

Ableitung digitaler Hangneigungen aus DTM-AV

Das Amt für Landwirtschaft des Kantons Schwyz beauftragte eine Ingenieur-Arbeitsgemeinschaft, die Hangneigungskategorien für die Berechnungen der landwirtschaftlichen Direktzahlungen digital zu ermitteln. Das digitale Terrainmodell (1) wurde durch die Dienststelle Vermessung des Kantons Schwyz als Textdatei (Lage und Höhe in Schweizer Landeskordinaten) bereitgestellt. Die Rohdaten weisen eine ausserordentlich hohe Dichte aus und wurden für die Zwecke des Auftraggebers selektiv ausgedünnt. Auf der Basis der ausgedünnten Datenreihe wurde eine Dreiecksvermaschung durchgeführt, das erhaltene DTM auf ein Raster abgebildet und für jede Rasterzelle die Hangneigung bestimmt. Die rechteckigen Rasterflächen wurden anhand der Neigungskategorien gemäss Datenmodell (2) zusammengefasst und sowohl als Geomedia-Objektklasse im Format Access sowie als Interlis-Transferfile ausgegeben. Anhand von Stichproben wurden die so ermittelten Hangneigungsklassen mit jenen der rechtsgültigen Hangneigungspläne (3) verglichen. Als Nebenprodukt liegen hiermit klassierte und ausgedünnte DTM-AV-Daten vor, welche eine gut handhabbare Grundlage für viele Anwendungen bieten.

Le service de l'agriculture du canton de Schwyz a mandaté une communauté de travail formée d'ingénieurs de déterminer de façon digitale les catégories de pentes de terrain destinées à calculer les paiements directs aux agriculteurs. Le modèle numérique de terrain (1) a été mis à disposition par la section des mensurations du canton de Schwyz (situation et altitude en coordonnées nationales suisses). Les données brutes présentent une très grande densité et ont subies un élagage sélectif pour les besoins du mandant. Sur la base de la série des données élaguées on a mis en place un réseau triangulaire et projeté le MNT ainsi obtenu sur un raster, puis déterminé la pente de terrain pour chaque cellule raster. Les surfaces raster rectangulaires ont été groupées selon les catégories de pentes conformément au modèle des données (2) et éditées aussi bien comme classe d'objet au format Access que comme transferfile Interlis. A l'aide de pointages les classes de pentes de terrain ainsi obtenues ont été comparées à celles des plans de pentes de terrain légaux (3). Comme «retombées» il s'agit de données MNT-MO classifiées et amincies qui constituent une base aisément utilisable pour beaucoup d'applications.

L'Ufficio dell'agricoltura del canton Svitto ha commissionato a un pool di ingegneri di fornire, sotto forma analogica, le categorie delle pendenze dei pendii per il calcolo dei pagamenti diretti nell'agricoltura. Il modello digitale del terreno (1) è stato allestito come file di testo (posizione e altezza delle coordinate nazionali svizzere) dall'Ufficio delle misurazioni del canton Svitto. I dati grezzi presentano una straordinaria densità e sono stati «annacquati» per soddisfare gli scopi del committente. Sulla base delle serie di dati «annacquati» si è realizzata un'interconnessione triangolare, il DTM ottenuto è stato raffigurato su un reticolo e per ogni cella del reticolo si è definita la pendenza. Le superfici quadrate del reticolo sono state raggruppate in base alle categorie di pendenza secondo il modello di dati (2) e sono state emesse sia come classe di oggetto geomedia nel formato Access che come file di trasferimento Interlis. In base alle prove campione si sono confrontate le classi di pendenza ottenute con quelle dei piani di pendenza validi (3). Come prodotto accessorio si dispone di dati MDT-MU classati e sfoltiti, che costituiscono una base utilizzabile in molte applicazioni.

C. Beffa, R. Lumpert

DTM-AV

Das Amt für Landwirtschaft des Kantons Schwyz (AFL) liess die Hangneigungskategorien digital ermitteln.

Entgegen der ursprünglichen Aufgabenstellung im Rahmen der Ausschreibung wurden die 80 vorgegebenen Kacheln auf der Basis vom DTM-AV Rohdaten statt dem DTM-AV Grid 2m (von Swisstopo nach einem festen 2 m Raster ausgedünnter Datensatz) erarbeitet. Die Wahl fiel aus folgenden Gründen auf die Rohdaten:

- Das DTM-AV Grid 2m dünnt die Grunddaten ohne Rücksicht auf Gradientenwechsel aus bzw. interpoliert dieses sogar unnötig in Zonen ohne Gradientenunterschied. Die Datenqualität wird dadurch verschlechtert, unnötige Daten werden eingefügt.
- Vor der Ausdünnung wurden mittels Filteralgorithmus bodennahe Nicht-Bodenpunkte eliminiert. Flächen ohne Höhenpunkte (Datenlücken) wurden markiert und als georeferenziertes Bitmap abgelegt; dies erlaubte Aussagen über die tatsächlich vorhandenen Datengrundlagen.
- Während für das AFL das 2m-Grid genügt, sind andere Verwaltungseinheiten und Ingenieurbüros für Anwendungen mit hohen Genauigkeitsanforderungen auf den ausgedünnten Grunddatensatz angewiesen.

Das DTM-AV bildet die Topografie der Erdoberfläche ohne Bewuchs und Bebauung ab. Die Daten wurden mittels luftgestütztem Laserscanning (Airborne Laser Scanning ALS) erhoben. Die Befliegung für den Kanton Schwyz erfolgte in den Jahren 2002 / 2003. Die Genauigkeit des Laser-Scanning ist relativ unabhängig von der Flughöhe und entspricht etwa der Photogrammetrie mit Weitwinkel-Aufnahmen (15 cm Kamera) im Bildmassstab 1:8000 (13). Für die Höhenangabe kann deshalb von einer mittleren Genauigkeit von ± 20 cm ausgegangen werden. Damit ist die Einhaltung der geforderten Genauigkeit (mittlerer Höhenfehler von

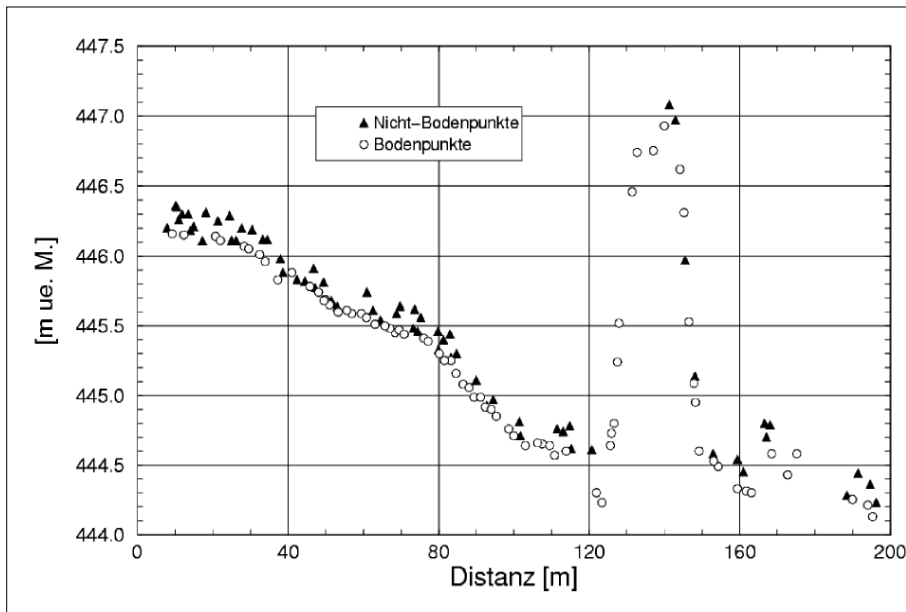


Abb. 1: Profildarstellung der klassierten Rohdaten (Profilbreite 1 m).

0.5 m gemäss (14) gewährleistet. Die Kacheln des DTM-AV haben eine Ausdehnung von 4375 m x 3000 m und entsprechen damit sowohl betreffend Grösse wie auch Lage einem Sechzehntel eines Blattchnitts der Landeskarte 1:25 000 bzw. einem Viertel eines Blattchnitts des Übersichtsplans 1:10 000.

Datenklassierung, Datenbereinigung

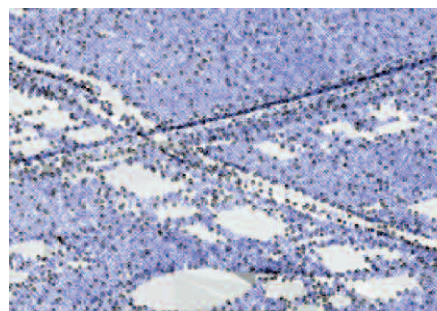
Die DTM-AV Rohdaten wurden gemäss Vorgaben der LT gegenüber den Direktmessungen um Bewuchs und Hochbauten bereinigt. Als Folge von niedrigem Bewuchs (Gras, kleine Sträucher) weisen die Rohdaten jedoch immer noch ein «Rauschen» auf. Vor einer Ausdünnung der Daten ist eine zusätzliche Bereinigung der Daten notwendig. Zur Klassifizierung der Daten in Boden- und Nicht-Bodenpunkte bieten sich morphologische Filter an (17). Basierend auf dem eingeführten Punkteraster werden die Einzelpunkte einer Abfolge von Erosion und Dilation unterzogen. Fallen mehrere Punkte in eine Rasterzelle, wird jeweils der Punkt mit der geringsten Höhe beibehalten. Die Fenstergrösse für die Filterung wird auf eine Zellenbreite beschränkt, um zu verhindern, dass Geländestrukturen fälschlicherweise als Nicht-Bodenpunkte klassiert werden. Je nach Geländetyp und Aufnahmedichte werden 40% bis 60%

der Rohdaten als Nicht-Bodenpunkte klassiert (Abb. 1). Für den folgenden Ausdünnungsschritt und die Fehlerbetrachtung werden nur noch die klassierten Bodenpunkte berücksichtigt.

Datenausdünnung

Die eigentliche Datenausdünnung erfolgt mittels eines Einfügealgorithmus («Greedy Insertion» [11]). Dabei wird jeweils derjenige Punkt eingefügt, welcher den grössten Abstand von der Fläche aufweist, welche durch die bereits eingefügten Punkte definiert wird. Die Fläche wird durch eine Dreiecksvermaschung (TIN) erzeugt, welche für jeden neu eingefügten Punkt aktualisiert werden muss. Durch eine Gewichtung des Punktabstandes mit der bisherigen Zellenfläche wird eine zu starke Ausdünnung ebener Flächen verhindert.

Die Einfügeprozedur wird beendet, wenn



der mittlere Fehler aller verbleibenden Punkte einen vorgegebenen Wert (hier: 10 cm) unterschreitet. Der reduzierte Datensatz umfasst noch – je nach Kachel – zwischen 2% bis 16% der Originalpunkte. Die Ausdünnungsrate ist in flachem Terrain besonders hoch. In hügeligem oder gebirgigem Terrain sind wesentlich mehr Höhenpunkte für eine exakte Abbildung der Topographie notwendig. Als Nebenprodukt liegen hiermit klassierte und ausgedünnte DTM-AV-Daten vor, welche bei vergleichbarer Genauigkeit eine deutlich besser handhabbare Grundlage für viele Anwendungen bieten als die Rohdaten.

Triangulation

Das Geländemodell wird durch eine Dreiecksvermaschung unter Einhaltung des Delaunay-Kriteriums erzeugt. In einer Delaunay-Triangulation erfüllen alle Dreiecke des Dreiecksnetzes die sogenannte Umkreisbedingung: Der Umkreis eines Dreiecks des Netzes darf keine weiteren Punkte der vorgegebenen Punktmenge enthalten. Dadurch weisen die Dreiecke des Netzes möglichst grosse Innenwinkel auf.

Um eine lückenlose Triangulation zu gewährleisten, wird bei diesem Arbeitsschritt die Beschränkung auf die Kachelfläche aufgehoben. Aus dem ausgedünnten Datensatz werden über den Kachelrand hinaus zusätzliche Punkte benachbarter Kacheln zugefügt, bis die Dreiecksvermaschung die Kachelfläche lückenlos abdeckt. Massgebend ist dabei der Schwerpunkt der Dreieckelemente: Liegen die Koordinaten des Schwer-

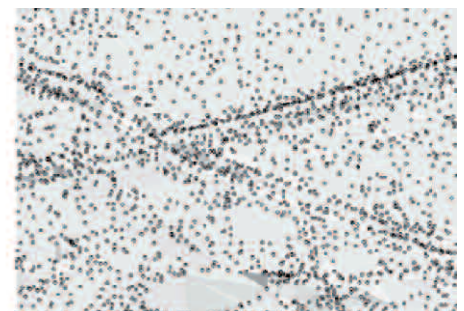


Abb. 2: Ansicht auf ausgedünntes Geländemodell mit Bodenpunkten vor und nach Ausdünnung.

punkts innerhalb der Kachelfläche, wird ein Element als zur jeweiligen Kachel zugehörig klassiert. Im anderen Fall wird ein Element der benachbarten Kachel zugefügt. Als Resultat entsteht eine lückenlose und nicht-überlappende Triangulation des gesamten Perimeters.

Elimination Kleinstflächen

Die Elimination von Kleinstflächen unter 0.5 Aren war ursprünglich nach folgendem Prinzip geplant:

- Sofern eine benachbarte oder umgebende Fläche eine um max. eine Stufe höhere (steilere) Hangneigungskategorie hat, wird die Kleinstfläche diesem Nachbarn zugeschlagen.
- Falls keine solche Fläche angrenzend oder umgebend vorliegt: Sofern eine benachbarte oder umgebende Fläche eine um max. eine Stufe tiefere (flachere) Hangneigungskategorie hat, wird die Kleinstfläche diesem Nachbarn zugeschlagen.

Dieses Vorgehen musste fallengelassen werden, weil damit noch immer Flächen bestanden, die kleiner als 0.5 Aren waren und die vor allem aufgrund ihrer Geometrie die Bedingung «OVERLAPS > 0.50» des Datenmodells nicht zu erfüllen vermochten. Letztere besagt sinngemäss, dass das Zentroid bzw. der Schwerpunkt einer Fläche nicht näher als 0.5 m von deren Grenze liegen darf. Bei schmalen Einzelflächen ohne Nachbarn entsprechen-

der Kategorie sowie bei komplexen Aggregationsflächen war diese Bedingung teilweise verletzt. Überdies lieferte die Dreiecksvermaschung nur mit Aggregation nach Neigungskategorien und ohne weitere Generalisierung ein überaus feingliedriges Bild von Neigungskategorie-Polygonen, welche vom gewohnten Bild der Neigungspläne in Sachen Detaillierung enorm abwich. Viele Dreieckselemente weisen trotz Einhaltung des Delaunay-Kriteriums sehr kleine Innenwinkel auf, was zu einem sehr unruhigen Verlauf der Klassengrenzen führt. Als optisch störend erweisen sich auch die verbleibenden Kleinstflächen, welche mit Flächen von wenigen Quadratmetern weit unter den geforderten Mindestgrössen liegen.

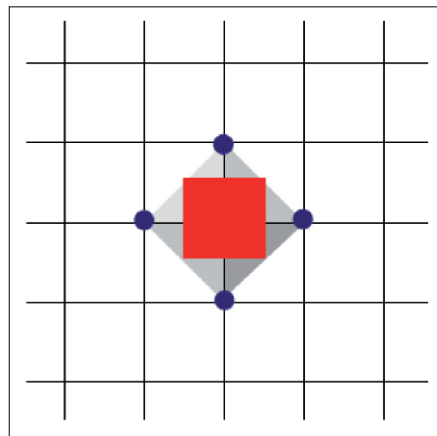


Abb. 3: Gitternetz mit Gitterpunkten (blau), zum Mittelpunkt gehörige Gitterzelle (rot) und aufgespannte Dreiecke (grau).

Vektoren, welche das Dreieck aufspannen, aus den Koordinaten der Eckpunkte	$a = \begin{pmatrix} x_2 - x_1 \\ y_2 - y_1 \\ z_2 - z_1 \end{pmatrix} \quad b = \begin{pmatrix} x_3 - x_1 \\ y_3 - y_1 \\ z_3 - z_1 \end{pmatrix}$
Normalenvektor der Dreiecksfläche aus dem Vektorprodukt	$s = a \times b = \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{pmatrix}$
Vertikaler Einheitsvektor	$n = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$
Winkel (Kosinus) zwischen dem Normalenvektor und dem Einheitsvektor aus dem Skalarprodukt der beiden Vektoren	$\cos\varphi = \frac{s \cdot n}{ s }$

Tab. 1: Vektorbezeichnungen und Operationen.

Interpolation und Rasterung

Zur optischen Glättung wird das DTM deshalb auf ein Raster von 7.5 x 7.0 m interpoliert, wobei eine lineare Interpolation im Einzelement verwendet wird. Als Resultat erhält man ein Gitter mit 625 x 400 = 250 000 Knotenpunkten. Die geforderte Mindestgrösse von 50 m² wird von jeder Teilfläche eingehalten.

Bestimmung Hangneigung

Zur Ermittlung der Hangneigung werden um jeden Gitterpunkt mit Hilfe der benachbarten Punkte vier Dreiecke aufgespannt (Abb. 3). Die Neigung eines Dreiecks erhält man mittels etwas Vektorgeometrie und trigonometrischen Operationen (z. B. [18]). Die Neigung des Dreiecks entspricht dem Tangens des Winkels φ . Eine erwartungstreue Schätzung für den Neigungswert der Gitterzelle erhält man aus dem arithmetischen Mittel der angrenzenden Dreiecke.

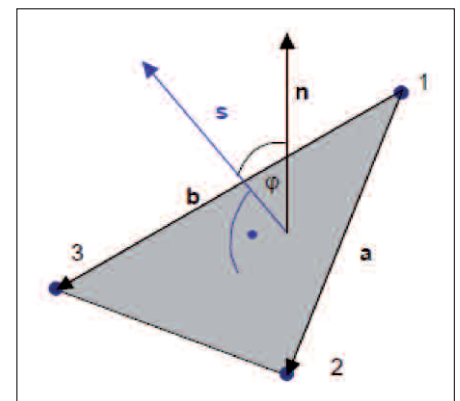


Abb. 4: Definitionen der Vektoren zur Ermittlung des Neigungswinkels der Dreiecksfläche.

Attribut	Bezeichnung	Bedingung
0	< 18%	$\tan\varphi < 0,175$
1	18%–29%	$0,175 \leq \tan\varphi < 0,295$
2	30%–35%	$0,295 \leq \tan\varphi < 0,355$
3	36%–50%	$0,355 \leq \tan\varphi < 0,505$
4	> 50%	$\tan\varphi \geq 0,505$

Tab. 2: Bildung Hangneigungskategorien.

Kategorie «IST»	Hangneigung in Prozent
0	unter 18
1	von 18 bis 29
2	von 30 bis 35
3	von 36 bis 50
4	über 50
5	nicht relevant da ausserhalb LW-Gebiet oder ausserhalb Projektperimeter

Tab. 3: Hangneigungskategorien «IST».

Klassierung nach Hangneigung

Als Resultate liegen für jede Gitterzelle die rechnerisch ermittelte Hangneigung $\tan\phi$ als Realzahl vor. Basierend auf dieser Realzahl wird die Hangneigungskategorie gemäss Vorschrift in Tabelle 2 zugeordnet. Kann ausserhalb des DTM-Perimeters oder im Bereich der Kachelränder einem Gitterpunkt kein Attribut zugeordnet werden, so wird der Mittelwert aus den benachbarten Gitterpunkten verwendet. Sind auch alle Nachbarwerte ohne Attribut, so wird der Gitterzelle das Attribut 0 zugeordnet. Dies trifft ausschliesslich für Seeflächen zu, wo in den Rohdaten keine Höhenpunkte vorhanden sind^d.

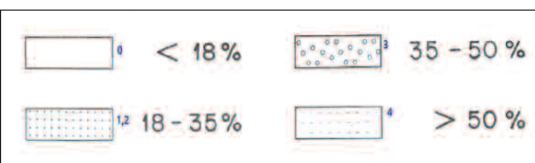


Abb. 5: Hangneigungskategorien «SOLL».

Überprüfung

Die Überprüfung erfolgte anhand der eingescannten rechtsgültigen Hangneigungspläne (3). Über das gesamte Gebiet wurde ein digitales Punktraster gelegt, welches im Schnitt je DTM-AV-Kachel 10 Punkte enthielt (Grundraster 1117.021 m x 1100 m). Diese Stichprobenpunkte wurden als Geomedia-Punktobjekte mit Attributen ausgebildet.

Aufgrund eines Verschnitts der Stichprobenpunkte mit den aus den vorgängigen

Arbeitsschritten hervorgehenden digitalen Hangneigungskategorie-Polygonen wurde jeder Stichprobe eine neu digital ermittelte Hangneigungskategorie «IST» zugeordnet. Jeder Stichprobe wurde weiter aufgrund visuellen Vergleichs am Bildschirm mit der sich dort befindlichen «alten» rechtsgültigen eingescannten Neigungskategorie, die die alte Hangneigungskategorie «Soll» als Attribut eingetragen.

Wo Stichprobenpunkte weitab von Landwirtschaftsgebieten lagen, wurden sie nicht attribuiert. Stichproben in der Nähe vom Landwirtschaftsgebiet wurden manuell darin hinein verschoben und attribuiert. Die neuen digital ermittelten Kategorien «IST» sind gemäss Tabelle 3 eingetragen worden.

Die Hangneigungskategorien «Soll» wurden gemäss der folgenden Abbildung vorgenommen, wobei bei Kategorie 1 oder 2 jeweils jener Wert gewählt wurde, welcher der Kategorie «IST» am jeweiligen Stichprobenpunkt näherkam. Damit liegt nun eine Punktdatenbank der Stichproben vor, welche mittels GIS beliebig ausgewertet und dargestellt werden kann. Die Abbildung 6 zeigt eine Übersicht der Übereinstimmungen.

Von den total 443 beurteilten Punkten zeigen 361 bzw. rund 81% eine Übereinstimmung in der Hangneigungskategorie. Der Übereinstimmungsgrad in Ab-

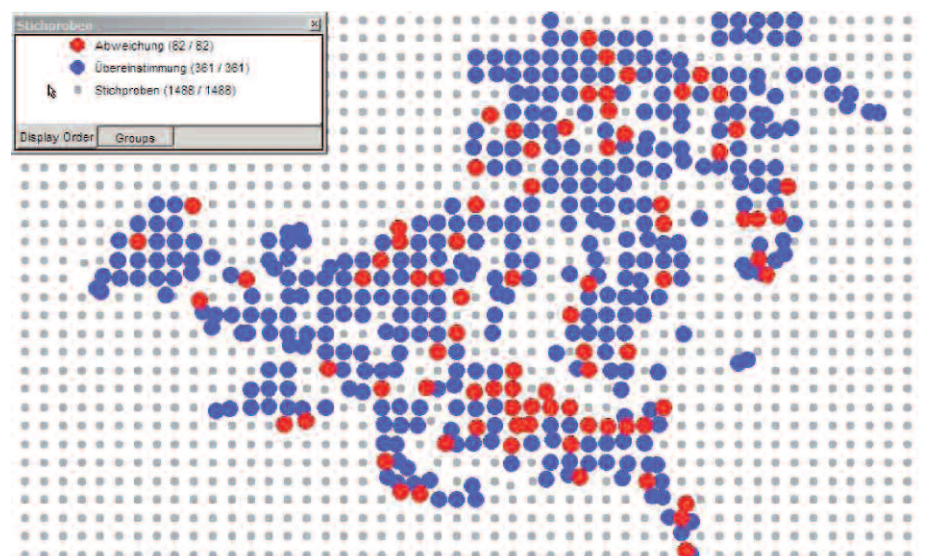


Abb. 6: Vergleich «SOLL»-«IST».

Abweichung der Kategorien Soll-Ist	Anzahl Punkte von total 443	Prozentualer Anteil
0	361	81.5%
1	69	15.6%
2	10	2.3%
3	2	0.5%
4	1	0.2%

Tab. 4: Auswertung Vergleich «SOLL»-«IST».

hängigkeit von der Abweichungsdifferenz ist in Tabelle 4 dargestellt.

Datenabgabe

Die Daten wurden kachelweise sowohl als Interlis-Objektklassen im Format Geomedia-GeosPro-Access wie auch als Interlis-Transferdateien abgeliefert. Die Interlis-transfers verliefen für jede Kachel fehlerfrei. Die ausgedünnten Rohdaten wurden ebenfalls kachelweise im Textformat abgegeben.

Literatur:

Garland M., Heckbert P. S. 1995. Fast Polygonal Approximation of Terrains and Height Fields. School of Computer Science, Carnegie Mellon University, Pittsburgh.

Heckbert P. S., Garland M. 1997. Survey of Polygonal Surface Simplification Algorithms.

Systemes d'information du territoire

Multiresolution Surface Modeling Course SIG-GRAPH '97. School of Computer Science, Carnegie Mellon University, Pittsburgh.

Kraus K. 2000. Hochgenaue Geländemodelle für hydrologische Problemstellungen. In: Modellierung von Höhendaten für hydrologische Fragestellungen. Kolloquium am 10. Mai 2000 in Koblenz. Bundesanstalt für Gewässerkunde.

LT (Bundesamt für Landestopografie) 2000. Projekt LWN RE2: Westschweiz, Ausschreibungsunterlagen (Pflichtenheft).

Maurer Th. 2000. Automatisierte Erstellung von Finite-Elemente-Netzen für die zweidimensionale Strömungssimulation durch problemangepasste Ausdünnung von Rasterdaten. In: Modellierung von Höhendaten für hydrologische Fragestellungen. Kolloquium am 10. Mai 2000 in Koblenz. Bundesanstalt für Gewässerkunde.

VUT (Vienna University of Technology) 2002. Filtering and Classification of Laser Scanning Data. OEEPE Distance Learning Course. Inst. Of Photogrammetry & Remote Sensing.

Zhang K., Chen S.-C., Whitman D., Shyu M.-L., Yan J., Zhang C. 2003. A progressive morphological Filter for Removing Nonground Measurements from Airborne LIDAR Data. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. Vol. 41, No. 4.

DMK/DPK Formeln und Tafeln. Orell Füssli 1977.

Digitale Daten:

Swisstopo (Bundesamt für Landestopografie, Wabern): Digitales Terrainmodell der Amtlichen Vermessung DTM – AV ROH.

Kanton Schwyz: Modell Landwirtschaftliche Nutzungsarten Kanton Schwyz (nflae_sz_v08d.ili) im Format Interlis 1 vom 12.03.09.

Kanton Schwyz: Scan der rechtsgültigen landwirtschaftlichen Hangneigungspläne Stand 2009.

Verwendete Software:

Datenausdünnung und Dreiecksvermaschung: SIMP von beffa tognacca GmbH (www.fluvial.ch/p/simp.html).

TRIANGLE: Delaunay-Triangulator (Autor: J. Shewchuk).

TRIPACK: Bibliothek mit Routinen zur Delaunay-Triangulation (Autor: R. J. Renka).

Shapelib: Bibliothek zum Schreiben/Lesen von Geodaten in ESRI-Shapeformat (Autor F. Warmerdam).

GIS: Geomedia Professional 6.1.5 (Intergraph).

Datenbanken: SQL Server Express 2008 und Access 2002 (Microsoft).

Interlis-Transfer: Geos Pro (amt).

Cornel Beffa

beffa tognacca gmbh

Laubstrasse 9, Postfach 28

CH-6431 Schwyz

cbeffa@fluvial.ch

Robert Lumpert

bpp Ingenieure AG

Riedstrasse 7

CH-6430 Schwyz

Robert.Lumpert@bpp-ing.ch