

---

# **Geostatistik unter Wasser: subaquatische Geländemodelle mittels Echolot und dGPS**

Erich DUMFARTH

## **Zusammenfassung**

Die Erstellung von Geländemodellen ist grundsätzlich nichts Neues. Für den „Normalfall“ terrestrischer Modelle steht für Datenaufnahme und Berechnung der Modelle eine Vielzahl von Methoden zur Verfügung. Ganz anders, zumindest unvertrauter, stellt sich das Problem in Hinblick auf subaquatische Geländemodelle. Sowohl die Instrumente der Datenaufnahme als auch die Daten selbst erzwingen methodische Anpassungen, die beträchtlich von den gewohnten Wegen zur Erstellung solcher Beschreibungen der Erdoberfläche abweichen.

## **1 Einleitung**

Modelle der Erdoberfläche sind nicht nur an Land, sondern auch unter Wasser für verschiedenste Fachbereiche von grosser Bedeutung. Während die Vermessung der Landoberfläche durch eine methodische Vielfalt routinemäßig erfolgt, entzieht sich der Grund von Gewässern nicht nur unserem Auge: auch methodisch steht nur eine begrenzte Anzahl von Möglichkeiten zur Verfügung. Normalerweise erfolgt die Vermessung von Oberflächen unter Wasser mittels Echolot. Durch dGPS zur Positionsbestimmung hat sich Qualität und Geschwindigkeit der Vermessung unter Wasser bedeutend verbessert. Grundsätzlich erfolgt die Akquisition von Geländedaten bei solchen Kampagnen entlang von Messprofilen, die Meßpunkte sind linienhaft entlang dieser Profile aneinander gereiht. Standardmethoden zur Berechnung von Geländemodellen liefern nur unzureichende Interpretationen solcher Daten. Durch Richtung und Verlauf der Profile ist bei den Modellen mit drastischen artifiziellen Erscheinungen zu rechnen. Aus diesem Grund sind in solchen Fällen die wesentlich differenzierter arbeitenden Techniken der geostatistischen Interpolation den üblichen Methoden zur Erstellung digitaler Geländemodelle vorzuziehen.

## **2 Funktionsweise von Echolot- und dGPS-Vermessung**

Die Vermessung des unter Wasser befindlichen Geländes fusst methodisch auf zwei Komponenten: der Bestimmung der Position mittels dGPS sowie der Bestimmung der Gewässertiefe bzw. der Seehöhe des Grundes mittels Echolot.

### **2.1 Bestimmung der Position mittels dGPS – das System ALF**

dGPS-Systeme erhöhen die Genauigkeit der Positionsbestimmung indem zusätzlich zu den Satellitensignalen noch Korrekturdaten einbezogen werden. Die Korrekturdaten gleichen

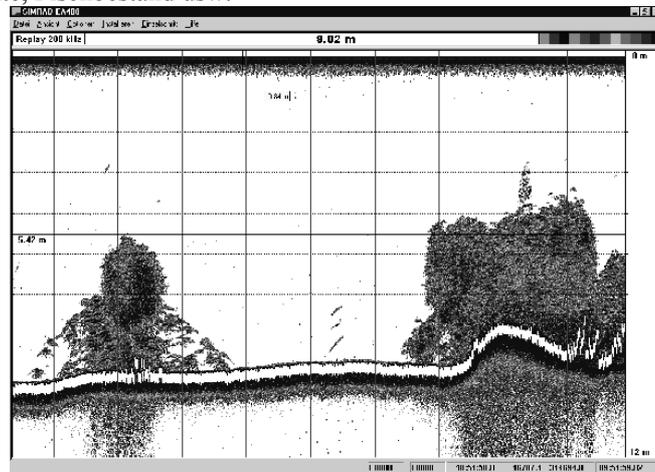
Abweichungen aus, die durch Ephemeridenfehler oder die Wirkung der Atmosphäre auf die Satellitensignale entstehen. Die Gewinnung der Korrekturdaten erfolgt an einem Referenzpunkt. Für Echtzeit-Anwendungen werden sie per Funk oder als Radiosignal von einer Referenzstation ausgestrahlt und stehen im Gelände dem GPS-Gerät zur Verfügung. Die erzielbare Genauigkeit, definiert als Abweichung von einem geodätisch vermessenen Punkt, liegt auch bei preisgünstigen Systemen bei unter 1m. Das für hydrographische Vermessung optimierte Trimble DSM12 (mit Evererst Multipath Modul) erbrachte in Salzburg bei Verwendung der ALF-Korrekturdaten Abweichungen von weniger als 40cm (1 Standardabweichung) bzw. weniger 60cm (2 Standardabweichungen) und weniger 1m (3 Standardabweichungen). ALF (Accurate Positioning by Low Frequency) ist ein Dienst zur Aussendung von Korrekturdaten über Langwelle 123.7 kHz, der seit 1996 vom deutschen BA für Kartographie und Geodäsie und der Deutschen Telekom betrieben wird.

## 2.2 Bestimmung der Gewässertiefe mittels Echolot

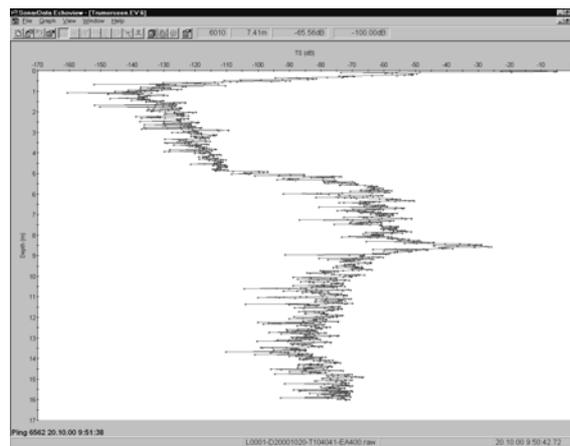
Jedes Echolot besteht aus Sender und Empfänger. Der Sender erzeugt im Wasser eine Folge von Geräuschimpulsen (Pings). Diese laufen durch das Wasser bis sie auf einen Gegenstand, etwa einen Fisch oder den Gewässergrund, treffen. Von dem Gegenstand werden die Pings reflektiert und vom Empfänger als Echo des ausgestrahlten Signals registriert. Aus der Laufzeit berechnet sich die Tiefe bis zu jenem Objekt, das den Impuls zum Lot zurückwarf. Die Empfindlichkeit des Empfängers umfasst einen dynamischen Bereich von 160dB – zum Vergleich: 0 dB markiert die menschliche Hörgrenze, 140 dB entsprechen einem Düsenjet. Bildhaft ausgedrückt produzieren Echolote unter Wasser einen unglaublichen „Lärm“, der allerdings weder von Mensch noch Tier wahrgenommen werden kann. Menschliche Hörfähigkeit endet bei etwa 20.000 Hertz, während die Betriebsfrequenzen von Echoloten in der Norm bei 38 kHz beginnen, 200 kHz (200.000 Schwingungen/Sekunde), für Vermessungslote typisch sind. Auf Grund der größeren Dichte durchläuft der Schall Wasser 5mal schneller als die Luft (im Süßwasser rd. 1450m/Sekunde). Bei dieser Geschwindigkeit hat ein mit 200 kHz arbeitendes Lot eine Wellenlänge von 0.00725m. Damit ist zugleich auch das Maß für die erzielbare Genauigkeit von Tiefenmessungen gesetzt, die bei normalen Verhältnissen 1cm beträgt. Moderne Lote strahlen pro Sekunde ohne weiters 10 und mehr Pings (Messimpulse) pro Sekunde aus.

Bis vor wenigen Jahren arbeiteten alle Lote analog: nicht unähnlich einem Sitfplotter zeichneten sie auf Papier, was die Signale zu messen imstande waren. Mittlerweile gibt es Geräte, die die Lotung digital aufzeichnen. Dabei wird pro Ping das gesamte Signal vom Boden bis zur Wasseroberfläche in kleine Scheiben zerlegt und gespeichert. Dadurch wird die gesamte Vermessungsfahrt aufgezeichnet. Vergleichbar einem Film läuft das Echogramm als digitale Aufzeichnung auf dem PC ab und kann jederzeit und beliebig oft abgespielt werden. Aufgezeichnet wird alles, was ein Echo des Signals erzeugt, der Boden, aber auch Fische, Pflanzen, selbst Luftblasen und Staubkörnchen im Wasser. Ausgefeilte Algorithmen suchen in den Echos nach der für Boden typische „Signatur“. Das ermöglicht auch in schwierigen Situationen (z.B. starker Bewuchs mit subaquatischer Vegetation) eine korrekte Erkennung des Bodenechos. Durch die Aufzeichnung des gesamten Signalspektrums ist es möglich mittels verschiedener Filter und Selektionskriterien das

Echogramm zusätzlich auszuwerten, etwa in Hinblick auf submerse Vegetation, Bodensedimente, Fischbestand usw.



**Abb. 1:** Szenenbild eines digitalen Echogramms. Deutlich erkennbar der starke Bodenbewuchs, flankiert von Fischen. Trotz Irritation durch den Bewuchs wird der Seeboden von der Software korrekt erkannt (siehe Abb. 2).



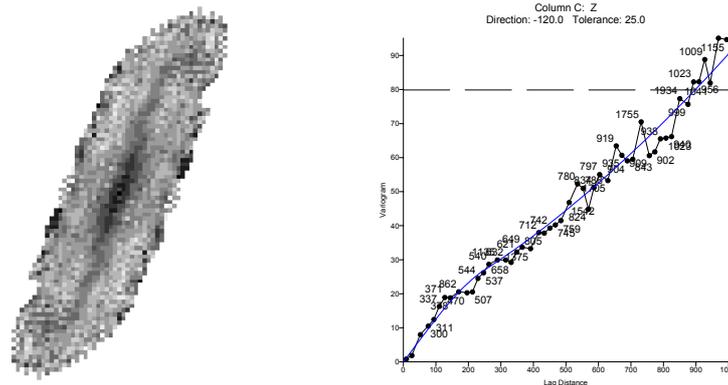
**Abb. 2:** Graph eines Ping. Der massive Ausschlag nach rechts (bis ca.  $-25$  dB) in einer Tiefe von 8 Meter bezeichnet den Boden. Darüber befindliche Ausschläge (bis ca.  $-50$  dB) werden durch die submerse Vegetation (siehe Abb.1) verursacht.

Eine mit Echolot und dGPS kommunizierende hydrographische Vermessungssoftware bündelt den Datenstrom aus beiden Gerätequellen und weist den Positionen den entsprechenden Tiefenwert des Gewässers bzw. die örtliche Seehöhe des

Gewässergrundes zu. Somit stehen für die weitere Verarbeitung, der geostatistischen Interpolation, sämtliche relevanten Informationen zur Verfügung.

### **3 Geostatistische Interpolation der Echolot- und dGPS-Daten**

Tom Poiker, „Vater“ des TIN, zitiert in Hinblick auf die Erstellung von DGM's gerne den Ausspruch „don't digitize lines“. Methodisch erzwungen erfolgt aber bei Echolotvermessungen die Aufnahme der Daten entlang von Profilen, also Linien. Für bestimmte hydrographische Fragestellungen werden daraus stark vereinfachte „kastenartig“ erscheinende Modelle konstruiert. Solche Modelle legen das Augenmerk weniger auf Detailtreue, sondern auf daraus abgeleitete Folgeprodukte, meist in Form von Zahlen (Wasservolumen, Durchflussmenge etc.). Fordert die Fragestellung vom Modell eine möglichst genaue Berücksichtigung örtlicher Details, ist die geschilderte Art der Datenaufnahme ungünstig für das gewünschte Ergebnis. Dies bezieht sich auf den Umstand, daß entlang der Linien eine beständige „Überbestimmung“ hinsichtlich des Attributs (Seehöhe) besteht, während zwischen den Linien praktisch keine oder nur wenige Daten vorliegen. Im Besonderen ist zu befürchten, daß Richtung und Verlauf der Linien das Ergebnis drastisch beeinflussen und massiv artifizielle Erscheinungen hervorbringen, die keine Deckung mit den tatsächlichen Gegebenheiten aufweisen. Zwar ist dies angesichts der Besonderheiten des Datenmaterials bei keiner Methode gänzlich auszuschließen, durch spezialisiertere Verfahren müßte sich aber doch im Vergleich zu herkömmlichen Methoden ein wesentlich verbessertes Ergebnis erzielen lassen. Aus diesem Grund empfiehlt sich für die Erstellung von örtlich differenzierenden subaquatischer Geländemodelle fortgeschrittene geostatistische Methoden, im besonderen aus der Familie der Kriging-Verfahren. Jede räumliche Interpolation beruht auf einer begrenzten Anzahl von Daten. Die an bekannten Positionen vorgenommenen Messungen dienen der flächendeckende Schätzung von Werten. Mit Hilfe der Messwerte wird eine Oberfläche aufgespannt, ähnlich einem Zelt, dessen Plane ebenfalls mittels einiger weniger Stützpunkte in Form gehalten wird. Kriging basiert auf einen spezifischen Set an Werkzeugen, die der expliziten Erkundung „räumlicher“ Attribute (Distanz, Richtung) dienen. Die Ergebnisse der Erkundung, der sogenannten „Explorativen Variographie“, steuern die Interpolation.



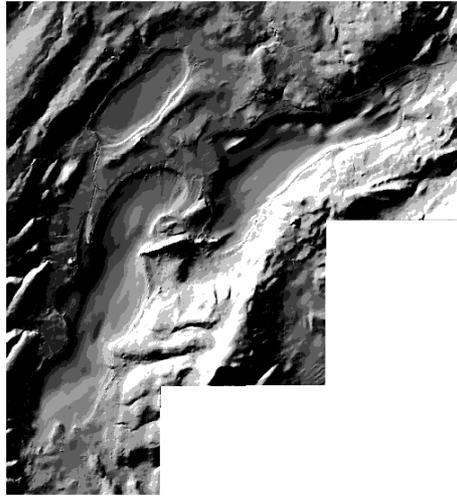
**Abb. 3:** Explorative Variographie als Werkzeug fortgeschrittener räumlicher Interpolation. Rechts die Variogrammoberfläche des Obertrumersees (Salzburg). Links das dazugehörige Semivariogramm.

Die Abb.3 zeigt zwei Beispiele für Explorative Variographie. Die Variogrammoberfläche im linken Bild beschreibt graphisch Richtung und Ausmaß räumlicher Kontinuität. Je dunkler die Farbtöne, desto stärker der Zusammenhang zwischen den Werten. Deutlich erkennbar ist die Bevorzugung einer NNE-SSW-Richtung. Ein solches Phänomen wird als Anisotropie bezeichnet. Die rechte Abbildung enthält ein Semivariogramm. Die zwischen den Punkten verlaufende Kurve beschreibt summarisch die Beziehung der Datenpunkte in Abhängigkeit von Distanz und Richtung. Diese summarische Beschreibung liegt der Berechnung der Schätzwerte im Krigingverfahren zugrunde. Durch die Einbettung in die Topographie weisen Flüsse und Seen üblicherweise eine deutliche Anisotropie auf. Dieser Tatsache ist bereits in der Phase der Datenaufnahme Rechnung zu tragen: durch geschickte Anlage der Meßprofile (orthogonal zur Anisotropie) kann der nachteilige Effekt von nur linienhaft vorliegender Information von Beginn an abgeschwächt werden.

Die durch die Variogramm-Analyse ermittelten Parameter dienen der optimalen Gewichtung, mit denen die bekannten Datenwerte in die Schätzung der unbekannt Punkte einfließen. Da das Semivariogramm eine distanzabhängige Funktion darstellt, ändern sich auch die Gewichte je nach räumlicher Anordnung (Nähe beziehungsweise Distanz) der bekannten Datenwerte. Die Funktionen, durch die ein Semivariogramm summarisch beschrieben wird, sind dabei als „Schätzfunktionen“ zu verstehen. Gemeinsam mit den anderen Parametern steuern sie den Einfluß, den die verschiedenen benachbarten und bekannten Datenwerte auf den zu schätzenden Punkt haben.

P. Ingram (1995, o.S.) definiert Kriging als „a weighted moving average technique“. Somit ist Kriging im Unterschied zu zahlreichen anderen Methoden eine statistische Technik, die ein Untersuchungsgebiet nicht durch 3D-Kurven, sondern durch die Berechnung eines Schätzwertes zu beschreiben versucht. Ein durch Kriging gewonnener Schätzwert eines bestimmten Punktes innerhalb des Untersuchungsgebiets wird durch eine gewichtete Kombination der bekannten Datenwerte rund um den Punkt, der geschätzt werden soll, gewonnen.

Dabei ist noch für jeden einzelnen zu schätzenden Punkt festzulegen, welche bekannten Werte als "benachbart" anzusehen sind. Definition und Auswahl benachbarter Punkte bzw. Werte erfolgt üblicherweise durch einen Suchradius: alle bekannten Wertausprägungen innerhalb des Radius werden als benachbart angesehen und für die Schätzung eines bestimmten Punktes herangezogen. In Abstimmung auf die Daten kann der Suchradius in verschiedener Weise modifiziert werden. Auf Grund der linearen Anordnung der Datenpunkte entlang von Profilen empfiehlt sich, den Suchradius zu einer schmalen Suchellipse "zuzuspitzen". Die Längsachse dieser Suchellipse fällt konsequenterweise mit der Achse der Anisotropie zusammen. Darüber hinaus kann die Suchellipse in mehrere Sektoren unterteilt werden. In jeden Sektor wird für die Interpolation nur eine begrenzte Anzahl von Datenpunkten aufgenommen. Mit diesen Maßnahmen wird gleichfalls der Einfluß der linearen Anordnung der Datenpunkte auf den Wert eines zu schätzenden Punktes gemindert. Dadurch fließen bevorzugt Datenpunkte in die Schätzung ein, die zwar in größerer Entfernung - auf anderen Profilen - liegen, aber einen höheren Erklärungsgehalt für einen bestimmten zu schätzenden Punkt aufweisen. Umgekehrt wird der Einfluß von in hohem Maße redundanter Information entlang der Profile auf das Ergebnis der Schätzung verringert. Stets ist aber auf ein Gleichgewicht zwischen den numerisch ermittelten Parametern, den Besonderheiten des zur Verfügung stehenden Datenmaterials (Profile, Uferlinien etc.) und - last but not least – auf ästhetische Kriterien bzw. die Vertrautheit mit dem untersuchten Phänomen zu achten: Überbetonungen bei Anisotropie und Suchstrategie können zwar in manchen Bereichen ausgezeichnete Ergebnisse produzieren, in anderen Bereichen des Untersuchungsgebiets aber ihrerseits massive und ästhetisch unbefriedigende artifizielle Erscheinungen bewirken. Daher wird räumliche Interpolation, trotz aller quantitativer Elemente, die die Auswahl geeigneter Verfahren und Parameter erleichtern und steuern, gerade bei anspruchsvollen Verfahren auch als Kunst bezeichnet, die viel Geduld und Erfahrung erfordert.



**Abb. 5:** Aus Echolot, dGPS und mittels Geostatistik interpoliertes Geländemodell im Bereich Trumerseen (Obertrumersee, Mattsee, Grabensee).

## 1 Literaturverzeichnis

- Dumfarth, E. (2000): *Erarbeitung digitaler Geländemodelle für die Trumerseen*. – Gutachten im Auftrag der Salzburger Landesregierung.
- Ingram, P. (1995): *SSTAT, Version 3.01 (spatial and map analysis)*  
<http://atlas.es.mq.edu.au/users/pingram/sware.htm>
- Isaaks, E.H. u. Srivastava, R.M. (1989): *Applied Geostatistics*. – Oxford Univ. Press, Oxford.