

Qualitätsgesicherte Erfassung und Auswertung von Daten der Gewässersohle

Vortrag von Harry Wirth

Qualitätsgesicherte Erfassung und Auswertung von Daten der Gewässersohle

Vortrag von Harry Wirth

Dipl.-Ing., Vermessungsberrater, Ansprechpartner für Gewässervermessung,
Bundesanstalt für Gewässerkunde, e-mail: wirth@bafg.de

Inhalt:

1	Einleitung	3
2	Qualitätsgesicherter Produktionsprozeß	3
2.1	Flächenhafte Plausibilisierung von Koordinatentripeln	5
2.2	Datenreduktion und Modellbildung	6
3	Vergleich der Modellierungsverfahren	9
4	Zusammenfassung	11

1 Einleitung

Die Gewässervermessung liefert einen nicht unerheblichen Anteil der Basisdaten für die hydrologische Modellierung. In der Vergangenheit bildeten -bedingt durch die verfügbare Messtechnik- einzelne Quer- oder Längsprofile die Grundlage für die Berechnung eines Geländemodells für den Gewässerboden. Nachdem die Fächerlottechnik auch im Binnenbereich bei relativ geringen Wassertiefen einsetzbar erscheint, bzw. schon eingesetzt wird, stellt sich in zunehmendem Maße die Frage nach der Datenqualität und den geeigneten Methoden, mit denen diese Massendaten ausgewertet werden können. Das Endergebnis stellt häufig ein Digitales Höhenmodell (DHM) dar, welches entweder direkt in das hydrologische Modell eingeht, oder aus dem zuvor rechnerisch Profile extrahiert werden. In diesem Beitrag soll der Stand der Technik an Beispielen verdeutlicht, sowie ein messgerätespezifischer Ansatz zur Modellierung der Höhendaten von Fächerloten vorgestellt werden.

2 Qualitätsgesicherter Produktionsprozeß

Für hydrologische Fragestellungen werden Daten benötigt, die frei von groben Fehlern sind und die eine dem jeweiligen Modellierungszweck entsprechende Genauigkeit und Zuverlässigkeit haben. Darüber hinaus ist in jüngster Zeit aufgrund der Entwicklung des Navigationssystems ARGO im Binnenbereich der Qualitätsanspruch stark angestiegen, weil für die Berufsschifffahrt bezogen auf die aktuelle Wasserpiegellage Tiefendaten für die Navigation bereitgestellt werden sollen.

Die erste, im Entwurf vorliegende elektronische Karte ist ein Beispiel für die unentdeckten Risiken einer bisher möglicherweise nicht oder unzureichend qualitätsgesicherten Produktion. Aus den mit einem Mehrfachschwingersystem mit Vertikalechloten gemessenen Tiefendaten wurde ein digitales Höhenmodell berechnet und anschließend daraus Höhenlinien abgeleitet. Wie in der folgenden Abbildung 2.1 dargestellt, ergeben sich stellenweise Höhenlinien, deren Verlauf beim Betrachter begründete Zweifel an der Richtigkeit aufkommen läßt.

Die Ursache für den gezackten Verlauf der Tiefenlinien kann beispielsweise eine fehlerhafte Messung oder eine fehlerhafte Auswertung sein, oder was noch schlimmer ist, es zeigt womöglich die Realität. Je nach Ursache wären verschiedene Maßnahmen denkbar, bzw. Reaktionen erforderlich. Entspräche die Darstellung der Realität, so müßte unter Umständen eine Baumaßnahme durchgeführt werden, weil in dieser Situation für den Schiffer kein nutzbarer navigierbarer Bereich verbleibt. Um den gesamten Produktionsprozeß gesichert und nachvollziehbar zu beherrschen soll durch Anwendung der ISO 9000 die Produktionsprozesse standardisiert werden.

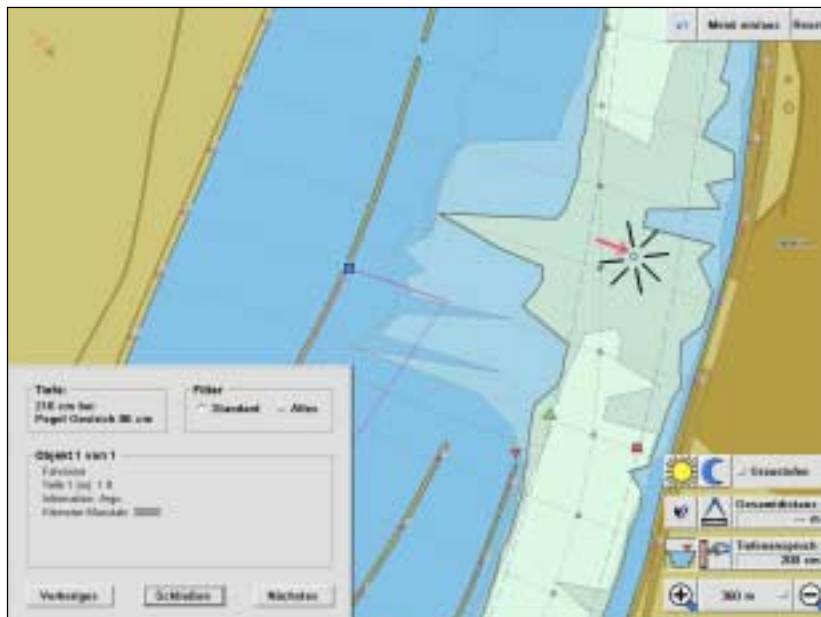
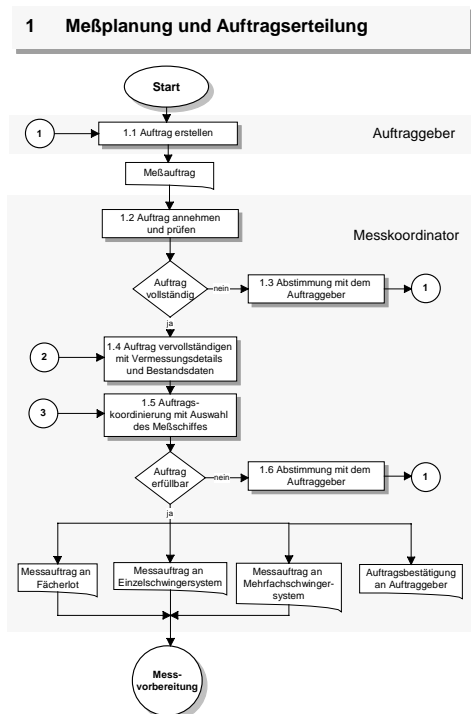


Abbildung 2.1: Entwurf Electronic Nautical Chart (ENC) am Rhein (Bsp. der Fa. SevenCs GmbH)



Einzelprozesse der Produktion:

- 0 Inbetriebnahme (Einmessung der Sensoren)
- 1 Auftragsdefinition mit Qualitätsangabe (Aktualität, Genauigkeit, Verfahren)
- 2 Messvorbereitung (Kalibrierung, Überprüfung der Qualität)
- 3 Messung (Messverfahren, Dokumentation)
- 4 Auswertung Teil 1 : geprüfte Koordinatentripel
- 5 Auswertung Teil 2 : Datenreduktion und Modellbildung
- 6 Kartographische Weiterverarbeitung, Vertrieb, Hydrologische Modellierung

Abbildung 2.2: Beispiel Prozeßablaufplanung und einzelne Produktionsschritte

Alle Einzelschritte des Produktionsprozesses müssen detailliert definiert werden, so dass das gesamte Produktionsverfahren transparent ist. Außerdem müssen bei sogenannten Audits und Prüfungen Risiken aufgedeckt und das Produktionsverfahren kontinuierlich beseitigt werden. Diese Vorgehensweise bietet sich nicht nur für sicherheitsrelevante Anwendungen an, sondern hat auch für gewässerkundliche Aufnahmen seine Berechtigung und Nutzen. Vor dem Hintergrund der knappen Ressourcen sollen die Vermessungen verstärkt für Mehrfachnutzung ausgelegt werden, so daß der Gewässerkundler in Gebieten, wo das Navigationssystem ARGO zum Tragen kommt, in Zukunft davon ausgehen kann, dass eine nachweisbare und vergleichsweise hohe Datenqualität und Zuverlässigkeit zur Verfügung stehen wird.

In den folgenden beiden Kapiteln werden Details der Auswertung beschrieben. Der wesentliche Bestandteil der Auswertung Teil 1 (siehe Abbildung 2.2) ist die Prüfung der berechneten Koordinatentripel aller Messungen auf Plausibilität. Im Auswerteschritt 2 wird die Fülle der Messdaten reduziert und gleichzeitig ein Geländemodell berechnet.

2.1 Flächenhafte Plausibilisierung von Koordinatentripeln

Die Fächerlote liefern Rohdaten in Form von Signallaufzeiten, Roll/Stampfwinkel des Fahrzeugs, Daten des Hubsensors, der Ortung, des Kompasses und der Schallgeschwindigkeitsprofile. Alle diese Daten müssen auf Konsistenz und Richtigkeit geprüft und zu Koordinatentripeln zusammengeführt werden. Für die Plausibilisierung wurden verschiedene Methoden entwickelt, die sich sehr in Effizienz (manuelle gegen rechnergestützte Auswertung) und Güte unterscheiden.

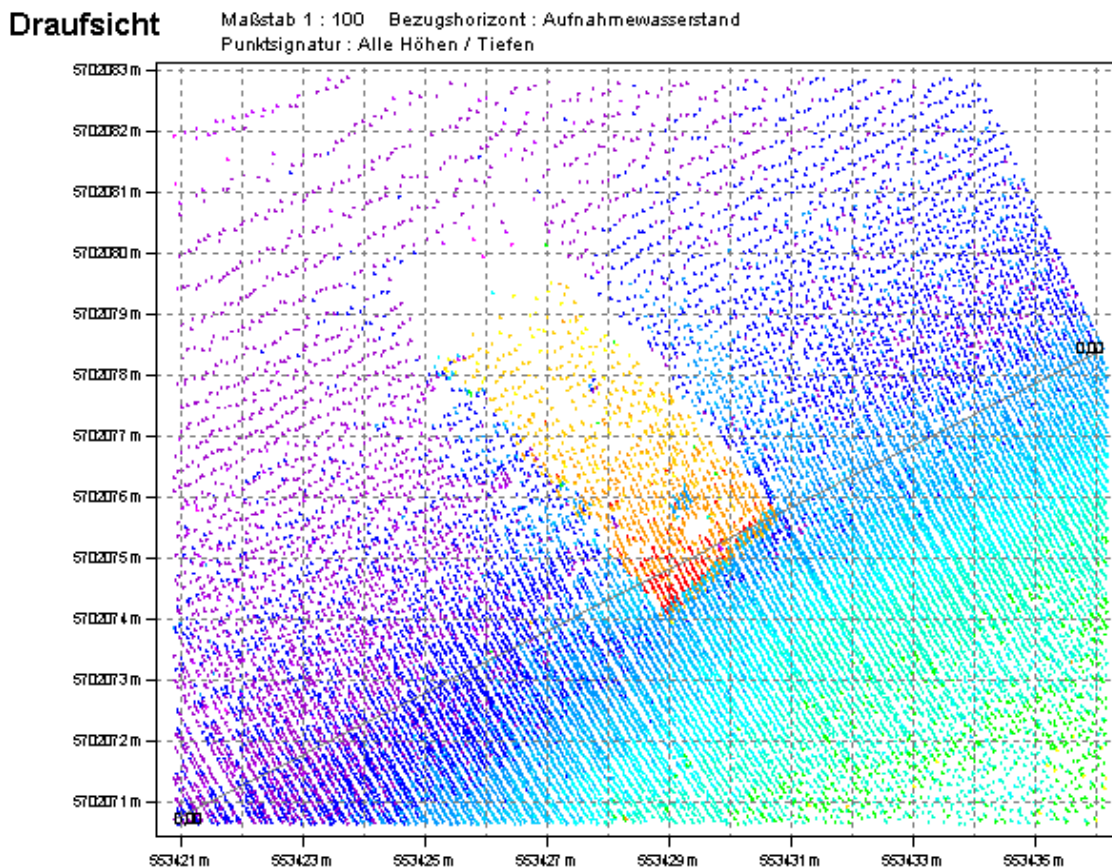


Abbildung 2.1.1: Ponton mit ca. 22.000 Messwerten (125 / m²)

Mit Fächerloten werden an einem Tag je nach verwendetem Sensor und Wassertiefe durchschnittlich 40 Millionen Messwerte erzeugt, so dass ausschließlich interaktive manuelle Bearbeitungsmethoden generell unwirtschaftlich sind. Bei Fächerloten treten Meßfehler nicht nur vereinzelt, sondern auch in Gruppen auf. Damit stellte sich die Aufgabe, ein Verfahren zu finden, welches unempfindlich gegenüber lokal gehäuft vorkommenden groben Fehlern ist.

Die BfG hat eine Methode zur **automatischen** Plausibilisierung entwickelt, die in den meisten Fällen mit natürlichem Gewässergrund und ausreichender Messwertdichte sehr befriedigende Ergebnisse ermöglicht [Wirth, 1999]. Der Gewässergrund wird hierbei durch ganze rationale Polynome approximiert, wobei die Parameter mit Hilfe der redundanten Messungen berechnet werden müssen. Dies erfolgt mit der Methode der kleinsten Quadrate. Diese Methode der Parameterschätzung ist an sich sehr empfindlich gegenüber nicht normalverteilten Meßwerten, so daß dann die Parameter verzerrt geschätzt werden und eine Ausreißersuche schwierig wird [Koch, 1987]. Das Verfahren wurde verbessert, indem sogenannte **robuste** Schätzverfahren angewendet werden. Dadurch können selbst bei einem Fehleranteil von nahezu 50% in der Stichprobe durch Hypothesentests mit einer zugrundegelegten Sicherheitswahrscheinlichkeit von 95% fehlerhafte Meßwerte noch erfolgreich erkannt werden [Koch, 1996, 1998].

2.2 Datenreduktion und Modellbildung

Die Datenfülle der geprüften und bereinigten Meßdaten trägt sämtliche verfügbare Information über die Gestalt des Gewässergrundes. Da wie gesagt, ein hoher Anteil der Daten redundant ist, wurde ein Weg gesucht, mit dem die Menge reduziert werden kann. Die Methode soll geeignet sein, vorgegebene Qualitätsstandards homogen für die gesamte Datenmenge einzuhalten und für jede Auswertung die erreichte Genauigkeit und Fehlerhäufigkeit automatisch nachzuweisen.

Das bestgeeignete Verfahren sollte folgende Eigenschaften haben:

- Schnell,
- Einfach,
- Vorgebbare Genauigkeit,
- Peilgebietsunabhängig,
- Für Flächenvermessung mit Linienechographen und für Fächerecholote geeignet,
- Gleichzeitige Modellierung des Gewässergrundes
- Kontrollierbare und protokollierbare Ergebnisse

Bekanntere Verfahren zur Datenreduktion und Modellierung lassen sich grob in zwei Klassen unterteilen:

1. Reguläre DHM's (Regular Elevation Model (REM) mit gleichmäßigem Gitter, auch hybride Formen),
2. Triangulation Irregular Network (Dreiecksvermaschung TIN)
 - Selektion wichtiger Eigenschaftspunkte (Gipfel, Kanten, etc.)
 - Iterative Methoden:
 - Sequentielle Verbesserung mit Start bei minimaler Approximation
 - Sequentielle Verschlechterung ausgehend von allen Punkten

Die meisten REM-Methoden sind einfach und schnell. Mit steigendem Qualitätsanspruch werden sogenannte hybride Modelle eingeführt, die im wesentlichen aus einer weiteren Verdichtung der Information des Modells bestehen, so dass die ursprüngliche Eigenschaft "einfach und schnell" immer weniger zutrifft. Die vorgebbare Genauigkeit wird in der Regel durch Erhöhung der Punktdichte erreicht, was dem eigentlichen Ziel, nämlich der Reduktion konträr ist. Auch andere Einsatzbereiche, wie die Verringerung von Daten der Linienechographen können hiermit in der Regel nicht abgedeckt werden.

Die zweite Gruppe der Reduktionsverfahren (TIN's) wird meist nicht als dreidimensionale Triangulation, sondern zweidimensional in Form von Delaunay-Triangulationen durchgeführt. Hierbei wird die räumliche Verteilung (Höhe) nicht genutzt, lediglich in der Ebene wird darauf geachtet, möglichst gleichmäßige Dreiecke zu bilden.

Um eine Reduktion durchzuführen, kann man versuchen, zunächst das ganze Gelände mit allen Meßwerten zu modellieren und anschließend wichtige **Eigenschaftspunkte** (Bruchkanten, Gefällwechsel etc.) zu bestimmen, wie dies ein Vermesser nach persönlicher Erfahrung und Geschick bei einer topographischen Geländeaufnahme auch macht. Dieses Verfahren ist weder einfach noch schnell.

Die **iterativen Triangulierungsmethoden** bieten zwei Lösungswege. Einmal geht man von maximal möglicher Approximation durch Triangulation mit allen Meßwerten aus, wobei man in jedem weiteren Rechenschritt sukzessive die Approximation verschlechtert, bis sie ein vorgegebenes Maß erreicht. Dieser Ansatz ist auf jeden Fall rechenintensiver wie der Ansatz, bei geringstmöglicher Approximation zu starten.

Für das Verfahren der iterativen, adaptiven Triangulation mit sukzessiver Verbesserung der Approximation entwickelt die BfG eine Lösung, die alle vorgegebenen Eigenschaften erfüllt. Nach der nun folgenden ausführlichen Schilderung der adaptiven Rechenmethode werden im Kapitel 3 noch die Eigenschaften des adaptiven TIN's der Gridding-Methoden gegenübergestellt.

1. Der Algorithmus startet mit einem Rechteck, welches in zwei Dreiecke geteilt wird, die alle Meßwerte umschließen
2. Delaunay-Triangulation der Meßwerte des konvexen Umrings
3. Sequentielles Einfügen des Messwertes mit der größten Höhenabweichung gegenüber der entsprechenden Dreiecksfläche

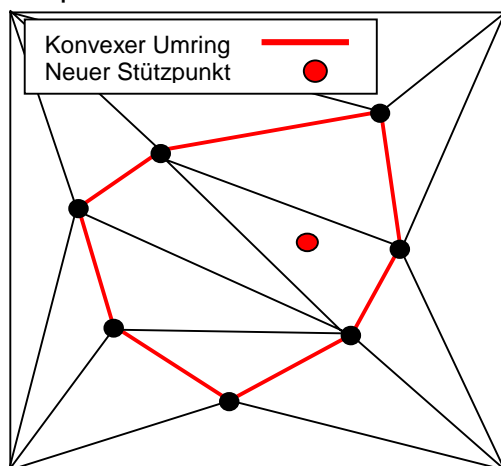


Abbildung 2.2.1: Verfahrensprinzip iterative Triangulation

4. Abbruch bei erreichter Genauigkeit
5. Löschen der außerhalb der konvexen Umringslinie liegenden Dreiecke

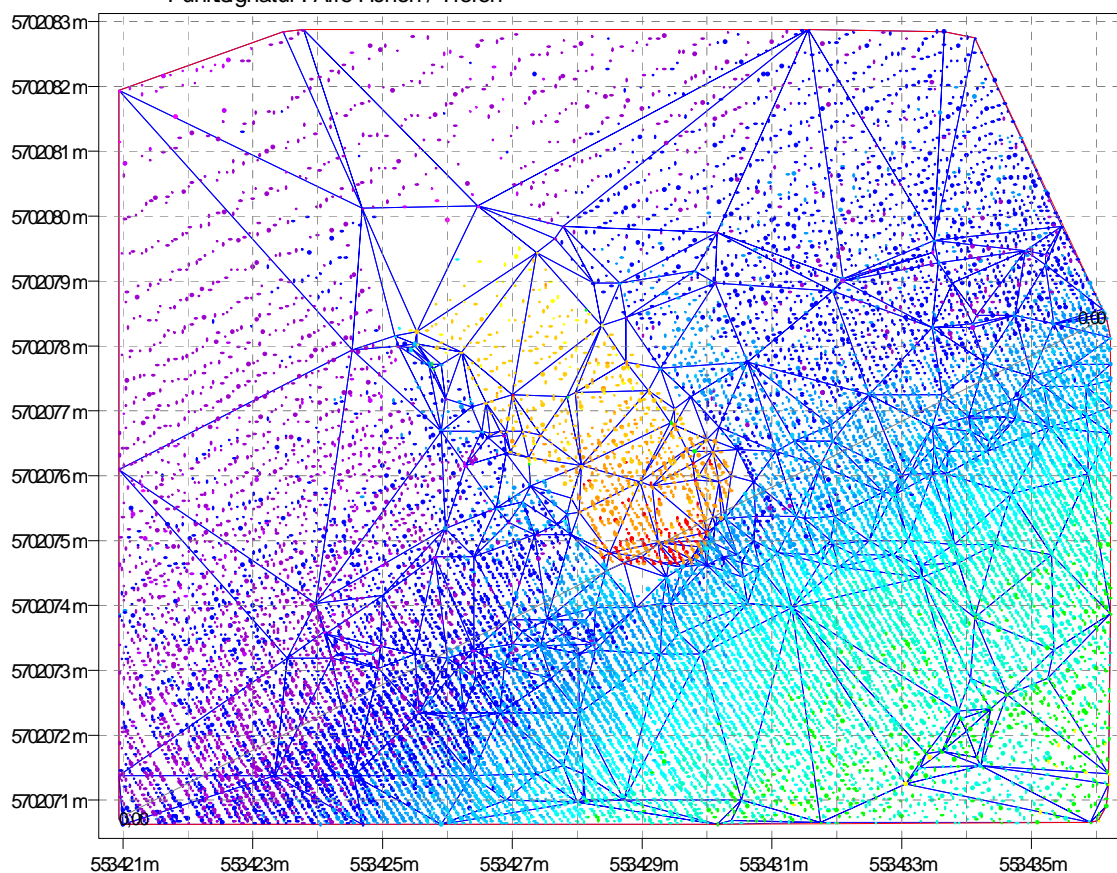
Der Nutzer muß lediglich die größte zulässige Höhenabweichung (Toleranz) zwischen resultierendem Modell und den Meßwerten definieren. Um verschiedene Einsatzbereiche abdecken zu können, darf die zulässige Abweichung nach oben einen anderen Wert haben wie nach unten. Beispielsweise darf im Modell für die Verkehrssicherung kein Meßwert nach oben herausstehen. In der Gewässerkunde wird eher die mittlere Geländehöhe bevorzugt, so dass hier eine nach oben und unten symmetrische Toleranz verwendet werden kann.

Zum Abschluß werden die Abweichungen aller Meßwerte und daraus statistische Werte wie größte verbliebene Abweichung, mittlere Abweichung, Standardabweichung, prozentuale Reduktion etc. berechnet.

Das Grundprinzip dieses Verfahrens wurde unabhängig voneinander an verschiedenen Stellen der Welt für verschiedene Zwecke mehrfach erfunden und entwickelt. Einen sehr guten Überblick liefert [Garland, 1995], wobei hier eine hinsichtlich Rechenzeit optimierte Lösung vorgestellt wurde, die aber nur regelmäßig verteilte Meßwerte reduzieren kann. Die Methoden zur Produktion von nautischen Karten und insbesondere Tiefenlinien beschreibt [Aasgaard (1996)].

Ein Nachteil der Delaunay-Triangulation ist es, dass konkave und leere Bereiche (z.B. Inseln) automatisch mit Dreiecken überdeckt werden. Dies kann nur verhindert werden, indem Begrenzungspolygone definiert und zusätzliche Stützpunkte und Dreiecksseiten unter Zwang in die Triangulation eingeführt werden. Durch den Zwang (Constraints) würde jedoch die Delaunay-Eigenschaft zerstört. In der vorgestellten Lösung stand mehr die Datenreduktion im Vordergrund. Dieses Ziel kann uneingeschränkt ohne die beschriebenen Zwangsbedingungen erreicht werden. Um auch in den konkaven Randbereichen und den Datenlücken eine exakte Modellierung zu ermöglichen, werden längs der Ränder jedoch weitere Meßwerte aufgenommen, obwohl sie aus Genauigkeitsgründen ansonsten nicht erforderlich wären. Die resultierende Stützpunktmenge kann dann anschließend mit Hilfe einer handelsüblichen Modellierungs- und kartographischen Software unter Verwendung der berechneten Begrenzungslinien weiter bearbeitet werden.

Eine weitere problematische Eigenschaft von Delaunay-Triangulationen ist die Tatsache, dass durch ungleichmäßige Punktverteilungen extrem spitzwinklige Dreiecke entstehen können. Dies wird in unserem Fall dadurch gemindert, dass nur die absolut notwendigen Meßwerte aufgenommen werden, was bei relativ glatten Untergründen automatisch zu einer recht gleichmäßig verteilten Stützpunktmenge führt. In Bereichen mit Felskanten und Riffeln kann ebenfalls eine gleichmäßigere und nicht sehr dichte Punktmenge erzeugt werden, indem man entweder das Modell durch einseitig verschwindende Toleranz auf die Riffelspitzen legt oder mit großer symmetrischer Toleranz eine eher durchschnittliche mittlere Tiefenlage des Modells erzeugt.

Draufsicht
 Maßstab 1 : 100 Bezugshorizont : Aufnahmewasserstand
 Punktsignatur : Alle Höhen / Tiefen

 Abbildung 2.2.2: PONTON approximiert mit Delaunay-Triangulation und 360 Meßwerten,
 98.3% Reduktion mit vorheriger Plausibilisierung

Im Beispiel wurden die Daten vorher nach dem im Kapitel 2.1 geschilderten Verfahren plausibilisiert. Da das Reduktionsverfahren die Tendenz hat, grobe Meßfehler noch besonders hervorzuheben, ist eine Plausibilisierung vor der Reduktion obligatorisch. Als abschließende Qualitätskontrolle empfiehlt sich daher die dreidimensionale Ansicht des Modells.

Die vorgegebene Maximalabweichung zwischen Modell und Meßwert betrug 0.2 m. Damit errechnet sich insgesamt eine Standardabweichung von <0.05 m. Im flachen Bereich entstehen wenige größere Dreiecke und im Bereich der ansteigenden Flanke des PONTONS viele kleinere Dreiecke. Die resultierende Punktdichte paßt sich also automatisch der Geländeform an.

3 Vergleich der Modellierungsverfahren

Die Eigenschaften von Regular Elevation Models (REM's) und der Methode der adaptiven Triangulation sollen im folgenden nicht nur aus der Sicht der Datenreduktion gegenübergestellt werden.

Mit einem REM oder auch Grid kann man mit geeignetem Modellansatz und hoher Meßwertdichte die Genauigkeit der Fächerlotung verbessern, weil das Modell gewissermaßen als vermittelnde Fläche das normalverteilte Meßrauschen filtert. Beim a-

daptiven TIN sind die Stützpunkte ungefilterte Meßwerte. Im Bereich der Dreiecksflächen werden die Meßwerte im Rahmen der vorgegebenen Toleranz approximiert. Gibt man jedoch eine Toleranz in der Größenordnung des angenommenen Meßrauschens vor, so kann im Durchschnitt von einer Verbesserung der Genauigkeit ausgegangen werden, was das Beispiel des Kapitels 2.2 auch bestätigt. Hier wurde bei einer Toleranz von 0.2m eine Standardabweichung des Modells (berechnet aus der Höhenabweichung der unbenutzten Meßwerte) von unter 5cm erzeugt, so dass sich für das REM in dieser Anwendung keine signifikanten Vorteile ergeben.

REM	Adaptives TIN
Genauigkeitssteigerung durch Filterung und hohe Stützpunktdichte möglich	Keine Filterung : "genaue" Rohdaten erforderlich
Aus vorgegebener Punktdichte resultiert die Genauigkeit	Aus vorgegebener Genauigkeit ergibt sich die Punktdichte
Ggf. Verbesserung der Genauigkeit lokal durch hybride Modelle oder globale Neuberechnung erforderlich	Genauigkeit wie vorgegeben, lokale Variationen geringer als Vorgabe
Interpolation: je nach Modellansatz entweder aufwendig oder fehleranfällig (Artefakte)	Interpolation: sehr einfach und kaum fehleranfällig
Erkennen und Modellieren der Morphologie (z.B. Bruchkanten, Riffel) ist aufwendig	Automatisch durch lokal höhere Punktdichte

Tabelle 3.1: Gegenüberstellung von Modelleigenschaften

Wenn die Stützpunkte des REM mit einer vermittelnden Funktion geschätzt werden, ist die resultierende Oberflächenform naturgemäß viel "glatter" und regelmäßiger als bei einem TIN. Aus einem gefilterten REM abgeleitete Tiefenlinien erscheinen dem Betrachter runder und "natürlicher", weshalb diese Modelle auch von Kartographen bevorzugt werden. Bei der Berechnung von Querprofilen aus dem Modell ergeben sich keine Vorteile für ein REM, weil die Richtigkeit des adaptiven TIN zumindest gleichwertig ist.

Das adaptive TIN ist eine hervorragende Methode, um überflüssige Redundanzen zu beseitigen und die zu archivierende Datenmenge zu verringern. Die Meßwerte können in jeder gewünschten Genauigkeit reduziert werden. Wenn man die Reduktion auf die Beseitigung von Meßwerten innerhalb des natürlichen Meßrauschens ausrichtet, kann man diesen Datensatz (ca. 60-90% Reduktion) längerfristig vorhalten und bei Bedarf später jedwede Modellform nahezu ohne Genauigkeitsverluste daraus ableiten. Stehen kartographisch-künstlerische Gesichtspunkte im Vordergrund, dann kann bei Bedarf aus dem reduzierten Datensatz jederzeit ein REM berechnet werden.

4 Zusammenfassung

Die BfG hat im Zuge der Umsetzung von Fächerlottechnik für den Binnenbereich ein Konzept entwickelt, mit dem die Massendaten kontrollierbar und protokollierbar reduziert werden können. Dadurch wird die Langfristarchivierung von Tiefenmeßdaten vereinfacht.

Darüber hinaus ist dieser Ansatz für die zukünftige Aufgabe der Berechnung von Tiefenlinien für die Berufsschiffahrt zwingend notwendig, weil die gestiegenen Anforderungen nur mit Hilfe eines Qualitätsmanagement-Systems oder zumindest durch Standardisierung des Produktionsprozesses und kontinuierliche Qualitätskontrollen erreicht und eingehalten werden können.

Literaturhinweise

- Aasgaard,R. (1996): *Using automated analysis of digital models of underwater terrain in the production of navigation charts*, Geomatic AS, Oslo, Norway
- Garland,M., Heckbert, P.S. (1995): *Fast polygonal Approximation of Terrains and Height Fields*, School of Computer Science Carnegie Mellon Univ. Pittsburgh, PA 15213, CMU-CS-95-181, <http://www.cs.cmu.edu/~garland/scape>
- Koch, K.R. (1987): *Parameterschätzung in linearen Modellen*, Dümmler, Bonn.
- Koch, K.R. (1996): *Robuste Parameterschätzung*, AVN Heft 1/1996,Wichmann Verlag, Heidelberg.
- Koch, K.R., Yuanxi Yang (1998): *Konfidenzbereiche und Hypothesentests für robuste Parameterschätzungen*, ZfV Heft 1/1998, Wittwer Verlag, Stuttgart.
- Wirth, H. (1999): *Flächenhafte Plausibilisierung von Peildaten*, DVW Schriftenreihe 37/1999: „Gewässervermessung und Hydrographische Informationssysteme“, Wittwer Verlag, Stuttgart