

Beschreibung der geometrischen Qualität eines Digitalen Geländemodells des Wasserlaufs

ROBERT WEIß¹ & SILKE MECHERNICH¹

Zusammenfassung: Digitale Geländemodelle werden vielfältig erstellt und eingesetzt. Je nach Anwendungsfall werden Geländemodelle unterschiedlich modelliert und den Modellen liegen unterschiedliche Daten zugrunde. Für die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) werden Digitale Geländemodelle des Wasserlaufs (DGM-W) erstellt. Diese zeichnen sich dadurch aus, dass neben der Topografie an Land auch der Gewässerboden detailliert dargestellt wird. Neben der Topografie als solche sind auch Angaben zur Qualität entscheidend. Eine Beschreibung der Qualität der DGM-W ist vielfältig möglich. Neben den Eigenschaften des DGM-W (TIN, GRID, Rasterweite, ...) und der damit verbundenen Modellierungsvorschrift, sind auch die Eigenschaften der eingehenden 3D-Messpunkte entscheidend. Dabei ist neben der Sensorart auch die Unsicherheit der eingehenden 3D-Messpunkte, die Punktdichte, Punktverteilung und Footprintgröße von großem Interesse. Weitere mögliche Qualitätsmerkmale sind (i) Abweichungen der Modellhöhen gegenüber Kontrollpunkten und -flächen, (ii) die Unsicherheiten, die sich aus den Ausgleichungen ergeben sowie (iii) statistisch aufbereitete Abweichungen der 3D-Punktwolke gegenüber der modellierten Oberfläche. In Summe ergeben sich damit vielfältige Parameter, mit denen die geometrische Qualität eines DGM-W beschrieben werden kann.

1 Einleitung und Motivation

Für eine Vielzahl verschiedenster Anwendungen werden Digitale Geländemodelle (DGM) benötigt. In der Regel sind DGMs auf trockene Flächen beschränkt bzw. Wasserflächen wie etwa Seen oder Flüsse werden durch einfache Interpolationen geschlossen.

In Deutschland ist die Wasserstraßen- und Schifffahrtverwaltung des Bundes (WSV) für die Sicherheit und Leichtigkeit des Verkehrs auf Bundeswasserstraßen zuständig. Dies beinhaltet z.B. auch das Vorhalten einer Fahrrinne mit entsprechenden Tiefen in Abhängigkeit vom Abflussgeschehen. Dementsprechend werden Geländemodelle benötigt, die neben trocken gefallen Flächen an Land auch präzise Informationen zu der Topografie unterhalb der Wasseroberfläche inklusive aller hydraulisch relevanten Bauwerke beinhalten. Diese Modelle werden als Digitalen Geländemodelle des Wasserlaufs (DGM-W) bezeichnet. Zudem sind DGM-Ws ein wesentliches Basisprodukt zur Bearbeitung gewässerkundlicher, wasserwirtschaftlicher, wasserbaulicher und ökologischer Aufgabenstellungen an Bundeswasserstraßen.

Die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) ist eine dem Deutschen Bundesministeriums für Digitales und Verkehr (BMDV) nachgeordnete wissenschaftliche Oberbehörde, deren Aufgabe unter anderem darin besteht, die WSV fachtechnisch zu beraten. In der Vergangenheit wurden die DGM-

¹ Bundesanstalt für Gewässerkunde, Am Mainzer Tor 1, D-56068 Koblenz, Deutschland,
E-Mail: [weiss, mechernich]@bafg.de

Ws primär durch die BfG erstellt. Zukünftig wird die WSV auch eigenständige DGM-Ws generieren, wobei die BfG Ihre Kompetenzen zukünftig in Form von fachlichen Beratungen und vor allem Weiterentwicklungen einbringen wird.

Neben der reinen Geometrie der modellierten Topografie ist die Qualität der Geländemodelle ein wichtiges Kriterium, das für die weiteren Anwendungen relevant ist. Die Beschreibung der Qualität von DGM-W ist relativ komplex, da bei einem DGM-W die Daten verschiedenster Sensoren und weiterführender Informationen fusioniert werden. Darüber hinaus bedingen auch die Modellierungsvorschriften die Qualität eines DGM-W.

Im Folgenden soll beschrieben werden, was unter einem DGM-W zu verstehen ist, wie es in groben Zügen erstellt wird und damit einher gehen auch Angaben, wie die Qualität eines DGM-W beschrieben werden kann.

2 Modellverständnis

Die DGM-Ws als solche werden vielfältig genutzt, aber es werden dabei relativ wenig Aussagen zur Qualität gemacht. Für eine Beschreibung der Qualität sind verschiedenste Aspekte zu berücksichtigen. An erster Stelle steht dabei das Verständnis darüber, was ein DGM-W eigentlich darstellt bzw. repräsentiert.

Ein Modell soll einerseits die Wirklichkeit approximieren, andererseits aber auch die Realität soweit vereinfachen, damit eine Nutzung für verschiedenskalige Anwendungen möglich ist. Im Fall eines Geländemodells und damit auch eines DGM-W erfolgt die Approximation der Realität als eine Erfassung und Modellierung der Topografie oberhalb und unterhalb der Gewässeroberfläche. Die Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (AdV) definiert ein Digitales Geländemodell als ein numerisches, auf ein regelmäßiges Gitter reduziertes Modell der Geländehöhen und -formen (ADV 2022). Im Allgemeinen werden diese als GRIDs oder Rastermodelle bezeichnet. Davon abweichend können DGM auch durch unregelmäßige verteilte Geländepunkte repräsentiert werden. In der Regel sind die Geländepunkte hierbei noch durch Dreiecksvermaschungen mit einander verbunden und werden als Triangulated Irregular Network (TIN) bezeichnet (Abb. 1). Üblicherweise sind morphologische Strukturelemente (z. B. Geländekanten, markante Höhenpunkte) in TINs detailliert abgebildet. Ein DGM beschreibt folglich die Erdoberfläche, frei von Vegetation oder Gebäuden. Sofern diese beiden Elemente in einem Modell enthalten sind, wird von einem Digitalen Oberflächenmodell (DOM) gesprochen (Abb. 2).

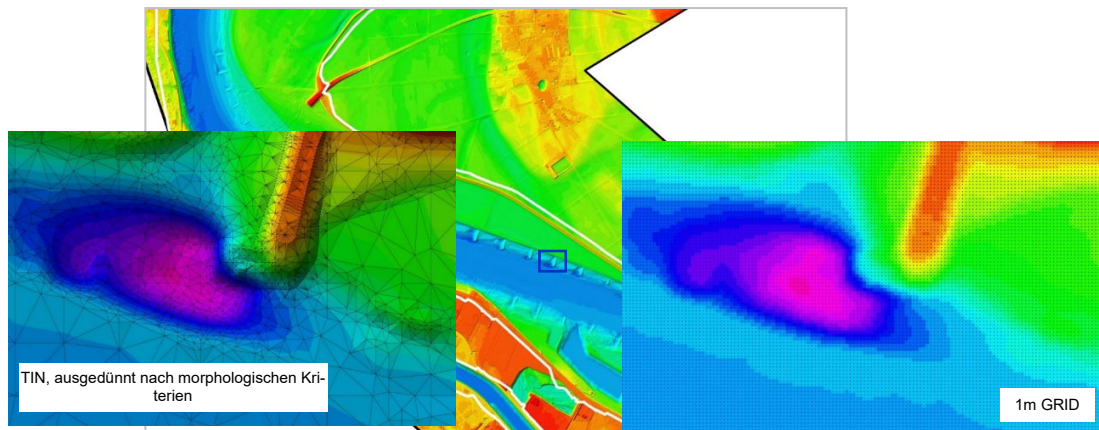


Abb. 1: DGM-W am Niederrhein mit TIN und GRID Darstellung

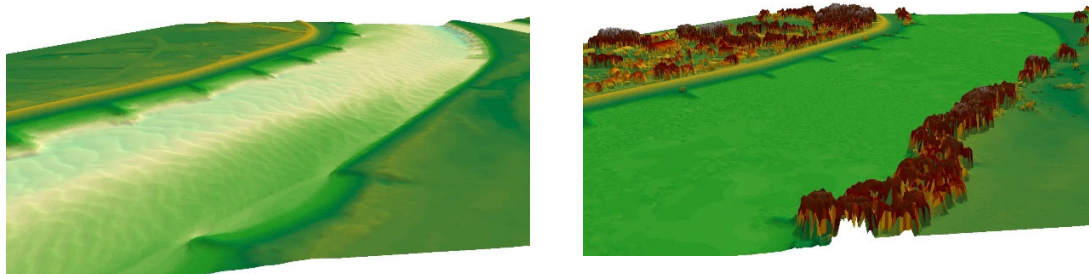


Abb. 2: DGM-W (links) und DOM (rechts) der Elbe bei Geesthacht, El-km 587

Die Modelle werden durch regelmäßig oder unregelmäßig verteilte Modellstützpunkte realisiert, wobei die Modellstützpunkte aus 3D-Punktwolken abgeleitet werden, die wiederum auf unterschiedlichen Sensoren bzw. Erfassungstechniken basieren. Neben der 3D-Punktwolke als solche ist auch die Modellierungsvorschrift von entscheidender Bedeutung. Ein DGM-W kann somit als eine Menge von Basisdatensätzen zzgl. einer Interpretationsvorschrift für jeden Basisdatensatz verstanden werden (SELLERHOFF 2011).

3 Ausgangsdaten einer DGM-W Modellierung

Die DGM-Ws basieren im Gegensatz zu einem konventionellen DGM neben konventionellen Airborne Laserscanning (ALS) Beobachtungen auch auf hydroakustisch erfassten 3D-Messpunkten, auf Ersatzmodellen, sowie z.T. auch auf bathymetrischen ALS-Beobachtungen. Hierbei ist zu beachten, dass den Messmethoden gänzlich unterschiedliche physikalische Messgrößen zugrunde liegen und somit die Eigenschaften der erfassten 3D-Messpunkte unterschiedlich sind. Üblicherweise werden neben den eigentlichen ALS-Daten auch Luftbilder erfasst. Diese erreichen nicht die Qualität von Produkten einer originären Luftbildbefliegung. In der Regel kommen hierbei Mittelformatkameras zum Einsatz. Die Ergebnisse dienen primär der Klassifizierung und Plausibilisierung. Insofern fließen Luftbildinformationen nur indirekt in eine DGM-W Modellierung ein.

3.1 Hydroakustisch erfasste 3D-Messpunkte

Hydroakustisch erfasste 3D-Messpunkte basieren auf unterschiedlichen Echolotsystemen. In der heutigen Zeit kommen in der Mehrzahl Fächerlechlotsysteme (Multi Beam Echo Sounder - MBES) zum Einsatz. Diese bestehen aus einem bis drei Schallwandlern (Transducern), die entsprechend getriggert Einzelmessungen mit einem bestimmten zeitlichen Abstand (Lotfolge) ausführen. Eine Messung eines Transducers wird im Allgemeinen als „Ping“ bezeichnet. Bei einem Ping wird ein, quer zur Fahrtrichtung ungerichteter, Schallimpuls mit einer Frequenz in der Größenordnung von 200-600 kHz in das Wasser emittiert. Die Schallsignale werden am Gewässerboden reflektiert und die Echos im Transducer empfangen. Die Fächerlechlotsysteme sind dabei in der Lage, das Rückkehrsignal richtungsspezifisch aufzuteilen bzw. das Rückkehrsignal in einzelne, winkelabhängige Signale (Beamwinkel) aufzuteilen. Jedes Einzelsignal wird als „Beam“ bezeichnet, ist über einen Beamwinkel und eine Streckeninformation auf Basis von Laufzeitmessungen charakterisiert und weist etwa eine Beamdivergenz von $0,5^\circ - 1,5^\circ$ auf. Diese ist abhängig von dem Fächerlot und den eingestellten Messparametern. Aus jedem Beam lässt sich folglich eine Koordinate im System des Transducers ableiten, wobei moderne Fächerlechlotsysteme den aufgespannten Fächer in ca. 500 - 1000 einzelne Beamwinkel aufteilen. Die üblicherweise in der WSV eingesetzten Transducer sind der Lage, einen Fächer mit einer Spannweite von $120^\circ - 140^\circ$ aufzuspannen. Einer Kombination von zwei Transducern wird aus „dual head“ System bezeichnet. In diesem Fall werden die Transducer geneigt installiert, damit ein max. Beamwinkel von $70^\circ - 75^\circ$ relativ zur Schiffshochachse erfasst werden kann.

Alternativ kommen noch sogenannte Einstrahlechote (Single Beam Echo Sounder - SBES) zum Einsatz. Im Gegensatz zu den Fächerlechloten wird hier jedem emittierten Ping ein Echo und damit auch nur eine Koordinate in der Z-Achse des Systems zugeordnet. Die Beamdivergenz entsprechender Systeme ist abhängig von der Schallfrequenz sowie dem Transducer und liegt in der Größenordnung mehrerer Grad. Eine getriggerte Kombination von mehreren SBES Systemen wird als „Multi Channel Echo Sounder“ (MCES) – System bezeichnet. Die einzelnen Transducer werden hierbei üblicherweise in einem Abstand verbaut, der in dem geplanten Messrevier zu einer flächenhaften Verteilung der Beobachtungen führt (z.B. 0,5 m). Die prinzipielle Messanordnung ist in Abb. 3 dargestellt. In Abb. 4 sind die resultierenden Punktmuster am Boden dargestellt.

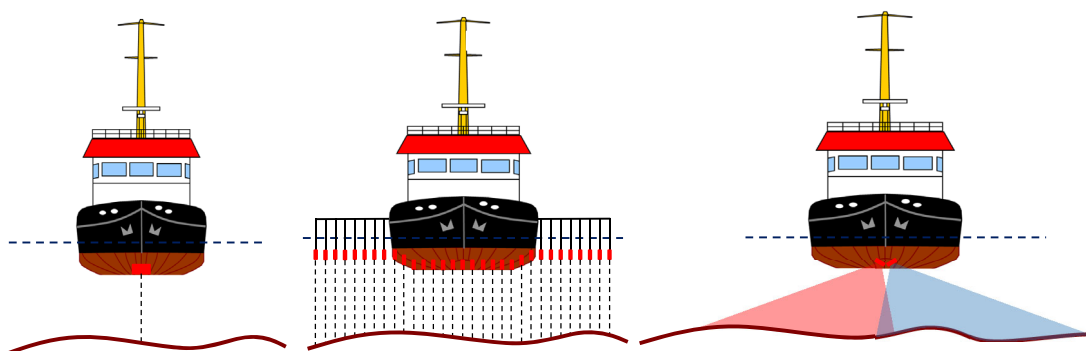


Abb. 3: SBES (links), MCES (Mitte) und (dual-head) MBES (rechts) - Systeme

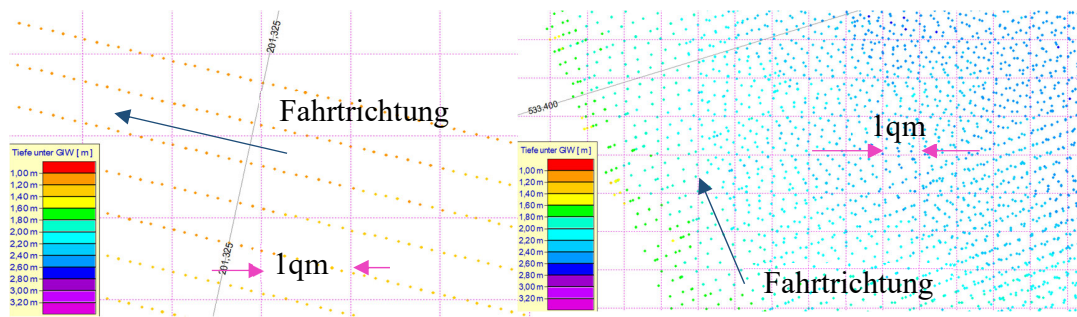


Abb. 4: Erfassungsmuster eines MCES System (links) und einem MBES System (rechts)

Die Lotfolgen liegen in der Größenordnung von 10 Hz-20 Hz und sind neben dem Lotsystem auch von der Wassertiefe und den Systemeinstellungen abhängig. Bei einer Geschwindigkeit von 5 m/s über Grund ergeben sich beispielsweise Abstände zwischen von 0,25 m – 0,5 m.

3.2 ALS-basierte 3D-Punktwolken

Der Standard für das Vorland und trocken gefallene Gebiete ist eine konventionelle ALS Erfassung. Dabei wird mit nahem Infrarot (NIR) Laserlicht die Erdoberfläche abgetastet. Im Gegensatz zu hydroakustischen Verfahren wird dabei jedem emittierten Laserpuls genau ein Rückkehrimpuls zugeordnet. Dieser Rückkehrimpuls wird in der Regel in einzelne Echos aufgeteilt, wobei jedes Echo einen Reflektionsschwerpunkt entlang des Signalwegs darstellt. Die ALS Technik ist in der Lage innerhalb bestimmter Grenzen die Vegetation zu penetrieren bzw. durch diese hindurch zu messen.

Neben der konventionellen ALS Technik wird in jüngster Vergangenheit zunehmend die bathymetrische ALS Technik eingesetzt. Im Gegensatz zu NIR Technik kommt hierbei grünes Laserlicht zum Einsatz, welches Wasser durchdringt. Ein Teil des emittierten Laserpulses wird an der Wasseroberfläche reflektiert. Der nicht reflektierte Teil dringt in den Wasserkörper ein und wird anteilig am Gewässerboden reflektiert. Sofern das verbleibende Signal am Gewässerboden reflektiert wird und dieses Echo im empfangenen Rückkehrsignal detektierbar ist, lässt sich die Position des Gewässerbodens ableiten.

Für ein neues DGM-W der Elbe wurde beispielsweise 2018 eine flächendeckende Befliegung der Elbe zwischen der Grenze zur Tschechische Republik und dem Elb-km 587 mit einem bathymetrischen ALS-System durchgeführt (KUEHNE 2021). Diese fand während des anhaltenden Niedrigwassers statt. Zum Zeitpunkt der Befliegung war das Wasser sehr klar bzw. die Gewässertrübung sehr gering, so dass große Bereiche des Gewässerbodens erfasst wurden.

3.3 Footprintgröße und Punktdichten

Allen Erfassungssystemen ist gemein, dass die 3D-Messpunkte zwar punktuell erfasst werden, die abtastenden Sensoren allerdings eine mehr oder weniger großen Footprint haben. In der Regel werden die Koordinaten der 3D-Messpunkte in cm oder mm-Auflösung gespeichert. Die Auflösung ist an dieser Stelle nicht mit der Genauigkeit oder repräsentierten Fläche (Footprint) zu verwechseln. Bei einem Fächerlotsystem mit einer Beamdivergenz von 1° ergibt sich bei einer Wassertiefe von 3 m im Nadir eine Footprintgröße von gut 5 cm. Bedingt durch die schräge Projektion

steigt dieser mit dem Beamwinkel sehr stark an. Bei einem Beamwinkel von 70° ergibt sich bei gleicher Wassertiefe ein Footprintdurchmesser von rund 45 cm. Prinzipiell ähnlich verhält es sich bei ALS Sensoren. Bei konventionellen (NIR) ALS-Systemen liegen die Beamdivergenzen in der Größenordnung von einigen $1/10$ mrad (RIEGL VQ780, RIEGL 2022). Bei einer Flughöhe von 1000 m ü.G. und einer Beamdivergenz von 0,18 mrad ergeben sich Footprintgrößen von 0,18 m (Nadir) bis 0,24 m (30° Scanwinkel). Wesentlich größere Beamdivergenzen von etwa 0,8 mrad bis 3 mrad weisen topobathymetrische Scanner auf. Bei einer typischen Flughöhe von 400 m, einem Scanwinkel von 21° sowie einer Beamdivergenz von 0,8 mrad ergeben sich Footprintdurchmesser in der Größenordnung von 0,3 m.

Die Punktdichten variieren je nach Vorgabe und Messkonfiguration. Im Bereich der Wasserstraßen und Schifffahrtsverwaltung des Bundes sind Punktdichten von etwa 20-30 Pkt./m² unter Wasser die Regel, wobei die Punktverteilung stark vom Erfassungssystem abhängt.

Bei ALS-Systemen werden bei großräumigen Projekten i.d.R. geringere Punktdichten erreicht. Aktuelle Befliegungen fordern Punktdichten von mind. 8 Pkt./m², wobei sich dieser Wert auf Gelände/Oberflächenpunkte bezieht bzw. es werden nur die „Last Pulse“-Punkte betrachtet.

3.4 Unsicherheiten der 3D-Messpunkte

Für die Unsicherheitsbetrachtung von Messwerten steht mit dem „Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement“ (GUM) ein international anerkannter Leitfaden zur Ableitung von kombinierten Unsicherheitsangaben (z.B. „Total Propagated Uncertainty“ (TPU) bzw. Kombinierte Standardunsicherheiten (KSU)) zur Verfügung. Der GUM beschreibt, wie aus den Unsicherheiten der Eingangsgrößen kombinierte Standardunsicherheiten berechnet werden (MIEKE 2020).

Sowohl bei der hydroakustischen Datenerfassung, als auch bei der ALS-Datenerfassung kommen abtastende Sensoren zum Einsatz. Beide Verfahren basieren darauf, dass Koordinaten der Geländeoberfläche oberhalb und unterhalb der Wasseroberfläche im Bezugssystem des Sensors erfasst werden. Dem folgt eine Rotation/Translation unter Nutzung der Einbaukoordinaten und Einbauwinkel in das Koordinatensystem des Sensorträgers (Peilschiff oder Luftfahrzeug) und eine weitere Rotation/Translation unter Nutzung der erfassten Orientierungswinkel und Positionen der Ortungssensoren in das Zielsystem (z.B. ETRS89/DREF91.R16).

Wird das mathematische Modell aufgestellt, ergeben sich die Koordinaten als Funktion der eigentlichen Sensormesswerte, der geometrischen Beziehungen innerhalb des Sensorträgers sowie der äußeren Orientierung und Positionierung. Die geometrischen Beziehungen innerhalb des Sensorträgers beinhalten in erster Linie die Hebelarme und Einbauwinkel der Sensoren. Nach GUM sind die Sensitivitätsfaktoren der jeweiligen Eingangsgrößen zu ermitteln und zusammen mit deren Standardabweichungen zu Gesamtunsicherheiten in Lage und Höhe zu fusionieren (MIEKE 2020). Bei den Standardabweichungen ist zu beachten, dass neben den direkten Unsicherheitsangaben (z.B. Unsicherheit einer Winkelmessung) auch indirekte Einflüsse wie etwa Signalverzögerungen, Uhrenfehler oder die Unsicherheit von Nullablagen zu beachten sind.

Die Verteilung der Unsicherheiten ist dabei abhängig vom Abstand zum Nadir. Die Unsicherheiten eines hydroakustischen Standard-Messsystems sind exemplarisch in Abb. 5 dargestellt, wobei die Werte auf eine Wassertiefe von 4 m und einem max. Beamwinkel von 75° gegenüber dem Nadir

bezogen sind. Weitere wesentliche Parameter sind die Unsicherheiten der Einbaukoordinaten auf dem Sensorträger von 5 mm, Nullablagen der Einbauwinkel von $0,02^\circ$, die Unsicherheiten der Orientierungswinkel von $0,05^\circ$ und Unsicherheiten der kinematischen GNSS-Koordinaten von 0,02 m / 0,04 m in Lage / Höhe. Alle Sensoren sind bei diesem Beispiel an einem Mast montiert.

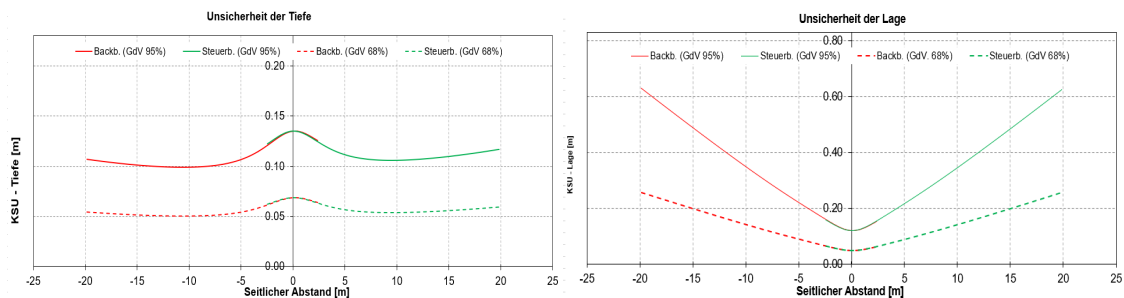


Abb. 5: Kombinierte Standardunsicherheiten (KSU) der Tiefe (links) und Lage (rechts) eines Fächerlotmesssystems

In vielen hydrografischen Softwaresystemen ist eine individuelle Berechnung der TPU/KSU auf Basis der tatsächlich installierten Sensoren, Geometrien und individuell anliegenden Parametern möglich bzw. realisiert. Im Ergebnis können zu jeder Koordinate gehörende Unsicherheitsangaben mit einem entsprechenden Grad des Vertrauens mit ausgegeben werden.

4 Geländemodellierung

4.1 Allgemeines

Auf Basis der 3D-Messpunkte erfolgt die Modellierung von Modellstützpunkten. Diese können als ein regelmäßiges Raster von Modellstützpunkten (GRID) oder als unregelmäßiges Stützpunktfeld mit Verknüpfungsinformationen (TIN) definiert werden, wobei bei einer TIN Modellierung auch häufig Bruchkanten eingesetzt werden.

Mit einer Modellierungsvorschrift wird definiert, um welche Modelle es sich handeln soll (TIN oder GRID) und wie die Modelle aus den 3D-Punktwolken abgeleitet werden.

4.2 TIN-Modellierung

Wird ein TIN gefordert, müssen seitens der Modellierung Vorgaben gemacht werden, welche Eigenschaften die Dreiecke haben sollen. Dabei ist vor allem neben der max. Kantenlänge und der Vorgabe einer Delaunay-Vermaschung entscheidend, bis zu welchem Abstand 3D-Messpunkte oberhalb oder unterhalb der Modelloberfläche liegen dürfen, ohne eine weitere Vermaschung zu generieren. Außerdem sind bei einer Ausdünnung von 3D-Messpunkten bei der DGM-W Modellierung hydraulische Kriterien, wie etwa hydraulisch relevante Bruchkanten zu berücksichtigen. In vielen Fällen werden aus TINs durch eine Interpolation GRID-Stützpunkte abgeleitet. Dabei ist aber zu beachten, dass der tatsächliche Informationsgehalt des GRIDs immer auf dem zugrunde liegenden TIN basiert. Eine hohe Auflösung spiegelt bei diesem Ansatz nicht immer eine hohe Informationsdichte wieder.

4.3 Direkte GRID-Modellierung

Im hydrografischen Bereich der WSV ist es üblich, aus den 3D-Punktwolken direkt GRIDs mit einem definierten Abstand der GRID-Punkte (Rasterweite) abzuleiten. Hierzu werden für jeden Stützpunkt im Rahmen einer vermittelten Ausgleichung Parameter für Flächenpolynome verschiedenen Grades nach dem Verfahren der Minimierung der kleinsten Quadrate geschätzt (LORENZ et al. 2021). Die so ermittelte Polynomfläche passt sich damit bestmöglich in die 3D-Punktwolke ein und an der Position des Modellstützpunkts entspricht die Höhe der Polynomfläche (Abb. 6) der Höhe des Modellstützpunktes.

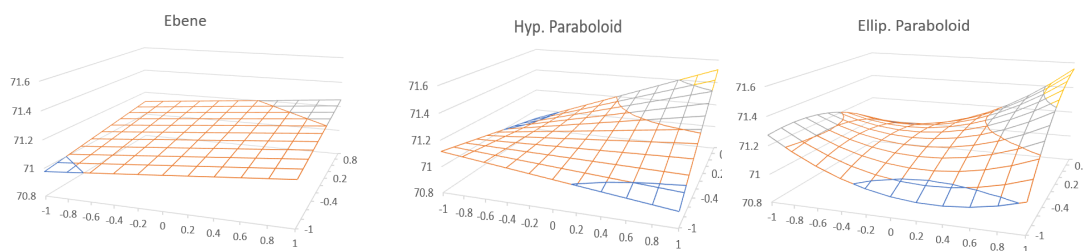


Abb. 6: Polynomfunktionen unterschiedlichen Grades (links: Ebene (3 Unbekannte), Mitte: hyperbolisches Paraboloid (4 Unbekannte), Rechts: Elliptisches Paraboloid (6 Unbekannte))

Grundlage für die Parameterschätzung je Modellstützpunkt ist eine definierte Punktschar. Für die Punktselektion können Einflussradien oder rasterbasierte Methoden zum Einsatz kommen. Punktselektion bzw. definierte Umkreisradien müssen gegenüber der Rasterweite so abgestimmt sein, dass einerseits keine wesentlichen Informationen verloren gehen und andererseits genügend Beobachtungen für eine sichere Modellierung vorhanden sind. Alternativ zum Umkreisradien ist es auch möglich, alle Punkte innerhalb einer definierten Rasterzelle bzw. je nach Vorgabe auch die umliegenden Rasterzellen zu nutzen.

Entscheidend ist in beiden Fällen, dass die Anzahl der eingehenden Beobachtungen wesentlich größer als die Anzahl der Unbekannten ist. Damit geht einher, dass die für dieses Verfahren benötigte Punktdichte relativ groß sein muss bzw. wenige Pkt./m² nicht ausreichend sind.

Für die Gewichtung im Rahmen der Ausgleichung werden unterschiedliche Ansätze genutzt. Häufig kommen abstandsgewichtete Ansätze zum Einsatz. Das Gewicht des jeweiligen 3D-Messpunktes verhält sich dabei indirekt proportional zum Abstand des Punktes zum Modellstützpunkt. Alternativ sind auch Gewichtungen auf Basis von TPU möglich. Exemplarisch sind als Ergebnisse in (Abb. 7) GRIDs mit unterschiedlichen Rasterweiten dargestellt. Es zeigt sich, dass der Informationsgehalt mit zunehmender Rasterweite abnimmt.

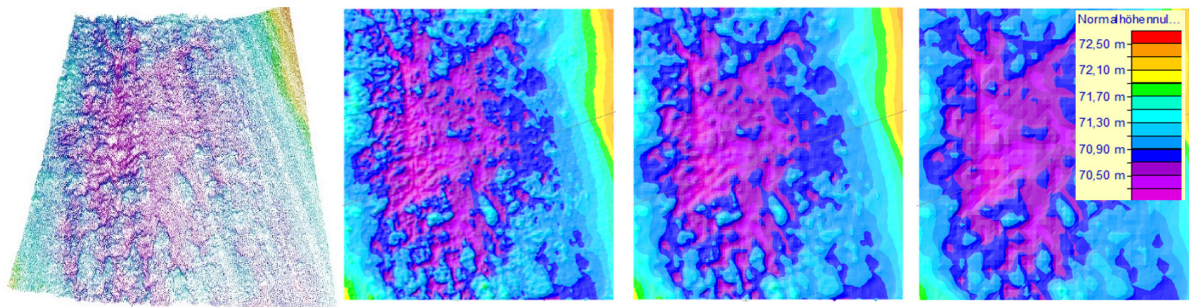


Abb. 7: v.l.n.r.: 3D-Punktvolke, GRID mit 0.5 m, 1.0 m, 2.0 m Rasterweite

5 Betrachtung der geometrischen Qualität

5.1 Modell vs. Kontrollpunkte

Zur Abschätzung der resultierenden Genauigkeit ist es möglich, auf Basis der 3D-Punktvolke an den exakten Positionen der Kontrollpunkte einen Modellstützpunkt nach der für das DGM-W gültigen Modellierungsvorschrift zu modellieren. Die resultierende Modellstützpunkthöhe kann dann der Höhe des Kontrollpunktes gegenübergestellt werden.

Exemplarisch sind die Ergebnisse dieser Prüfung für eine Befliegung im Bereich des Jungferngrunds am Rhein mit dem Leica SPL100 ALS System in Abb. 8 dargestellt. Es zeigt sich, dass die Abweichungen der aus der 3D-Punktvolke modellierten Modellstützpunkte zu den Höhen der Kontrollpunkte in der Größenordnung weniger Zentimeter liegen. Von 12 Kontrollpunkten weichen in diesem Fall 11 Punkte um weniger als 3 cm von der Kontrollpunkthöhe ab. Dabei ist zu beachten, dass trotz der Einhaltung aller vermessungstechnischen Grundsätze und Mehrfachbestimmung die Unsicherheit der GNSS-Höhenbestimmung von RTK Punkten in der Größenordnung von 2 -3 cm (ZSS, 2022) bei einem Grad des Vertrauens von 68,3% (BW, 2022) liegt. Somit ist nicht sicher nachweisbar, ob die Ursache der Abweichungen auf Seiten des ALS-Systems oder auf Seiten der Kontrollpunkte zu suchen sind.

Sofern an der Position des Kontrollpunktes kein Modellstützpunkt modelliert wird, ist es dennoch möglich, die vertikale Abweichung der Modelloberfläche zum Kontrollpunkt zu ermitteln und weiter auszuwerten.



Abb. 8: Höhenkontrollpunkte und Abweichung der Modellergebnisse zu den Kontrollpunkten

5.2 Ergebnisse der Ausgleichung

Im Fall der unter Abschnitt 4.3 beschriebenen Geländemodellierung werden die Höhen der Modellstützpunkte über eine Ausgleichung bestimmt. Bei jeder Ausgleichung nach dem Gauß-Markov-Modell mit vermittelnden Beobachtungen werden die Unbekannten so geschätzt, dass die gewichtete Quadratsumme der Verbesserungen minimiert wird (Gl.1 - 2, NEITZEL, 2010). Aus den Verbesserungen selbst lässt sich der Varianzfaktor σ_0^2 und in Verbindung mit der invertierten Normalgleichungsmatrix dann die Unsicherheit der Unbekannten $\sigma_{k,0}$ ableiten. Dieser ist abhängig von den Freiheitsgraden und damit von der Anzahl der Beobachtungen.

$$v = Adx - l \quad \text{Gl. 1}$$

$$dx = N^{-1}(A^T Pl) \quad \text{Gl. 2}$$

$$\sigma_0^2 = \frac{v^T P v}{r} \quad \text{Gl. 3}$$

$$\sigma_{k,0}^2 = \sigma_0^2 Q_{xx[0,0]} \text{ mit } Q_{xx} = N^{-1} = (A^T P A)^{-1} \quad \text{Gl. 4}$$

Das Ausgleichungsmodell geht von unkorrelierten Beobachtungen aus, die frei von systematischen Effekten sind. Da die Beobachtungen in aller Regel mit einem Messsystem erfasst wurden, ist diese Bedingung im strengen Sinne nicht erfüllt. Damit geht einher, dass die $\sigma_{k,0}$ (Gl. 3 - 4) Werte in der Regel zu kleine Beträge annehmen. Bei einer flächenhaften Visualisierung der Werte wird aber dennoch deutlich, in welchen räumlichen Bereichen die Verbesserungen größere Beträge annehmen. In diesen Fällen passt sich die geschätzte Polynomfläche schlechter in die 3D-Punkt- wolke ein (Abb. 9).

5.3 Modell vs. 3D-Punkt- wolke

Es ist weiterhin möglich, die 3D-Punkt- wolke der Modelloberfläche gegenüber zu stellen. Die Modelloberfläche besteht im Fall eines TIN aus vermaschten Dreiecksflächen. Im Fall eines GRIDs könne diese trianguliert werden, wodurch ebenfalls vermaschte Dreiecksflächen entstehen. Die Höhenabweichungen eines Punktes gegenüber einem Dreieck lassen sich mathematisch über die Hessische Normalform bestimmen. Alternativ können die Modellhöhen im Fall eines unvermaschten GRIDs durch bilineare Interpolationen abgeleitet werden. Es ist damit möglich, jedem 3D-Messpunkt eine Höhenabweichung zur Modelloberfläche zuzuordnen und diese Angaben statistisch auszuwerten. Es können rasterbasierte Mittel- oder Medianwerte abgeleitet werden, wobei diese aber um Null schwanken sollten. Die rasterbasierten Standardabweichungen der Höhenabweichungen zeigen eine Streuung der Beobachtungen rund um die Modelloberfläche an. In Abb. 9 sind neben einem Modellbeispiel auch die Unsicherheit der Unbekannten $\sigma_{k,0}$ und die Abgaben zur Höhenabweichung gegenüber der Modelloberfläche dargestellt. Aus der Abbildung geht hervor, in welchen Bereichen sich die Beobachtungen gut über Flächenpolynome approximieren lassen und welche Bereiche eher schlecht modellierbar sind.

In dem Rechenbeispiel der Abb. 9 weisen 86,5% eine Unsicherheit der Unbekannten von <10 mm auf. In Bezug auf die Abweichung der Messwerte zu der Modelloberfläche liegen 86,4% aller Messpunkte in einem Intervall von 10 cm. In einem Intervall von 4 cm liegen 56,1% der Messpunkte.

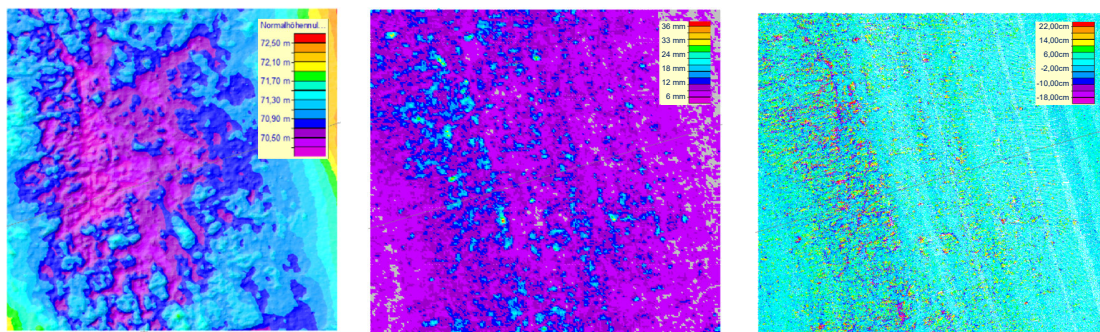


Abb. 9: Modellergebnis (links), Fehler der Unbekannten (Mitte) und Abweichung der Messwerte zur Modelloberfläche (rechts)

Aus den Ergebnissen lassen sich neben Aussagen zur geometrischen Qualität auch Rückschlüsse auf weitere Eigenschaften der Geländeoberfläche zu. Insbesondere Informationen über die Rauigkeit und Beschaffenheit des Bodens sind hierbei von großem Interesse. So lassen sich beispielsweise mit den genannten Parametern strukturierte Bereiche von gleichmäßigen Bereichen unterscheiden.

6 Fazit

Für die Beschreibung der Qualität digitaler Geländemodelle des Wasserlaufs sind vielfältige Parameter nutzbar. Neben den üblichen Metadaten, wie etwa Erfassungszeitraum oder räumliche Auflösung sind insbesondere die dem Modell zugrunde liegenden 3D-Messdaten entscheidend. Der Detaillierungsgrad steht dabei in direktem Zusammenhang mit der Auflösung des Modells. Ein hoch aufgelöstes Modell mit einem geringen Abstand der Modellstützpunkte untereinander sollte einen wesentlich höheren Detaillierungsgrad aufweisen, als dies bei einem niedrig aufgelösten Modell der Fall ist. Der Informationsgehalt steigt folglich mit der Auflösung und damit einhergeht auch eine Steigerung der benötigten Speichermenge bzw. der für eine Bearbeitung nötigen Ressourcen. Der Informationsdichte sind durch die eingesetzten Erfassungssensoren Grenzen gesetzt. Jedes der eingesetzten Sensorsysteme weist unvermeidliche Unsicherheiten auf, kann nur eine definierte Anzahl von Messungen innerhalb einer Zeiteinheit ausführen und darüber hinaus wird die räumliche Auflösung bzw. der Detaillierungsgrad durch den Footprint beschränkt.

Neben einer Beschreibung, welche Sensorik an welcher Stelle zum Einsatz kam, sind auch die damit verbundenen systemspezifischen Parameter, wie etwa Punktdichte, Footprintgröße und Unsicherheiten der 3D-Messpunkte in Lage und Höhe entscheidend. Diese Informationen lassen indirekt Rückschlüsse auf die Qualität des Modells zu.

Weiterhin ist die Modellierungsvorschrift von entscheidender Bedeutung. Diese gibt vor, wie ein Modell erstellt wird und damit auch welche Eigenschaften das Modell hat. Je nach Modellierungsvorschrift werden Informationen ausgedünnt und damit einhergehend die Details mehr oder weniger stark reduziert.

Für eine Beurteilung der geometrischen Qualität ergeben sich verschiedene Möglichkeiten. Einerseits ist es möglich, Modellstützpunkte an der Position von Kontrollpunkten nach der Modellierungsvorschrift zu modellieren und diese den Kontrollpunkten gegenüber zu stellen. Hierbei ist zu beachten, dass auch die Kontrollpunkte Unsicherheiten aufweisen und nicht fehlerfrei sind.

Im Falle einer Ausgleichung ist es zusätzlich möglich, die sich aus der Ausgleichung ergebenden Unsicherheiten der Unbekannten zu visualisieren und zur Qualitätsbeurteilung zu nutzen. Dabei ist zu beachten, dass eine vermittelnde Ausgleichung von unkorrelierten Beobachtungen ausgeht, was streng genommen nicht der Fall ist. Insofern sind die geschätzten Unsicherheiten der Unbekannten i.d.R. zu klein.

Letztendlich kann die ermittelte Modelloberfläche den Beobachtungen gegenübergestellt werden. Die vertikalen Abweichungen zwischen Modelloberfläche und Messwerte können statistisch analysiert und Stützpunktbezogen ausgegeben werden.

7 Literaturverzeichnis

- ADV, 2022: Homepage der AdV zu den Produkten des Amtlichen Vermessungswesens in Deutschland. <https://www.adv-online.de/AdV-Produkte/Geotopographie/Digitale-Gelaendemodelle/>, letzter Zugriff am 13.01.2022.
- BW, 2022: Metainformationssystem BW, SAPOS-Daten. <https://metadaten.geoportal-bw.de/geonetwork/srv/api/records/944f98d7-99b5-6240-1229-c284b792c489>, letzter Zugriff am 13.01.2022.
- KUEHNE, E., 2021: New Opportunities for Capturing the Topography of the River Elbe by Airborne Hydromapping in a Low Discharge Period 2018. PFG – Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science, **89**, 177-182. <https://doi.org/10.1007/s41064-021-00151-2>.
- LORENZ, F. ARTZ, T., BRÜGGEMANN, T., REICH, J., WEIß, R. & WINTERSCHIED, A., 2021: Simulation-based Evaluation of Hydrographic Data Analysis for Dune Tracking on the River Rhine. PFG – Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science, **89**, 111-120, <https://doi.org/10.1007/s41064-021-00145-0>.
- MIEKE, S., 2020: Berechnung der Messunsicherheit nach GUM Kurzfassung in 20 min. Vortrag – PTB-Institut Berlin, https://www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/fachabteilungen/abteilung_8/8.4_mathematische_modellierung/277_PTB_SEMINAR/VOR-TRAEGE/11_Mieke_-_Berechnung_der_Messunsicherheit_nach_GUM_Kurzfassung_in_20.pdf, letzter Zugriff am 13.01.2022.
- NEITZEL, F., 2010: Ausgleichsrechnung – Modellbildung, Auswertung, Qualitätsbeurteilung, Qualitätsmanagement geodätischer Mess- und Auswerteverfahren, Beiträge zum 93. DVW-Seminar am 10. und 11. Juni 2010 in Hannover. DVW-Schriftenreihe, Band **61**, Seite 95-127.
- RIEGL, 2022: Data Sheet – RIEGL VQ780-II. http://www.riegl.com/uploads/tx_pxpriegldownloads/RIEGL_VQ-780II_Datasheet_2021-06-29.pdf, letzter Zugriff am 13.01.2022.

- SELLERHOFF, F., 2011: BFG-Kolloquium „Zeitgemäße Erfassung und Bereitstellung von Geobasisdaten für die WSV, 6.4.2011 in Koblenz – Vortrag „Aspekte der DGM-W-Modellierung in tidebeeinflussten Gebieten“. https://www.bafg.de/DE/05_Wissen/02_Veranst/2011/2011_04_06_sellerhoff.pdf?__blob=publicationFile, letzter Zugriff am 13.01.2022.
- ZSS, 2022: Zentrale Stelle SAPOS (ZSS), Dienste – SAPOS HEPS, <https://zentrale-stelle-sapos.de/dienste-anwendungen-alternativ/>, letzter Zugriff am 13.01.2022.