

# LIDAR-Datenpotenziale für hydrodynamisch-numerische Modelluntersuchungen

HERBERT BROCKMANN<sup>1</sup>, ANDREAS HAASE<sup>2</sup>, GOTTFRIED MANDLBURGER<sup>3</sup> & MICHAEL SCHRÖDER<sup>4</sup>

*Zusammenfassung: Für vielfältige Aufgaben der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes werden hydrodynamisch-numerische Modelluntersuchungen ausgeführt. Dazu und auch für weitere Aufgabenstellungen werden als wesentliche Basisdatensätze Digitale Geländemodelle der Wasserläufe und 3D-Bruch-/Geländekanten benötigt. Als Geländedatengrundlage stehen häufig LIDAR-Daten zur Verfügung. In diesem Kontext wurden am Main pilothaft eine LIDAR-Datenverbesserung aufgrund von Streifendifferenzen und eine automatische Ableitung mit interaktiver Nachbearbeitung von 3D-Kanten aus LIDAR-Daten erfolgreich erprobt..*

## 1 Einleitung

Für vielfältige gewässerkundliche, wasserbauliche und wasserwirtschaftliche Aufgabenstellungen werden aktuelle, hoch auflösende, homogene und großräumig erfasste hydrologisch beziehungsweise hydraulisch wirksame 3D-Bruch- und Geländekanten sowie Digitale Geländemodelle der Wasserläufe (DGW-W als 1m-Quadratgitter und TIN) benötigt. Beide sind wesentliche Basisprodukte für hydrodynamisch-numerische Modelluntersuchungen. Zur Bearbeitung derartiger Aufgabenstellungen, z. B. am Main, waren diese pilothaft für die Stauhaltungen Obernau und Kleinostheim (s. Abb. 1) mit einer Fläche von ca. 33 km<sup>2</sup> vor allem auf der Basis vorliegender LIDAR-Daten zu generieren. Die Ergebnisdienste dienen anschließend als Eingangsgrößen für eine entsprechende hydrodynamisch-numerische Modelluntersuchung.

Die wesentlichen Ziele dieser Pilotanwendung „DGM-W Main-2“ waren insbesondere die Erpro-

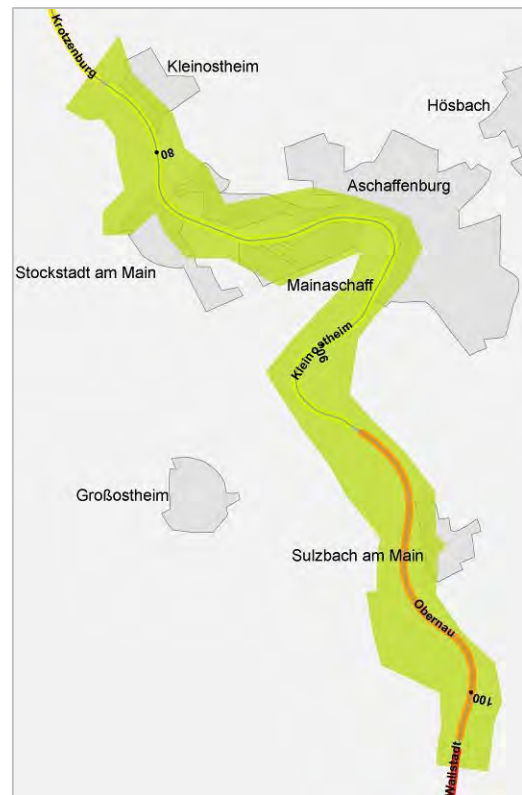


Abb. 1: Bearbeitungsgebiet DGM-W Main-2

- 1) Herbert Brockmann, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Am Mainzer Tor 1, 56068 Koblenz, Deutschland; E-Mail: [brockmann@bafg.de](mailto:brockmann@bafg.de)
- 2) Andreas Haase, RMK, Breite Straße 32, 29221 Celle, Deutschland; E-Mail: [haase.FA-RMK@bafg.de](mailto:haase.FA-RMK@bafg.de)
- 3) Gottfried Mandlbürger, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung I.P.F., TU Wien, Gußhausstraße 27-29, 1040 Wien, Österreich; E-Mail: [gm@ipf.tuwien.at](mailto:gm@ipf.tuwien.at)
- 4) Michael Schröder, Bundesanstalt für Wasserbau, Kußmaulstraße 17, 76178 Karlsruhe; E-Mail: [michael.schroeder@baw.de](mailto:michael.schroeder@baw.de)

bung möglicher LIDAR-Datenverbesserungen durch eine Feingeoreferenzierung und einer Methodik zur automatischen robusten Kantenbestimmung sowie die Bewertung, in wie weit das Vorgehen grundsätzlich auf vergleichbare Aufgabenstellungen übertragbar ist.

## 2 Qualitätskontrolle und -verbesserung der LIDAR-Daten

### 2.1 Ausgangsdaten

Als Ausgangsdaten standen klassifizierte LIDAR-Punkte einer Befliegung des Bayerischen Landesamtes für Vermessung und Geoinformation (LVG Bayern) kachel- und flugstreifenweise zur Verfügung. Die Daten wurden im Zeitraum vom 20.02.2007 bis 09.04.2007 mit einem Riegl LMSQ240i Scanner aufgezeichnet. Der Flugblock wurde mit einer Streifenüberlappung von 50% angelegt, wobei die Punktdichte im Einzelstreifen etwas mehr als 1 Pkt/m<sup>2</sup> betrug. Die Punktdichte der nutzbaren Punktwolke betrug im Mittel rd. 2,5 Pkt/m<sup>2</sup>, in Einzelbereichen bis zu 4 Pkt/m<sup>2</sup>.

### 2.2 Qualitätskontrolle

Da die Kriterien Punktdichte, Durchdringungsrate und gegenseitige Orientierung der einzelnen Laser-Scanner-Streifen ausschlaggebend für eine erfolgreiche automatische Extraktion und Modellierung der Kanten sind, wurde eine entsprechende Qualitätskontrolle durchgeführt.

Die dabei abgeleiteten Punktdichtekarten auf der Basis der Last-Echo-Punktwolke der Flugstreifen ließen Unregelmäßigkeiten in der Flugbewegung, Pitch-Winkel, erkennen, die stellenweise zu Unter- beziehungsweise Überabtastungen führten. Weiterhin wurden für die gesamten Punkte aller Flugstreifen Punktdichtekarten für alle Last-Echo-Punkte und für alle Bodenpunkte berechnet. Die Ergebnisse zeigten, dass die angestrebte 50% Überlappung nicht immer erreicht wurde, sodass Bereiche stellenweise nur durch einen Flugstreifen abgedeckt wurden. Mit Ausklassifizierung der Vegetations- und Gebäudedaten sank die o. g. Punktdichte deutlich.

Generell lag die Punktdichte der nutzbaren Punkte im Mittel besser als 1 Pkt/m<sup>2</sup> und wurde als ausreichend zur Kantenableitung angesehen.

Zur Überprüfung der gegenseitigen Orientierung der Flugstreifen wurden zunächst auf Basis aller Last-Echo-Punkte Oberflächen- und aus jeweils benachbarten Streifen Differenzmodelle berechnet. Die Zusammenstellung der Streifendifferenzen aller benachbarten Flugstreifen (s. Abb. 2) zeigte, dass

- über das gesamte Projektgebiet hinweg Höhendifferenzen in den Überlappungsbereichen benachbarter Flugstreifen von mehr als 50cm auftreten,
- die Streifendifferenzen vor allem auf einen Versatz in x-Richtung (Flugrichtung, Ost-West) zurückzuführen sind,
- die Abweichungen sich systematisch in y-Richtung, aber insbesondere in x-Richtung ausprägen, was z. B. deutlich an Hausdächern abgelesen werden kann, deren Firstlinien in y-Richtung verlaufen,
- benachbarte Streifenpaare systematische Muster der Differenzen aufweisen, wobei sich jeweils Streifenpaare mit vorwiegend positiven und negativen Differenzen abwechseln,

- die Streifendifferenzen von der Streifenmitte zum Rand hin zunehmen, was auf eine Verkipfung der Flugstreifen schließen lässt.

Aufgrund dieser Erkenntnisse wurde für ausgewählte Flugstreifenpaare eine genauere Analyse durchgeführt. Die Flugstreifen wurden dabei in überlappende Segmente von etwa 100m Länge eingeteilt. Für die korrespondierenden Segmente zweier benachbarter Streifen wurden dann mittels Least-Squares-Matching (LSM) 3D-Verschiebungsvektoren für jedes Segment bestimmt. Dadurch können 3D-Verschiebungen entlang eines Flugstreifens ermittelt werden. Die Abb. 3 zeigt exemplarisch die Differenzergebnisse für ein Streifenpaar (23/24). Die über das gesamte Streifenpaar gemittelten 3D-Verschiebungen ergeben sich zu:  $\Delta x = -0,89$  m,  $\Delta y = +0,23$  m,  $\Delta z = \pm 0,00$  m.

Die erheblichen Verschiebungen zwischen den Flugstreifen in x-Richtung deuten auf einen Synchronisationsfehler zwischen GPS/IMU und Laserscanner hin. Die y-Verschiebungen sind zwar wesentlich geringer, zeigen aber systematische Effekte auf. Bei einer Korrektur der Punkte beider Streifen um eine mittlere 3D-Verschiebung wird die o. g. Verkipfung der beiden Streifen offensichtlich. Vor dem Hintergrund dieser nicht akzeptablen Mängel wurde eine Feingeoreferenzierung der Flugstreifen für erforderlich gehalten.

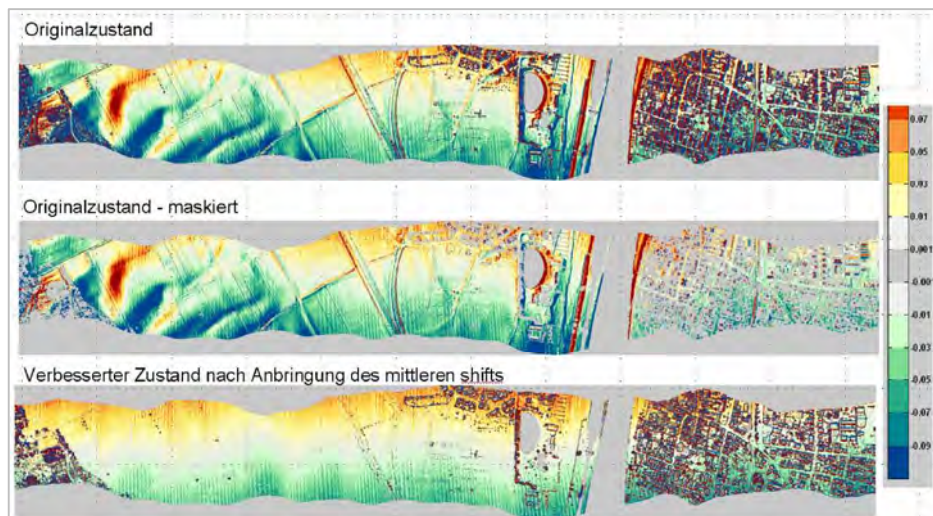


Abb. 3: Streifendifferenzen vor und nach Berücksichtigung der mittleren Verschiebungen

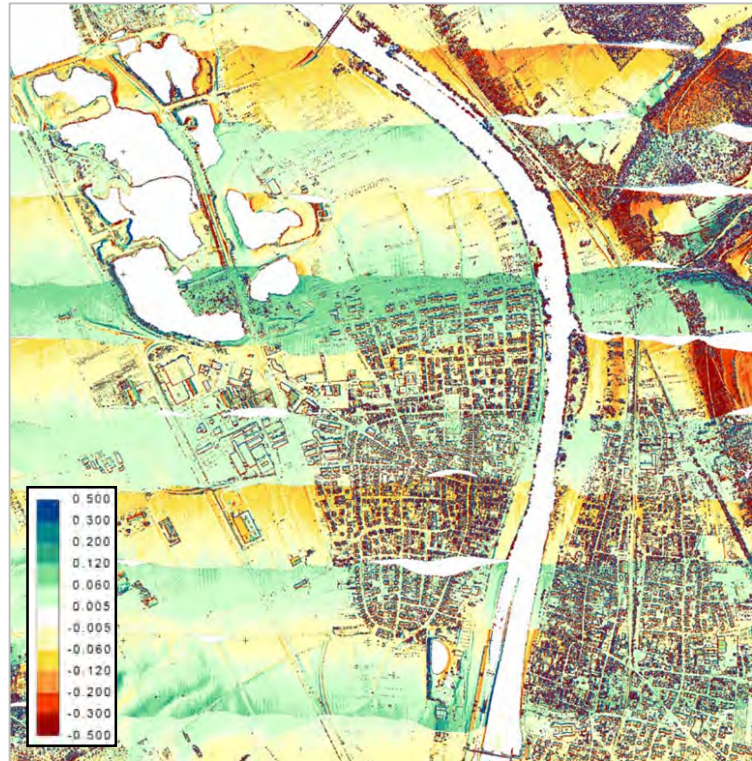


Abb. 2: Streifendifferenzen vor der Feingeoreferenzierung



## 2.3 Feingeoreferenzierung

Die relative Feingeoreferenzierung war für 62 Streifenpaare mit einer Länge von ca. 10 km, Ost-West-Befliegung, auszuführen. Trajektorien und Querstreifen standen nicht zur Verfügung. Lediglich drei horizontale Passflächen konnten genutzt werden.

Aufgrund der Daten- und Softwaresituation wurde letztendlich ein pragmatischer manueller LSM-Ansatz für die Bestimmung von lokalen 3D-Differenzvektoren in den Streifenüberlappungsbereichen entwickelt. Dabei wird eine 3D-Verschiebung für manuell initiierte, möglichst gleichmäßig verteilte, ausgewählte Fenster berechnet, innerhalb derer das Gelände Variationen in Exposition und der Neigung aufweist. (z. B. Häusergruppen). Somit ist gesichert, dass nahezu nur „gute“ LSM-Verschiebungen bestimmt werden und die nachfolgende Ausgleichung robust durchgeführt werden kann.

Im Rahmen einer Varianzkomponentenschätzung wurde nach der Ausgleichung für die gemessenen Verschiebungen eine Genauigkeit von ca. 5cm in x und y sowie 1.5cm in z geschätzt. Die Zellengrößen betragen dabei 101m x 101m. Empirisch wurde vorab getestet, dass bei dieser Fenstergröße immer noch ohne affine Parameter gerechnet werden kann. Da jeder Streifen meistens zwei Nachbarn hat, war jeder Streifen auch zweimal bei dieser manuellen Auswahl beteiligt. In der Summe ergaben sich pro Streifen ca. 10 – 50 korrespondierende Punkte.

Die Analysen der Zwischenergebnisse zeigten neben nicht zulässigen Verschiebungen auch signifikante Abweichungen bedingt durch Rollwinkeleinflüsse um die x-Achse, die deshalb abschließend bei der Ausgleichung mitgeschätzt wurden. Die Abb. 4 zeigt exemplarisch eine Gegenüberstellung der jeweils farbkodierten Streifendifferenzen.

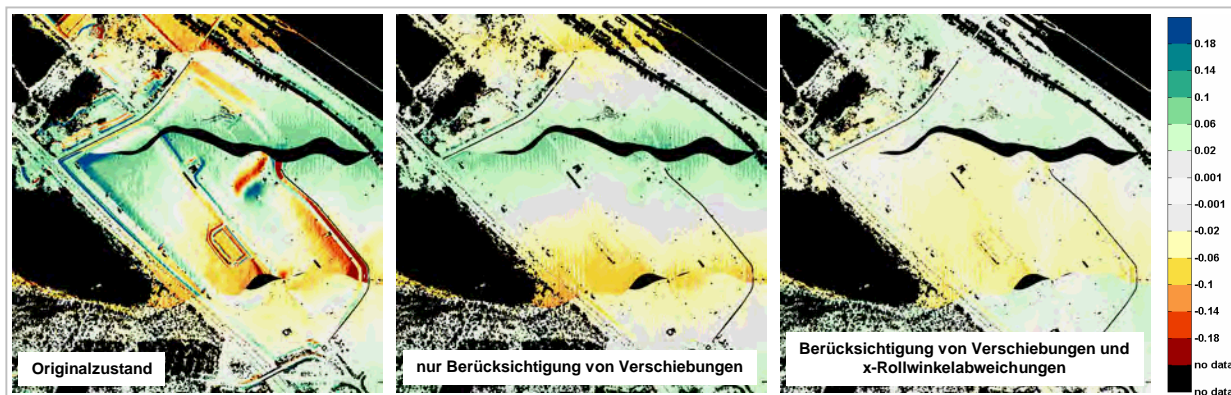


Abb. 4: Gegenüberstellung von Streifendifferenzen vor und nach der Feingeoreferenzierung

Auf der Basis der berechneten Residuen der Verknüpfungspunkte für jeden Streifen, vor und nach der Feingeoreferenzierung, kann ein quantitativer Ergebnisvergleich ausgeführt werden, s. Tab. 1.

Tab. 1: Statistik der Georeferenzierung (61 Streifen, 1625 Residuen pro Koordinatenrichtung, Einheit: m)

Größe	Originalgeoreferenzierung			Feingeoreferenzierung		
	x	y	z	x	y	z
Root Mean Square	0.353	0.127	0.022	0.036	0.036	0.012
max. Abweichung	0.982	0.349	0.219	0.135	0.137	0.221
mittlere Abweichung	-0.067	-0.001	0.000	0.000	0.000	0.000

Mit den erreichten Verbesserungen der LIDAR-Daten waren diese nun in einer notwendigen Datenqualität zur automatischen Ableitung der 3D-Kanten und des DGM-W verfügbar.

### 3 Ableitung der Bruch- und Geländekanten

#### 3.1 Nutzeranforderungen

Für die hydrodynamisch-numerische Modellierung werden alle hydrologisch wirksamen 3D-Bruch- und Geländekanten benötigt. Als eigenständiger Datensatz sind sie Eingangsdaten für die DGM-W-Modellierung. Insbesondere waren Böschungen, Dämme, Deiche, Brückenwiderlager und wasserführende Gräben zu erfassen. Seitens der Nutzer wurden Genauigkeiten von  $U_{x/95} = U_{y/95} \leq 50$  cm in der Lage und  $U_{z/95} \leq 20$  cm angestrebt. Die Ableitung der Kanten sollte auf Basis der unregelmäßig verteilten LIDAR-Punktwolke erfolgen und deren volles Potential, vor allem hinsichtlich der Höhengenaugkeit, ausschöpfen. Die hydraulische Relevanz zur weitestgehenden automatischen Ableitung der Kanten wurde durch folgende Kriterien definiert:

- Änderung der Geländeneigung quer zur Kante von mind.  $10^\circ$ ,
- Höhenunterschied bzw. Lageausdehnung des Körpers (Damm, Deich, Graben, Mauer, etc.) von mind. 50 cm und
- minimale Länge einer Geländekante von 10 m.

#### 3.2 Methodik

Die Ableitung der 3D-Kanten gliedert sich in drei Arbeitsschritte, der Detektion, der eigentlichen Modellierung und des abschließenden Postprocessings.

Als Eingangsgrößen werden neben den LIDAR-Daten Näherungen der Kanten oder zumindest entsprechende Startsegmente zur Kantendetektion benötigt. Diese Startsegmente wurden mit dem Programmsystem STREX (structure line extreaktion) des I.P.F. durch Analyse der Geländekrümmungen abgeleitet. Dabei wird ein Startsegment für den nachfolgenden Prozess der Kantenmodellierung generiert, wenn

- der minimale Krümmungsradius (maximale Krümmung) einen benutzerdefinierbaren Wert unterschreitet,
- das Verhältnis von maximaler zu minimaler Krümmung entsprechend groß ist, wobei nur lineare Elemente gesucht sind und
- die Abweichung der Punkte von der Quadrik (bestangepasste Fläche zweiter Ordnung) kleiner ist als ein benutzerdefinierter Schwellenwert.

Dabei ist der Grundgedanke, dass für jeden  $n$ -ten LIDAR-Punkt seine  $k$ -nächsten Nachbarn gesucht werden ( $n, k$  benutzerdefinierbar). Aus den  $k$  Datenpunkten wird dann die Quadrik bestimmt, die je nach Geländeverlauf die Form eines Ellipsoides, eines Paraboloides, eines Hyperboloides oder eines Zylinders annehmen kann. Die Quadrik wird anschließend in ihre Hauptlage transformiert, woraus sich die Hauptkrümmungen (minimale und maximale Krümmung) und deren Richtung berechnen lassen.

Auf Basis der LIDAR-Punkte und der ermittelten Startsegmente erfolgte die Modellierung der 3D-Kanten mit dem Programm *strex modeler* des I.P.F. Ausgehend von einem Startsegment als Näherung für die Geländekante werden die umgebenden LIDAR-Punkte in zwei Klassen, links

oder rechts der Kante, eingeteilt. Die eigentliche Kantenmodellierung erfolgt dann, indem in einem simultanen Ausgleichsprozess zwei bestanpassende ebene Flächen, links und rechts der Kante, geschätzt werden (s. Abb. 5). Die Schnittgerade der beiden Flächen beschreibt eine Tangente an die Geländekante, in deren Mitte dann ein repräsentativer Kantenpunkt bestimmt wird. Anschließend wird sowohl in die Vor- als auch in die Rückrichtung des ersten gefundenen Kantensegmentes extrapoliert und der Prozess solange wiederholt, bis ein Abbruchkriterium, s. Abschn. 3.1, erreicht ist. Die Größe der Flächen-Patches (Breite  $b$ , Länge  $l$ ), sowie das Überlappingsmaß ( $v$ ) zweier aufeinanderfolgender Patches ist benutzerdefinierbar, wobei im Rahmen dieses Projektes meist mit  $l=6\text{m}$ ,  $b=3\text{m}$  und einer Überlappung  $v$  von 70% gearbeitet wurde. Die Schätzung der ebenen Teilflächen erfolgt voll automatisch und robust. Etwaig vorhandene Vegetationspunkte werden während der Ausgleichung eliminiert, indem ihr Gewicht von einer Iteration zur nächsten sukzessive verringert wird.

Da in der Regel bei der Kantendetektion zu viele Startsegmente auf ein und derselben Kante generiert werden (s. Abb. 6 und 7) ist im Zuge der Modellierung eine Überprüfung erforderlich, ob das nächste zu prozessierende (Start-)Segment bereits modelliert wurde. Des Weiteren s. BRIESE, B., 2004 und BRIESE, B. & ATTWENGER, M., 2005.

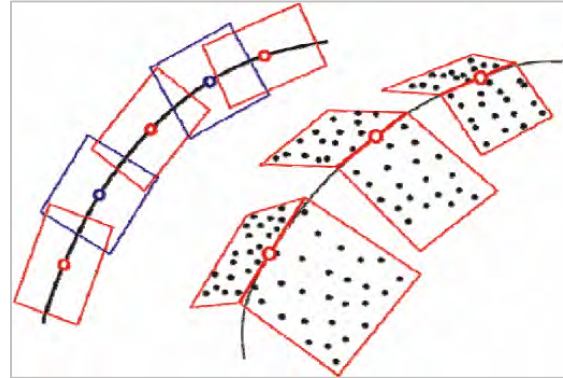


Abb. 5: Prinzip der Kantenmodellierung mittels Verschneiden von Ebenenpaaren



Abb. 6: Automatisch extrahierte Startsegmente

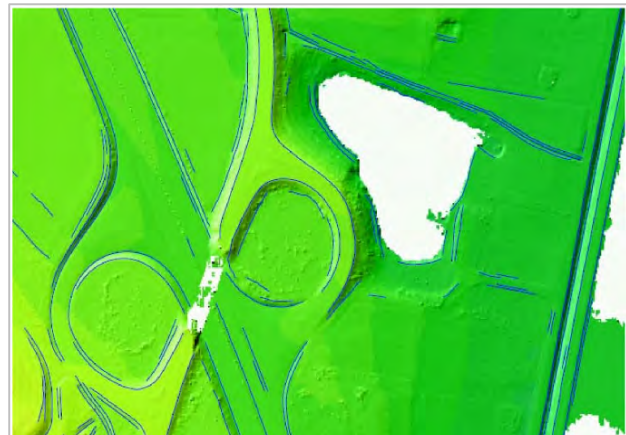


Abb. 7: Automatisch abgeleitete 3D-Kanten

Die automatisch abgeleiteten Kanten weisen von Fall zu Fall Lücken auf. Weiterhin nimmt die Modellierung keine Vereinfachung der 3D-Kanten vor, sondern behält alle erfolgreich gefundenen Kanten-Stützpunkte bei. Daher wurde ein Postprocessing-Modul implementiert, das im Wesentlichen folgende Aufgaben erfüllt:

- Zusammenfassen von Linienteilen,
- Vereinfachung der Linien (Reduktion der Punktmenge),
- Unterdrückung kurzer Linienstücke.

### 3.3 Ausführung

Auf Basis der bereitgestellten LIDAR-Punktclouden war eine Detektion und Modellierung benachbarter Linienelemente mit einem lagemäßigen Abstand von 1-2m in Abhängigkeit der Punktdichte realistisch. Zur Ableitung der Geländekanten wurden alle Last-Echo-Punkte der Klassen *Boden* und *Boden-oder-Vegetation* herangezogen. Außer den LIDAR-Punkten wurden keinerlei zusätzliche Daten zur Ableitung der Kanten verwendet. Es wurden insgesamt 12.000 Kanten von ca. 900 km Länge abgeleitet.

Abschließend war eine intensive interaktive Nachbearbeitung auf der Basis hydrodynamisch-numerischer Grundkenntnisse unumgänglich. Hier erfolgte neben restlichen Mängelbereinigungen in den Ergebnisdaten (z. B. Schließen von Grabenkanten) zusätzlich eine Kantenattributierung, da für die weitere Bearbeitung nur Deichkanten und wesentliche hydraulisch relevante Kanten benötigt wurden.

### 3.4 SOLL-IST-Vergleiche

Zur abschließenden Beurteilung der erreichten Genauigkeiten der abgeleiteten Kanten wurden in zwei Teilbereichen vor Ort signifikante Kanten mit einer summarischen Länge von 12 km (3094 Punkte) terrestrisch mit GPS-Techniken erfasst. Die SOLL-IST-Vergleiche an vergleichbaren Kanten ergaben folgende Ergebnisse:

- Lagedifferenzen von  $\Delta x/y = 2-3$  dm, in Abhängigkeit von der Definitionsgenauigkeit,
- Höhendifferenzen von  $\Delta z < 10$  cm, bei gut definierten Geländekanten (z.B. befestigte Grabenkanten).

Bei natürlichen Geländekanten sind die Differenzwerte nur an konkret erfassten Punkten und gut definierten Kantenverläufen vergleichbar. Insbesondere bei flach verlaufenden Neigungswechseln oder bei starkem Bewuchs (weniger Laserpunkte) traten Lagedifferenzen von  $\Delta x/y = 0,5-1$  m und Höhendifferenzen von  $\Delta z < 20$  cm auf.

Damit wurden die nutzerseits formulierten Anforderungen, s. Abschn. 3.1, erfüllt.

## 4 Prozessierung des Wasserlauf-DGM

### 4.1 Nutzeranforderungen

Neben den LIDAR-Punktclouden standen insbesondere die abgeleiteten 3D-Kanten, Fächerlotdaten als 1m-Quadratgitter, 25m- und 100m-Querprofile mit Landanschlüssen, digitale Gebäudeinformationen der bayerischen Flur- und Gebäudeflurkarte sowie analoge Bestandsunterlagen zur DGM-W-Modellierung zur Verfügung. Nutzerseits waren drei DGM-Varianten des Mainwasserlaufs zu prozessieren: 1m-Quadratgitter, Irreguläre Dreiecksgitternetze (TIN, hybrides Modell) mit ausgesparten Gebäudeflächen und ausgedünnt nach morphologischen Kriterien.

### 4.2 Methodik und Ausführung

Zur Trennung der LIDAR-Geländepunkte von denen der Gewässeroberfläche war im Vorfeld die Wasser-Land-Grenze abzuleiten. Im 1. Schritt wurde ein Differenzenmodell aus einer modellierten Gelände- und einer modellierten Wasseroberfläche gerechnet (s. BROCKMANN, H. & MANDLBURGER, G., 2001). Aufgrund von überstehender Vegetation im Uferbereich und geringer Punktzahl auf der Wasseroberfläche war das Ergebnis interaktiv nachzuarbeiten.



Der Aufwand der interaktiven Nachbearbeitung zur Bestimmung der Wasser-Land-Grenze war vertretbar. Die DGM-W-Modellierung sollte mit der Software SCOP++ des I.P.F. erfolgen. Es waren alle vorgenannten Daten einzubeziehen. Zur Berücksichtigung der Wasserwechselzone waren die Querprofile soweit möglich morphistisch zu verdichten (s. MANDLBURGER, G., 2000). Die zu berücksichtigenden Bauwerke wurden vorab aus analogen Bestandsunterlagen konstruiert. Ebenfalls wurden die nicht mit dem Main verbundenen Gewässer mit einer Böschungeneigung von 1:5 und einer angenommenen Wassertiefe von 2m konstruiert. Bei Häfen und dgl. wurde die Fahrrinntiefe eingearbeitet.

Als Basis-DGM-W für die Prozessierung der geforderten Modellvarianten wurde ein hybrides Modell mit einer Gitterweite von 1 m und eingeketteten Kanteninformationen erzeugt, s. Abb. 8. Zur Glättung der zufälligen Abweichungen wurde ein mittlerer Filterbetrag von 15 cm angesetzt.

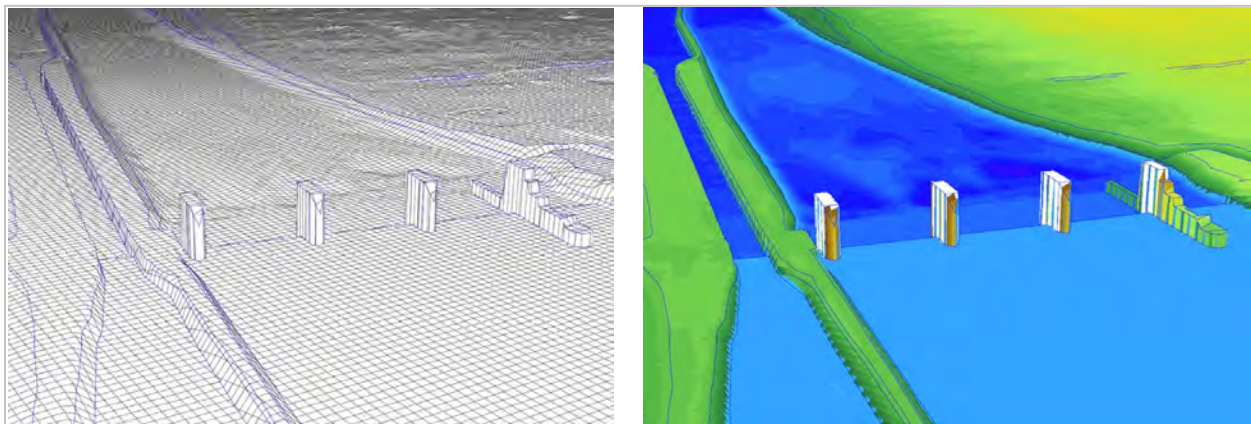


Abb. 8: DGM-W (hybrides Modell, ausgedünnt) im Bereich der Wehr- und Kraftwerksanlage Wallstadt

## 5 Hydrodynamisch-numerische Modellierung

### 5.1 Anforderungen an Modelle

Künstliche und natürliche Gewässer, wie frei fließende oder staugeregelte Flüsse, Kanäle, Talsperren, Seen und Küstengewässer, dienen in einer modernen Industriegesellschaft vielfältigen Zwecken (Zielke, 1999). An den großen deutschen Flüssen ist dies insbesondere die Nutzung als umweltfreundlicher Verkehrsträger, bei dessen Ausbau und Unterhaltung die zum Teil widerstreitenden Anforderungen Dritter zu berücksichtigen sind, wie z.B. die Interessen des Naturschutzes und Hochwasserschutzes. Um den unterschiedlichen Ansprüchen bei einem möglichst breiten Konsens der Anfordernden gerecht zu werden, sind verlässliche Modelluntersuchungen erforderlich, mit denen detaillierte Kenntnisse über Wasserstände, Strömungs- und Transportprozesse erhalten werden (s. Abb. 9). Zu diesem Zweck werden heute überwiegend mathematische, hydrodynamisch-numerische Modelle (HN-Modelle) eingesetzt, die aufgrund der kontinuierlich wachsenden Leistung von Supercomputern einen immer höheren räumlichen wie zeitlichen Detaillierungsgrad aufweisen. Damit sind aber auch die Anforderungen an die Qualität und Auflösung der für Modellerstellung und -betrieb erforderlichen Daten stetig gewachsen, so dass heute für Digitale Geländemodelle von Wasserläufen (DGM-W) LIDAR-Daten mit einer Auflösung von mehreren Punkten je Quadratmeter in Kombination mit photogrammetrisch oder anderweitig bestimmten Bruchkanten benötigt werden. Die für HN-Modelle darüber hinaus benö-



tigten hydrologischen, hydraulischen und sedimentologischen Daten seien an dieser Stelle der Vollständigkeit halber nur erwähnt.

## 5.2 Berechnungsgitter für numerische Modelle

Die hydrodynamischen Gleichungen zur Berechnung von Strömungen, die Navier-Stokes-Gleichungen, sind nicht geschlossenen analytisch lösbar.

Es können nur Näherungslösungen an den diskreten Punkten eines Gitters berechnet werden, wobei Güte und Genauigkeit der Berechnung mit der Auflösung des Gitters zunehmen. Die verschiedenen mathematisch-numerischen Näherungsverfahren, wie Methode der Finiten Differenzen oder Methode der Finiten Elemente, erfordern jeweils unterschiedliche Berechnungsgitter. Die Strömung in Flüssen und Küstengewässern lässt sich in erster Näherung meist durch zweidimensionale tiefenintegrierte Strömungsgleichungen (Flachwassergleichungen) beschreiben. Die hierfür erforderlichen Berechnungsgitter sind dementsprechend ebenfalls zweidimensional, und die räumliche Information der Geländehöhe wird durch einen Parameter an den Knotenpunkten des Berechnungsgitters repräsentiert.

## 5.3 Numerische Anforderungen an unstrukturierte Berechnungsgitter

Von den verschiedenen numerischen Näherungsverfahren haben sich die Methoden durchgesetzt, die auf unstrukturierten Berechnungsgittern beruhen, da sie eine sehr genaue Abbildung der Geländegeometrie bei einem Minimum an diskreten Berechnungspunkten erlauben. Die verschiedenen numerischen Methoden stellen sehr unterschiedliche Anforderungen an die Berechnungsgitter. Im Rahmen dieses Artikels werden daher nur ein paar allgemeine Aussagen getroffen, die mehr oder weniger restriktiv für die meisten Berechnungsverfahren gelten:

- keine Unstetigkeiten an Geländesprüngen (endliche Sohlgradienten),
- kompakte Elemente (z.B. Verhältnis kürzeste ÷ längste Seite größer als  $1 \div 10$ ),
- Vermeidung stumpfwinkliger Dreieckselemente (z.B. größter Innenwinkel  $< 135^\circ$ ) und
- keine sprunghafte Änderung der Diskretisierung (z.B. Flächenverhältnis von zwei benachbarten Elementen  $A_1 \div A_2 < 5$ , wobei  $A_1 > A_2$  gilt).

## 5.4 Gittergenerierung auf der Basis eines DGM-W mit Bruchkanten

Die aufgeführten numerischen Anforderungen werden im Allgemeinen von triangulierten Digitalen Geländemodellen nicht erfüllt, so dass eine Optimierung oder auch eine Neuerstellung des Berechnungsgitters notwendig ist. Bei einer Gitternetzoptimierung wird das DGM sukzessive verändert, indem Gitterpunkte entfernt werden, die aus morphologischen Gründen überflüssig sind, und Gitterpunkte hinzugefügt werden, die aufgrund der numerischen Anforderungen des Berechnungsverfahrens (s. Abschnitt 5.3) erforderlich sind. Eine derartige Gitternetzoptimierung

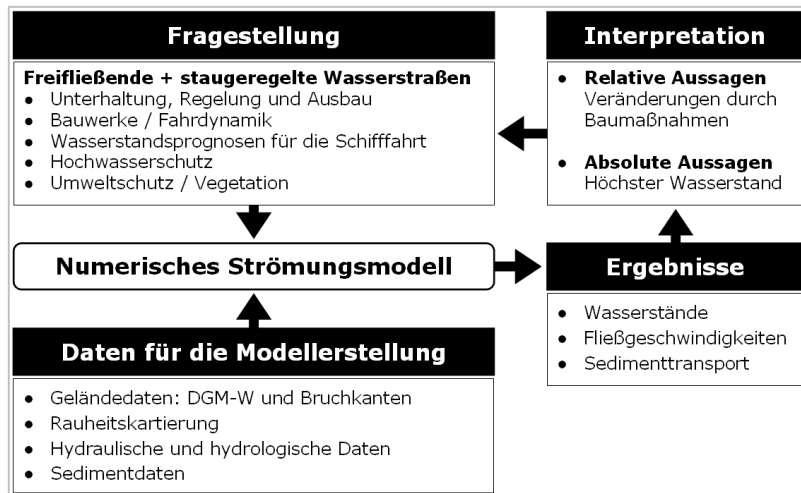


Abb. 9: Ablauf einer modelltechnischen Untersuchung

ist aufwändig, und es können nicht immer sämtliche numerischen Anforderungen vollständig erfüllt werden. Eine andere Methode zur Generierung von Berechnungsgittern beruht auf einer Optimierung der Bruchkanten, die z.B. durch eine photogrammetrische Auswertung von Luftbildern oder wie im vorliegenden Beispiel aus LIDAR-Daten ermittelt wurden. Durch eine geeignete weitestgehend manuelle Bearbeitung wird der Punktabstand auf den Bruchkanten an die vom Modellierer gewünschte Diskretisierung angepasst (s. Abb. 10). Das aus Dreieckselementen bestehende Berechnungsgitter kann dann anschließend mithilfe eines Frontgenerierungsalgorithmus erstellt werden, wobei in Abhängigkeit von der Aufbereitung der Bruchkanten die numerischen Anforderungen verhältnismäßig einfach vollständig erfüllt werden können.

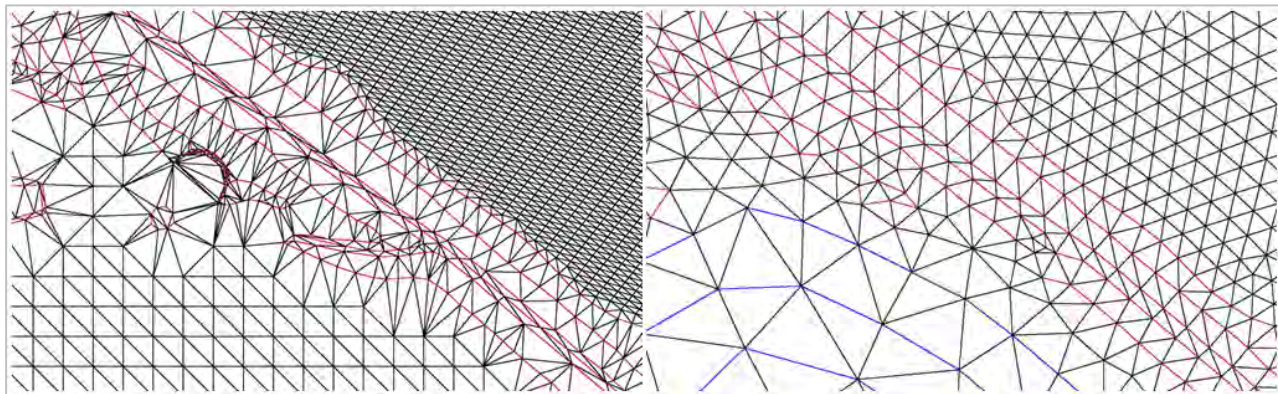


Abb. 10: Aufbereitung von Bruchkanten zur Erstellung eines Berechnungsgitters (links: Bruchkanten im DGM-W; rechts: Bruchkanten in einem Finite-Elemente Gitter)

## 6 Literaturverzeichnis

- BRIESE, C, 2004: "[Breakline Modelling from Airborne Laser Scanner Data](#)"; Reviewer: K. Kraus, H. Maas; Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung
- BRIESE, C. & ATTWENGER, M., 2005: Modellierung dreidimensionaler hydrologisch und hydraulisch relevanter Geländekanten aus hochauflösenden Laser-Scanner-Daten, BfG-Kolloquium, Praxisorientierte und vielseitig nutzbare Fernerkundungseinsätze an der Elbe, Magdeburg (invited); 09-30-2004; in: "Praxisorientierte und vielseitig nutzbare Fernerkundungseinsätze an der Elbe", Bundesanstalt für Gewässerkunde, 1 (2005), 35 - 45
- BROCKMANN, H. & MANDLBURGER, G., 2001: Aufbau eines Digitalen Geländemodells vom Wasserlauf der Grenzoder. Publikation der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung, Band 10, 2001, S. 199 - 208Mod
- MANDLBURGER, G., 2000: Verdichtung von Echolot Querprofilen unter Berücksichtigung der Flussmorphologie. Österreichische Zeitschrift für Vermessung & Geoinformation, 88. Jahrgang, Heft 4, 2000, S. 211 - 214
- ZIELKE, W. et al. (1999): Numerische Modelle von Flüssen, Seen und Küstengewässern, DVWK-Schriften, Band 127, Bonn, ISBN 3-89554-099-4