

## DISSERTATION

# Topographische Modelle für Anwendungen in Hydraulik und Hydrologie

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der  
technischen Wissenschaften unter Leitung von

Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Norbert Pfeifer  
Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung,  
Technische Universität Wien

und

O.Univ.Prof. Dr. Ing. Karl Kraus  
Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung,  
Technische Universität Wien

in Zusammenarbeit mit

Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.nat.techn. Helmut Habersack  
Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und Konstruktiven Wasserbau,  
Universität für Bodenkultur Wien

eingereicht an der Technischen Universität Wien  
Fakultät für Mathematik und Geoinformation

von

Dipl.-Ing. Gottfried Mandlbürger  
Matr.Nr. 8726726  
Linzerstraße 15  
A-3382 Loosdorf

Wien, im Oktober 2006

.....

Prof. Kraus in tiefer Dankbarkeit, der mir weit über wissenschaftliche Belange hinaus Mentor war.

Diese Arbeit wurde im Rahmen des Christian Doppler Labors für "Räumliche Daten aus Laserscanning und Fernerkundung" verfasst.

This work was composed in the context of the Christian Doppler Laboratory "Spatial Data from Laser Scanning and Remote Sensing".

## Kurzfassung

Das Thema Gefahrenzonenplanung ist durch die Hochwasserereignisse der jüngsten Zeit in den Blickpunkt des öffentlichen und medialen Interesses gerückt. Die Festlegung gesetzlicher Überschwemmungsgrenzen erfolgt dabei auf Basis von numerischen Modellen aus dem Bereich der Hydraulik und der Hydrologie. Die wesentlichste Eingangsgröße für diese Modelle ist die Topographie in Form eines digitalen Geländemodells des Wasserlaufs (DGM-W), bestehend aus Gewässerbett und Flussvorland. Die rasante Entwicklung im Bereich der Sensortechnik ermöglicht eine immer genauere und detailliertere Erfassung der Erdoberfläche und der Flusssohle. Das dabei entstehende Datenvolumen macht einen direkten Einsatz des hochauflösenden DGM-W in den komplexen physikalischen Rechenmodellen unmöglich. Zur Bewältigung der Datenmenge wird in der Praxis zu sehr einfachen Methoden der Datenreduktion gegriffen, bei welchen der wesentliche geometrische Inhalt oft verloren geht.

Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt daher einerseits auf einer, zunächst möglichst präzisen, Beschreibung der Topographie des Flusslaufes und seiner Umgebung, und andererseits auf einer qualifizierten Reduktion und fachgerechten Aufbereitung der Geometrie. Letztlich besteht das Ziel darin, eine optimale geometrische Datenbasis hinsichtlich Datenanordnung und Datenvolumen für die weiterführende Anwendung in den Modellen der Hydraulik und Hydrologie zu schaffen. Diese einleitenden Gedanken unterstreichen den interdisziplinären Charakter der Arbeit zwischen Geodäsie und Hydrologie bzw. Hydraulik. Zu Beginn werden daher die grundlegenden Begriffe und Konzepte der Geländemodellierung, wie auch der numerischen Modellierung in Hydrologie und Hydraulik, vorgestellt. Dem Spezialisten einer Fachrichtung soll dadurch ein Einblick in das jeweils fachfremde Gebiet gegeben werden.

Schwerpunktmäßig wird anschließend der Aufbau eines möglichst genauen DGM-W erläutert. Teilaspekte sind dabei die Ableitung der Wasser-Land-Grenze zur Trennung der Vermessungsdaten des Vorlandes und des Gewässerbereiches, die Modellierung der Gewässersohle, der Aufbau eines digitalen Geländemodells der Wasseroberfläche und die Ableitung hydraulisch relevanter Geländekanten. Ein besonderer Schwerpunkt wird dabei auf die Generierung des DGM-W auf Basis der derzeit gebräuchlichsten Erfassungsmethoden - Airborne Laser Scanning sowie Digitale Photogrammetrie für das Vorland und Echolot für das Gewässerbett - gelegt. Darüber hinaus wird auch auf die Problematik der Datenzusammenführung und des Datenmanagements eingegangen.

Im zweiten Teil der Arbeit wird zunächst ein allgemeiner Rahmen zur Datenreduktion dichter Geländemodelle vorgestellt. Der grundlegende Ansatz ist dabei, dass, ausgehend von einer initialen Approximation der Fläche, solange zusätzliche Punkte eingefügt werden, bis die geforderte maximale Höhentoleranz eingehalten wird. Die Verfeinerung kann prinzipiell entweder durch Analyse der lokalen Geländekrümmung und -neigung, oder durch adaptive Verdichtung eines Dreiecksnetzes erfolgen. Darauf aufbauend wird anschließend ein Konzept zur fachgerechten Datenaufbereitung von Geometriedaten für die Anwendung in der hydrodynamisch-numerischen (HN-)Modellierung präsentiert. Dieses Konzept besteht einerseits in einer differenzierten Datendichte, wobei die für die HN-Modellierung wichtigen Bereiche entsprechend detaillierter abgebildet sind. Andererseits kommt im Bereich des Gewässerbettes einer an die Fließrichtung angepassten Datenaufbereitung besondere Bedeutung zu.

Mittels derart aufbereiteter Geometriedaten werden abschließend konkrete Beispiele hydrodynamisch-numerischer Simulationen durchgeführt und die Ergebnisse kritisch diskutiert. Es stellt sich dabei heraus, dass durch die in dieser Arbeit vorgestellten Ansätze eine detaillierte

Berücksichtigung der Geometrie in den numerischen Modellen der Hydraulik und Hydrologie gelingt. Dieses Ergebnis wird als Anstoß für eine weitere vertiefte Zusammenarbeit zwischen Hydrologen, Hydraulikern und Geodäten verstanden.

## Abstract

Due to recent flood events, risk assessment has become a topic of highest public interest. The definition of endangered or vulnerable areas is based on numerical models of the water flow. The most influential input for such models is the topography provided as a digital terrain model of the watercourse (DTM-W). A DTM-W basically consists of the river bed and the inundation area. The rapid development in the area of sensor technology enables an ever more precise and more detailed description of the earth's surface. The higher resolution comes along with an increased amount of data. Thus, a direct use of the DTM-W as the geometric basis for numerical flow models is impossible. To deal with the high amount of data often very simple methods of data reduction are applied, resulting in a poor geometric quality.

Thus, the work described in this thesis focuses on the one hand on a precise modeling of the DTM-W comprising all available data and on the other hand on a high quality data reduction and a professional conditioning of the geometry data. The final goal is to achieve a good geometric basis concerning data distribution and an amount of data for the subsequent hydraulic or hydrological modeling. In that sense the thesis has to be regarded as interdisciplinary between the fields of geodesy, hydrology and hydraulics. Therefore the basic terms and concepts of DTM modeling as well as hydrologic and hydraulic modeling are presented first.

Subsequently the generation of a precise watercourse DTM is focused on. This involves several aspects like determination of the water-land-boundary, modeling of the river bed, deduction of a digital model of the water surface and modeling of relevant break lines. Emphasis is laid on the process of DTM-W generation on the basis of the currently most commonly used methods for data capturing. These are Airborne Laser Scanning or Digital Photogrammetry for describing the inundation area and echo sounder profiling for acquiring the river bed. Additionally, the relevant aspects concerning data fusion and data management are explained.

The second part of the work deals with data reduction and data preparation of dense digital terrain models. Basically a mesh refinement approach is used to densify an initially coarse surface approximation by iteratively inserting additional points until a certain height tolerance is kept. The refinement is either based on the analysis of local curvature and slope measures or an adaptive TIN-densification. Subsequently, concepts for a professional conditioning of geometry data to be applied in Computational Fluid Dynamic (CFD) models are presented. The basic idea is to provide a spatially adaptive data density, where the terrain parts being important for the CFD model are mapped with more details than parts of minor importance. Within the river bed, however, a data distribution aligned to the flow direction matters and is being considered.

At the end practical results of CFD models based on different geometry variants are presented and discussed. It will be shown that a detailed description of the topography can indeed be established in CFD models very well. This result should be the initiation of a deepening collaboration between geodesists and hydrologists.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Grundlagen und Begriffsbestimmungen</b>	<b>5</b>
2.1	Topographische Modelle . . . . .	5
2.1.1	Allgemeine Definition . . . . .	5
2.1.2	Semantik . . . . .	7
2.1.3	Anwendungen . . . . .	8
2.1.4	Datenerfassung . . . . .	9
2.1.5	Datenstrukturen . . . . .	15
2.1.6	Interpolationsverfahren . . . . .	20
2.1.7	Klassifizierung von Laserscanner-Punktwolken . . . . .	25
2.2	Numerische Modelle in der Hydrologie . . . . .	26
2.2.1	Bestimmung von Einzugsgebieten . . . . .	27
2.2.2	Niederschlags-Abfluss-Modell . . . . .	27
2.3	Numerische Modelle in der Hydraulik . . . . .	28
2.3.1	Modellübersicht . . . . .	28
2.3.2	Physikalische Grundlagen . . . . .	29
2.3.3	Dimensionalität . . . . .	33
2.3.4	Berechnungsverfahren . . . . .	35
2.3.5	Datenstrukturen . . . . .	37
2.3.6	Modellkalibrierung . . . . .	39
<b>3</b>	<b>Aufbau des Wasserlauf-DGM</b>	<b>41</b>
3.1	Modellierung der Gewässersohle . . . . .	41
3.1.1	Problemstellung und vorhandene Ansätze . . . . .	42
3.1.2	Interpolation von Querprofilen . . . . .	44
3.1.3	Interpolation unter Berücksichtigung der Wasser-Land-Grenze . . . . .	53
3.1.4	Vergleich: Fächerlot versus interpolierte Querprofile . . . . .	56
3.2	Modellierung der Wasseroberfläche . . . . .	58
3.2.1	Ableitung aus prognostizierten Wasserspiegellagen . . . . .	58
3.2.2	Ableitung aus ALS-Punktwolke . . . . .	59
3.3	Bestimmung der Wasser-Land-Grenzlinie . . . . .	63
3.3.1	Ableitung aus ALS-Punktwolke . . . . .	64
3.3.2	Ableitung aus Verschnitt von DGM bzw. DGM-W und DWM . . . . .	67
3.4	Bestimmung hydraulisch relevanter Geländekanten . . . . .	68
3.5	Datenzusammenführung und Datenmanagement . . . . .	73

<b>4</b>	<b>Datenreduktion hybrider Geländemodelle</b>	<b>76</b>
4.1	Übersicht über vorhandene Reduktionsansätze . . . . .	76
4.1.1	Vereinfachung von Kurven . . . . .	77
4.1.2	Vereinfachung von Flächen . . . . .	77
4.2	Anforderungen an die Datenreduktion . . . . .	78
4.3	Der Reduktionsalgorithmus . . . . .	80
4.3.1	Hierarchische Unterteilung . . . . .	81
4.3.2	Unregelmäßige Unterteilung . . . . .	82
4.4	Die Reduktionskriterien . . . . .	83
4.4.1	Datenreduktion durch Krümmungs- und Neigungsanalyse . . . . .	83
4.4.2	Datenreduktion durch adaptive TIN-Verdichtung . . . . .	91
4.5	Diskussion und Vergleich der Reduktionsansätze . . . . .	92
4.5.1	Krümmungs/Neigungs-basierter Ansatz mit hierarchischer Unterteilung (E1) . . . . .	94
4.5.2	Krümmungs/Neigungs-basierter Ansatz mit unregelmäßiger Unterteilung (E2) . . . . .	94
4.5.3	Adaptive TIN-Verdichtung mit hierarchischer Unterteilung (T1) . . . . .	100
4.5.4	Adaptive TIN-Verdichtung mit unregelmäßiger Unterteilung (T2) . . . . .	101
4.5.5	Performancevergleich . . . . .	102
4.5.6	Verhalten entlang von Geländekanten . . . . .	103
4.5.7	Vergleich mit externer Methode . . . . .	105
<b>5</b>	<b>Aufbereitung von DGM-Daten für die hydrodynamisch-numerische Modellierung</b>	<b>108</b>
5.1	Anforderungen an die Datenanordnung . . . . .	108
5.2	Ansätze zur fachgerechten Datenaufbereitung . . . . .	109
5.2.1	Zonen-basierte Steuerung der maximalen Toleranz . . . . .	110
5.2.2	Distanzabhängige Steuerung der maximalen Toleranz . . . . .	112
5.2.3	Höhenabhängige Steuerung der maximalen Toleranz . . . . .	112
5.2.4	Spezielle Datenanordnung im Gewässerbett . . . . .	114
5.3	Geometrisches Netz versus hydraulisches Netz . . . . .	117
5.4	Aufbereitung zusätzlicher Daten . . . . .	119
5.4.1	Gebäudelayer . . . . .	120
5.4.2	Vegetationslayer . . . . .	122
<b>6</b>	<b>Beispiele hydrodynamisch-numerischer Simulationen</b>	<b>124</b>
6.1	Beispiel 1: Gars am Kamp . . . . .	124
6.2	Beispiel 2: Auwald bei Hadersdorf am Kamp . . . . .	129
6.3	Beispiel 3: Unterlauf der Lainsitz . . . . .	132
6.4	Beispiel 4: Mittellauf der Lainsitz . . . . .	142
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>145</b>
	<b>Bibliography</b>	<b>151</b>

# 1 Einleitung

Die extremen Hochwasserereignisse der vergangenen Jahre haben die Themen Gefahrenzonenplanung, Hochwasserschutz und -simulation in den Blickpunkt des medialen Interesses gerückt. Alleine in Mitteleuropa sind mit Oder 1997, Elbe 2002, Donau 2002, Schweiz und West-Österreich 2005 sowie Thaya und March 2006 eine Vielzahl von Überflutungen zu nennen. Neben dem persönlichen Leid der Betroffenen entsteht durch Hochwasserereignisse diesen Ausmaßes auch ein beträchtlicher volkswirtschaftlicher Schaden, den es im Sinne des Gemeinwohls zu minimieren gilt. So haben beispielsweise die Überflutungen vom März, Juni und August des Jahres 2002 (vgl. Abb. 1.1) in Österreich laut Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (BMLFUW) einen geschätzten Schaden von drei Milliarden Euro verursacht, und etwa 100.000 Menschen waren direkt betroffen.

Das Instrument zur computergestützten Simulation von Strömungsvorgängen ist die hydrodynamisch-numerische (HN-) Modellierung. Mittels eines HN-Modells wird die Frage beantwortet, wohin und mit welcher Geschwindigkeit sich das Wasser bewegt. Die wesentlichen Modell-Einflussgrößen sind die Topographie des Flusslaufes und der Überschwemmungsgebiete sowie die Fließwiderstände. Letztere entstehen durch Rauigkeiten der Geländeoberfläche und des Flussbettes (Korngröße, Formrauigkeit, Bewuchs, ...) und wirken bremsend auf die Strömung. Zusätzlich werden zur Modellierung noch Randbedingungen, wie etwa Abflussmengen, benötigt, die ihrerseits aus hydrologischen Modellen ermittelt werden. Auch für diese Modelle ist die Topographie primärer Input-Parameter, wobei in diesem Fall das gesamte Einzugsgebiet eines Flussnetzes von Interesse ist.

Die Berücksichtigung der Topographie erfolgt bei der hydrodynamisch-numerischen Modellierung i.A. in generalisierter Form. Während im Bereich des Gewässerbettes und der Uferböschung eine relativ genaue Erfassung der Geometrie angestrebt wird, basiert die Beschreibung im Vorland meist auf einer begrenzten Anzahl hydraulisch relevanter Kanten (Dammkronen, Böschungskanten, ...). Moderne Datenerfassungsmethoden, wie Airborne Laserscanning (ALS) oder Automatische Bildkorrelation, bieten heute aber bereits die Möglichkeit einer sehr detaillierten Erfassung der Geometrie des Vorlandes und der Uferböschung. Die Auswertung dieser Daten und deren Weiterverarbeitung zu einem homogenen digitalen Geländemodell ist ein Hauptbetätigungsfeld der Photogrammetrie. Es werden dabei hohe Anforderungen an das Fachwissen und Systemverständnis der BearbeiterInnen und an die Leistungsfähigkeit der verwendeten Algorithmen und Computer gesetzt.

Eine Steigerung der Qualität und Zuverlässigkeit von Hochwasserprognosen kann durch das Zusammenwirken von detaillierterem physikalischem Problemverständnis, erweiterten Modellierungstechniken sowie verbesserten Eingangsdaten erreicht werden. In einem Umfeld ständig steigender Komplexität und Leistungsfähigkeit hinsichtlich Datenerfassung, Modellaufbau und Rechentechnik ist dies nur durch eine intensivere Zusammenarbeit von Fachleuten unterschiedlicher Richtungen - im konkreten Fall von Geodäten, Hydraulikern und Informatikern - zu bewerkstelligen. Im Bezug auf die Geometrie als einflussreichstem Parameter bei



*Abbildung 1.1: Luftbild vom Hochwasser am 14. August 2002, Donau bei Kritzendorf (NÖ); Datenquelle: Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen (BEV), Wien*

der HN-Modellierung besteht daher die Aufgabe, die Flusslauf-Topographie zunächst möglichst präzise zu erfassen und anschließend alle für die Modellierung relevanten Strukturen entsprechend aufzubereiten.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es folglich, einen Beitrag zu einer verbesserten und effektiveren Berücksichtigung der Topographie in den numerischen Modellen der Hydrologie und vor allem der Hydraulik zu erreichen. Dies beinhaltet neben dem Aufbau einer genauen geometrischen Datengrundlage, welche möglichst alle in den Messdaten enthaltenen Details berücksichtigt, auch eine fachgerechte Aufbereitung der Geometrie, sodass diese bei der Weiterverarbeitung in Folge-Modellen eine optimale Grundlage darstellen. Dies setzt allerdings eine tiefere Auseinandersetzung mit den Grundlagen, Verfahren und Anforderungen der Hydrologie und Hydraulik voraus.

In diesem Sinne ist die Arbeit als interdisziplinär anzusehen. Dem Hydrauliker und Hydrologen soll dabei genauso Einblick in die relevanten Aspekte der Geodäsie gegeben werden, wie der Geodät über die Grundlagen der Hydraulik und Hydrologie informiert werden soll. Dies erfolgt vor allem im Kapitel 2, wo auf die Grundlagen der jeweiligen Disziplinen eingegangen wird, sofern dies im Bezug zum Thema der Arbeit von Wichtigkeit ist. Neben der Einführung in die Begriffe soll durch dieses Kapitel auch ein erweitertes Verständnis für die Denkweisen der jeweils fachfremden Disziplin und die dort verwendeten Strategien ermöglicht werden. Diesem Punkt wird insofern große Bedeutung beigemessen, als das Verwenden und Verstehen eines gemeinsamen Vokabulars die Grundvoraussetzung für eine interdisziplinäre Zusammenarbeit darstellt. Nicht selten scheitern gemeinsame Projekte an Kommunikationsproblemen.

Im Kapitel 3 werden dann Strategien zur Generierung eines vollständigen Modells der Flusslauf-Topographie vorgestellt. Ein wesentlicher Aspekt dabei ist das Zusammenführen der Vermessungsdaten aus dem Bereich des Vorlandes und des Gewässerbettes. Dies erfordert zunächst die Ableitung der Grenzlinie zwischen Wasser und Land, für die ihrerseits ein digitales Modell der Wasseroberfläche die Voraussetzung bildet. Anhand der Wasser-Land-Grenzlinie können sowohl Vorland- als auch Gewässerbett-daten beschnitten werden. Liegen die Daten des Flussbettes als weitabständige Querprofile vor, so sind diese noch zu homogenisieren, ehe ein gesamtes Geländemodell des Wasserlaufs in einem Guss interpoliert werden kann.

Der Einsatz moderner Sensoren zur Datenerfassung bringt einerseits eine hohe geometrische Auflösung der Topographie und andererseits ein entsprechend gestiegenes Datenvolumen mit sich. Diese hochauflösende Datenbasis eignet sich nicht direkt als geometrische Grundlage für das hydrologische oder hydraulische Modell. Vielmehr müssen die topographischen Daten derart reduziert werden, dass das Datenvolumen in gewissen akzeptablen Grenzen bleibt und gleichzeitig die wesentlichen Geländedetails erhalten bleiben. In Kapitel 4 wird daher ein allgemeiner Rahmen zur Reduktion von hybriden Geländemodellen vorgestellt. Unter hybrid wird dabei eine Datenstruktur verstanden, bei welcher aufbauend auf einem regelmäßigen Gitter die wesentlichen Geländemerkmale, wie Geländekanten oder markante Höhenpunkte, als zusätzliche Vektordaten integriert sind.

Aufbauend auf dem allgemeinen Rahmen zur Datenreduktion beschreibt das Kapitel 5 Ansätze zur fachgerechten Aufbereitung der Topographie. Unter "fachgerecht" wird dabei eine Bereitstellung der Daten verstanden, die nicht bloß geometrische Kriterien erfüllt, sondern auch auf die speziellen Erfordernisse für die anschließende physikalische HN-Modellierung Rücksicht nimmt. So kommt vor allem der Datenaufbereitung innerhalb der Uferböschung in einer an die Fließrichtung angepassten Form eine große Bedeutung zu. Im Vorland hingegen existiert keine

praedominante Strömungsrichtung. Die Datenanordnung kann hier flächenhaft erfolgen, wobei auf eine gewisse Homogenität der Datenverteilung zu achten ist. Topographische Detailstrukturen sind insofern zu berücksichtigen, als diese abflussrelevant sind. Höher gelegene Bereiche, die von Überschwemmungen weniger betroffen sind, können daher generalisierter abgebildet werden als Bereiche im unmittelbaren Flussvorland. Zusätzlich zur Geländeform sind auch die Gebäude im Überschwemmungsgebiet sowie die Vegetation von Bedeutung.

Im Kapitel 6 schließlich werden die vorgestellten Strategien zum Aufbau einer präzisen geometrischen Datengrundlage, deren Reduktion auf den wesentlichen Inhalt und deren fachgerechte Aufbereitung anhand praktischer Beispiele hydrodynamisch-numerischer Simulationen getestet und die Ergebnisse kritisch diskutiert. Es wird sich dabei herausstellen, dass eine detaillierte Berücksichtigung der Topographie mit den heute verfügbaren Mitteln der numerischen Simulation möglich ist.

## 2 Grundlagen und Begriffsbestimmungen

In diesem Kapitel werden die für die vorliegende Arbeit relevanten Grundlagen beschrieben. Dabei sollen die im Titel der Arbeit vorkommenden Begriffe *Topographische Modelle* sowie *Anwendungen in Hydrologie und Hydraulik* präzisiert und die jeweils dahinter stehende Theorie erläutert werden. Da es sich um eine interdisziplinäre Arbeit zwischen den Fachgebieten Geodäsie und Hydrologie bzw. Kulturtechnik handelt, sollen dadurch dem in einem Gebiet geschulten Leser Einblicke in die Begriffe, Techniken und Strategien der jeweils anderen Fachrichtung ermöglicht werden.

### 2.1 Topographische Modelle

Die Beschreibung des Geländes in mathematischer Form wird als *Topographisches Modell* (griechisch: topos - der Ort, grafein - zeichnen, beschreiben) bezeichnet. Der Begriff ist eng mit dem des *Digitalen Geländemodells (DGM)* verbunden, zu welchem er eine Verallgemeinerung darstellt. Im Folgenden werden die beiden Begriffe generell synonym behandelt, wobei eine inhaltliche Differenzierung im Abschnitt 2.1.2 erfolgt.

Das DGM wurde bereits 1958 von C.L.Miller und R.A. Laflamme eingeführt. In den vergangenen 50 Jahren wurde das DGM nicht nur zu einem unverzichtbaren Bestandteil in Vermessung, Kartographie und Geo-Informationswesen, sondern auch immer mehr zu einer wesentlichen Eingangsgröße für Modelle anderer technischer und ökonomischer Fachgebiete. Im Rahmen dieser Arbeit interessiert besonders die Anwendung und Aufbereitung digitaler Geländemodelle als Geometrie-Daten für die hydrodynamisch-numerische oder hydrologische Modellierung. Der folgende Abschnitt gibt daher einen knappen Abriss über die Grundlagen des DGM sowie über die gebräuchlichen Datenstrukturen und Interpolationsverfahren.

#### 2.1.1 Allgemeine Definition

Für den Begriff *Digitales Geländemodell* existiert leider keine einheitliche, allgemein anerkannte Definition. Vielmehr wird er von verschiedenen Autoren leicht unterschiedlich ausgelegt, was zu einer gewissen begrifflichen Verwirrung geführt hat. Entsprechende Begriffsbestimmungen finden sich etwa in [Miller u. Laflamme, 1958], [Grossmann u. Kahmen, 1988], [Resnik u. Bill, 2003], etc. In aller Allgemeinheit kann der Begriff wie folgt festgelegt werden:

*Definition: Ein digitales Geländemodell ist eine mathematische Beschreibung der Erdoberfläche in digitaler Form.*

Diese Definition ist sehr allgemein gefasst und enthält keinerlei Festlegungen oder Einschränkungen hinsichtlich Datenstruktur, Parametrisierung, Interpolationsverfahren oder dergleichen. Häufig wird das DGM als finite Menge dreidimensionaler Raumpunkte  $(x,y,z)$  definiert.

Diese Formulierung legt die Interpretation nahe, dass es sich beim DGM um eine diskrete Funktion handle. Dem gegenüber sei an dieser Stelle ausdrücklich darauf hingewiesen, dass das DGM eine kontinuierliche Beschreibung der Erdoberfläche darstellt. Ob die Fläche durch eine Reihe von Stützpunkten, stückweise Flächen-Patches oder durch Parameter welcher Art auch immer beschrieben wird, ist dabei sekundär.

Demgemäß lässt sich das DGM auch sehr gut in den Begriffen der objektorientierten Programmierung (OOP) darstellen. Ein Objekt im Sinne der OOP besteht aus einer Sammlung von Daten und den dazugehörigen Funktionen (Methoden). Die grundlegende Funktion für DGM-Objekte ist die Interpolation von Geländehöhe, -neigung und -krümmung an jeder beliebigen Position. Wie bereits erwähnt ist es dabei unerheblich, ob diese Werte aus den benachbarten Stützpunkten, einem regelmäßigen Raster, bestimmten lokal gültigen Koeffizienten einer Funktion oder jeglicher anderen Datengrundlage ermittelt werden.

Ein weiterer wesentlicher Punkt bei der Begriffsfestlegung ist die Frage der Dimension. In der Regel versteht man unter einem DGM eine Funktion, die jeder beliebigen Position  $(x,y)$  des 2D-Raumes einen eindeutigen Geländehöhenwert zuordnet. Im mathematischen Sinne handelt es sich um die bivariate Funktion:

$$z = f(x, y) \quad (2.1)$$

wobei die beiden Variablen  $x$  und  $y$  die Grundriss-Koordinaten eines lokalen dreidimensionalen kartesischen Koordinatensystems, der Recht- bzw. Hochwert im Landeskoordinatensystem ( $z = f(re, ho)$ ) oder die geographische Länge und Breite ( $z = f(\phi, \lambda)$ ) sein können. Die Höhe  $z$  entspricht daher in den meisten Fällen zumindest genähert der Lotrichtung. Obwohl mathematisch betrachtet eine bivariate Funktion vorliegt, hat sich dafür im allgemeinen Sprachgebrauch die Bezeichnung *2.5D-Geländemodell* eingebürgert. Aufgrund der Tatsache, dass sich der Großteil der Erdoberfläche auf Basis dieser Definition beschreiben lässt und die Datenstrukturen einfach und effizient gehalten werden können, hat sich das 2.5D-DGM zur Beschreibung der Topographie im großen Stil durchgesetzt.

Mit der Formel 2.1 können allerdings weder exakt vertikale Formen noch Überhänge dargestellt werden. Dazu muss auf die implizite Form

$$f(x, y, z) = 0 \quad (2.2)$$

übergegangen werden, wobei man dann vom *3D-DGM* spricht (manchmal auch *Voll-3D* um den Gegensatz zum 2.5D-DGM zu betonen).

3D-DGMs sind für mehrdimensionale hydrodynamisch-numerische Modelle im Bereich von Brücken relevant. In den gängigen Implementierungen dieser Modelle behilft man sich allerdings, um den Mehraufwand einer echten 3D-Geometrie-Datenstruktur zu vermeiden, mit 2.5D Approximationen. In der vorliegenden Arbeit liegt der Schwerpunkt daher auf 2.5D-Geländemodellen. Für eine detailliertere Diskussion von 3D-DGMen sei auf die Fachliteratur verwiesen [Pfeifer, 2002], [Pfeifer, 2005].

## 2.1.2 Semantik

In diesem Abschnitt erfolgt eine inhaltliche Konkretisierung des DGM Begriffs, wobei die grundsätzliche Frage, welches DGM wird für die hydrodynamisch-numerische (HN)Modellierung benötigt wird, beantwortet werden soll.

### **Digitales Höhenmodell (DHM):**

Unter einem DHM versteht man die mathematische Beschreibung einer (nicht näher definierten) Oberfläche. Der Begriff wird oft synonym zum DGM gebraucht, obwohl er im Grunde eine Verallgemeinerung auf eine beliebige Fläche darstellt. Als DHM werden häufig auch Geländemodelle ohne Strukturlinien-Information (Geländekanten, Gerippelinien, ...) in regelmäßiger Rasterstruktur bezeichnet. Dies gilt insbesondere auch für die englische Bezeichnung *Digital Elevation Model (DEM)*. Vom U.S. Geological Survey (USGS) existiert dazu sogar ein eigenes DGM-Raster-Datenformat gleichen Namens. Für die weiteren Betrachtungen in dieser Arbeit wollen wir aber bei der allgemeineren Auslegung als Oberbegriff aller in der Folge eingeführten speziellen Oberflächen bleiben.

### **Digitales Geländemodell (DGM):**

Wie bereits in Abschnitt 2.1.1 ausgeführt, beschreibt das DGM die Erdoberfläche. Es repräsentiert die Topographie ohne jeglichen natürlichen oder künstlichen Bestand. Vegetation und Gebäude sind daher nicht Bestandteil des DGM. Sehr wohl zum DGM gerechnet werden allerdings alle Baulichkeiten, die sich nicht über die Oberfläche erheben, wie Straßen und Dämme. Interpretations-Spielraum besteht hinsichtlich der Objekte, die sich in die Oberfläche hinein oder aus dieser heraus entwickeln, wie etwa Kellerabgänge bzw. Brücken. Abgesehen von der bereits angesprochenen 3D-Problematik bleibt es Ansichtssache, ob das DGM z.B. die Brücken- oder die Wasseroberfläche enthält. Oftmals entscheidet hier die Anwendung, welcher Inhalt im DGM abgebildet sein soll. Qualitativ hochwertige Geländemodelle sollten in jedem Fall Geländekanten, Gerippelinien sowie markante Höhenpunkte enthalten. Diese beschreiben Unstetigkeitsstellen der Geländeneigung (Böschungskanten, Dammkronen, Grate, ...), sonstige charakteristische Geländelinien (weiche Geländekanten) bzw. für die lokale Geländeform wichtige Einzelpunkte (Mulden, Kuppen, ...) und tragen daher wesentlich zur Porträtierung des Geländes bei. Für die HN-Modellierung erfolgt weiter unten noch eine entsprechende inhaltliche Spezialisierung.

### **Digitales Oberflächenmodell (DOM):**

Im Gegensatz zum DGM beinhaltet das DOM (engl. Digital Surface Model, DSM) auch alle Objekte, die sich über die Erdoberfläche erheben. Es handelt sich also um diejenige Oberfläche, die ein Beobachter oder Messinstrument in der Vogelperspektive als erste wahrnimmt (Baumkronen, Hausdächer, ...). Das DOM kann als Oberfläche eines elastischen Schirms, welcher über das Gelände ausgebreitet ist, verstanden werden. Aus dieser Analogie erklärt sich auch der weitgehend synonym verwendete Begriff Digital Canopy Model (DCM), der vor allem in der englischsprachigen Literatur gebräuchlich ist. Im offenen Gelände stimmen DGM und DOM überein. In bebautem oder bewachsenem Gebiet hingegen liegt das DOM stets über dem DGM.

### **Normalisiertes Oberflächenmodell (nDOM):**

Das nDOM ist ein digitales Modell der Bestandshöhen, woraus die Definition:  $nDOM = DOM - DGM$  unmittelbar hervorgeht. Das nDOM wird häufig zur Detektion von Häusern oder Vegetation in unklassifizierten Datensätzen herangezogen. Für hydraulische Anwendungen ist es vor allem getrennt in Gebäude und Vegetation für die Festlegung von Rauigkeitsbeiwerten interessant.

### **Digitales Modell der Wasseroberfläche (DWM):**

Die Wasseroberfläche ist die Grenzschicht zwischen Wasser und Luft. Bei der Geländemodellierung von Fließgewässern wird diese oft als digitales Modell benötigt. So kann beispielsweise die Wasser-Land-Grenzlinie aus dem Verschnitt aus DWM und DGM ermittelt werden. Neben der Ist-Wasseroberfläche zum Zeitpunkt der Messung ist auch noch die prognostizierte Wasseroberfläche als Ergebnis einer HN-Modellierung von Bedeutung, auf deren Basis sich dann durch Verschnitt mit dem DGM die Überschwemmungsgrenze ermitteln lässt.

### **Digitales Geländemodell des Wasserlaufs (DGM-W):**

Anwendungen im Bereich der HN-Modellierung erfordern eine weitere Spezialisierung des DGM-Begriffes auf das *Digitale Geländemodell des Wasserlaufs (DGM-W)*. Gemäß [Mandlbürger u. Brockmann, 2001] versteht man unter einem DGM-W ein digitales Geländemodell, welches den abflusswirksamen Bereich eines Flusslaufes einschließlich des Gewässerbetts enthält. Im DGM-W müssen daher auch alle abflusshindernden Elemente wie Pfeiler und Widerlager von Brücken, Kraftwerken sowie Schleusen abgebildet sein. Gebäude im Flussvorland können entweder mit korrekter Geometrie im DGM-W enthalten sein oder bei der anschließenden HN-Modellierung in Form von Rauigkeitsbeiwerten berücksichtigt werden. Besteht aus Sicht der HN-Modellierung die Anforderung neben den Brückenpfeilern auch die Brückenkörper zu erfassen, dann muss auf ein 3D-DGM-W übergegangen werden, worauf in der Folge aber nicht weiter eingegangen wird. In der Praxis begnügt man sich heutzutage mit der Erfassung der Pfeiler und der zusätzlichen Höhenangabe der Unter- und Oberkante des Brückenkörpers.

Zum Abschluss dieses Abschnittes sind in Tabelle 2.1 die verschiedenen Modell-Begriffe, ihre Abkürzungen sowie die englischen Synonyme zusammengestellt. Einen Überblick über die unterschiedlichen DGM-Varianten gibt auch [Pfeifer, 2003].

### **2.1.3 Anwendungen**

Für die unterschiedlichsten Anwendungsgebiete lässt sich auf Basis des DGM ein breites Spektrum an Folgeprodukten ableiten. In der folgenden Liste sind einige der typischen Derivate und deren exemplarische Anwendungsgebiete aufgeführt. Für einige der aufgezählten Anwendungen finden sich Beispiele in der Abb. 2.1.

- Höhenlinien/Isolinien (Kartographie, Meteorologie)
- Reliefschummerung (Kartographie, Visualisierung)

- Farbkodierte Darstellung (GIS, Visualisierung)
- Neigungskarten (Landwirtschaft, Lawinerverbauung)
- Expositionskarten (Landwirtschaft)
- Krümmungskarten (automatische Kantenextraktion)
- Längs- und Querprofile (Straßenbau, Hydraulik)
- Perspektivansichten (Visualisierung, Tourismus)
- Sichtbarkeitskarten (Telekommunikation, GPS-Planung)
- Differenzmodelle (Dokumentation von Massenbewegungen, Gefahrenzonenpläne)
- Verknüpfung mehrerer digitaler Modelle (Erosionsgefährdungskarten)

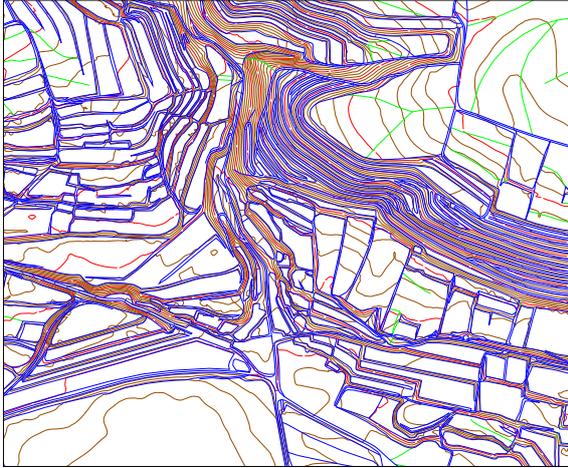
## 2.1.4 Datenerfassung

Zur Beschreibung der Geländeoberfläche in Form eines DGM werden als Primärdaten in aller Regel punkt- und linienhafte Objekte erfasst. Während glatte Oberflächenbereiche durch eine Menge von regelmäßig oder unregelmäßig angeordneten Massenpunkten (bulk points) beschrieben werden, dienen markante Höhenpunkte (spot heights) zur Definition von ausgezeichneten Stellen wie Gipfeln und Mulden. Diskontinuitäten im homogenen Geländeverlauf werden durch Geländekanten (break lines) modelliert, welche die Fläche meist in unabhängige Interpolationsgebiete teilen. Typische Beispiele dafür sind Böschungskanten, Dammkronen, Berggrate und dergleichen. Geländekanten sind ein unverzichtbarer Bestandteil qualitativ hochwertiger Geländemodelle. Gerippelinien (form lines) schließlich werden als *weiche Geländekanten* bezeichnet und dienen der zusätzlichen Modellierung des Geländes in Form eines Liniengerüsts.

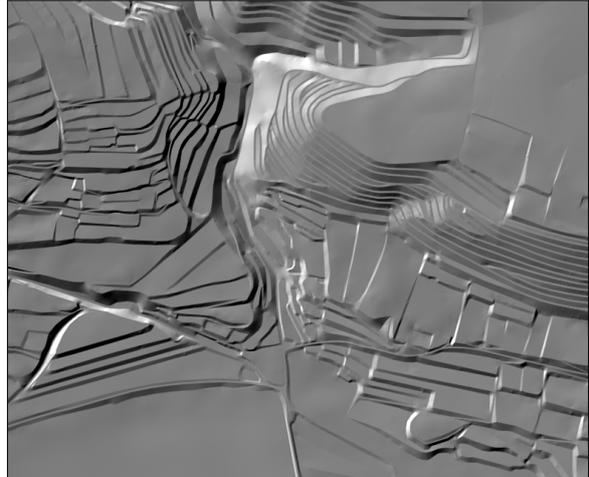
Zur Erfassung dieser Objekte stehen unterschiedliche Methoden zur Verfügung. Die wesentlichen Parameter für die Wahl der geeigneten Erfassungsmethode sind die geforderte Genauigkeit und Auflösung des DGM sowie die Größe des Projektgebietes. Wie in Abschnitt 2.1.2

*Tabelle 2.1: DGM-Begriffsübersicht*

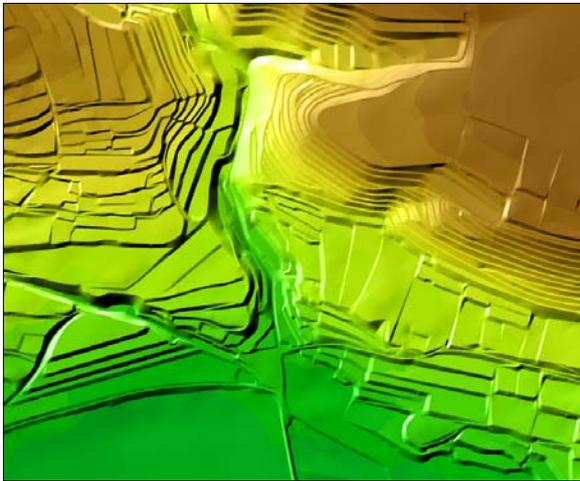
Bezeichnung	Abk.	engl. Bezeichnung	Abk.
Digitales Höhenmodell	DHM	Digital Elevation Model	DEM
Digitales Geländemodell	DGM	Digital Terrain Model	DTM
Digitales Oberflächenmodell	DOM	Digital Surface Model	DSM
		Digital Canopy Model	DCM
Normalisiertes Oberflächenmodell	nDOM	Normalized DSM	nDSM
		Normalized DCM	nDCM
Digitales Wasseroberflächen-Modell	DWM	Digital Watersurface Model	DWM
Wasserlauf DGM	DGM-W	Watercourse DTM	DTM-W



Höhenlinien + Geländekanten



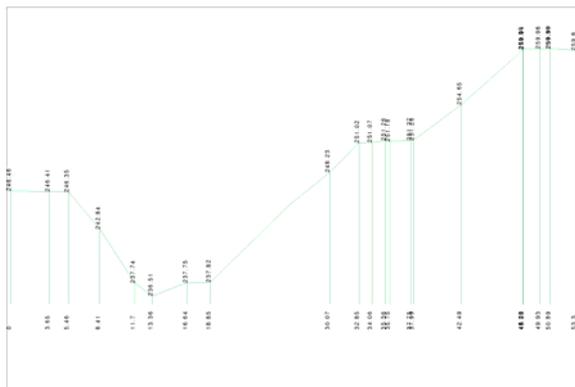
Reliefschummerung



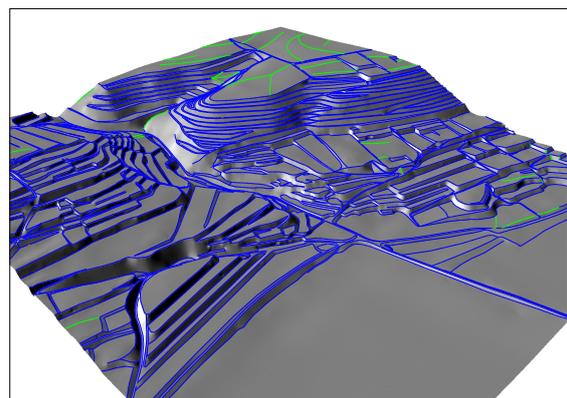
Farbkodierte Darstellung + Relief



Neigungskarte



Profilschnitt



Perspektivansicht

Abbildung 2.1: DGM-Anwendungsbeispiele; Daten: Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen (BEV)

erläutert, ist zum Aufbau eines DGM-W die Erfassung des Flussvorlandes und des Gewässerbettes erforderlich. Im Folgenden werden zunächst die verschiedenen Methoden zur Erfassung des Vorlandes beschrieben. Daran anschließend werden Techniken zur Aufnahme der Gewässersohle behandelt.

## **Terrestrische Vermessung**

Aus historischer Sicht stellt die tachymetrische Punktbestimmung die klassische Art der Geländeerfassung für Abflussmodellierung dar. Von einem Instrumentenstandpunkt aus werden Einzelpunkte durch Messung von Richtungswinkel, Zenitdistanz und schräger Strecke bestimmt. Durch Zusammenhängen von Einzelpunkten zu einem Polygonzug können auf dieselbe Art Geländekanten erfasst werden. Neben dieser konventionellen Technik wird zunehmend auch das Global Positioning System (GPS) als Alternative eingesetzt. Die Abtastung des Geländes erfolgt in jedem Fall im Maßstab 1:1. Terrestrische Techniken können vor allem im Rahmen von eindimensionaler Abflussmodellierung eingesetzt werden, da die Erfassung der Topographie in diesem Fall in Form einzelner ausgewählter Profile (linkes Vorland - Flusssohle - rechtes Vorland) erfolgt. Generell kann festgehalten werden, dass die Einzelpunkte mit terrestrischen Verfahren zwar sehr genau bestimmt werden können (etwa 1cm-Genauigkeit), eine flächenhafte Aufnahme mit entsprechender Punktdichte aber nicht wirtschaftlich ist. Für mehrdimensionale Abflussmodellierung werden daher bevorzugt Techniken mit höherem Automatisierungsgrad eingesetzt. Auf terrestrisches Laserscanning (TLS) wird weiter unten eingegangen.

Literatur: [Grossmann u. Kahmen, 1985], [Kahmen, 1986]

## **Photogrammetrie**

Die Standardmethode der großflächigen DGM-Datengewinnung ist die photogrammetrische Messung aus Stereobildern. Analytische Stereo-Auswertegeräte erlauben eine automationsunterstützte Messung eines Punktgitters, wobei der Operateur lediglich die Höhen einstellen muss, während die Auswertesoftware das Anfahren der Geländepunkte übernimmt. Digitale photogrammetrische Stationen bieten darüber hinaus eine vollautomatische Höhenmessung durch Einsatz von Bildkorrelation. Unter der Voraussetzung ausreichender Textur zur Punktidentifikation können Massenpunkte, Geländekanten, Gerippelinien und markante Höhenpunkte im Stereomodell gemessen werden. Die photogrammetrische Luftbildmessung stellt somit eine vollständige Methode zur Erfassung qualitativ hochwertiger DGMe dar, die sich auch bei großen Projektgebieten eignet. Je nach Flughöhe und Brennweite des Kameraobjektivs lassen sich Genauigkeiten von 20 bis 100 cm erzielen. Der mittlere Punktabstand beträgt dabei typischerweise 10 bis 50 m. Nicht unerwähnt bleiben soll der Mehrwert dieser Methode, da die Luftbilder über die DGM-Datenerfassung hinaus auch noch zur Dokumentation, zur Orthophoto-Erstellung und Auswertung von Situationselementen (z.B. Wasser-Land-Grenzlinie) herangezogen werden können.

Literatur: [Kraus, 2004], [Kraus, 1996], [Kraus, 2000]

## Radar Interferometrie

Unter allen Methoden der Fernerkundung gewinnt zur DGM-Datenerfassung vor allem die Interferometrie mittels Synthetic Aperture Radar (InSAR) immer mehr an Bedeutung. Diese Technik kann entweder vom Satelliten aus (spaceborne) oder vom Flugzeug aus (airborne) eingesetzt werden. Grundsätzlich werden dabei von zwei quer zur Flugrichtung montierten Antennen gepulste Mikrowellen ausgesendet, deren zurückgestreute Intensität (Amplitude) und Phasenlage an den entsprechenden Empfangseinheiten registriert werden. Aus den gemessenen Phasenlagen an beiden Antennen kann ein Differenzbild (Interferogramm) berechnet werden, welches die Ableitung relativer Höhenunterschiede erlaubt. Zur Auflösung der Phasenmehrdeutigkeiten (Anzahl der vollen Wellenlängen) benötigt man in jedem Fall ein genähertes DGM. Während sich die Höhengenaugigkeit für spaceborne InSAR im Bereich einiger Meter bewegt und deswegen für Anwendungen in der Hydraulik ungeeignet ist, erzielt man bei Flugzeug-getragendem InSAR Genauigkeiten im Bereich einiger Dezimeter.

Literatur: [Kraus, 2000], [Konecny, 2003]

## Laserscanning

Seit seiner Einführung in den 1990-er Jahren hat sich das Flugzeug-getragene Laserscanning (Airborne Laser Scanning, ALS) in den letzten Jahren zur bedeutendsten Datenerfassungsmethode entwickelt, sofern es um präzise und hochauflösende Geländemodelle geht. Das Messprinzip ist dabei relativ einfach: Eine in einem Flugzeug montierte Sendeeinheit emittiert sehr kurze Laserpulse. Das Lasersignal wird an der Erdoberfläche sowie an der Vegetation und an Gebäuden reflektiert, und Teile des rückgestreuten Signals werden an einer Empfangseinheit detektiert. Aus der Laufzeit des Signals kann die schräge Entfernung ermittelt werden. Eine bewegliche Einheit (z.B. schwingender oder rotierender Spiegel) sorgt für die Ablenkung des Laserstrahls quer zur Flugrichtung, wobei der Auslenkwinkel (bank angle) zusätzlich zur Streckenmessung registriert wird. Die Bestimmung der absoluten Position sowie der Drehwinkel des Laserscanners erfolgt mittels GPS und einer inertialen Messeinheit (Inertial Measurement Unit, IMU). Die typische Höhenmessgenauigkeit beim Einsatz von ALS-Systemen beträgt etwa 10 bis 20 cm. Die Pulsrate wurde in den letzten Jahren kontinuierlich gesteigert, wodurch sich auch die erzielbare Punktdichte ständig erhöhte. Derzeitige kommerzielle Systeme liefern in Abhängigkeit von Flughöhe bzw. -geschwindigkeit und Pulsrate zwischen einem und zehn  $\text{Punkten}/\text{m}^2$ . Diese hohe Punktdichte ermöglicht auch bereits die Ableitung von expliziter Linieninformation (Geländekanten) auf Basis der Laserscanner-Punktswolke, worauf im Abschnitt 3.4 näher eingegangen wird.

Die Datenerfassung beim ALS erfolgt streifenweise. Der Überlappungsbereich benachbarter Flugstreifen kann zur gegenseitigen Orientierung herangezogen werden. Zur Verbesserung der direkten Georeferenzierung mittels GPS und IMU empfiehlt es sich, in den Modellecken Passflächen (z.B. geneigte Hausdächer) zu messen und die Orientierung des gesamten Modellverbandes in einer Blockausgleichung zu verbessern. Gerade die hohen Genauigkeitsansprüche bei der Abflussmodellierung erfordern eine präzise Bestimmung der Georeferenzierung vor der DGM Berechnung.

Zur Untersuchung von lokal begrenzten Flussabschnitten wird zunehmend auch terrestrisches Laserscanning (TLS) eingesetzt [Hofbauer, 2003]. Das Prinzip der Streckenmessung ist daselbe wie beim ALS. Der Laserscanner ist dabei - wie ein Theodolit - auf einem Stativ montiert.

Ein Schrittmotor sorgt für die Drehung um die vertikale Achse, während ein um die horizontale Achse rotierender Spiegel das Lasersignal ablenkt. Es handelt sich also wie bei der Tachymetrie um ein polares Messsystem, bei dem Richtungswinkel, Höhenwinkel und Entfernung gemessen werden. Durch die hohe Punktdichte von mehreren dutzend Punkten/m<sup>2</sup> ermöglicht das TLS eine sehr detaillierte Erfassung des Geländes in einem begrenzten Bereich. Als Einsatzgebiete für TLS seien Überwachung der Flussmorphologie, Bestimmung von Rauigkeitsparametern und die Geländeerfassung für drei-dimensionale Abflussmodellierung genannt.

Literatur: [Ackermann, 1999], [Kraus, 2000]

## Echolot

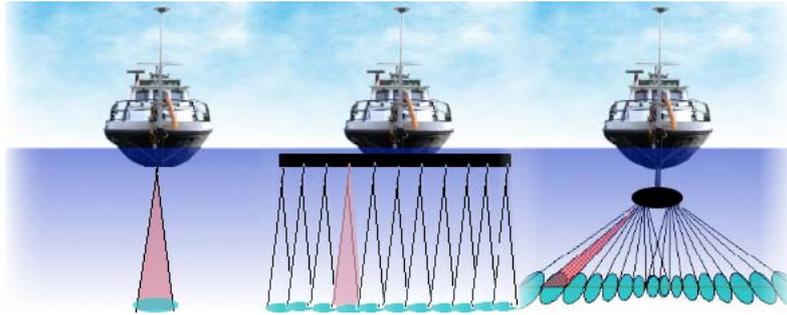
Zur Aufnahme des Gewässerbetts eignet sich von den bislang vorgestellten Datenerfassungsmethoden nur die tachymetrische Punktbestimmung bzw. GPS. Diese Technik ist aber nur für geringe Wassertiefen einsetzbar. Für größere Flüsse werden daher hydroakustische Verfahren (Echolot) eingesetzt. Dabei werden von einer auf einem Messschiff montierten Sendeeinheit ein oder mehrere Schallimpulse emittiert. Die Schallwelle wird an der Gewässersohle reflektiert und Teile des rückgestreuten Echos werden an einer Empfangseinheit detektiert. Die Berechnung der Wassertiefe (depth  $d$ ) erfolgt aus der Laufzeit ( $\Delta t$ ) der Schallwelle durch die Beziehung  $d = \frac{\Delta t}{2} c$ , wobei  $c$  die Schallgeschwindigkeit bezeichnet. Diese ist im wesentlichen eine Funktion der Temperatur  $T$ , des Drucks  $p$  oder der Wassertiefe  $d$  und des Salzgehaltes  $S$ , also  $c = f(T, p, S) = f'(T, d, S)$ . Die mittlere Schallgeschwindigkeit  $\bar{c}$  ergibt sich dann durch Integration über die Wassertiefe zu  $\bar{c} = \frac{d-d_0}{\int_{d_0}^d c(d)}$ .

Um dreidimensionale Koordinaten im übergeordneten Projektkoordinatensystem zu erhalten, ist das Messschiff zusätzlich zum hydroakustischen Sensor (Schwinger) noch mit einem GPS-Empfänger ausgestattet, was eine kontinuierliche Bestimmung der Position und Ausrichtung des Messschiffs erlaubt. Die Positionsbestimmung kann auch über kontinuierliche Polarortung mittels Servo-Theodolit und automatischer Zielverfolgung erfolgen. Statt des Theodolits kann auch ein terrestrischer Laserscanner mit entsprechender Zielverfolgungssoftware eingesetzt werden. In beiden erfolgt die Verfolgung des Messschiffs vom Ufer aus. Für eine real-time Punktbestimmung müssen die Positionierungsdaten daher via Telemetrie zum Messschiff übertragen werden.

Vom Typ her unterscheidet man prinzipiell folgende Systeme:

- Einzelschwinger (single beam echosounder)
- Mehrfachschwinger (multi-single beam echosounder)
- Fächerlot (multi beam echosounder)

Mehrfachschwinger-Systeme bestehen dabei aus einer Reihe von Einzelschwingern, die senkrecht zur Fahrtrichtung des Messschiffs angeordnet sind. In beiden Fällen wird die Wassertiefe senkrecht unter dem Schwinger gemessen. Einzelschwinger-Systeme liefern daher eine profilweise Anordnung der Messpunkte, die in der Gewässervermessung vor allem zur Erfassung der Geometrie von Querschnitten eingesetzt wird. Auf die besonderen Probleme bei der Interpolation der Gewässersohle aus meist weitabständigen Einzelschwinger-Profilen wird im



*Abbildung 2.2: Echolot-System: Einzelfschwinger, Mehrfachschwinger, Fächerlot)*

Abschnitt 3.1 eingegangen. Aufnahmen mit Mehrfachschwingern ergeben eine Reihe paralleler Profillinien und werden bevorzugt in Fließrichtung etwa zur Vermessung der Fahrrinne ausgeführt.

Beim Fächerlot wird der Schallimpuls in einer Ebene quer zur Fahrtrichtung gleichzeitig in verschiedene Richtungen ausgesandt und das reflektierte Signal von gerichteten Antennen detektiert. Durch die gleichzeitige Vorwärtsbewegung des Messschiffs wird die Gewässersohle dabei flächenhaft gescannt. Die Größe des Aufnahmebereichs ist dabei von der Wassertiefe und dem maximalen Auslenkwinkel abhängig. Von allen Echolot-Systemen erzielt man mit dem Fächerlot den größten Informationsgehalt (Punktdichte). Wegen der Größe der Apparatur kommt der Einsatz allerdings nur auf entsprechend großen Vermessungsschiffen und daher nur bei größeren Flüssen in Frage. Der Tiefgang solcher Schiffe erschwert auch die Aufnahme der Uferbereiche, weshalb die profilbasierte Aufnahme der Gewässersohle mit Einzelfschwingern auch heute noch vielerorts zum Einsatz kommt.

Literatur: [de Jong u. a., 2002], [Böth u. Brockmann, 2002]

## **Laser Bathymetrie**

Die Erfassung der Gewässersohle mittels Echolot-Verfahren ist vor allem für große Wassertiefen geeignet. Insbesondere beim Fächerlot vergrößert sich der abgetastete Bereich mit zunehmender Wassertiefe. Allerdings ist diese an ein Messschiff gebundene Aufnahmetechnik aufwändig und versagt darüber hinaus in Flachwasserbereichen und damit in Ufernähe.

Eine Alternative stellt hier die Flugzeug-getragene Laser Bathymetrie (Airborne Laser Bathymetry, ALB) dar. Das Verfahren, welches praktisch gemeinsam mit der Erfindung des Lasers in den späten 1960-er Jahren seinen Anfang nahm, beruht auf der Verwendung eines Lasers mit zwei unterschiedlichen Wellenlängen. Die Wassertiefe kann dann aus der Laufzeitdifferenz der an der Wasseroberfläche bzw. der Gewässersohle reflektierten Lasersignale berechnet werden. Bei den meisten Systemen wird ein Laser im nahen Infrarotbereich mit einer Wellenlänge von 1064 nm zur Erfassung der Wasseroberfläche eingesetzt, während sich ein grün-blauer Laser mit einer Wellenlänge von 532 nm für die Durchdringung des Wassers und Reflexion an der Gewässersohle als optimal herausgestellt hat. Im Gegensatz zur Ausbreitung des Lasersignals in der Luft, wo die Größe des Abtastflecks (footprint) am Boden im wesentlichen vom Öffnungswinkel der Sendeoptik und weniger von der Strahlbrechung in der Atmosphäre abhängt, kommt es bei der Durchdringung des Wassers durch das grün-blaue Lasersignal wegen

der Refraktion im optisch dichteren Medium zu einer deutlichen, etwa kegel- oder vulkanförmigen Strahlaufweitung. Der footprint am Grund ist also deutlich größer als der an der Wasseroberfläche. Das führt in der Folge dazu, dass an der Empfangsoptik das Signal über den Luft-Wasser-Luft-Weg mit geringerer Intensität registriert wird. Da die Lokalisierung der rückgestreuten Echos aber in der Regel über ein Schwellwertverfahren erfolgt, ist die unterschiedliche Stärke der beiden Signale für die Bestimmung der Wassertiefe unbedeutend.

Die Einsetzbarkeit der Laser Bathymetrie ist in erster Linie von der Klarheit des Wassers begrenzt. Mit anderen Worten, die maximale messbare Wassertiefe hängt von der Trübheit des Wassers ab und kann zwischen wenigen Metern bei trüben Verhältnissen bis zu einigen Zehner-Metern bei klarem Wasser reichen. Die Klarheit des Wassers wird dabei üblicherweise durch den Koeffizienten  $K_d$  beschrieben, der die diffuse Dämpfung beschreibt und diejenige Distanz angibt, bei der die Lichtintensität  $\frac{1}{e}$  seines ursprünglichen Wertes eingebüßt hat.

Hauptanwendungsgebiet für die Laser Bathymetrie ist die Vermessung von Küstengewässern. Hier gibt es eine Reihe von Publikationen und Erfahrungsberichten. Für die Erfassung des Flussbettes ist die Methode aufgrund der tendentiell trüberen Wasserverhältnisse weniger gut geeignet. Auch bleibt zu erwähnen, dass der Bereich bis zu ein Meter Wassertiefe durch dieses Verfahren wegen der geringen Laufzeitdifferenz des infraroten bzw. grün-blauen Signals kaum detektierbar ist, d.h. auch die Laser Bathymetrie im unmittelbaren Uferbereich versagt. Ein wesentlicher Vorteil für die Fließgewässer-Vermessung bestünde darin, dass mit ALB-Systemen simultan die Topographie und das Gewässerbett erfasst werden könnte, wogegen bei allen anderen Erfassungsmethoden Daten unterschiedlicher Herkunft fusioniert werden müssen.

Literatur: [LaRocque u. West, 1999], [Guenther u. a., 2000]

## 2.1.5 Datenstrukturen

Bis jetzt wurden die allgemeine Definition topographischer Modelle, ihre inhaltliche Einteilung und die zugrunde liegenden Datenerfassungsmethoden erörtert. Alle diese Ausführungen waren bis dato unabhängig von der computermäßigen Organisation der Daten. Die gängigsten Datenstrukturen für 2.5D-Geländemodelle werden in diesem Abschnitt vorgestellt.

### Raster-/Gittermodell

Die einfachster DGM-Datenstruktur ist das regelmäßige Raster. Dabei ist die XY-Ebene in rechteckige Zellen gleicher Größe eingeteilt und jedem Rasterelement wird genau ein Höhenwert zugewiesen. Am gebräuchlichsten sind dabei quadratische Zellen. Ein *Rastermodell* kann - ganz ähnlich wie ein digitales Bild - als Matrix von Höhenwerten betrachtet werden. Durch diese enge Verwandtschaft zur digitalen Bildverarbeitung erklärt sich auch die große Verbreitung dieser Datenstruktur. Alle aus der Bildverarbeitung bekannten Operationen sind sinngemäß auch auf Raster-DGMe anzuwenden. So lassen sich z.B. analog zu Bildpyramiden unterschiedliche Auflösungsstufen (Level of Detail, LOD) durch wiederholte Anwendung von Gauß'schen Filtern erzeugen.

Gemäß der Analogie zur Bildverarbeitung bezieht sich im Rastermodell die Höhe auf eine ganze Zelle. Der repräsentative Punkt ist daher der Zellmittelpunkt. Um beispielsweise einen

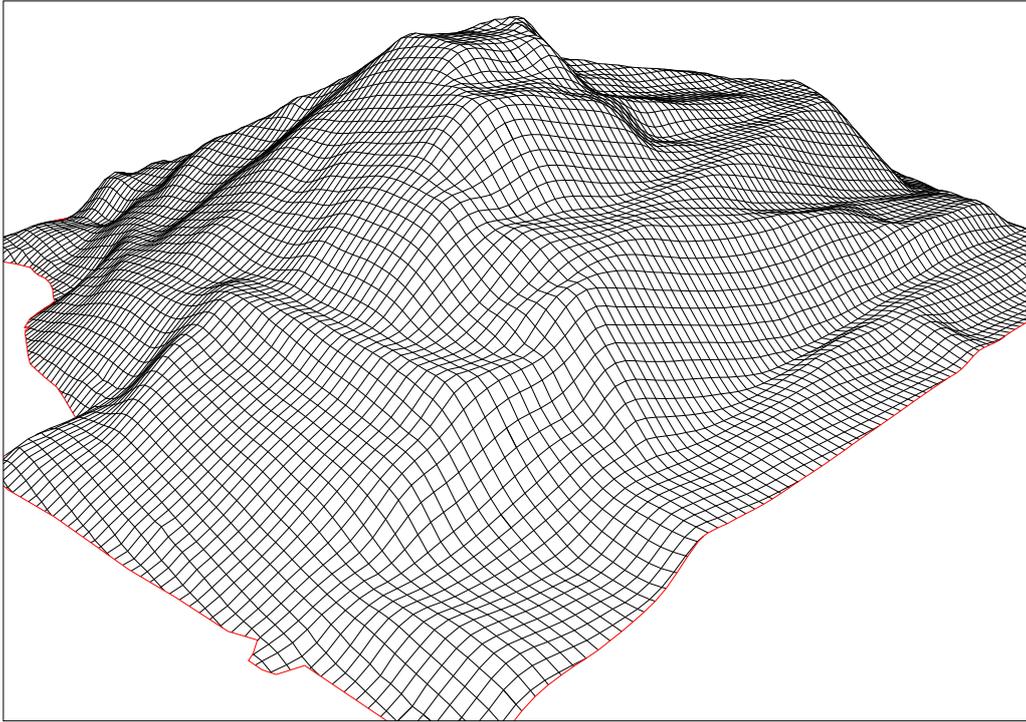
$100 \times 100 \text{ m}^2$  großen Geländeausschnitt bei einer Zellgröße von  $5 \times 5 \text{ m}^2$  vollständig zu beschreiben, werden  $20 \times 20 = 400$  Elemente benötigt. Das Rastermodell ist wieder in Analogie zum digitalen Bild ein Treppenmodell. Im Unterschied dazu werden bei einem *Gittermodell* nicht die Höhen der Zellmittelpunkte sondern der Schnittpunkte der Gitterlinien gespeichert. Die Höhen innerhalb einer Gitterzelle werden aus den umliegenden Gitterpunkten durch bi-lineare Interpolation oder durch Interpolation höherer Ordnung ermittelt. Für denselben Flächenbereich wie beim obigen Beispiel benötigt man daher  $21 \times 21 = 441$  Gitterpunkte. Ganz allgemein gilt: Die Anzahl der Punkte im Gittermodell ist pro Koordinatenrichtung um eins höher als die Anzahl der Zellen im Rastermodell. Trotz seiner großen Verwandtschaft mit dem Rastermodell besteht der wesentliche Unterschied darin, dass es sich beim Gittermodell um eine Vektor-Datenstruktur handelt, deren kleinster Bestandteil die Gittermasche darstellt. In diesem Sinne ist das regelmäßige Gitter ein Spezialfall der allgemeineren, unregelmäßigen Gitter.

Mitverantwortlich für die große Verbreitung der Raster-/Gitterdatenstruktur ist die Verfügbarkeit weltweiter Datensätze. Zu nennen sind hier das globale DGM *GTOPO30* (USGS, Auflösung:  $30'' \approx 1 \text{ km}$ ) und das *SRTM* Modell (Shuttle Radar Topographic Mission, NASA, Auflösung:  $3'' \approx 100 \text{ m}$ ). Die *SRTM* Daten decken den Bereich von  $60^\circ$  südlicher bis  $60^\circ$  nördlicher Breite ab, und wurden im Jahr 2000 vom Space Shuttle *Endeavor* in einer elftägigen Mission mittels InSAR aufgenommen. Das *SRTM*-DGM wird auch, quasi als Verbesserung von *GTOPO30*, in einer reduzierten Auflösung von  $30''$  angeboten. Interessantes Detail dabei ist, dass *GTOPO30* als Raster und das *SRTM* Modell als Gitter ausgeliefert wird. Da für die Geländemodellierung die Gitter-Interpretation vorteilhafter ist, wird diese in der Folge bevorzugt gegenüber der des Rasters verwendet. Im Bedarfsfall ist ein Überführen der beiden Datenstrukturen durch Interpolation möglich.

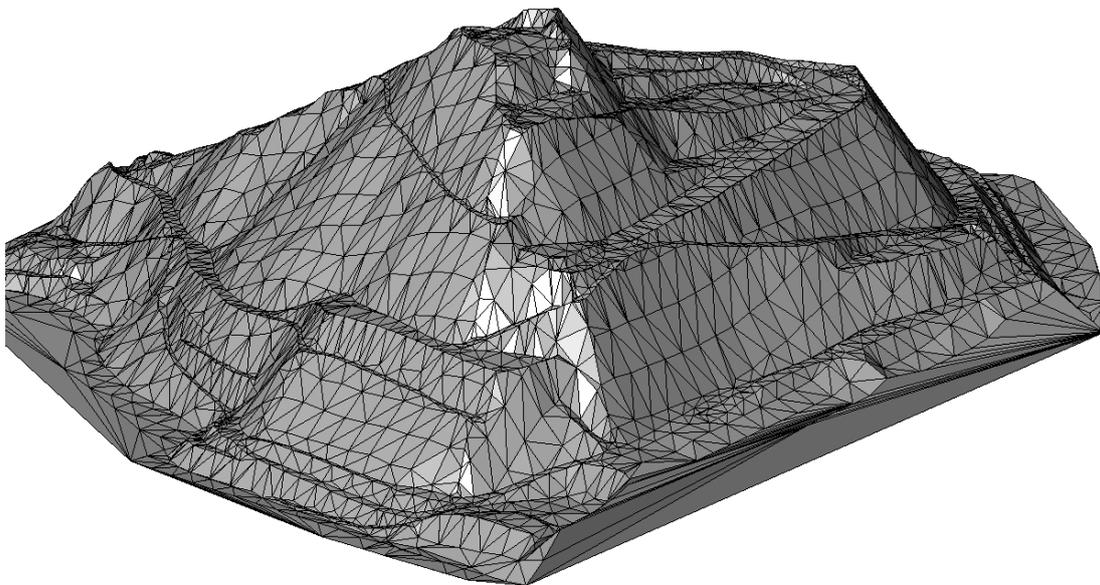
Ein wesentlicher Vorteil der regelmäßigen Gitterstruktur besteht in ihrer Kompaktheit, da lediglich die Höhen der Gitterpunkte, die XY-Koordinaten eines Eckpunkts (meist linke untere Ecke) und die Dimension der Gitterzelle gespeichert werden müssen. Aus den Koordinatendifferenzen zum Eckpunkt kann für jede beliebige XY-Position einfach der zugehörige Zeilen- und Spaltenindex und damit die Höhe bestimmt werden. Der Aufbau einer expliziten Topologie ist bei dieser Datenstruktur nicht erforderlich, da diese über die Indizes der Höhenmatrix implizit gegeben ist. Die Zeilen und Spalten der Höhenmatrix stellen auch unmittelbar einen räumlichen Index zur Verfügung, wodurch ein Direktzugriff (random access) möglich ist. Nachteilig hingegen ist, dass die Zellgröße den Detaillierungsgrad der abzubildenden Oberfläche beschränkt. Geländeformen kleiner als die Gitterzelle können also nicht modelliert werden. Weiters ist es nicht möglich, linienhafte Information wie Geländekanten in dieser Datenstruktur abzubilden. Und schließlich soll noch erwähnt werden, dass die primär gemessenen Geländepunkte nicht direkt in der Datenstruktur enthalten sind, zumal diese meist unregelmäßig angeordnet sind. Das regelmäßige Gitter muss vielmehr durch geeignete Interpolationsverfahren berechnet werden (siehe 2.1.6).

### **Triangular Irregular Network (TIN)**

Im Gegensatz zum regelmäßigen Gitter gehen beim *Triangular Irregular Network (TIN)* die gemessenen Datenpunkte direkt in die Datenstruktur ein. Wie der Name sagt, wird das Gelände durch ein Netzwerk unregelmäßig verteilter Dreiecksflächen beschrieben, wobei jeweils zwei Punkte (Knoten) zu einer Kante und drei Kanten zu einer Dreiecksfläche verbunden sind. Im



*Abbildung 2.3: DGM in regelmäßiger Gitterstruktur*



*Abbildung 2.4: DGM in TIN-Datenstruktur*

Rahmen der Netzgenerierung muss diese Topologie explizit aufgebaut werden, worauf im Abschnitt 2.1.6 näher eingegangen wird.

Das TIN hat im GIS-Bereich aber auch bei einigen ingenieurwissenschaftlichen Anwendungen eine starke Verbreitung gefunden. In allen Bereichen der Mechanik wird es vor allem deswegen bevorzugt eingesetzt, weil die numerische Lösung von komplexen physikalischen Problemen oft auf Basis einer Diskretisierung in einzelne unregelmäßig verteilte Knoten und Dreiecksflächen erfolgt (z.B. Finite Elemente Methode). Dies gilt insbesondere auch für die HN-Modellierung.

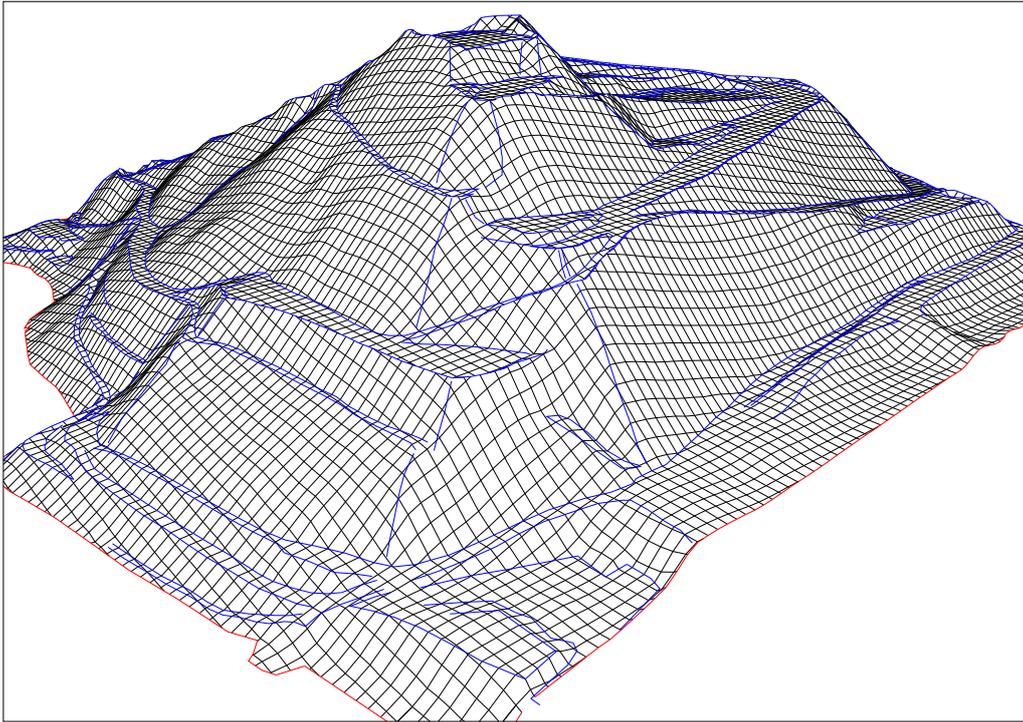
Für die Beschreibung der Topographie birgt diese Datenstruktur allerdings den Nachteil, dass bei ungünstiger Punktanordnung unmotivierte Zacken im Höhenlinienbild entstehen können. (vgl. [Kraus, 2000]). Diese weisen auf unwahrscheinliche Neigungsverhältnisse in der Fläche hin. Außerdem knicken die Höhenlinien am Übergang von einer Dreiecksfläche zur anderen ab. Dieser Effekt kann nur durch Glättung der Höhenlinien (suboptimal) oder durch Verwendung von Flächen höherer Ordnung, wie etwa Bezier-Flächen, vermieden werden. Für letztere müssen allerdings zusätzlich zur einfachen Knoten-Kanten-Flächen-Topologie auch noch die Flächennormalen in allen Knoten berechnet werden.

Im Gegensatz zum glatten Gelände ist das Abknicken der Höhenlinien entlang von Geländekanten eine gewünschte Eigenschaft. Für diese Bereiche ist ein TIN daher auch aus topographischer Sicht eine geeignete Datenstruktur. Vorteilhaft ist darüber hinaus, dass das Gelände auch bei großen Punktabständen durch die ebenen Dreiecksflächen hinreichend beschrieben wird. Paradebeispiel dafür ist ein ebener Sportplatz, welcher als TIN mit vier Punkten (zwei Dreiecken) ausreichend genau erfasst ist, während beim regelmäßigen Gitter entsprechend viele Höhenwerte gespeichert werden müssen. Abschließend zu diesem Abschnitt sei noch erwähnt, dass das TIN auch als Basis für 3D-DGMe geeignet ist.

### **Hybride DGM-Struktur**

Die hybride DGM-Struktur [Köstli u. Sigle, 1986] vereint die Vorteile von regelmäßigem Gitter und TIN. Die Basisstruktur ist dabei ein regelmäßiges Gitter, in welches Geländekanten, Strukturlinien und markante Höhenpunkte eingekettet sind. Während die rasterförmige Grundstruktur einen direkten Zugriff auf die Höhendaten erlaubt, sorgen die integrierten Geländekanten für eine präzise und scharfe Modellierung an Unstetigkeitsstellen der Geländehöhe oder -neigung. Darüber hinaus ist bei der im Programmsystem SCOP implementierten hybriden DGM-Struktur ein hierarchischer Ansatz integriert, indem das gesamte Interessengebiet in kleinere Teilgebiete (Recheneinheiten) unterteilt ist [Köstli u. Sigle, 1986]. Die Interpolation und auch ggf. Aktualisierung des DGM kann daher lokal erfolgen, was sich einerseits positiv auf die Performance auswirkt und andererseits die Grundlage für die Abarbeitung sehr großer Datensätze darstellt.

Aus Abbildung 2.5 ist ersichtlich, dass die Gitterlinien an den Geländekanten abknicken, was auch das erwünschte Knicken der Höhenlinien bedingt. In den glatten Geländebereichen hingegen sind die Gitterlinien ungebrochen und die Höhenlinien weisen einen glatten Verlauf auf. Gegenüber der reinen Gitterstruktur wird die Qualität der Geländebeschreibung durch die Integration der Geländekanten in die DGM-Datenstruktur deutlich erhöht. Diese sind unverzichtbarer Bestandteil von geomorphologisch hochwertigen Geländemodellen. Durch die Möglichkeit, Kleinformen wie etwa Gräben durch Geländekanten zu erfassen, kann bei der



*Abbildung 2.5: DGM in hybrider Datenstruktur*

hybriden DGM-Struktur ohne Genauigkeitsverlust eine größere Maschenweite als bei reinen Rastermodellen verwendet werden.

Grundsätzlich kann festgehalten werden, dass die hybride DGM-Struktur durch die Einbindung von Kanten, Strukturlinien und markanten Punkten eine Erweiterung des Gittermodells darstellt und diesem daher für eine möglichst exakte Geländebeschreibung vorzuziehen ist. Die Diskussion, ob TIN- oder Gitter-basierte DGMe besser sind, wird in der Literatur von den jeweiligen Anhängern oftmals polemisch geführt. Wie in diesem Abschnitt ausgeführt, haben beide Ansätze bestimmte Vor- und Nachteile. Von einer globalen Überlegenheit der einen Struktur gegenüber der anderen kann daher nicht gesprochen werden. Oftmals wird die Anwendung entscheiden, ob eine TIN- oder Gitter-basierte Datenstruktur vorteilhafter ist. Eine kritische Auseinandersetzung mit dem Thema *TIN versus Gitter* findet sich in [Ackermann u. Kraus, 2004].

### **Weitere DGM-Datenstrukturen**

Bei allen bisher beschriebenen Datenstrukturen werden die Geländehöhen an diskreten Positionen gespeichert. Im Gegensatz dazu kann die Geometrie der Geländeoberfläche auch durch gewisse Funktionsparameter oder -koeffizienten beschrieben werden. Zu diesen alternativen Methoden zählen beispielsweise die Fourier- oder Wavelet-Analyse oder Kugelfunktionsentwicklungen. Ein auf Wavelets basierender Ansatz ist in [Beyer, 2005] beschrieben. Kugelfunktionen werden vor allem im Bereich der Modellierung des Geoids eingesetzt, welches sich mit

Recht als DHM interpretieren lässt. In allen Fällen kann die Geländeoberfläche aus den entsprechenden Koeffizienten rekonstruiert werden. Diese Ansätze bieten durch Unterdrücken von Termen höherer Ordnung interessante Möglichkeiten Levels of Details (LOD) abzuleiten.

Für die praktische Anwendung besteht allerdings oftmals das Problem, dass zur großflächigen, detaillierten Geländebeschreibung eine Unmenge solcher Koeffizienten erforderlich wäre. Das Problem der globalen Geländebeschreibung wird oft durch Unterteilen in kleinere Teilgebiete gelöst. Bei den Koeffizienten-bezogenen Datenstrukturen ergeben sich dabei allerdings Probleme der Stetigkeit am Übergang der einzelnen Teilgebiete. Da die punktbezogenen Datenstrukturen hinsichtlich Datenverwaltung und -austausch generell einfacher zu handhaben sind, haben sich diese im Wesentlichen durchgesetzt.

## 2.1.6 Interpolationsverfahren

Im Abschnitt 2.1.1 wurde das DGM als flächenhafte Repräsentation der Geländeoberfläche definiert. Die primären Geländehöhendaten stehen allerdings nicht beliebig dicht, sondern nur in diskreter Form zur Verfügung. Um zu einer kontinuierlichen Flächenbeschreibung zu gelangen, sind daher geeignete Interpolationsverfahren erforderlich. Als Primärdaten dienen dabei, wie im Abschnitt 2.1.4 ausgeführt, Punkte (Massenpunkte, markante Höhenpunkte) und Linien (Geländekanten, Gerippelinien, Randlinien, ...). Die gängigen Verfahren zur Interpolation von Flächen auf Basis von gemessenen Punkten und Linien werden im Folgenden erläutert.

### Dreiecksvermaschung

Eine Möglichkeit des Übergangs von Punkten und Linien zu Flächen besteht im Aufbau eines Netzwerkes von stückweise linearen Teilflächen. Am gebräuchlichsten sind dabei unregelmäßige Dreiecksnetze (Triangular Irregular Networks, TIN). Die Erstellung solcher Dreiecksnetze wird Dreiecksvermaschung (Triangulation) genannt. Während die Dreiecksbildung bei drei Stützpunkten trivial ist, können bereits bei einem konvexen Viereck zwei verschiedene Dreiecke gebildet werden, je nachdem wie die Diagonale im Viereck gelegt wird. Das wesentliche Problem bei der Triangulation ist demnach die Wahl eines entsprechenden Kriteriums, nach welchem die Vermaschung erfolgt. Aus der großen Anzahl an Vorschlägen (z.B. minimale Kantenlänge, möglichst gleich große Dreieckswinkel ...) hat sich das Delaunay-Kriterium für viele Fälle als optimal herausgestellt. Die Delaunay-Triangulation (DT) liefert Dreiecke mit den größten minimalen Innenwinkeln (Min-Max-Kriterium) und weist die geometrische Eigenschaft auf, dass sich innerhalb des Umkreises eines Dreiecks kein weiterer Punkt befindet. Die DT ist außerdem der duale Graph zum Voronoi-Diagramm (VD), wobei eine Voronoi-Region diejenige Fläche beschreibt, die zum zugehörigen DT-Punkt die kürzeste Entfernung aufweist.

Für die Geländemodellierung müssen die Geländekanten bei der Triangulation als Zwangskanten berücksichtigt werden. Man spricht in diesem Fall von Constrained Delaunay Triangulation (CDT). Sofern digitalisierte Höhenlinien den Basisdatenbestand bilden, muss die DT meist noch nachbearbeitet werden, damit Artefakte wie horizontale Dreiecke vermieden werden. Auf die Vor- und Nachteile hinsichtlich der Datenstruktur wurde bereits im vorangegangenen Abschnitt eingegangen. Aus Sicht des Interpolationsverfahrens ist darüber hinaus zu erwähnen, dass die Dreiecksvermaschung eine Interpolation ohne Filterung darstellt. Die zufälligen Messfehler gehen daher direkt in die Flächenbeschreibung ein. Um zu einem qualitativ

hochwertigen DGM zu gelangen ist eine entsprechende Filterung der Messfehler daher bereits vor der Triangulation vorzunehmen.

Literatur: [Peucker, 1978], [Heitzinger, 1999], [Pfeifer, 2002], [Kraus, 2000]

### Thin Plate Splines

Thin Plate Splines (TPS) stellen das zweidimensionale Analogon zu den natürlichen kubischen Splines im eindimensionalen Fall dar. es handelt sich um die fundamentale Lösung einer bi-harmonischen Gleichung der Form:

$$U(r) = r^2 \ln(r) \quad (2.3)$$

Der Name dieser Interpolationsmethoden leitet sich davon ab, dass man sich in jedem Stützpunkt eine dünne Platte vorgestellt. Diese einzelnen dünnen Platten werden nun so verbogen, dass ein glatter Übergang zwischen Platten gegeben ist. Die Interpolierende bei den TPS ist nun diejenige Funktion, bei der die Verbiegungsenergie (bending energy) minimal wird. Die Verbiegungsenergie ist dabei als Integral der zweiten Ableitungen über den 2D-Raum definiert:

$$I = \int \int (f_{xx}^2 + 2 f_{xy} + f_{yy}^2) dx dy \quad (2.4)$$

Literatur: [Duchon, 1976], [Meinguet, 1979].

### Bilineare Interpolation

Diese Interpolationsmethode wird vor allem bei Geländemodellen mit regelmäßiger gitterförmiger Grundstruktur angewendet. Die einzelnen Punkte auf den achsparallelen Gitterlinien werden durch lineare Linienstücke verbunden, wodurch jede Gittermasche ein hyperbolisches Paraboloid (HP-Fläche) beschreibt. Da die Diskretisierung der Geländeoberfläche bei dieser Interpolationsart in Form von kleinen abgegrenzten Flächenstücken erfolgt, spricht man häufig auch von *Interpolation mit finiten Elementen*. Die Grundgleichung der HP-Fläche lautet:

$$z = f(x, y) = a_0 + a_1x + a_2y + a_3xy \quad (2.5)$$

Statt der vier Flächenkoeffizienten  $a_i$  können die vier unbekanntes z-Werte an den Eckpunkten der Gittermasche eingeführt werden. Die Aufgabe besteht nun darin, die Höhen an allen Gitterpunkten auf Basis der vorhandenen Stützpunkte zu schätzen. Außerdem können noch zusätzliche Bedingungen wie vorgegebene Neigungen und Krümmungen berücksichtigt werden. Abschließend sei erwähnt, dass die Interpolation mit finiten Elementen auch die Berücksichtigung von Geländekanten erlaubt.

Lit: [Lancaster, 1990], [Kraus, 2000]

## Gleitende Flächen

Bei dieser Gruppe von Interpolationsverfahren erfolgt die Berechnung der Höhen an beliebigen Positionen dynamisch aus den  $n$  nächstgelegenen Stützpunkten (nearest neighbours) oder aus allen Stützpunkten innerhalb eines fixen Bereiches (fixed distant neighbours). Sie wird häufig angewendet, um aus unregelmäßig angeordneten Stützpunkten ein regelmäßiges Gitter abzuleiten, als Basis für die im Abschnitt 2.1.5 erläuterten Datenstrukturen. In diesem Zusammenhang spricht man oft auch von Gridding. Die Wahl der Basisflächen (funktionales Modell) ist prinzipiell beliebig, wobei sich die folgenden bewährt haben:

Horizontalebene:	$z = a_1$	moving average
Schrägebene:	$z = a_1 + a_2x + a_3y$	moving plane
Quadratische Form:	$z = a_1 + a_2x + a_3y + a_4x^2 + a_5y^2 + a_6xy$	moving quadric

Stehen für die Bestimmung der Flächenparameter  $a_i$  ebenso viele Stützpunkte zur Verfügung, so handelt es sich um eine Interpolation ohne Filterung, und die Fläche verläuft exakt durch die Stützpunkte. Verwendet man mehr Stützpunkte, so können die Flächenparameter im Rahmen einer Ausgleichung nach kleinsten Quadraten bestimmt werden, und man erhält eine Interpolation mit Filterung. Für diesen Fall wird häufig auch die englische Bezeichnung *Moving Least Squares (MLS)* verwendet.

In der Regel erfolgt die Schätzung der Parameter noch unter Berücksichtigung eines stochastischen Modells, wobei entferntere Stützpunkte geringeres Gewicht erhalten als näher gelegene. Man spricht in diesem Fall von inverser Distanzgewichtung (engl. inverse distance mapping). Für den einfachsten Fall des gleitenden Mittels ergibt sich demnach der zu interpolierende  $z$ -Wert zu

$$z = \frac{\sum_{i=1}^n z_i p_i}{\sum_{i=1}^n p_i} \quad (2.6)$$

wobei  $z_i$  die Höhen an den gegebenen Stützpunkten und  $p_i$  die zugehörigen Gewichte bezeichnen, die sich aus dem Abstand des jeweiligen Stützpunktes von der Interpolationsstelle ergeben. Unter allen möglichen Gewichtsfunktionen haben sich vor allem die reziproke Distanz ( $p(d) = \frac{1}{d}$ ), die reziproke quadratische Distanz ( $p(d) = \frac{1}{d^2}$ ) sowie die Gauß'sche Glockenkurve ( $p(d) = e^{-\alpha d^2}$ ) bewährt. Bei entsprechender Überbestimmung kann ein System von Verbesserungsgleichungen für eine Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen

$$z_i + v_i = \mathbf{b}^T \mathbf{a} \quad (2.7)$$

aufgestellt werden, wobei  $z_i$  die beobachteten Höhen,  $v_i$  deren Verbesserungen,  $\mathbf{a}$  den Vektor der Flächenparameter und  $\mathbf{b}^T$  den des funktionalen Modells bedeuten. Die unbekanntenen  $a_i$  können unter Berücksichtigung der Gewichte durch die Diagonalmatrix  $P$  wie folgt berechnet werden:

$$\mathbf{a} = (\mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{B})^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{z} \quad (2.8)$$

Bei der Verwendung von gleitenden Polynomflächen steht dem Vorteil einer einfachen und schnellen Berechnung auch eine Reihe von Nachteilen gegenüber. So weist die interpolierte

Fläche überall dort Unstetigkeitsstellen auf, wo jeweils andere Stützpunkte herangezogen werden. Das äußert sich oft in einem unruhigen Höhenlinienbild.

Literatur: [Kraus, 2000], [Bartelme, 2000]

## Lineare Prädiktion/Kriging

Bei der linearen Prädiktion handelt es sich um ein geostatistisches Interpolationsverfahren. Die beobachteten Höhen werden dabei als räumliche Zufallsvariable  $Z = Z(\mathbf{x})$ ,  $\mathbf{x} \in R^2$  aufgefasst. Während der Begriff *Lineare Prädiktion* seinen Ursprung im Bereich der Geländemodellierung hat, wird in der Geostatistik bevorzugt der Begriff *Kriging* verwendet, die Bezeichnung geht auf den südafrikanischen Bergbauingenieur Danie Krige zurück. Die weitgehende Identität der beiden Methoden ist in [Kraus, 1998] dargelegt.

Die lineare Prädiktion (Interpolation nach kleinsten Quadraten) ist diejenige lineare Schätzmethode mit der kleinsten Varianz. Beim Kriging wird darüber hinaus Erwartungstreue verlangt. Man spricht in diesem Zusammenhang dann auch von einem sogenannten BLUE-Schätzer (Best Linear Unbiased Estimator). *Linear* bedeutet in diesem Fall, dass sich die Höhe an beliebigen Interpolationsstellen als Linearkombination der bekannten Höhen an den Stützstellen ableitet. *Unbiased* bezeichnet die Erwartungstreue des Schätzers und *Best* die Eigenschaft, dass er den Schätzwert mit der minimalen Varianz liefert.

Ausgangspunkt für die Interpolation nach kleinsten Quadraten ist die Kovarianzfunktion  $C(\mathbf{h})$ , welche die Streuung der Zufallsvariablen  $Z(\mathbf{x})$  in Abhängigkeit des Distanzvektors  $\mathbf{h}$  beschreibt. In der Geostatistik wird bevorzugt mit dem Variogramm  $\gamma(\mathbf{h})$  gearbeitet, dabei können Kovarianzfunktion und Variogramm durch die Beziehung  $\gamma(\mathbf{h}) = C(\mathbf{0}) - C(\mathbf{h})$  einfach ineinander überführt werden. Als mathematisches Modell für die Kovarianzfunktion hat sich für glattes Gelände vor allem die Gauß'sche Glockenkurve in der Form  $C(d) = C(0)e^{-(d/c)^2}$  durchgesetzt, wobei der Distanzvektor  $\mathbf{h}$  vereinfachend durch die (skalare) Distanz  $d$  (isotrope Kovarianzfunktion) ersetzt wurde und  $c$  die Steigung im mittleren Bereich bezeichnet. Der Verlauf der prädizierten Fläche wird entscheidend durch die Form der Kovarianzfunktion bestimmt. Während die Gauß'sche Kurve im Ursprung eine horizontale Tangente aufweist und daher einen glatten Geländeverlauf mit sich bringt, können Spitzen in den Stützpunkten durch die Wahl von sphärischen oder exponentiellen Kovarianzfunktionen (linearer Anstieg im Ursprung) erzielt werden. Kovarianzfunktionen mit horizontaler Tangente im Ursprung eignen sich daher besser zur Modellierung von homogenem Gelände. Funktionen mit linearem Ursprungsverhalten hingegen können mit Vorteil im Bereich von Diskontinuitäten im Gelände eingesetzt werden.

Die lineare Prädiktion lässt sich auch als spezielle Form der Interpolation mittels Flächensummation auffassen. Die Oberfläche entsteht dabei aus der Summe von Elementarflächen um die Stützpunkte. Im konkreten Fall wird die Kovarianzfunktion als Elementarfläche verwendet. Die einzelnen Teilflächen sind in Z-Richtung so zu skalieren, dass die Summe durch die Stützpunkte verläuft. Ohne auf die Ableitung näher einzugehen, ergibt sich die prädizierte Höhe  $\hat{z}$  bei der Interpolation nach kleinsten Quadraten zu:

$$\hat{z} = \mathbf{c}^T \mathbf{C}^{-1} \mathbf{z} \quad (2.9)$$

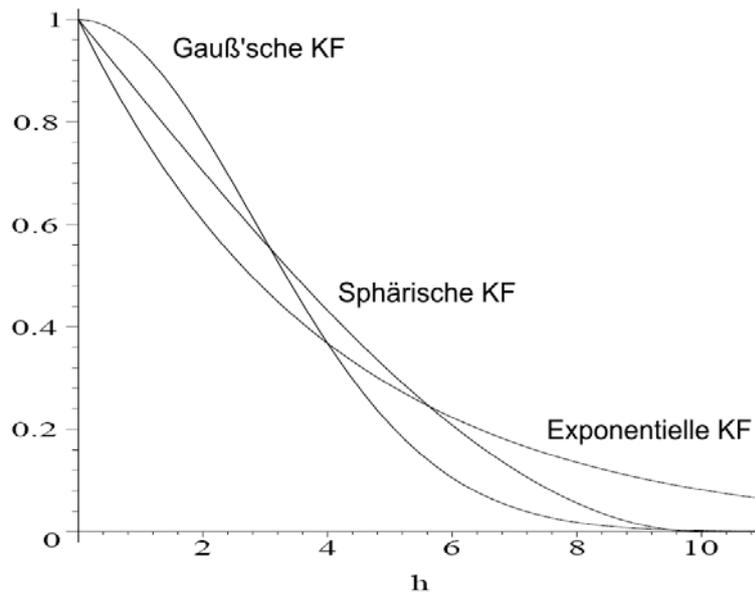


Abbildung 2.6: Gauß'sche, sphärische und exponentielle Kovarianzfunktion

$$\mathbf{c} = \begin{pmatrix} C(P P_1) \\ C(P P_2) \\ \dots \\ C(P P_n) \end{pmatrix}, \mathbf{C} = \begin{pmatrix} C(0) & C(P_1 P_2) & \dots & C(P_1 P_n) \\ & C(0) & \dots & C(P_2 P_n) \\ & & \dots & \dots \\ \text{symm.} & & & C(0) \end{pmatrix}, \mathbf{z} = \begin{pmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \dots \\ z_n \end{pmatrix}$$

Der Vektor  $\mathbf{c}$  enthält die Kovarianzen zwischen der Interpolationsstelle und den Stützpunkten, die symmetrische Matrix  $\mathbf{C}$  hingegen enthält die Kovarianzen zwischen den einzelnen Stützpunkten. Während  $\mathbf{c}$  für jeden Ort verschieden ist, bleibt die  $\mathbf{C}$ -matrix für das gesamte Interpolationsgebiet gleich. Im Vektor  $\mathbf{z}$  schließlich stehen die um den Trend verminderten Höhen der Stützpunkte.

Bei der Modellierung nach der Formel 2.9 verläuft die prädizierte Fläche genau durch die Stützpunkte (exakter Interpolator). Zu einer Interpolation mit Filterung gelangt man durch folgende Überlegung: Die um den Trend reduzierten Höhen  $z_i$  der Stützpunkte kann man in einen systematischen Signalanteil  $s_i$  und einen unregelmäßigen Rauschanteil  $r_i$  ( $\doteq$  Messfehler) trennen. Für die Varianzen gilt dann:  $V_{ZZ} = V_{ss} + V_{rr}$ .  $V_{ss}$  entspricht aber dem Wert der Kovarianzfunktion an der Stelle Null ( $V_{ss} = C(0)$ ) und  $V_{rr}$  ist der zufällige Messfehler  $\sigma_Z^2$ . Die Gleichung kann somit umgeformt werden zu:

$$V_{ZZ} = C(0) + \sigma_Z^2$$

Mit anderen Worten, die Varianz der Stützwerte setzt sich aus einem korrelierten Anteil  $C(0)$  und einem unkorrelierten Anteil  $\sigma_Z^2$  zusammen. Ersetzt man in Gleichung 2.9 die  $C(0)$  durch  $V_{ZZ}$ , so erhält man eine Interpolation mit Filterung. Im Gegensatz zu anderen Interpolationsverfahren kann die Steuerung der Filterung dabei direkt über die a-priori bekannten Messfehler erfolgen. Auch eine Erweiterung auf Beobachtungen unterschiedlicher Genauigkeit gelingt einfach und elegant. Bei der Linearen Prädiktion ist die Anzahl der Unbekannten gleich der

Anzahl der Stützpunkte. Diese Charakteristik ist dann vorteilhaft, wenn weniger Stützpunkte als zu interpolierende DGM-Gitterpunkte vorliegen, was typischerweise bei photogrammetrischer Datenerfassung der Fall ist. Ungünstig hingegen wirkt sich dies bei dichten Punktwolken aus, wo oft weniger Gitterpunkte interpoliert werden als Stützpunkte vorhanden sind. Bei größeren Gebieten ist in jedem Fall eine Unterteilung in kleinere Teilgebiete erforderlich, was am Rand dieser Teilgebiete das Problem der Glattheit der Fläche mit sich bringt.

Literatur: [Kraus, 2000], [Journal u. Huijbregts, 1978], [Dutter, 1985], [Kraus, 1998]

### **2.1.7 Klassifizierung von Laserscanner-Punktwolken**

Der verstärkte Einsatz von automatischen Messmethoden, wie Airborne Laserscanning, InSAR und automatische Bildkorrelation, bringt mit sich, dass zunehmend nicht nur Punkte auf der Erdoberfläche, sondern auch an Gebäuden und der Vegetation mit erfasst werden. Für eine Weiterverarbeitung im Sinne eines DGM ist die Punktwolke vorab in Boden- und Nicht-Bodenpunkte zu klassifizieren. Diese Trennung wird in der Fachsprache auch als *Filterung* bezeichnet und ist nicht zu verwechseln mit der Filterung von zufälligen Messfehlern (Glättung) während der Interpolation. Zur Klassifizierung von Laserscanner-Punktwolken haben sich im Wesentlichen drei Verfahren durchgesetzt. Diese können sinngemäß - aber mit Einschränkungen - auch auf Daten aus InSAR und automatischer Bildkorrelation angewendet werden. Eine Gegenüberstellung der einzelnen Filterverfahren findet sich in [Sithole u. Vosselman, 2003].

#### **Morphologische Filterung**

Grundgedanke bei diesem Ansatz ist der Vergleich der Umgebung eines Punktes mit einem Strukturelement, welches den maximal zulässigen Höhenunterschied benachbarter Punkte in Abhängigkeit ihrer Entfernung beschreibt. Je geringer die Distanz eines Punktes zu den umliegenden Punkten ist, desto geringer darf sein Höhenunterschied sein, damit der Punkt als Bodenpunkt akzeptieren werden kann. Die Form des Strukturelementes wird dabei entweder aus den Daten eines Trainingsgebietes oder aufgrund von Annahmen über die maximalen Neigungsverhältnisse im Projektgebiet bestimmt.

Literatur: [Vosselman, 2000], [Sithole u. Vosselman, 2001]

#### **Progressive TIN-Verdichtung**

Ausgangspunkt für diese Methode sind ausgewählte Punkte aus der originalen, unklassifizierten Punktwolke, die gesichert als Bodenpunkte betrachtet werden können. Häufig wird dazu ein grobes Raster gebildet, wobei aus jeder Rasterzelle der tiefste Punkt selektiert wird. Die ausgewählten Punkte werden trianguliert und beschreiben damit näherungsweise die Geländeoberfläche. In einem weiteren Schritt wird in jeder Dreiecksmasche ein weiterer Bodenpunkt aus der Menge der unklassifizierten Punkte ermittelt, wozu ein Schwellwert-Kriterium herangezogen wird. Mögliche Kriterien sind der Vertikal- bzw. Normalabstand des Neupunktes vom Dreieck sowie die Winkeln zwischen der Dreiecksfläche und den Kanten Neupunkt-Dreieckspunkt. Unterschreitet ein Punkt den Schwellwert, so wird er als Bodenpunkt klassifiziert und ins TIN eingefügt. Der Algorithmus setzt dann in gleicher Weise mit dem nächsten

Dreieck fort. Auf diese Weise wird das Dreiecksnetz fortschreitend verdichtet, solange bis alle Punkte entweder als Boden- oder als Nicht-Bodenpunkte klassifiziert sind.

Literatur: [Axelsson, 2000]

### **Hierarchische robuste Interpolation**

Dieses Verfahren basiert auf einem Oberflächenmodell durch alle Punkte, welches sich iterativ der Geländeoberfläche annähert. Auf Basis eines ersten Oberflächenmodells werden die Residuen der Stützpunkte gegenüber der Fläche berechnet. Liegen Stützpunkte dabei oberhalb der Fläche, dann ist die Wahrscheinlichkeit größer, dass es sich um einen Nicht-Bodenpunkt handelt. Punkte unterhalb der Fläche sind ein Indiz dafür, dass ein Bodenpunkt vorliegt. In einer weiteren Iteration erhalten die Punkte unterhalb der Fläche daher ein größeres Gewicht als die oberhalb der Fläche. Dadurch nähert sich die interpolierte Fläche sukzessive der Geländeoberfläche. Als Interpolationsverfahren eignet sich die lineare Prädiktion mit individuellen Punktgewichten. Die Gewichtsfunktion einer robusten Ausgleichung kann dabei herangezogen werden, um ausgehend von den Residuen einer Epoche die Gewichte für den nächsten Iterationsschritt zu bestimmen. Um große Gebäudekomplexe detektieren und klassifizieren zu können sowie um die Rechenzeit zu reduzieren, wird die robuste Interpolation zusätzlich in einen hierarchischen Ansatz (coarse-to-fine approach) eingebettet.

Literatur: [Kraus u. Pfeifer, 1998], [Kraus, 2000], [Pfeifer u. Briese, 2001], [Pfeifer u. a., 2001], [Bauerhansl u. a., 2004]

## **2.2 Numerische Modelle in der Hydrologie**

Die Hydrologie (griechisch: hydros - das Wasser, logos - die Lehre) ist die Wissenschaft vom Wasser. Sie behandelt die biologischen, chemischen und physikalischen Eigenschaften des Wassers, seine räumliche und zeitliche Verteilung in der Atmosphäre, den Kreislauf und die Verteilung auf der Erdoberfläche sowie die Zusammenhänge und Wechselwirkungen der unterschiedlichen Erscheinungsformen des Wassers.

Der einleitenden Aufzählung ist zu entnehmen, dass es sich bei der Hydrologie um ein sehr breit gestreutes Fachgebiet handelt. So fallen die Teilgebiete Ozeanologie (Hydrologie der Meere), Gewässerkunde (Hydrologie des Festlandes) genauso darunter wie die Hydrometrie (hydrologisches Messwesen). Zu den verwandten Fachgebieten zählen so unterschiedliche Wissenschaften wie Hydrogeologie, Meteorologie, Glaziologie und Geologie.

Im engeren Sinn befasst sich die Hydrologie mit den Themen Wasserhaushalt der Erde, Eigenschaften des Wassers, Niederschlag, Verdunstung, Interzeption, Abfluss, Schnee und Eis, Seen, Bodenwasser sowie Grundwasser. Für viele dieser Teilgebiete existieren auch numerische Modelle. Im Rahmen dieser Arbeit sind vor allem die Teilgebiete der Hydrologie interessant, bei denen die Topographie eine wesentliche Rolle spielt. Dies gilt in erster Linie für den Abfluss (engl. runoff). Als Abfluss oder Durchfluss wird in der Hydrologie das Wasservolumen bezeichnet, das pro Zeiteinheit einen definierten oberirdischen Fließquerschnitt durchfließt ([Baumgartner u. Liebscher, 1996]), es wird in [ $m^3/s$ ] angegeben. Nach ingenieurhydrologischen Ansätzen lässt sich der Gesamtniederschlag in einen Verlustanteil (Verdunstung,

Interzeption, Bodenfeuchte, Speicherung im Grundwasser oder Schnee, ...) und einen abflusswirksamen Anteil trennen. Für weiterführende hydraulische Modelle stellt der Abfluss eine wesentliche Eingangsgröße dar.

Im Folgenden wird daher eine Auswahl hydrologischer Modelle präsentiert, die einerseits mit der Modellierung des Abflusses in Zusammenhang stehen und andererseits einen Bezug zur Topographie haben.

### **2.2.1 Bestimmung von Einzugsgebieten**

Die Lösung hydrologischer Fragestellungen baut in der Regel auf der Kenntnis der Einzugsgebiete auf. Unter einem Einzugsgebiet (engl. catchment area) versteht man ein Gebiet, welches im Grundriss durch ober- bzw. unterirdische Wasserscheiden (engl. watershed) begrenzt ist. Die oberirdischen Wasserscheiden lassen sich dabei durch Analyse der Hangneigungsvektoren aus dem digitalen Geländemodell ableiten. Entsprechende Ansätze sind in [Rieger, 1992] bzw. [Gajski, 2004] beschrieben.

Der Hangneigungsvektor gibt die horizontale Richtung (Azimuth) des stärksten Gefälles, in anderen Worten die Richtung der Falllinie an. Wasserscheiden zeichnen sich dabei dadurch aus, dass die Vektoren auseinander weisen. Neben den Wasserscheiden sind auch die Fließwege (Falllinien) hydrologisch relevant. Diese lassen sich ebenfalls aus dem DGM bestimmen, in dem im Gegensatz zu den Wasserscheiden die Bereiche gesucht werden, wo die Neigungsvektoren zueinander zeigen.

Je nach Größe des betrachteten Flusses oder Flussnetzes können Einzugsgebiete eine Fläche von einigen Duzend bis einigen Tausend Quadratkilometern aufweisen. Eine entsprechend effiziente Verwaltung der DGM Daten ist daher erforderlich. Die Anforderungen an die räumliche Auflösung des DGM sind allerdings weniger hoch als für Anwendungen in der Hydraulik. Zur Ableitung von Einzugsgebietsgrenzen kann daher ein DGM-Punktabstand von etwa 25-50m als ausreichend betrachtet werden.

### **2.2.2 Niederschlags-Abfluss-Modell**

Durch ein Niederschlags-Abfluss-Modell (engl. rainfall-runoff-model) wird die Frage beantwortet, wie groß der Abfluss an einer bestimmten Stelle (Modellausgang) in Reaktion auf den Gesamtniederschlag ist. Es wird dabei der gesamte hydrologische Prozess des Abflusses mit all seinen Teilaspekten wie Verdunstung, Speicherung in Form von Bodenfeuchte, Grundwasser, Schnee, etc. modelliert.

Voraussetzung für die Niederschlags-Abfluss-Modellierung sind die im Abschnitt 2.2.1 beschriebenen Einzugsgebietsgrenzen und Fließwege. Neben den hydrologischen bzw. meteorologischen Eingangsgrößen, wie Niederschlagsmenge, Temperatur, etc., kommt auch der Topographie Bedeutung zu. Hier interessiert allerdings weniger die Detailform der Geometrie als vielmehr die ungefähre Höhenlage und die Exposition, welche vor allem Einfluss auf die Verdunstung haben. Als Ergebnis erhält man Ganglinien, welche den Abfluss am Modellausgang in diskreten Zeitintervallen angeben. Diese Abfluss-Werte eine wesentliche Eingangsgröße für HN-Modelle.

## 2.3 Numerische Modelle in der Hydraulik

Die Hydraulik (griechisch: hydros - das Wasser, aulos - das Rohr) ist die Lehre vom Strömungsverhalten von Flüssigkeiten. Ein Teilgebiet davon ist die Hydrodynamik (griechisch: dynamikos - kräftig), welche sich mit bewegten Flüssigkeiten (und Gasen) wie z.B. laminaren und turbulenten Strömungen beschäftigt. Das Verfahren zur quantitativen computergestützten Erfassung der Strömungsvorgänge ist die hydrodynamisch-numerische (HN-) Modellierung.

Die Erfassung und Aufbereitung von geeigneten topographischen Daten für die HN-Modellierung bildet den Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit. Von grundlegender Bedeutung ist daher ein Verständnis für den Zusammenhang zwischen den physikalischen Parametern des HN-Modells und der Geometrie. Am Beginn stehen deshalb ein Überblick über die verschiedenen Modelle und eine Zusammenfassung ihrer physikalischen Grundlagen. Anschließend werden die Themen Dimensionalität, Datenstrukturen und Berechnungsverfahren soweit detaillierter betrachtet, als diese für das Verständnis des Zusammenspiels mit der Geometrie erforderlich sind.

### 2.3.1 Modellübersicht

#### Strömungsmodell

Die Grundlage jeglicher HN-Modellierung ist die Beschreibung der Strömung. Durch ein *hydraulisches Modell* oder *Strömungsmodell* wird die Frage beantwortet, wohin und mit welcher Geschwindigkeit sich ein Flüssigkeitsteilchen - primär unter dem Einfluss der Schwerkraft - bewegt. Die Berechnung von Wasserspiegellagen für unterschiedliche Abflüsse  $Q$  ist damit eine Teilaufgabe der Strömungsmodellierung, welcher vor allem für die Bestimmung von Überschwemmungsgrenzen und die Ableitung von Gefahrenzonenplänen höchste Bedeutung zukommt. Darüber hinaus erhält man aus dem Strömungsmodell aber auch Aussagen über das Energieliniengefälle entlang eines Flusslaufes, woraus sich weitere Größen, wie etwa die Sohlschubspannung, ableiten lassen, die ihrerseits wieder die Grundlage für weiterführende Modelle darstellen.

#### Sedimenttransportmodell

Aufbauend auf den Ergebnissen des Strömungsmodells können Umlagerungen von gelösten und festen Stoffen (Schwebstoff und Geschiebe) in einem *Sedimenttransportmodell* quantitativ erfasst werden. Neben den hydraulischen Grundlagen (Kontinuitätsgleichung, Energiegleichung, Fließformeln) sind daher noch zusätzlich Beziehungen, die den Sedimenttransport beschreiben, erforderlich (Kontinuitätsgleichung des Sediments, Transportformeln). Die maßgeblichen Parameter für den Sedimenttransport sind einerseits die hydraulischen Parameter, wie Energieliniengefälle bzw. Fließgeschwindigkeit, und andererseits die Verteilung der Korngrößen. Aus den hydraulischen Parametern kann zusammen mit der Wassertiefe und der Durchlässigkeit des Gewässerbetts für jede Position des Flusslaufes die entsprechende Sohlschubspannung ermittelt werden. Wird dabei eine gewisse kritische Sohlschubspannung überschritten, kommt es zu Sohleintiefungen (Erosion). Wird diese unterschritten, ergibt sich entsprechend eine Anlandung. Durch den Feststofftransport ändert sich klarerweise die Geometrie

des Gewässerbetts. Zur Beschreibung der variablen Flusssohle werden daher entweder gekoppelte oder ungekoppelte Modelle eingesetzt. Während bei den ungekoppelten Modellen iterativ entweder die Bewegung des Wassers oder die Bewegung des Sediments berechnet wird und die jeweils anderen Parameter konstant gehalten werden, erfolgt die Berechnung von Wasser- und Sedimenttransport im gekoppelten Modell simultan.

## Habitatmodell

Eine weitere Anwendung des Strömungsmodells ist die *Habitatmodellierung*. Dabei werden die Ergebnisse aus dem Strömungsmodell - insbesondere die Wassertiefe und die Fließgeschwindigkeit - mit biologischen Parametern, welche die Präferenz bestimmter Spezies für bestimmte Gewässerformen beschreiben, kombiniert. Getrennt für die unterschiedlichen Lebensphasen (z.B. laich, juvenil, adult) lassen sich auf diese Weise Flächen (WUA, weighted usable areas) für das potentielle Vorkommen bestimmter Arten ausweisen.

### 2.3.2 Physikalische Grundlagen

Im Folgenden werden die physikalischen Grundlagen für die hydrodynamisch-numerische Modellierung in knapper Form vorgestellt. Für eine detailliertere Darstellung sei auf die Fachliteratur [Landau u. Lifschitz, 1991], [Habersack, 2004], ... verwiesen.

Grundlage für die HN-Modellierung sind die Bewegungsgleichungen für Flüssigkeitsteilchen. Unter einem Flüssigkeitsteilchen versteht man dabei eine Flüssigkeitsmenge, die einerseits klein genug ist, dass auf sie der Begriff des Differentials anzuwenden ist, und die andererseits groß genug ist, dass ihre Eigenschaften als Mittelwert aller im Molekularbereich ablaufenden Prozesse betrachtet werden können. Für die numerische Modellierung gibt es grundsätzlich zwei unterschiedliche Betrachtungsweisen. Beim Euler'schen Zugang werden die strömungsspezifischen Parameter als Funktion des Ortes und der Zeit formuliert. Die  $x$ -Komponente der Fließgeschwindigkeit ( $v_x$ ) kann etwa als Funktion der Ortskoordinaten  $x$ ,  $y$  und  $z$  sowie der Zeit  $t$  dargestellt werden:

$$v_x = F(x, y, z, t) \quad (2.10)$$

Bei dieser Herangehensweise nimmt der Beobachter einen fixen Standpunkt ein und beobachtet quasi vom Ufer aus die Bewegung des Flüssigkeitsteilchens. Dem gegenüber bewegt sich der Beobachter beim Lagrange'schen Zugang mit dem Flüssigkeitsteilchen mit. Die Ortstage des Teilchens wird dabei als Funktion bestimmter unabhängiger Parameter  $a$ ,  $b$ ,  $c$  und der Zeit  $t$  ausgedrückt.

$$x = F(a, b, c, t) \quad (2.11)$$

Da diese Art der Formulierung sehr aufwendig und rechenintensiv ist, hat sich in der numerischen Modellierung eher die Euler'sche Betrachtungsweise durchgesetzt.

Bevor näher auf die Bewegungsgleichungen (englisch: momentum equations) eingegangen wird, sollen stichwortartig die wichtigsten hydraulischen Grundbegriffe aufgezählt und kurz erläutert werden.

- **Geschwindigkeit:** Die Fließgeschwindigkeit  $v$  ist als Änderung eines (differentiellen) Linienelements  $s$  pro Zeiteinheit oder gleichbedeutend als Änderung des Durchflusses  $Q$  pro Querschnittsfläche  $A$  definiert ( $v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t}$ ,  $v = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta Q}{\Delta A}$ ).
- **Beschleunigung:** Die Beschleunigung von Flüssigkeitsteilchen lässt sich generell in zwei Komponenten aufspalten, die lokale Beschleunigung ( $\frac{\partial v}{\partial t}$ ) und die konvektive Beschleunigung ( $(v \nabla)v, \dots \nabla = \frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z}$ ). Von stationärer Strömung spricht man, wenn  $\frac{\partial v}{\partial t} = 0$ . In diesem Fall bleibt der Durchfluss  $Q$  über die Zeit konstant, was den Standardfall für die HN-Modellierung darstellt. Eine instationäre Strömung ist bei  $\frac{\partial v}{\partial t} \neq 0$  gegeben, wie sie beim Ansteigen ( $\frac{\partial v}{\partial t} > 0$ ) bzw. Absinken ( $\frac{\partial v}{\partial t} < 0$ ) einer Hochwasser-Welle der Fall ist. Eine Strömung wird als gleichförmig bezeichnet, wenn keine konvektive Beschleunigung vorhanden ist. Dieser Fall tritt bei Fließgewässern in der Natur allerdings nicht auf. Vielmehr rufen Änderungen des Querschnittes, Krümmungen im Flusslauf sowie Sohlrauigkeiten konvektive Beschleunigungen hervor, die eine ungleichförmige Strömung zur Folge haben.
- **Massenkraft:** Bei offenen Gerinnen wird die Bewegung der Flüssigkeitsteilchen primär durch den Einfluss der Schwerkraft als Massenkraft hervorgerufen. Durch die annähernd horizontale Bewegung der Flüssigkeitsteilchen und der vertikalen Wirkungsweise der Schwerkraft kann die resultierende Massenkraft  $\mathbf{k}$  in die drei Anteile  $X, Y, Z$  der jeweiligen Koordinatenrichtungen aufgespalten werden.
- **Druck:** Eine weitere wesentliche Größe in den Bewegungsgleichungen stellt der Wasserdruck  $p$  dar. Für die numerische Modellierung wird in der Regel von einer hydrostatischen, mit der Wassertiefe zunehmenden Druckverteilung ausgegangen.
- **Viskosität oder Zähigkeit:** Viele der hydrodynamischen Grundgesetze wurden zunächst für ideale, reibungsfreie Flüssigkeiten formuliert. Bei realen Flüssigkeiten setzen die Flüssigkeitsteilchen einander bei Bewegung einen gewissen Widerstand entgegen. Diese Eigenschaft wird als Viskosität oder Zähigkeit ( $\nu$ ) bezeichnet. Darüber hinaus treten auch an den Grenzflächen (z.B. Wasser-Gewässersohle) Reibungen auf, die in der Numerik über Rauigkeiten modelliert werden.
- **Turbulenz:** Bei der Bewegung von reibungsbehafteten Flüssigkeiten unterscheidet man zwischen laminaren und turbulenten Strömungen. Im Gegensatz zur laminaren Strömung kommt es bei der turbulenten Strömung zu Wirbelbildungen, die eine scheinbar zufällige, instationäre Bewegung der Flüssigkeitsteilchen zur Folge haben. Als Beurteilungskriterium wird die Reynolds-Zahl  $Re$  herangezogen. Die Reynolds-Zahl beschreibt das Verhältnis von Trägheitskräften zu Reibungskräften und wird durch die Formel  $Re = \frac{\bar{v}R}{\nu}$  berechnet, wobei  $\bar{v}$  die mittlere Fließgeschwindigkeit,  $R$  den hydraulischen Radius und  $\nu$  die kinematische Zähigkeit bezeichnen. Der hydraulische Radius wiederum gibt das Verhältnis zwischen benetzter Querschnittsfläche  $A$  und benetztem Umfang  $U$  an ( $R = \frac{A}{U}$ ). Bei Gerinnen mit einem Breite:Tiefe-Verhältnis von größer als 30 entspricht der hydraulische Radius etwa der Wassertiefe.

## Bewegungsgleichungen

Die fundamentalen Beziehungen zur Beschreibung der Ausbreitung von Flüssigkeiten werden durch die Euler'schen Bewegungsgleichungen beschrieben. Es handelt sich dabei um den Im-

pulssatz in differentieller Form. Die Euler-Gleichungen gelten für reibungsfreie Flüssigkeiten und lauten in vektorieller Schreibweise:

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \nabla) \mathbf{v} = \mathbf{k} - \frac{1}{\rho} \nabla p \quad (2.12)$$

Die Euler'schen Bewegungsgleichungen sind partielle Differentialgleichungen 1. Ordnung. Sie stellen einen Zusammenhang zwischen der lokalen und konvektiven Beschleunigung auf der linken bzw. der Massenkraft  $\mathbf{k}$  (Kraft pro Masse) und der Oberflächenkraft (Druckkraft  $p$ ) auf der rechten Seite des Gleichungssystems 2.12 her. Eine Erweiterung der Euler-Gleichungen stellen die Navier-Stokes'schen Bewegungsgleichungen dar, bei denen zusätzlich die innere Reibung bewegter Flüssigkeiten berücksichtigt wird.

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \nabla) \mathbf{v} = \mathbf{k} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \Delta \mathbf{v} \quad (2.13)$$

$\nu$  stellt dabei die (bekannte) kinematische Viskosität dar und  $\Delta$  bezeichnet den Laplace-Operator. Bei den Gleichungen 2.13 handelt es sich um partielle Differentialgleichungen 2. Ordnung, die abgesehen von Spezialfällen nicht mehr analytisch lösbar sind und daher in der Praxis numerisch gelöst werden. Erweiterungen der Navier-Stokes'schen Bewegungsgleichungen berücksichtigen außerdem noch Turbulenz-Terme.

## Hydromechanische Grundgesetze

- **Impulserhaltungssatz:** Wie bereits weiter oben festgestellt wurde, stellen die Euler'schen Bewegungsgleichungen die mathematische Formulierung des Impulserhaltungssatzes dar. Dieser besagt, dass in einem abgeschlossenen System, auf das keine äußeren Kräfte einwirken, der Gesamtimpuls aller miteinander in Wechselwirkung stehenden Teile konstant bleibt. Darüber hinaus lassen sich aus den Bewegungsgleichungen weitere hydro-mechanische Grundgesetze ableiten.
- **Kontinuitätsgesetz oder Massenerhaltungssatz:** Das Gesetz von der Erhaltung der Masse bei inkompressiblen Flüssigkeiten besagt, dass während eines Zeitschrittes die Summe aus ein- und ausströmender Flüssigkeitsmasse gleich ist. Für stationären Abfluss erhält man unter der Annahme konstanter Dichte und nach Einführung einer über den Querschnitt gemittelten Fließgeschwindigkeit  $\bar{v}$  für zwei Querschnitte die Beziehung:

$$Q = \bar{v}_1 A_1 = \bar{v}_2 A_2 = \text{const} \quad (2.14)$$

Gleichung 2.14 bringt zum Ausdruck, dass der Durchfluss [ $m^3/s$ ] als Produkt aus mittlerer Fließgeschwindigkeit [ $m/s$ ] und durchflossenem Querschnitt [ $m^2$ ] für jeden beliebigen Querschnitt und damit für die gesamte Fließstrecke konstant ist. Eine Vergrößerung des Fließquerschnittes geht daher immer mit einer Reduktion der Fließgeschwindigkeit einher und umgekehrt.

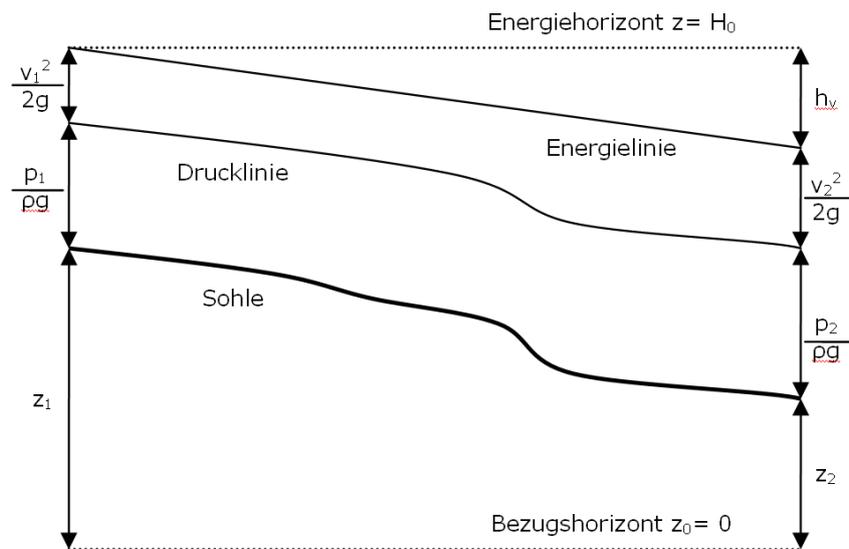


Abbildung 2.7: Energieerhaltungssatz bei zähen Flüssigkeiten (Satz von Bernoulli)

- Energieerhaltungssatz: Nach dem Satz von Bernoulli ist bei stationärer Bewegung einer idealen, lediglich der Schwerkraft als Massenkraft unterworfenen Flüssigkeit die Summe aus Orts-, Druck- und Geschwindigkeitshöhe konstant. In der in Abb. 2.7 dargestellten eindimensionalen Betrachtungsweise (Längsschnitt) bezeichnet ausgehend von einem Bezugshorizont  $z_0 = 0$  die Ortshöhe dabei die relative Höhe der Gewässersohle, die Druckhöhe die Wassertiefe. Die Geschwindigkeitshöhe komplettiert die beiden ersten Terme zu einem konstanten Energiehorizont  $z = H$ . Für zähe Flüssigkeiten wird zusätzlich noch die Verlusthöhe  $h_v$  einbezogen, welche den Energieverlust infolge von Energieumwandlung in Schall, Wärme, etc. beinhaltet.

$$z + \frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} + h_v = H = \text{const} \quad (2.15)$$

Aufgrund von  $h_v$  ergibt sich ein Energieliniengefälle  $I_e = \frac{dh_v}{ds}$ , welches durch Änderungen von Querschnitt, Gefälle oder Korngrößen sowie durch Ufervegetation und Sohlrauigkeit zustande kommt.

## 1D-Bewegungsgleichungen nach De Saint-Venant

Aus der Kombination von Kontinuitätsgesetz und Energiegleichung lassen sich die sogenannten De Saint-Venant'schen Differentialgleichungen ableiten. Für den eindimensionalen Fall nehmen diese die folgende einfache Form an.

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} + g \left( \frac{\partial h}{\partial x} + I_s \right) + g I_e = 0 \quad (2.16)$$

Diese Gleichungen gelten für kleine Wasserspiegelnigungen unter der Voraussetzung, dass es sich um eine inkompressible Flüssigkeit handelt, dass die Geschwindigkeit über einen Querschnitt konstant ist und dass die Druckverteilung entlang einer beliebigen Vertikalen als hydrostatisch angenommen werden kann. Die ersten beiden Glieder der Gleichung 2.16 stellen analog zu 2.12 oder 2.13 die lokale bzw. konvektive Beschleunigung dar. Das dritte und vierte Glied beschreiben den Einfluss der Schwerkraft und der Reibung. Da die Annahme einer mittleren Fließgeschwindigkeit über einen Querschnitt in den meisten Fällen zu vereinfachend ist, werden in der Praxis noch die sogenannten De Saint-Venant Koeffizienten  $\alpha$  und  $\beta$  als Korrekturfaktoren eingeführt, welche pro Querschnitt die Abweichung der tatsächlichen (integrierten) von der mittleren Fließgeschwindigkeit modellieren.

## Fließformeln

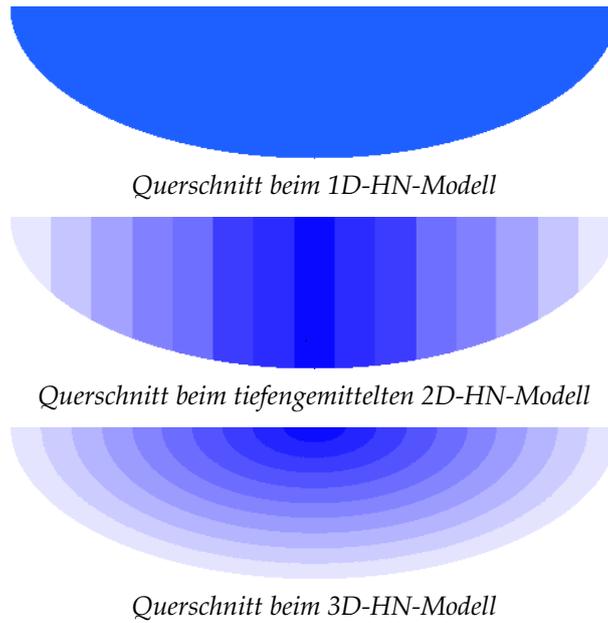
Zum Abschluss der physikalischen Grundlagen seien noch die für die Praxis wichtigen Fließformeln erwähnt. Fließformeln stellen einen Zusammenhang her zwischen der Fließgeschwindigkeit  $v$  bzw. dem Durchfluss  $Q$  und den Gerinne spezifischen Parametern wie Querschnittsform und Fließfläche  $A$ , Wassertiefe  $h$ , Beschaffenheit bzw Rauigkeit der Gewässerwand, dem hydraulischen Radius  $R$  sowie dem Energieliniengefälle  $I_e$ . Fließformeln wurden von mehreren Autoren, wie etwa Brahms-De Chezy, Darcy-Weisbach bzw. Colebrook-White angegeben. Eine sehr häufig verwendete Fließformel ist die von Gaukler-Manning-Strickler.

$$v = k_{str} \sqrt[3]{R^2} \sqrt{I_e} \quad (2.17)$$

$I_e$  bezeichnet dabei das Energieliniengefälle und  $R$  den hydraulischen Radius. Durch Multiplikation der Gleichung 2.17 mit der Größe des Querschnittes  $A$  lässt sich daraus leicht eine Formel für den Durchfluss  $Q$  ableiten. Mit  $k_{str}$  wird der so genannte Strickler-Beiwert bezeichnet. Dieser ist ein Maß für den Widerstand, welcher dem fließenden Wasser entgegengebracht wird. Aus der Gleichung 2.17 ist unmittelbar ersichtlich, dass die Fließgeschwindigkeit umso kleiner ist je kleiner der Strickler-Beiwert ist. Kleine  $k_{str}$ -Werte bedeuten daher einen großen Widerstand und umgekehrt. Aus diesem Grund wird in der angelsächsischen Literatur auch bevorzugt als Rauigkeitsmaß der Manning-Beiwert  $n$  verwendet, welcher reziprok zum Stricker-Beiwert ist ( $n = \frac{1}{k_{str}}$ ). Tabelle 2.2 enthält eine ausgewählte Menge an Rauigkeitsklassen und deren zugehörige Strickler-Beiwerte nach [Naudascher, 1992].

### 2.3.3 Dimensionalität

In der HN-Modellierung unterscheidet man ein- und mehrdimensionale Abflussmodelle. Die eindimensionalen Modelle haben bereits einen sehr großen Verbreitungsgrad erreicht und stellen ein Standardwerkzeug in der Bearbeitung hydrodynamischer Fragestellungen dar. Dabei wird von einer einheitlichen Fließgeschwindigkeit pro Querschnitt sowie von einer horizontalen Wasserspiegellage ausgegangen. Die Ergebnisse sind also Geschwindigkeit und Wasserspiegellage pro Profile. Die Ortslage wird dabei lediglich über die Fließlänge (Stationierung)  $s$  festgelegt. Um das eindimensionale 1D-Modell an die realen Stömungsverhältnisse anzupassen, können eine Reihe von Korrekturfaktoren pro Querschnitt angebracht werden (z.B. De Saint-Venant Koeffizienten  $\alpha$  und  $\beta$ ). Da die Betrachtungsweise querschnittsbezogen ist,



**Abbildung 2.8:** Prinzipskizze der Geschwindigkeitsverteilung bei ein- und mehrdimensionalen HN-Modellen

genügt es auch, die Geometrie in eben diesen Schnitten bereitzustellen. Der Aufbau eines flächenhaften DGM-W ist daher nicht erforderlich. Die Erfassung der Topographie in Form von ausgewählten Querprofilen stellt daher auch die klassische Methode der Flussvermessung dar. Begünstigt durch steigende Rechnerleistungen und Verfügbarkeit von Software-Lösungen setzen sich derzeit zweidimensionale Modelle mehr und mehr durch. Beim 2D-Modell wird die Geometrie in einzelne kleine Flächenstücke (Dreiecke, Vierecke) diskretisiert. Für jedes Flächenelement erfolgt die Integration der Impuls- und Kontinuitätsgleichung über die Wasser-

**Tabelle 2.2:** Rauigkeitsklassen und entsprechende Strickler-Beiwerte  $k_{str}$

Rauigkeitsklasse	$k_{str}$
Nat. Flussbett, feste Sohle, glatt	40
Nat. Flussbett, mit Geröll, unregelmäßig	30
Wildbach	20-25
Wiese, kurzes Gras	30
Wiese, hohes Gras	20
Landw. genutzte Fläche, keine Feldfrucht	30
Landw. genutzte Fläche, reifes Getreide	18
Landw. genutzte Fläche, Mais	6
Gebüsch, vereinzelt, starke Krautschicht	20
Gebüsch, mittlere-hohe Dichte, Winter	10
Gebüsch, mittlere-hohe Dichte, Sommer	8
Bäume, Kahlschlag	25
Bäume, dichter Wald	10

tiefe  $h$ . Als Ergebnis der Modellierung erhält man dadurch auch ggf. geneigte Wasserspiegel sowie horizontale Fließvektoren. Vertikale Gradienten liefern die tiefengemittelten 2D-Modelle allerdings nicht. Anwendung finden die zweidimensionalen Abflussmodelle vor allem dort, wo nicht-parallele Strömungen vorliegen, bei kleineren und mittleren Gewässern mit variierender Gewässerbreite (Laufaufweitung bzw. -einengung) sowie bei der Modellierung des Sedimenttransportes. Generell können bei gegliederten Profilen (Ufervegetation, Kolke, Inseln, ...) wesentlich detailliertere Ergebnisse als beim Einsatz von 1D-Modellen erzielt werden. Die Geometrie muss hier jedenfalls als flächenhaftes Modell im Sinne des Abschnittes 2.1.1 vorliegen. Vor allem zur Erfassung von Überflutungsebenen sind daher auch flächenhafte Aufnahmetechniken (Laserscanning, Photogrammetrie, ...) erforderlich. Das 2.5D-DGM-W, welches für jeden Lagepunkt genau einen Höhenwert aufweist, ist für die zweidimensionale HN-Modellierung gerade das richtige Geometriemodell.

Dreidimensionale Abflussmodelle berücksichtigen zusätzlich auch noch die variable vertikale Geschwindigkeitsverteilung durch eine zusätzliche horizontale Schichtung. Die realen Strömungsvorgänge können dadurch am besten simuliert werden. Allerdings stellt die 3D-Modellierung hohe Ansprüche an Rechenleistung, Datengrundlage und auch an das Systemverständnis. Modelle dieser Art werden daher heute fast ausschließlich zu Forschungszwecken an Universitäten oder bei sehr kleinräumigen Projektgebieten (Wehranlagen, Brücken, ...) eingesetzt. Die Bezeichnung 3D-Modell bezieht sich dabei darauf, dass die Komponenten der Fließgeschwindigkeit in alle drei Raumrichtungen erfasst werden. Die geometrische Grundlage ist trotz allem das 2.5D-DGM-W, welches jeder Position  $x, y$  im Grundriss genau einen Höhenwert  $z$  zuordnet.

### 2.3.4 Berechnungsverfahren

Wie bereits im Abschnitt 2.3.2 festgehalten wurde, sind die partiellen Differentialgleichungen 2.12 und 2.13 analytisch nicht lösbar, weswegen in der Praxis numerische Lösungsverfahren herangezogen werden. In der Reihenfolge ihrer historischen Entwicklung haben sich die folgende Verfahren etabliert:

- Methode der Charakteristiken
- Finite Differenzen Methode (FDM)
- Finite Elemente Methode (FEM)
- Finite Volumina Methode (FVM)

Die Methode der Charakteristiken kommt bei den heutigen Implementierungen kaum mehr zum Einsatz und wird daher nicht mehr weiter behandelt. Die anderen Lösungsansätze sind im Folgenden jeweils kurz beschrieben.

#### Finite Differenzen Methode

Grundlage bei der Finiten Differenzen Methode (FDM) ist die Taylor-Reihenentwicklung.

$$f(x + \Delta x) = \sum \frac{f^{(n)}(x)\Delta x^n}{n!} = f(x) + f'(x)\Delta x + f''(x)\frac{\Delta x^2}{2} + \dots \quad (2.18)$$

Die Funktionswerte an der Stelle  $x + \Delta x$  bzw.  $x - \Delta x$  werden aus den bekannten Werten an der Stelle  $x$  und deren Ableitungen berechnet. Die Schätzung ist dabei umso genauer, je kleiner  $\Delta x$  ist und je mehr Ableitungen herangezogen werden.

Beim Finite Differenzen Verfahren werden nun unbekannte Differentialquotienten  $f'(x)$  und  $f''(x)$  aus der Gleichung 2.18 durch Differenzenquotienten  $f'(x)^*$  und  $f''(x)^*$  ersetzt. Diese ergeben sich jeweils aus dem Mittel aus Vorwärts- bzw. Rückwärtsdifferenzen zu:

$$f'(x)^* = \frac{f(x + \Delta x) + f(x - \Delta x)}{2\Delta x}$$

$$f''(x)^* = \frac{f(x + \Delta x) - 2f(x) + f(x - \Delta x)}{2\Delta x^2}$$

Schreibt man die De Saint-Venant'schen Differentialgleichungen 2.16 in der Form

$$\frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{v}{g} \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial x} = I_s - I_e$$

an, so erkennt man unmittelbar, dass für die Differentialquotienten  $\frac{\partial v}{\partial t}$ ,  $\frac{\partial v}{\partial x}$  und  $\frac{\partial h}{\partial x}$  nach der obigen Vorschrift die entsprechenden Differenzenquotienten zu bilden sind. Für eine eindimensionale Abflussmodellierung ergibt sich demnach ein zweidimensionales Punktgitter in den Variablen  $(x, t)$  mit der Ortsachse  $(x)$  als Abszisse und der Zeitachse  $(t)$  als Ordinate. Unter der Voraussetzung geeigneter Startwerte können die unbekanntes Fließgeschwindigkeiten und Wasserspiegellagen für den Ort  $x_i$  und den Zeitpunkt  $t_j$  durch fortgesetztes Anwenden des Differenzenschemas ermittelt werden. Für die konkrete Berechnung gibt es explizite und implizite Differenzenschemata. Eines der gängigsten ist dabei das implizite Preissmann-Schema.

## Finite Elemente Methode

Die Finite Elemente Methode (FEM) hat ihren Ursprung im Bereich der Strukturmechanik (Stabwerke, Flächentragwerke, ...), kann aber auf Problemstellungen verschiedenster Ingenieur-Disziplinen angewendet werden. Nach [Knothe u. Wessels, 1991] kann die FEM bei beliebigen Arten von Feldfunktionen, bei denen das Verhalten von Kontinua durch partielle, orts- und zeitabhängigen Differentialgleichungen beschrieben wird, eingesetzt werden.

Anders als bei der FDM, bei welcher Differentialoperatoren diskretisiert werden, wird bei der Finiten Elemente Methode der Raum und die Lösungsfunktionen diskretisiert. Ausgangspunkt ist dabei ein Variationsprinzip oder ein Prinzip der virtuellen Arbeit. Solch eines lässt sich aus der Formulierung als Differentialgleichung durch integrale Mittelwertbildung gewinnen. Das Interessensgebiet wird dabei von einem Netz endlicher (finiter) Elemente überzogen, wobei für die Elemente gerade- oder krummlinige Dreiecks- bzw. Vierecksflächen oder dergleichen in Frage kommen. In den Knoten der jeweiligen Elemente werden die gesuchten Variablen  $(h, v, Q, \dots)$  durch lineare Ansatzfunktionen beschrieben. Die Koeffizienten dieser Funktionen

werden auf Basis der Netzgeometrie und der Rauigkeiten abgeleitet. Der Aufbau des Gleichungssystems erfolgt elementweise, wobei in die einzelnen Gleichungen ,ähnlich wie bei der FDM , die Koeffizienten der gerade betrachteten und der umgebenden Knoten eingehen.

Der Vorteil der FEM ist vor allem in einem verbesserten geometrischen Auflösungsvermögen zu sehen. Durch die Verbindung von Dreiecks- oder Vierecksflächen, Parallelogrammen, etc lassen sich komplexe Ränder sowie lokale Verfeinerungen besser modellieren als durch das bei der FDM benutzte koordinatenparallele Rechengitter. Die geometrische Form der einzelnen finiten Elemente hat allerdings bei der FEM einen starken Einfluss auf die numerische Stabilität des Verfahrens. Daher sollten Konfigurationen mit sehr spitzen oder stumpfen Winkeln vermieden werden.

## **Finite Volumina Methode**

Die Finite Volumina Methode (FVM) ist ein weiteres numerisches Verfahren zur Lösung von Erhaltungsgleichungen in der Form von vornehmlich hyperbolischen, partiellen Differentialgleichungen. Das Verfahren eignet sich daher besonders zur Lösung der Navier-Stokes'schen Bewegungsgleichungen 2.13 und wird bevorzugt für die numerische Lösung bei der dreidimensionalen HN-Modellierung eingesetzt. Im Gegensatz zur FEM, bei welcher der Raum zweidimensional in Drei- und Vierecke unterteilt wird, erfordert die FVM eine dreidimensionale Zellaufteilung in Prismen, Tetraeder, Hexaeder und Pyramiden.

Der Vorteil der FVM liegt vor allem darin, dass hinsichtlich der numerischen Stabilität des Verfahrens nur geringe Anforderungen an die Form der Gitterzellen gestellt werden. Das erlaubt eine sehr flexible, gut an die natürlichen Verhältnisse angepasste Gestaltung der Geometrie. Für eine detailliertere Beschreibung vor allem des mathematischen Hintergrundes sei auf die Fachliteratur (z.B. [Tritthart, 2005], [Helf, 2000], [Hirsch, 1988], [Knothe u. Wessels, 1991]) verwiesen.

### **2.3.5 Datenstrukturen**

Voraussetzung für die Anwendung numerischer Simulationsverfahren ist eine geeignete räumliche Diskretisierung der Geometrie, im Speziellen für die HN-Modellierung von Fließgewässern der Topographie im Sinne des DGM-W. Im Abschnitt 2.1 wurden Erfassungs- bzw. Interpolationstechniken sowie Datenstrukturen für topographische Modelle vorgestellt. Diese eignen sich aber nur bedingt zur direkten Anwendung in der HN-Modellierung, da sie einerseits zumeist einen zu hohen Detaillierungsgrad aufweisen und andererseits nicht für die Lösung eines physikalischen Problems wie der Navier-Stokes'schen Bewegungsgleichungen ausgelegt und optimiert sind.

Die räumliche Diskretisierung des Interessengebietes in Form eines geeigneten Rechengitters ist daher ein notwendiger Vorverarbeitungsschritt für die numerische Modellierung. Der entsprechende Prozess wird als Gitter- oder Netzgenerierung (mesh generation) bezeichnet. Folgende grundlegende Gittertypen haben sich dabei etabliert:

- Strukturierte Gitter
- Kartesische Gitter

- Unstrukturierte Gitter

Im Folgenden werden die genannten Gittertypen kurz beschrieben. Detailliertere Informationen finden sich z.B. in [Helf, 2000].

### **Strukturierte Gitter**

Strukturierte Gitter sind aus Vierecken bzw. Hexaedern (Quadern) aufgebaut und weisen eine regelmäßige Struktur auf. Die Knoten sind dabei über ihre Indizes festgelegt. Sowohl die Knoten-Koordinaten als auch die Nachbarschaftsbeziehungen zwischen den einzelnen Knoten sind über die Indizes implizit gegeben. Strukturierte Gitter weisen darüber hinaus pro Koordinatenrichtung eine fixe Anzahl von Knoten auf. Diese einfache Struktur besitzt eine Reihe günstiger numerischer Eigenschaften und wird daher nach wie vor bevorzugt zur numerischen Berechnung partieller Differentialgleichungen herangezogen.

Nachdem eine derartige Regelmäßigkeit nicht der natürlichen Geometrie von Fließgewässern entspricht, werden strukturierte Gitter durch eine entsprechende Koordinatentransformation des Rechengebietes auf ein Einheitsquadrat (Einheitswürfel im 3D) erzeugt. Die Schnittpunkte der transformierten Koordinatenlinien werden dann als Knoten des Rechengitters aufgefasst. Für die Transformation werden entweder algebraische Methoden in Form von parametrisierten Kurvendarstellungen der Gitterlinien oder Methoden, die auf der Lösung entsprechender partieller Differentialgleichungen basieren, eingesetzt.

Für die HN-Modellierung eines Flussschlauches kann ein strukturiertes Gitter erzeugt werden, indem die kartesischen Koordinaten (Rechtswert  $x$ , Hochwert  $y$ ) in achsbezogene Koordinaten (Stationierung  $s$ , Achsabstand  $q$ ) umgerechnet werden. Die Achse selbst kann dabei beispielsweise als über die Bogenlänge parametrisierte, kubische Spline-Funktion auf der Basis gegebener Stützpunkte formuliert werden. Die Erzeugung eines Einheitsquadrates gelingt schließlich, indem nach der Transformation ins Achssystem noch eine Normierung der variablen Gewässerbreite sowie eine Reduktion der Stationierungs-Werte vorgenommen wird. Ein ganz ähnlicher Ansatz wird auch bei der Interpolation von Gewässerbett-Querprofilen eingesetzt, worauf im Abschnitt 3.1.2 näher eingegangen wird.

Ein strukturiertes Gitter ist demnach durch die Felddimension und die Darstellung der zugehörigen Koordinatentransformation festgelegt. Es bleibt allerdings zu berücksichtigen, dass bei der Diskretisierung der Bewegungsgleichungen die Transformation und ihre Ableitungen bis zum Grad der Differentialgleichungen in die Diskretisierung mit eingehen (Kettenregel) und mitberücksichtigt werden müssen.

### **Kartesische Gitter**

Kartesische Gitter sind aus Rechtecken bzw. Quadern parallel zu den Koordinatenachsen aufgebaut. Von ihrer Grundstruktur können sie daher als Spezialfall der strukturierten Gitter betrachtet werden. Der wesentliche Unterschied liegt darin, dass anders als bei den strukturierten Gittern bei den kartesischen Gittern nicht die Anzahl der Knoten pro Koordinatenrichtung, sondern der Abstand der einzelnen Knoten vorerst konstant ist. Kartesische Gitter kommen allerdings ohne Koordinatentransformation aus, d.h. das Geometriegitter entspricht direkt dem Rechengitter.

Um den lokalen Variationen der Geometrie im Rechengitter Rechnung zu tragen, müsste daher die Gesamtauflösung auf die kleinste Zellgröße abgestimmt werden. Dies führt aber zu großen Datenmengen und in der Folge zu langen Rechenzeiten für das HN-Modell. Deswegen werden kartesische Gitter häufig mit Ansätzen der adaptiven Gitterverdichtung (mesh refinement) kombiniert, wodurch eine hierarchische, baumartige Datenstruktur (Quadtree, Octtree) entsteht. Im Kapitel 4 wird detailliert auf adaptive Verfahren mit hierarchischer Unterteilung zur Beschreibung der Topographie eingegangen.

### **Unstrukturierte Gitter**

Im Gegensatz zu den strukturierten bzw. kartesischen Gittern sind die Nachbarschaften zwischen den Knoten bei den unstrukturierten Gittern explizit beschrieben. Die Nachbarschaftsbeziehungen sind über Knoten-Kanten-Flächen-Listen organisiert und daher nicht mehr global, sondern nur lokal vom einzelnen Knoten oder der einzelnen Masche aus zugänglich. Die Bezeichnung *unstrukturiert* rührt vom Fehlen dieses globalen Ordnungsprinzips her. Die Anordnung der Knoten und Maschen ist dabei keineswegs strukturlos, sondern eher unregelmäßig strukturiert.

Unstrukturierte Gitter sind hauptsächlich aus Dreiecken bzw. Tetraedern aufgebaut. Von *semi-strukturierten* Gittern spricht man, wenn zusätzlich Vierecke bzw. Hexaeder eingebunden sind. Gestreckte, viereckige Elemente eignen sich bei der HN-Modellierung von Fließgewässern vor allem zur Beschreibung des Gewässerbetts. Die Variation der Geometrie ist unter dem Einfluss der gerichteten Kraft des Wassers in Fließrichtung wesentlich weniger ausgeprägt als quer dazu. Eine gestreckte Elementanordnung parallel zur Fließrichtung bzw. Uferböschung ist daher zu bevorzugen, da sie den physikalischen Gegebenheiten näher kommt. Bei gestreckten Dreiecksnetzen können die spitzen Winkel allerdings numerische Probleme hervorrufen, weswegen in diesem Fall bevorzugt viereckige Elemente herangezogen werden.

Die Erzeugung eines unstrukturierten Gitters erfordert neben der Auswahl einer geeigneten Menge an Knoten auch noch ein Kriterium, nach welchem die Knoten miteinander vermascht werden. Am verbreitetsten ist dabei das Delaunay-Kriterium, worauf allerdings bereits bei den Topographie-Modellen im Abschnitt 2.1.6 eingegangen wurde.

### **2.3.6 Modellkalibrierung**

Die hydrodynamisch-numerische Modellierung stellt einen sehr komplexen Prozess mit einer Reihe von Eingangsgrößen und Modellannahmen dar. Der einflussreichste Parameter ist dabei die Geometrie. Darüber hinaus haben aber auch Annahmen über die Rauigkeit, Viskosität und Turbulenz Einfluss auf das Ergebnis der HN-Modellierung. Schließlich steckt auch in der Diskretisierung der Differentialgleichungen selbst ein gewisses Fehlerpotential.

Unabhängig vom eingesetzten numerischen Lösungsverfahren ist es aus den genannten Gründen unumgänglich, die Ergebnisse einer Modellrechnung kritisch zu beurteilen, das Modell zu kalibrieren und ggf. zu validieren. Unter Kalibrieren versteht man dabei die Anpassung der einzelnen Modellparameter in der Form, dass die in der Natur gemessenen Wasserspiegel-lagen und Fließgeschwindigkeiten möglichst gut zu den aus dem Modell errechneten passen ([Habersack u. a., 2000]). Die Anpassung erfolgt durch zielgerichtete Variation der einzelnen Modellparameter durch den Hydrauliker.

Prinzipiell beginnt man die Modellkalibrierung mit Abflüssen, die vollständig im Hauptgerinne abfließen. In diesem Fall geht neben der Kornrauigkeit im Gewässerbett noch die Geometrie (Formrauigkeit) ein. Durch Anpassung der Geometrie ist vor allem sicherzustellen, dass die natürlichen Verhältnisse genau genug abgebildet werden und die numerische Stabilität der Lösung gegeben ist. Im Anschluss können die Rauigkeiten variiert und damit auf die resultierenden Wasserspiegellagen und Fließgeschwindigkeiten Einfluss genommen werden. Ist eine befriedigende Übereinstimmung erreicht, werden die Abflüsse gesteigert, bis durch Ausuferung auch eine Benetzung des Vorlandes eintritt. Daraufhin wird die Kalibrierungsprozedur wiederholt, bis sich auch bei höheren Abflüssen eine akzeptable Übereinstimmung mit den gemessenen Werten in der Natur ergibt.

Die Kalibrierung und Validierung kann unter anderem durch folgende Verfahren durchgeführt werden:

- 1D-Kalibrierung nach Wasserspiegellagengefälle: Vergleich der gemessenen und errechneten Wasserspiegellagen im Längsschnitt
- 2D-Kalibrierung nach Wasserspiegelquergefälle: Soll-Ist-Vergleich der Wasserspiegellagen ausgewählter Querschnitte. Dieses Verfahren ist vor allem für größere Abflüsse geeignet, welche ein messbares Quergefälle ausbilden.
- 2D-Kalibrierung nach Geschwindigkeitsverteilung im Querschnitt: Vergleich der tiefengemittelten Fließgeschwindigkeiten in ausgewählten Messlotrechten aus Naturmessung und Modellrechnung.
- 2D-Validierung über Richtungen der Geschwindigkeitsvektoren: Dieses aufwändige Prüfverfahren erfordert die Messung der Geschwindigkeitsvektoren in der Natur und deren Vergleich mit den Werten aus dem HN-Modell.

Eine sorgfältige Prüfung und Kalibrierung des HN-Modells stellt jedenfalls eine Grundvoraussetzung für zuverlässige Aussagen über das Abflussverhalten und weiterführende Modellrechnungen dar.

## 3 Aufbau des Wasserlauf-DGM

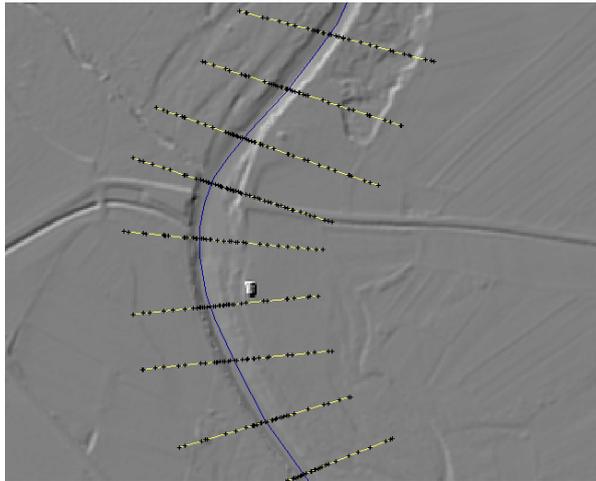
Das Wasserlauf-DGM stellt die geometrische Grundlage für die HN-Modellierung dar. Wie bereits im Abschnitt 2.1.2 ausgeführt, enthält es alle Elemente, die für die Strömung von Wasser relevant sind. Im Wesentlichen sind dies das Gewässerbett, das Flussvorland sowie abflusshindernde Bauwerke wie Brücken oder Wehre. Das DGM-W wird daher aus Daten unterschiedlicher Erfassungsmethoden aufgebaut. Während zur Beschreibung des Flussvorlandes heute bevorzugt ALS-Daten herangezogen werden, erfolgt die Modellierung des Gewässerbettes in vielen Fällen aus Querprofilaten (Echolot oder tachymetrische Vermessung).

Der Aufbau von Geländemodellen aus flächenhaft erfassten Basisdaten wurde bereits im Abschnitt 2.1.6 behandelt, weshalb an dieser Stelle auf eine weitere Vertiefung verzichtet wird. Die Modellierung der Gewässersohle hingegen erfordert den Einsatz spezieller Strategien und wird im Abschnitt 3.1 beschrieben. Weitere wichtige Aspekte im Zusammenhang mit der DGM-W-Generierung sind die Modellierung der Wasseroberfläche als digitales Modell (3.2), sowie die Ableitung der Wasser-Land-Grenzlinie (3.3) und hydraulisch relevanter Geländekanten (3.4). Ein Abschnitt über die Zusammenführung der Teildaten zu einem DGM-W 3.5 schließt das Kapitel ab.

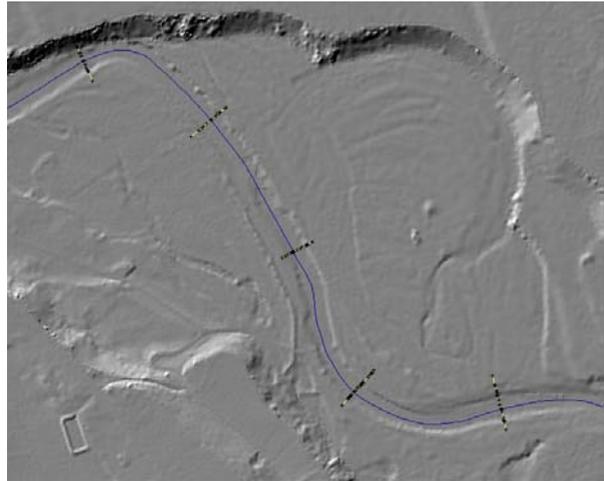
### 3.1 Modellierung der Gewässersohle

Im Abschnitt 2.1.4 wurde bereits erläutert, dass die Datenerfassung zur Beschreibung der Gewässersohle bei Bächen und kleineren Flüsse durch terrestrische Vermessung (Tachymetrie, GPS) und bei Gewässern, bei denen eine Begehung nicht mehr möglich ist, durch Echolot-Aufnahmen erfolgt. Obwohl mit den Fächerloten bereits Instrumente zur flächenhaften Aufnahme der Sohle vorhanden sind, wird vielerorts nach wie vor die linienhafte Aufnahme in Form von Querprofilen verwendet. Dies gilt insbesondere für die terrestrische Vermessung, zu einem beachtlichen Umfang, aber auch noch für Echolot-Verfahren unter Verwendung von Einzelschwingern.

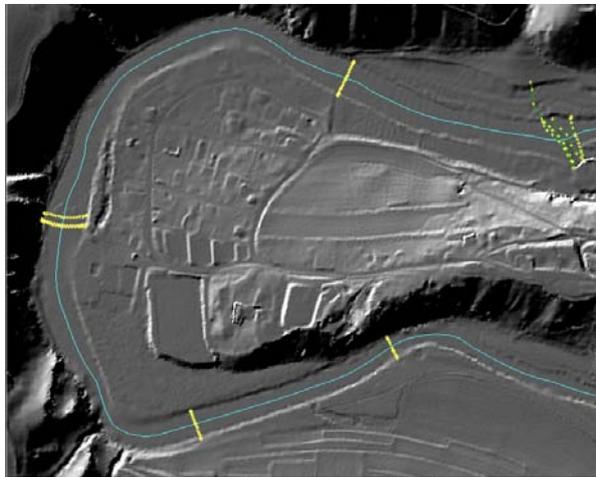
Auf die Modellierung der Gewässersohle aus flächenhaft erfassten Fächerlot-Punktwolken wird hier nicht mehr weiter eingegangen. Die Prozessierung ist im Wesentlichen vergleichbar mit der von ALS-Punktwolken. Während beim Airborne Laserscanning zur Ableitung des DGM vor allem Gebäude und Vegetation aus dem Rohdatenbestand gefiltert werden müssen (siehe 2.1.7), so besteht bei Fächerlot-Punktwolken ein ähnliches Problem durch Reflexionen des Schallimpulses an Hindernissen, wie etwa der aquatischen Fauna (Einzelfische, Fischeschwärme, ...). Neben dem Problem der Klassifizierung in Bodenpunkte und Nicht-Bodenpunkte stellt sich genauso wie beim ALS auch das Problem der Datenmenge und folglich das der Datenreduktion. Entsprechende Ansätze zur Auswertung und Aufbereitung von Fächerlotdaten sind u.a. in [Bottelier u. a., 2000] beschrieben. Im Folgenden wird daher nur auf die Modellierung der Gewässersohle aus Querprofilaten weiter eingegangen.



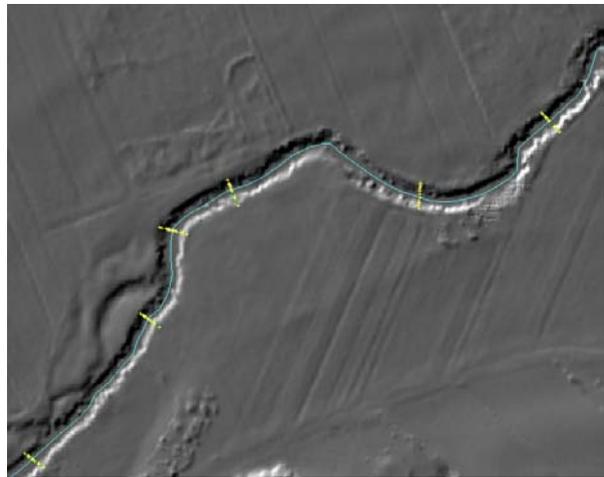
Querprofile: Kamp



Querprofile: Alm-Fluss



Querprofile: Thaya

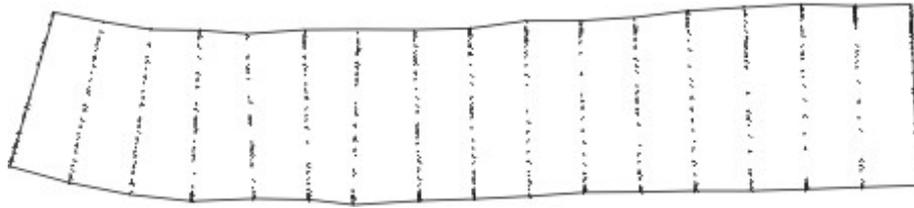


Querprofile: Lainsitz

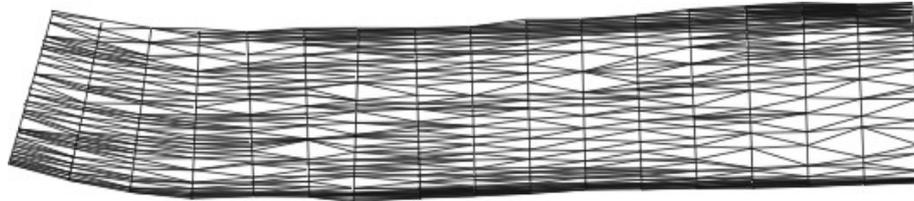
**Abbildung 3.1:** Aufnahme des Gewässerbettes durch Querprofile: Kamp (NÖ), Alm-Fluss (OÖ), Thaya (NÖ) und Lainsitz (NÖ)

### 3.1.1 Problemstellung und vorhandene Ansätze

Die Abb. 3.1 zeigen repräsentative Aufnahme-Konfigurationen zur Vermessung des Flussbettes mittels Querprofilen. Daraus ist ersichtlich, dass die Profile eine hohe Punktdichte in Profilrichtung und einen großen Profilabstand aufweisen. Während der Punktabstand im Profil typischerweise 0,2-2 m beträgt, liegt der entsprechende Profilabstand etwa bei 25-250 m. Die Relation von Punkt- zu Profilabstand kann demnach ca. 1:100 betragen. Eine profilorientierte Datenerfassung in dieser Art ist für offenes Gelände ungeeignet. Durch die gerichtete Erosionskraft des Wassers hingegen ändert sich die Form eines Fluss-Querschnitts in Fließrichtung nur langsam (vgl. Abb. 3.15). Aus diesem Grund ist die Erfassung des Gewässerbettes durch weitabständige Profile für Flussläufe bis zu einem gewissen Grad durchaus zulässig. Eine präzise Modellierung der Gewässersohle setzt allerdings eine ausreichend dichte Anzahl an gemessenen Querprofilen voraus. Vor allem an Stellen, wo sich der Querschnitt oder die Flussneigung deutlich ändert, sind entsprechende Profile vorzusehen.



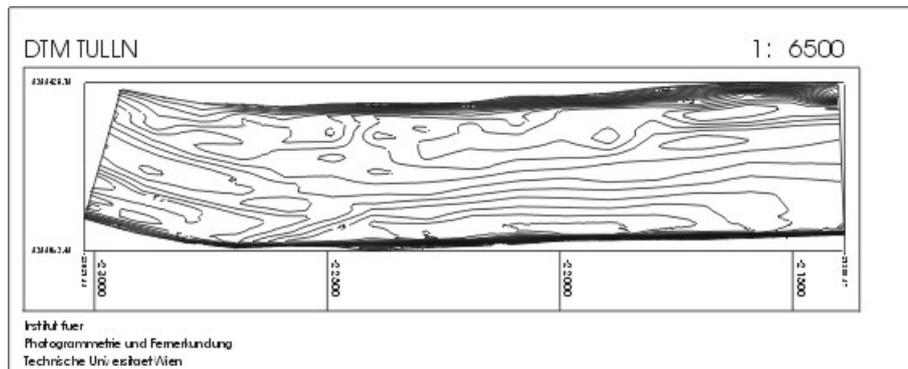
*Basisdaten, Querprofile, Punktabstand: ca. 2.5 m, Profilabstand: 100 m*



*Dreiecksnetz (TIN) aufgebaut aus Querprofilaten*



*Digitales Geländemodell der Flusssohle auf TIN-Basis*



*Aus DGM berechnete Höhenlinien, Höhenlinienintervall: 0.5 m*

**Abbildung 3.2:** Modellierung des Gewässerbettes auf Basis eines TIN, Donau, Tulln (NÖ)

Ein vorhandener Ansatz zur Modellierung des Gewässerbettes, basierend auf einer Dreiecksvermaschung der Querprofile, ist in [Heitzinger u. Kager, 1998] beschrieben. Ein TIN bietet prinzipiell Vorteile bei heterogener Datenverteilung und stellt daher für die Beschreibung der Gewässersohle aus weitabständigen Querprofilaten eine gute Möglichkeit dar. Auf elegante Weise können damit auch Aufweitungen und Verengungen des Fließquerschnittes berücksichtigt werden. Die Abb. 3.2 ist aus [Heitzinger u. Kager, 1998] entnommen und demonstriert die Leistungsfähigkeit des TIN-basierten Modellierungsansatzes.

Der TIN-basierte Ansatz funktioniert vor allem dann gut, wenn die Flussbreite deutlich größer als der Profilabstand ist und wenn die Krümmung des Flusslaufes im Bezug zum Profilabstand

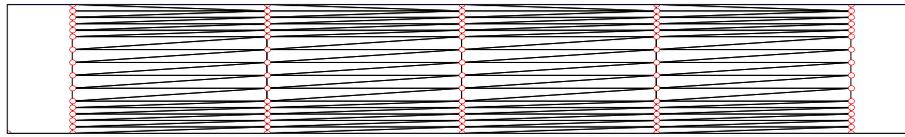
vernachlässigbar ist. Übersteigt der Profilabstand die Gewässerbreite, so besteht die Gefahr, dass im Zuge der Dreiecksvermaschung Uferpunkte des einen Profils mit Punkten der Gewässersohle im nächsten Profil verbunden werden. Dadurch entstehen Artefakte im Verlauf der Böschungfläche (siehe auch Abb. 3.8). Bei gekrümmten Flussläufen kommt es darüber hinaus bei der direkten Anwendung der Dreiecksvermaschung zu Einschnitten an der inneren und zu Klaffungen an der äußeren Uferböschung. Dieser Umstand ist anhand eines synthetischen Beispiels in den Abb. 3.3 und 3.4 dargestellt, bei dem identische Profildaten einmal für einen gestreckten und dann für einen gekrümmten Flussverlauf herangezogen wurden. Abgebildet ist ein 120 m langer Flussabschnitt, dessen Sohle durch fünf Querprofile jeweils im Abstand von 30 m erfasst ist. Die Flussbreite beträgt dabei konstant 20 m und die Wassertiefe 3 m.

Neben den bereits erwähnten Einschnitten in die Uferböschung fällt vor allem auch der abgelenkte Verlauf der Höhenlinien auf. Der Grund dafür ist, dass die Vermaschung der nichtparallelen Profile zu Dreiecksflächen führt, die an den Profilstellen Knicke aufweisen. Werden nun in diesen Dreiecksflächen weitere Zwischenpunkte linear eingerechnet, so wird fälschlicherweise entlang der geradlinigen Verbindung der Profile interpoliert. In Wirklichkeit fließt das Wasser aber entlang einer gekrümmten Linie und die Änderung der Fließrichtung erfolgt kontinuierlich.

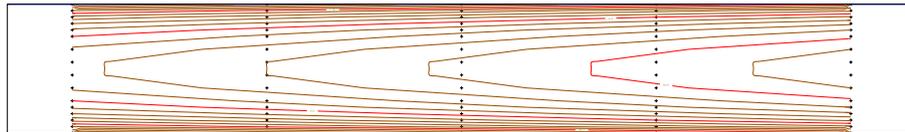
### 3.1.2 Interpolation von Querprofildaten

Die erwähnten Nachteile einer rein TIN-basierten Modellierung des Gewässerbettes machen den Einsatz einer besser an die Verhältnisse im Flusslauf angepassten Strategie erforderlich. Diese sollte dabei die folgenden Anforderungen erfüllen:

- Homogenisierung der heterogenen Datenverteilung in einem Preprocessing-Schritt. Auf Basis von verdichteten Punkten ist im Anschluss die gemeinsame Interpolation von Vorland- und Gewässerbett-daten in einem Guss möglich. Dadurch können Unstetigkeiten im Uferbereich vermieden werden.
- Berücksichtigung der in den einzelnen Querprofilen enthaltenen Flussmorphologie. Die Form der einzelnen Fließquerschnitte soll kontinuierlich von der Form des Ausgangsprofils in die des nächstfolgenden Profils übergeführt werden.
- Berücksichtigung von Querschnittsänderungen. Der Ansatz soll Aufweitungen bzw. Verengungen automatisch berücksichtigen.
- Anwendbarkeit auf gekrümmte Flussläufe.
- Anwendbarkeit auf gekrümmte oder schiefwinkelige Querprofile. Da die Erfassung der Querprofile i.A. nicht auf exakten Geraden (Drift des Messschiffes, ...) erfolgt, soll die Verarbeitung unregelmäßig angeordneter Punkte im Querprofil ohne vorhergehende Reduktion (rechnerische Begradigung) möglich sein.
- Einbeziehung von lokalen Variationen des Fließquerschnittes. Die Strategie soll flexibel genug sein, um kleinräumige Unregelmäßigkeiten des Uferverlaufes, die durch den Abstand der Querprofile nicht erfasst sind, berücksichtigen zu können.

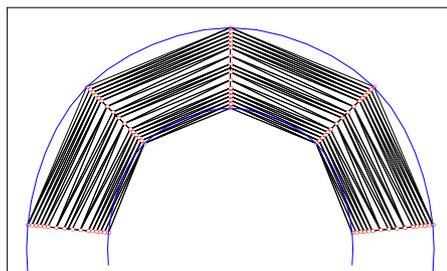


TIN aus Querprofilen

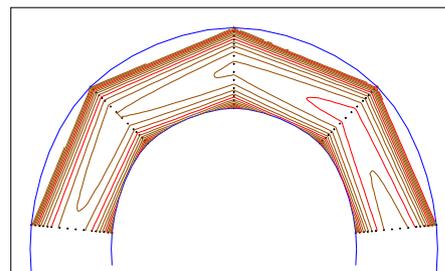


25 cm-Höhenlinien aus TIN-DGM

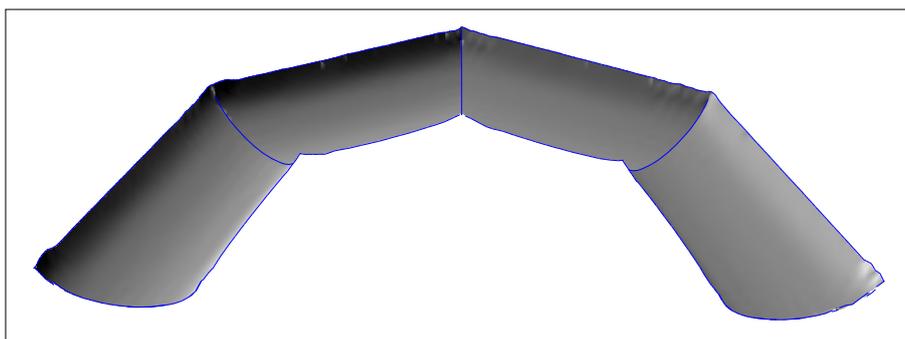
**Abbildung 3.3:** DGM des Gewässerbettes aus triangulierten Querprofilen, synthetisches Beispiel, gestreckter Flussschlauch, Profilabstand: 30 m, Punktabstand im Profil: 1-2 m



TIN aus Querprofilen



25 cm-Höhenlinien aus TIN-DGM



TIN-DGM des Flussbettes, Perspektivansicht der DGM-Schummerung

**Abbildung 3.4:** DGM des Gewässerbettes aus triangulierten Querprofilen, synthetisches Beispiel, gekrümmter Flussschlauch, Profilabstand: 30 m, Punktabstand im Profil: 1-2 m

### Ausgangsdaten:

Flussachse  
 $x = f(s)$   
 $y = f(s)$  } Kubische Splinekurve  
Querprofile

### Berechnungsablauf:

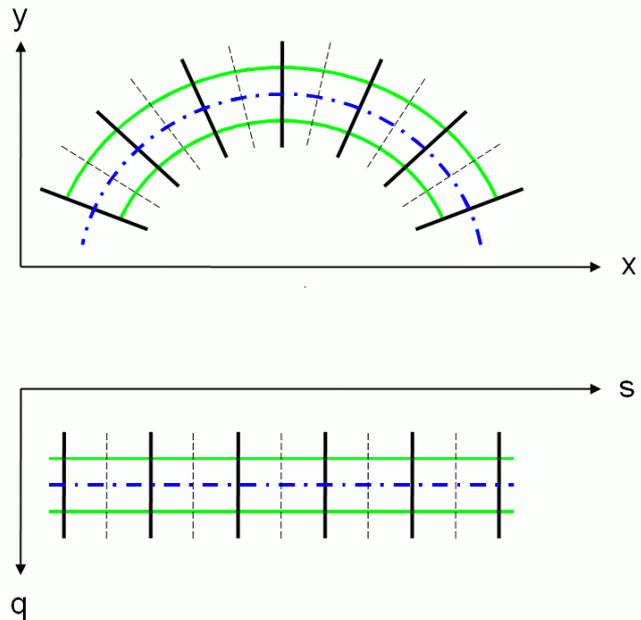
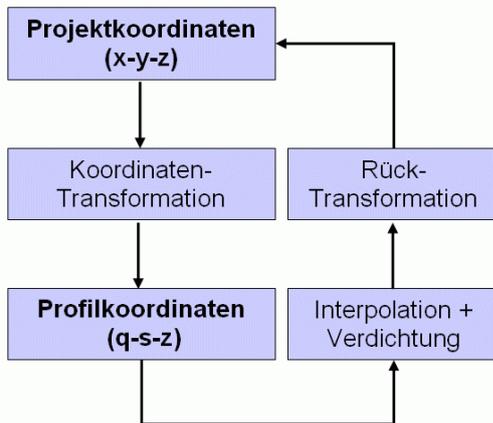


Abbildung 3.5: Prinzipskizze zur Interpolation von Querprofilen

## Grundkonzept

Das Grundkonzept eines Interpolationsansatzes für Querprofilen, welcher obige Anforderungen erfüllt, ist in [Mandlbürger, 2000] bzw. [Brockmann u. a., 2000] beschrieben. Zentraler Punkt der Überlegungen ist dabei die Idee, bei der Homogenisierung der Datenverteilung die Fließrichtung des Wassers zu berücksichtigen. Als genügend gute Näherung für die Fließrichtung kann die Gewässerachse herangezogen werden. Diese ist derart bereitzustellen, dass für jeden Achspunkt in Abhängigkeit der Bogenlänge  $s$  die zugehörige Position  $x, y$  im Projektkoordinatensystem sowie die Tangentenrichtung berechnet werden kann. Zunächst werden die  $x, y$  Projektkoordinaten der Profilmesspunkte in ein Profilkoordinatensystem  $(q, s)$  transformiert, wobei  $s$  die Bogenlänge (Kilometrierung) eines Profils und  $q$  den Querabstand eines Profilmesspunktes von der Achse bezeichnen. In diesem Profilkoordinatensystem erscheint der Flusslauf als gestreckter Schlauch. Während die Profile im Projektkoordinatensystem schiefwinklig angeordnet waren, sind sie im Profilkoordinatensystem parallel. Die Homogenisierung der Datenverteilung erfolgt nun durch Einrechnen von Zwischenpunkten im Profilkoordinatensystem, wobei unterschiedliche Interpolationsverfahren herangezogen werden können. In der Regel wird dabei ein regelmäßiges  $q-s$ -Raster berechnet. Den Abstand der eingerechneten Zwischenpunkte wählt man dabei zweckmäßigerweise in der Größenordnung des Punktabstandes im Querprofil. In einem letzten Schritt erfolgt schließlich die Rücktransformation der interpolierten Zwischenprofile ins Projektkoordinatensystem entlang der gekrümmten Achse. Dadurch ist ein glatter tangentialer Übergang von einem zum folgenden Querprofil gegeben. Die Fließrichtung wird somit bei der Modellierung der Gewässersohle mitberücksichtigt, die Querschnittsform ändert sich sukzessive zwischen den einzelnen gemessenen Profilen, und Klaffungen bzw. Einschnitte im Uferbereich können vermieden werden. Dieser grundsätzliche Ablauf ist in der Abb. 3.5 dargestellt.

## Beschreibung der Gewässerachse

An praktisch allen größeren Fließgewässern existieren Ordnungssysteme. Diese Ordnungssysteme bestehen in der Regel aus einem mathematisch definierten Achsverlauf (Geraden, Kreisbögen, Parabeln, ...) und der dazugehörigen Kilometrierung. Da bei den größeren Fließgewässern, wie Donau, Rhein, Oder, etc., die Kilometrierung meist schon vor mehreren Jahrzehnten festgelegt worden ist, entspricht diese aufgrund von Regulierungsmaßnahmen oder ähnlichem meist nicht der tatsächlichen Bogenlänge entlang der heutigen Achse. Der Zusammenhang zwischen der Kilometrierung  $s$  und dem lagemäßigen Achsverlauf kann allerdings immer durch eine entsprechende Parametrisierung der Achse hergestellt werden (z.B.  $x = f(s), y = f(s)$ ). Durch diese parametrisierte Beschreibung kann ein beliebig komplexer krummliniger Flussverlauf in Abhängigkeit der Kilometrierung dargestellt werden.

Bei kleineren Flüssen oder Bächen existiert oft keine festgelegte Achse. Diese lässt sich aber für die Zwecke der Verdichtung von Querprofildaten ausreichend genau aus großmaßstäbigen Karten oder aus einer DGM- bzw. DOM-Schummerung durch manuelles Digitalisieren bestimmen. Dabei entsteht im Allgemeinen ein Polygonzug, dessen Bogenlänge für die Parametrisierung der Achse verwendet werden kann. Unabhängig von der Datenquelle muss die Achse in jedem Fall als glatte Kurve vorliegen. Die Glattheit bezieht sich dabei auch auf die Tangentenrichtung, was einer Stetigkeit der ersten Ableitung entspricht ( $C^1$ -Stetigkeit). Eine sehr allgemeine Form der Kurvenbeschreibung stellen zusammengesetzte kubische Splines dar. Diese sind stetig bis zur zweiten Ableitung ( $C^2$ -stetig) und können aus einzelnen Stützpunkten und den zugehörigen Kilometrierungen als Kurvenparameter aufgebaut werden. Die gesamte Splinekurve ist bei  $n$  Stützpunkten aus  $n - 1$  kubischen Parabeln der Form  $a_i s^3 + b_i s^2 + c_i s + d_i$  aufgebaut, wobei für jedes Teilstück  $i$  die Koeffizienten  $a_i, b_i, c_i$  und  $d_i$  so ermittelt werden, dass die Funktionswerte sowie deren Tangenten und Krümmungen an den  $n - 2$  inneren Stützstellen identisch sind. Die Koeffizienten sind für die  $x$ - und die  $y$ -Richtung getrennt zu berechnen. Für weitere Details zur Kurveninterpolation mittels kubischen Splines sei auf die Literatur, z.B. [Kraus, 2000], verwiesen.

## Koordinatentransformation

Die Verdichtung der Querprofile erfolgt, wie bereits erwähnt, im Profilkordinatensystem. Dazu müssen die Projektkoordinaten der einzelnen Querprofile zunächst transformiert werden. Das Profilkordinatensystem ist über die Achspunkte  $A_1, A_2, \dots, A_n$  und die dazugehörigen Kurvenparameter  $s_1, s_2, \dots, s_n$  festgelegt. Aus den  $A_i(x_i, y_i)$  und  $s_i$  können die Koeffizienten  $a_i, b_i, c_i, d_i$  einer zusammengesetzten kubischen Splinekurve berechnet werden, womit Verlauf und Tangentenrichtung der Achse für alle  $s \in [s_1 \dots s_n]$  definiert ist. Die Transformation eines beliebigen Punktes  $P$  mit den Koordinaten  $(x_p, y_p)$  ins Profilsystem  $(q_p, s_p)$  läuft auf die Bestimmung des Lotfußpunktes  $F$  auf der Splinekurve hinaus. Sie ist in Abb. 3.6 dargestellt.  $F$  ist dabei der Punkt auf der Kurve, welcher vom Punkt  $P$  den kleinsten Abstand hat. Die Gerade  $\overline{FP}$  ist dabei stets eine Normale zur Tangente  $\mathbf{t}$  an die Kurve in  $F$ . Der Abstand zwischen  $F$  und  $P$  ist dann der gesuchte Querabstand  $q_p$ , wobei  $q$  positiv ist, wenn  $P$  in Richtung des aufsteigenden Kurvenparameters  $s$  betrachtet rechts von der Kurve liegt (Rechtssystem).  $s_p$  ist der zum Lotfußpunkt  $F$  gehörende Kurvenparameter (Kilometrierung, Bogenlänge, in der Folge mit Stationierung bezeichnet). Der Querabstand  $q$  ist die Abszisse und die Stationierung  $s$  die Ordinate im Profilkordinatensystem. Die Berechnung der Profilkordinaten erfolgt iterativ, da zunächst dasjenige Segment der zusammengesetzten Splinekurve gefunden werden muss,

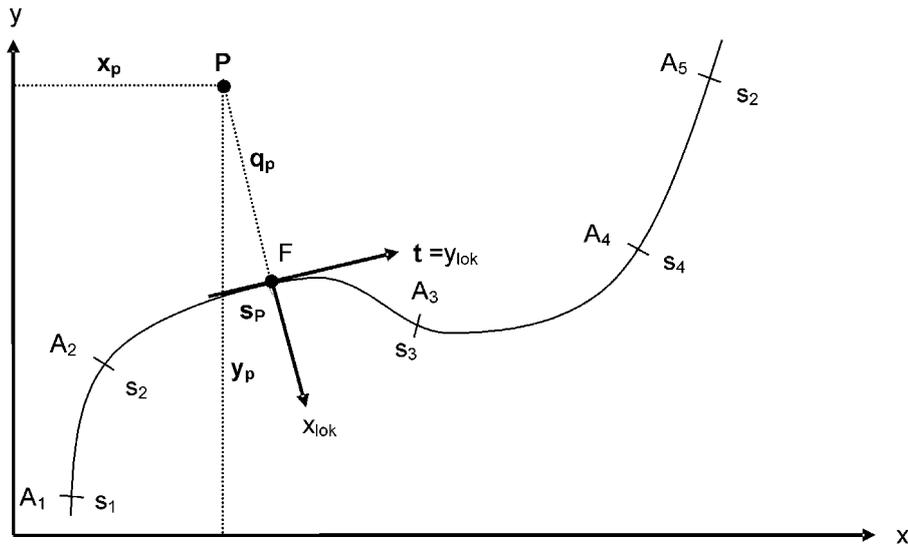
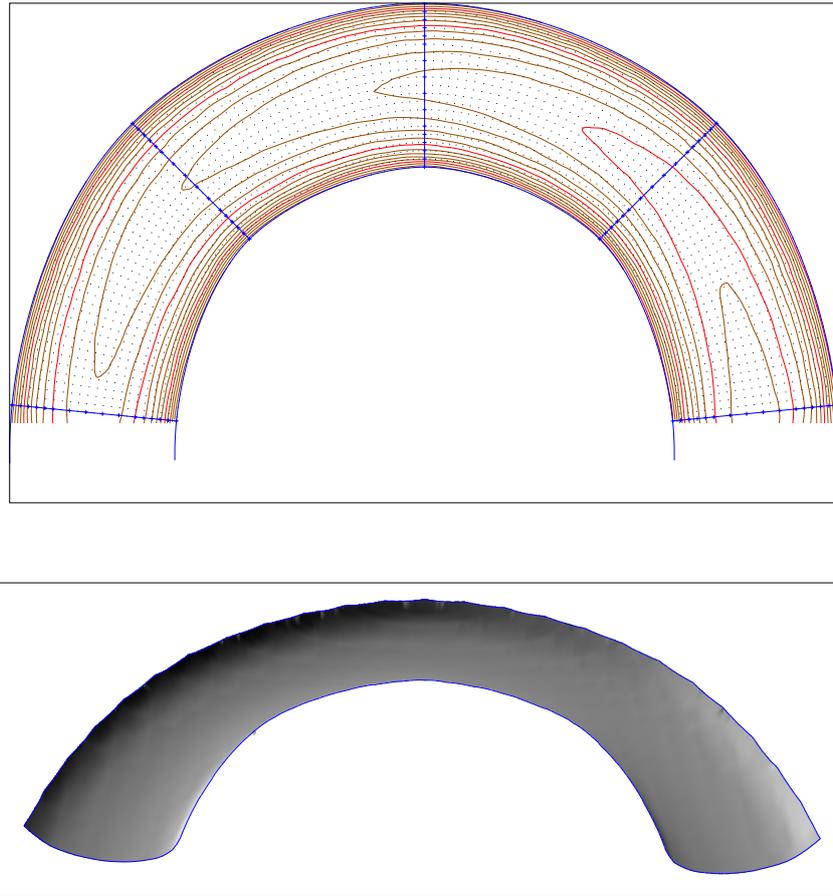


Abbildung 3.6: Zusammenhang zwischen Projekt- und Profilkordinatensystem

in welchem der Lotfußpunkt  $F$  liegt. Die umgekehrte Transformation ist dagegen einfach, da über die Angabe der Stationierung der zugehörige Achspunkt im Projektkoordinatensystem und die Tangentenrichtung definiert ist. Der Querabstand braucht dann nur auf der Normalen zu  $\mathbf{t}$  abgetragen zu werden, um die Projektkoordinaten  $x, y$  zu erhalten.

Im Sinne der obigen Ausführungen müssen in einem ersten Vorbereitungsschritt alle Querprofile ins Profilkordinatensystem transformiert werden. Da die einzelnen Profilmuster i.A. nicht exakt senkrecht zur Achse liegen und daher alle leicht unterschiedliche Stationierungen aufweisen, muss zunächst eine für das gesamte Querprofil repräsentative Bezugsstationierung ermittelt werden. Dazu kann entweder das Mittel aus den Stationierungen aller Profilmuster oder die Stationierung des Schnittpunktes des Querprofils mit der Achse herangezogen werden. Weist das Querprofil keinen Verschnitt mit der Achse auf, kann zur Ermittlung der Bezugsstationierung auch derjenige Profilmuster verwendet werden, welcher der Achse am nächsten liegt. Diese Vorgangsweise setzt jedenfalls voraus, dass die Profildaten in strukturierter Form vorliegen. Mit anderen Worten, die Zuordnung der Punkte zu einem bestimmten Profil muss gegeben sein. Ist die repräsentative Stationierung gefunden, dann ist damit auch gleichzeitig der zugehörige Achspunkt  $F$  und dessen Tangentenrichtung  $\mathbf{t}$  festgelegt. Somit ist auch für das Querprofil ein lokales Koordinatensystem  $x_{lok}, y_{lok}$  mit Ursprung in  $F$  und  $\mathbf{t}$  als  $y$ -Achse definiert, welches mit dem Projektkoordinatensystem durch eine ebene 3-Parameter-Transformation (zwei Verschiebungen und eine Drehung) in Zusammenhang gebracht werden kann. Der Übergang auf Querprofil-bezogene lokale Koordinatensysteme bringt mehrere Vorteile. Einerseits ist die Umrechnung der Projekt- in die lokalen Koordinaten mathematisch wie auch rechentechnisch einfacher und schneller als die Transformation zwischen Profil- und Projektkoordinaten. Andererseits ergibt sich bei sehr langen Querprofilen im Zusammenhang mit stark gekrümmten Flussläufen (z.B. Mäandern) das Problem, dass auf der Bogeninnenseite die Profilmuster mit großem Abstand zur Achse (Vorland) gelegentlich bereits einem anderen Achsabschnitt zugewiesen werden. In diesem Fall weisen die zu einem Profil zusammengehörenden Punkte große Stationierungsdifferenzen auf, was zu Problemen bei der Weiterverarbeitung führt. Für die nachfolgende Verdichtung der Querprofildaten haben sich daher profilde-



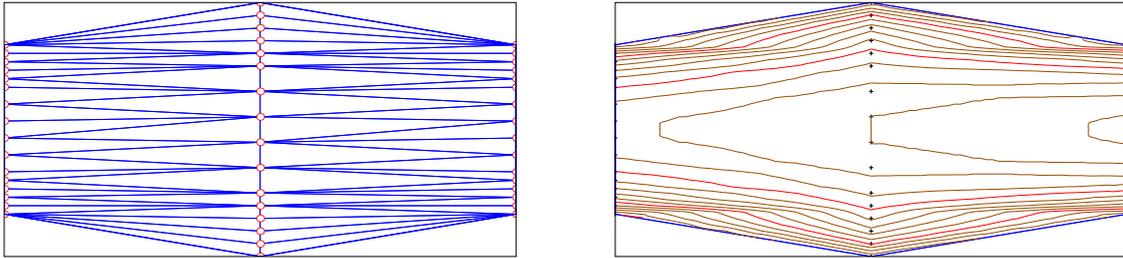
*Abbildung 3.7: Homogenisierung der Datenverteilung durch Triangulierung, Originale Querprofile (blau), interpolierte Zwischenpunkte (schwarz), 25 cm-Höhenlinien (braun,rot)*

zogene, lokale Koordinatensysteme als günstiger erwiesen.

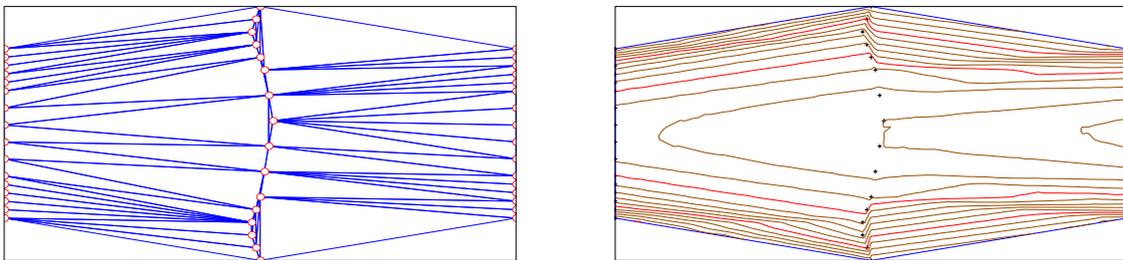
### **Interpolation mittels TIN**

Zum Einrechnen von Zwischenpunkten können unterschiedliche Interpolationsansätze verwendet werden. Eine Möglichkeit besteht im Aufbau eines Dreiecksnetzes. Während der Einsatz des TIN auf Basis der ursprünglichen Projektkoordinaten noch die in 3.1.1 beschriebenen Nachteile mit sich brachte, erzielt man mit derselben Technik angewandt auf die lokalen Profilkordinaten gute Ergebnisse. Die Anpassung an den krummlinigen Achsverlauf wird - gleichgültig welcher Interpolationsansatz gewählt wird - nicht durch die Interpolation selbst, sondern durch die Koordinatentransformation gewährleistet. Ein Beispiel zeigt die Abbildung 3.7.

Mit einem TIN-basierten Ansatz können auf elegante Weise Aufweitungen und Einengungen des Flusslaufes berücksichtigt werden, da sich die Dreiecke automatisch an die unterschiedliche Flussbreite anpassen. Allerdings bestehen, wie in Abb. 3.8 ersichtlich, dahingehend Pro-



**Abbildung 3.8:** Homogenisierung der Datenverteilung durch Triangulierung, TIN und 25 cm-Höhenlinien, Problemkreis Aufweitung



**Abbildung 3.9:** Homogenisierung der Datenverteilung durch Triangulierung, TIN und 25 cm-Höhenlinien, Problemkreis Krummliniges Querprofil

bleme, dass Uferpunkte des einen Profils mit Punkten im Innenbereich der Gewässersohle im nächsten Profil verbunden werden. Dies führt zu einer Verfälschung der Fläche, was aus dem zugehörigen Höhenlinienbild klar zu erkennen ist. Außerdem treten bei abrupten Querschnittsänderungen wieder Knicke der Höhenlinien an den einzelnen Profilstellen auf. Überall dort, wo es am Übergang vom einen zum nächsten Profil zu einer markanten Richtungsänderung der Dreiecke kommt, wirkt sich diese auch in einem abgeknickten Verlauf der Höhenlinien aus. Der Effekt ist somit derselbe, wie er bereits bei der Dreiecksvermaschung von Querprofilen im Projektkoordinatensystem (vgl. 3.1.1) aufgetreten ist. Ein glatterer Übergang kann hier nur durch den Einsatz einer Interpolation höheren Grades (Polynom-Interpolation, Kriging) erzielt werden. Weiters ist anzumerken, dass nicht jedes beliebige Dreieckskriterium eingesetzt werden kann. Die Abb. 3.9 zeigt ein Beispiel, in dem das Dreiecksnetz mittels Constrained Delaunay Triangulation (CDT) aufgebaut wurde. Obwohl die Querprofile als Zwangskanten eingeführt wurden, kommt es zu Dreiecken, bei denen ausschließlich Punkte desselben Querprofils beteiligt sind. Dies führt in der Regel zu Artefakten in Form von annähernd vertikalen Dreiecken. Für die HN-Modellierung hätte das bedingt durch die Stauwirkung gravierende Folgen. Es ist daher im Vorhinein bei der Vermaschung zu berücksichtigen, dass die Dreiecke aus jeweils zwei Punkten des einen sowie einem Punkt des nächsten oder vorigen Profils aufgebaut sind. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, die Profilpunkte zunächst auf eine Gerade zu reduzieren, in welchem Fall dann die Vermaschung mittels CDT erfolgen kann.

Dadurch wird aber der Einsatzbereich dieses Interpolationsansatzes eingeschränkt, da Querprofile, die stark von einer Geraden abweichen, damit nur mehr bedingt verarbeitet werden können.

## Interpolation mittels Kriging

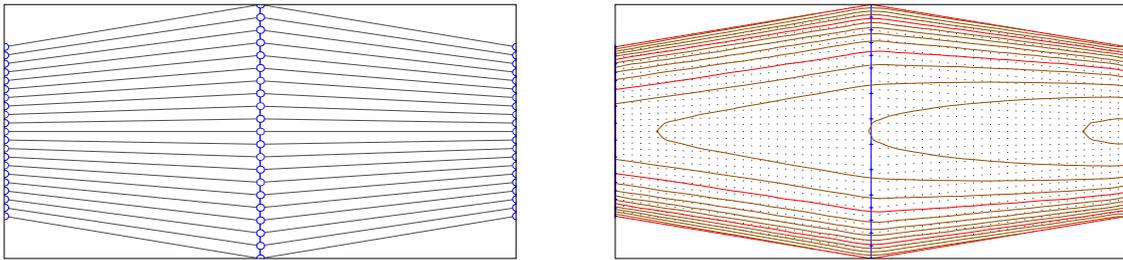
Kriging, bzw. die weitgehend äquivalente Lineare Prädiktion stellen Standardverfahren zur DGM-Interpolation dar. Um eine qualitativ hochwertige Flächenbeschreibung zu erzielen ist allerdings eine gewisse Homogenität der Datenverteilung Voraussetzung. Auf den ersten Blick erscheint Kriging daher für den Zweck der Homogenisierung der Punktverteilung bei weitabständigen Querprofilen ungeeignet. Bei näherer Betrachtung erkennt man aber, dass die Unregelmäßigkeit der Datenverteilung hier nicht zufällig, sondern systematisch ist. Der Punktabstand in den einzelnen Profilen ist i.A. annähernd konstant, und mit dem Abstand der Profile verhält es sich ähnlich.

Das Mittel, um diese Systematik im Rahmen von Kriging zu formalisieren, ist die Kovarianzfunktion (KF) oder deren Komplement das Variogramm. Das Variogramm beschreibt die Streuung zweier Beobachtungen (Punkte) in Abhängigkeit des Distanzvektors  $\mathbf{d}$ . Die Variogrammfunktion ist daher im Ursprung per definitionem gleich Null und steigt mit zunehmender Distanz solange an, bis sich die Streuung nicht mehr erhöht und daher statistische Unabhängigkeit einstellt. Statt dem Variogramm kann auch die KF verwendet werden, welche ein Maß für die Abhängigkeit zweier Punkte in einer gewissen Entfernung angibt. Die KF sinkt daher ausgehend von ihrem Scheitelwert  $C_0$  mit zunehmender Entfernung gegen Null. Bei der DGM-Interpolation mittels Kriging werden zumeist isotrope Kovarianzfunktionen verwendet. Bei isotropen Verhältnissen ist die Abhängigkeit zweier Punkte nur von ihrer Distanz, nicht aber von ihrer Richtung bestimmt. Die KF ist also rotationssymmetrisch. Genau in dieser Richtungsabhängigkeit besteht nun der Ansatzpunkt, Kriging für die Interpolation von Querprofilen einsetzbar zu machen. Die Kovarianz von Punkten im Profil ( $q$ -Richtung) nimmt, bedingt durch die hohe Datendichte, wesentlich schneller ab, als das für korrespondierende Punkte in benachbarten Querprofilen ( $s$ -Richtung) der Fall ist. D.h. durch eine Stauchung in  $q$ -Richtung und einer entsprechenden Dehnung in  $s$ -Richtung erhält man eine affin transformierte KF, wobei das Maß für die Stauchung aus dem Verhältnis von Punkt- zu Profilabstand abgeleitet wird. Auf Basis einer solchen KF kann Kriging mit gutem Erfolg zur Interpolation von Querprofilen eingesetzt werden.

Der Vorteil von Kriging gegenüber einem TIN-basierten Ansatz ist vor allem der, dass es eine glattere Interpolation darstellt. Beim Kriging gehen zur Interpolation eines Zwischenpunktes, entsprechend seiner Entfernung und Richtung zu den umliegenden Stützpunkten, Punkte aus mehreren Querprofilen ein. Bei der Interpolation mittels TIN sind dabei stets nur die Punkte aus zwei benachbarten Profilen involviert. Aus diesem Grund kann auch bei Aufweitungen und Einengungen mittels Kriging eine größere Glattheit der Fläche erzielt werden.

## Polynom-Interpolation

Das Einrechnen von Zwischenpunkten ist generell lediglich ein Preprocessing-Schritt zur Homogenisierung der Datenverteilung. Kriging ist für diesen Homogenisierungsschritt ein relativ aufwendiges Verfahren. Eine vor allem rechentechnisch einfachere Methode stellt die Polynom-Interpolation dar.



**Abbildung 3.10:** Homogenisierung der Datenverteilung durch lineare Interpolation, links: Querprofile (blau) + Feldlinien (grau), rechts: Zwischenpunkte (schwarz) + 25 cm-Höhenlinien

Der Grundgedanke ist dabei, dass zu jedem Punkt eines Querprofils die korrespondierenden Punkte in den benachbarten Profilen ermittelt werden. Einzelne Profilpunkte sind dabei dann zueinander korrespondierend, wenn sie dasselbe Verhältnis  $\bar{q}$  von Querabstand zu Profillbreite aufweisen. Innerhalb eines Profils kann dabei aufgrund der hohen Punktdichte in der Regel linear interpoliert werden. Verbindet man die korrespondierenden Punkte, so erhält man zunächst 3D-Polygonzüge, die in ihrer Gesamtheit über die Gewässerbreite als Feldlinien interpretiert werden können. Die Feldlinien laufen bei konstanter Profillbreite parallel, scharfen sich im Bereich von Einengungen zusammen und streben bei Aufweitungen entsprechend auseinander.

Die Interpolation von Zwischenpunkten kann nun direkt auf Basis der Stützpunkte der einzelnen 3D-Polygonzüge erfolgen (lineare Interpolation). Aufgrund der Orientierung entlang der Feldlinien weist diese Variante wesentlich günstigere Interpolationseigenschaften auf als die Dreiecksvermaschung, wovon man sich anhand der Abb. 3.10 überzeugen kann. Auffallend ist hier vor allem, dass es einerseits zu keinem Abknicken der Höhenlinien kommt und andererseits auch die Uferböschung korrekt interpoliert ist. Ist dennoch eine glattere Interpolation vonnöten, dann können die Stützpunkte als Ausgangsbasis für die Berechnung von zusammengesetzten dreidimensionalen quadratischen oder kubischen Parabeln herangezogen werden. Die Zwischenpunkte werden dann aus den quadratischen oder kubischen Splines ermittelt. Ob eine Interpolation höheren Grades überhaupt eingesetzt werden muss, hängt generell vom zu erwartenden Ausmaß der Querschnittsänderungen ab. Als Anhaltspunkt für die Praxis kann dabei dienen, dass für breite und regulierte Gewässer die lineare Interpolation meist ausreicht, während bei kleineren naturnahen Flüssen eine Interpolation höheren Grades anzuraten ist.

Ein weiterer Vorteil bei der Polynom-Interpolation ist, dass eine Trennung in die Bereiche links und rechts der Flussachse leicht vorgenommen werden kann. Das ist insbesondere bei gekrümmten Flussläufen günstig, da hier der Prallhang (Bogenaußenseite) und der Gleithang (Bogeninnenseite) oft unterschiedliche Geometrien im Grundriss wie auch im Profil aufweisen. Beim Prallhang tritt beispielsweise oft eine einseitige Querschnittsverbreiterung auf. Durch Trennung in die beiden Flusshälften kann diesem Umstand bei der Interpolation von Zwischenpunkten besser Rechnung getragen werden. Notwendig wird die getrennte Berechnung auch im Bereich von Bühnenfeldern. Diese werden in der Regel unabhängig von der Fahrrinne erfasst, wobei die Profile dann nur vom Ufer bis zum Bühnenkopf reichen und daher nur auf einer Seite der Flussachse liegen.

### 3.1.3 Interpolation unter Berücksichtigung der Wasser-Land-Grenze

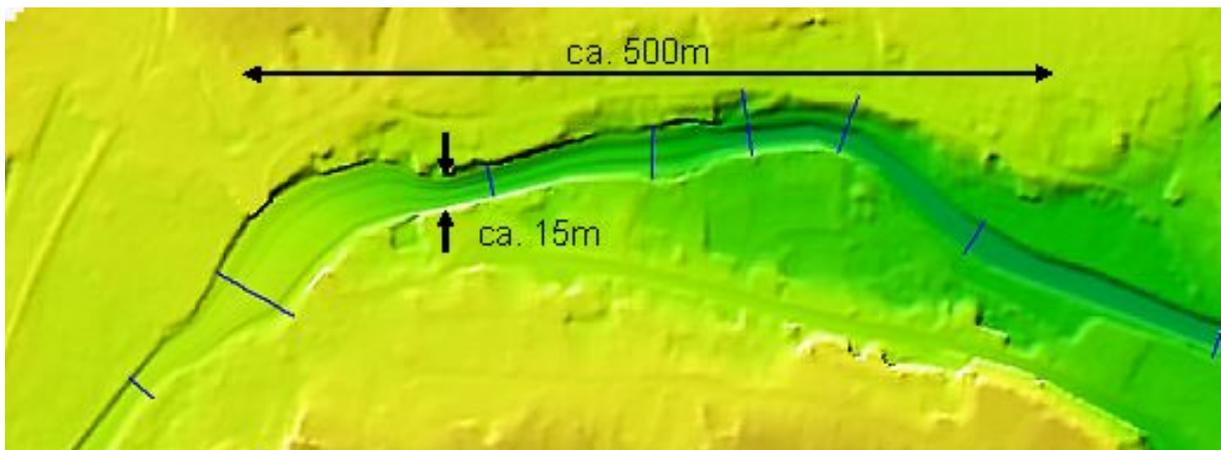
Im Abschnitt 3.1.2 wurde der grundsätzliche Ansatz einer achsorientierten Interpolation von Querprofilen vorgestellt. Dabei wurde stets vorausgesetzt, dass die Wasser-Land-Grenze (WLG) hinreichend genau durch die Profildaten erfasst ist. In der Natur kommt es aber in vielen Fällen zu einer weitaus stärkeren Variation der WLG. D.h. die Gewässerbreite schwankt zwischen zwei Messquerschnitten mehr oder weniger stark, wobei die lokalen Unregelmäßigkeiten bei kleineren unregulierten Flüssen meist wesentlich stärker sind als bei breiten und regulierten Flüssen.

Die Abbildung 3.11 zeigt ein entsprechendes Beispiel an der Lainsitz bei Gmünd (NÖ). Der Fluss weist in diesem Bereich eine stark variierende Gewässerbreite auf, was einerseits direkt aus der Visualisierung des DGM (Farbkodierte Darstellung überlagert mit Schummerung) und andererseits aus den unterschiedlichen Längen der in blau dargestellten Grundrisse der Querprofile zu erkennen ist. Wendet man das in 3.1.2 besprochene Interpolationsverfahren an, so ergibt sich das in Abb. 3.12 dargestellte Bild. Darin ist deutlich zu erkennen, dass die interpolierten Zwischenpunkte bei Verengungen in den Uferbereich hineinragen oder bei Aufweitungen diesen gar nicht erreichen. Ein auf diese Art modelliertes Gewässerbett ist für eine Weiterverarbeitung im HN-Modell ungeeignet. Vielmehr muss bei der Interpolation der Querprofile der lokale Verlauf der WLG und damit die lokale Gewässerbreite berücksichtigt werden.

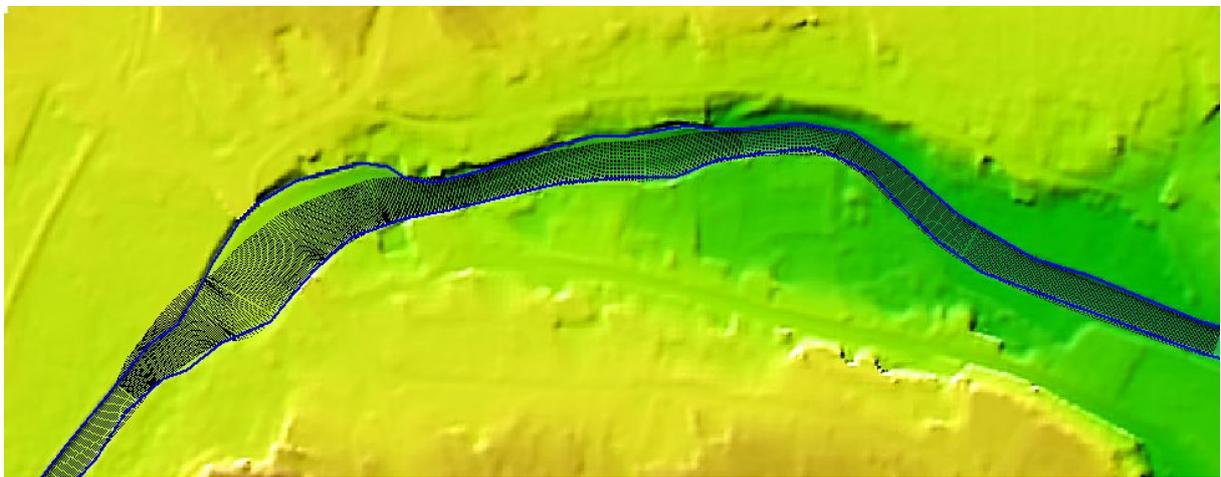
Voraussetzung für die Anwendung der folgenden Strategie ist, dass die WLG als 3D-Polylinie vorliegt. Wie diese aus unterschiedlichen Datenquellen bestimmt werden kann, wird im Abschnitt 3.3 erläutert. Die Berücksichtigung der WLG erfolgt in drei Stufen und ist als Prinzipskizze in Abb. 3.14 dargestellt.

1. Zunächst wird für ein Zwischenprofil die Interpolation ohne Berücksichtigung der WLG durchgeführt. Daraus ergibt sich eine Ist-Lage des Profils, welche von der Soll-Lage abweichen kann. Der Anfangs- bzw. Endpunkt des Profils in der Ist-Lage sei mit  $P_A$  bzw.  $P_E$  bezeichnet.
2. Die Soll-Lage des Profils wird aus dem Verschnitt der WLG mit der vertikalen Profilebene ermittelt. Aus der bekannten Stationierung des Zwischenprofils können dazu aus der Beschreibung der Achse als zweidimensionale Splinekurve der Profil-Nullpunkt  $P_0$  und der Richtungswinkel der Profilebene berechnet werden. Die Lotrechte in  $P_0$  und der horizontale Richtungsvektor des Profils spannen dann die Vertikalebene auf, welche mit der WLG verschnitten werden kann. Als Ergebnis erhält man Anfangs- und Endpunkt  $(\bar{P}_A, \bar{P}_E)$  des Profils in der Soll-Lage. Bei schräg zur Achse liegenden Querprofilen ist diese Operation sinngemäß mit der entsprechenden vertikalen Ebene des schrägen Zwischenprofils durchzuführen.
3. Durch die beiden Punktpaare  $P_A / P_E$  bzw.  $\bar{P}_A / \bar{P}_E$  können die Ist- und die Soll-Lage des Profils durch eine affine Transformation ineinander übergeführt werden. Zunächst werden dazu  $\bar{P}_A$  und  $P_A$  zur Deckung gebracht (Verschiebung) und anschließend wird das Ist-Profil derart skaliert, dass auch die Profildatenpunkte  $\bar{P}_A$  und  $P_A$  übereinstimmen (Streckung bzw. Stauchung).

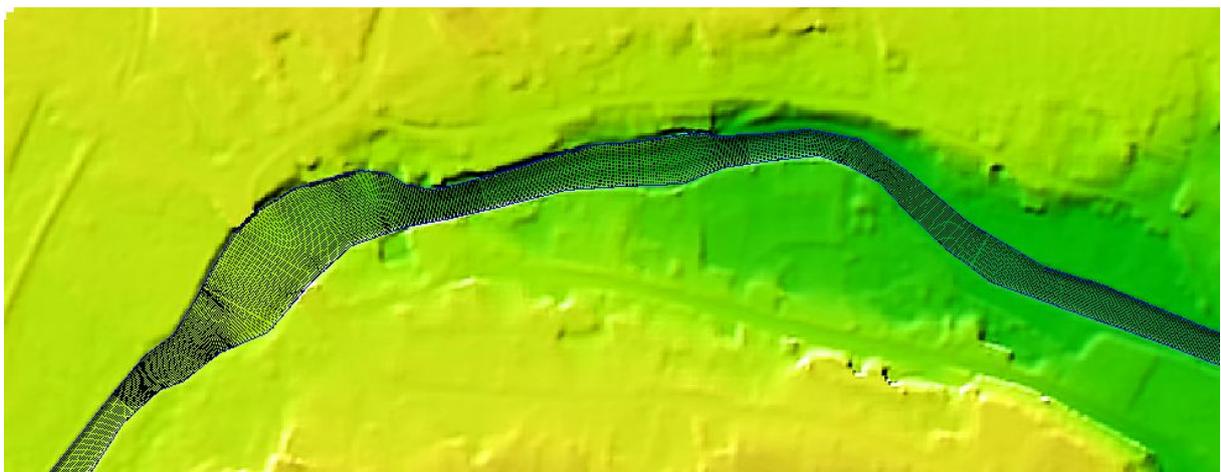
Aus der Abbildung 3.14 ist ersichtlich, dass die ursprünglich durch Interpolation aus den gemessenen Querprofilen gewonnene Querschnittsfläche  $A$  durch die Aufweitung im Zuge der



**Abbildung 3.11:** Starke Variation der Gewässerbreite an der Lainsitz bei Gmünd (NÖ); Daten: Fa. GeoConsult, Wien



**Abbildung 3.12:** Interpolierte Zwischenpunkte ohne Berücksichtigung der WL, WL (blau), interpolierte Zwischenpunkte (schwarz)



**Abbildung 3.13:** Interpolierte Zwischenpunkte mit Berücksichtigung der WL, interpolierte Zwischenpunkte (schwarz)

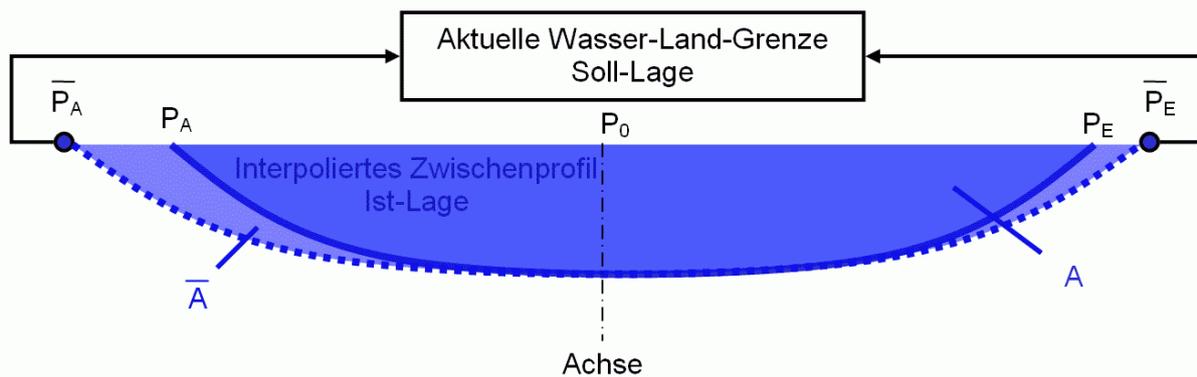


Abbildung 3.14: Prinzipskizze zur Berücksichtigung der WLG für die Querprofil-Interpolation

WLG-Anpassung eine Vergrößerung erfährt ( $\bar{A} > A$ ). Analog dazu würde die Querschnittsfläche bei Verengung verkleinert werden. Dies entspricht allerdings mit großer Wahrscheinlichkeit nicht den Verhältnissen in der Natur, da Laufaufweitungen meist mit einer flacheren Wasserführung und umgekehrt Laufverengungen mit einer entsprechenden Eintiefung einhergehen. Eine bessere Modellierung erreicht man daher, wenn die durch den Verlauf der WLG angezeigte Aufweitung durch eine Verminderung der Wassertiefe kompensiert wird. Aus geometrischer Sicht kann das durch Korrektur der Profilhöhen geschehen, sodass das auf die Soll-Lage transformierte Profil dieselbe Querschnittsfläche aufweist wie die ursprünglich interpolierte ( $\bar{A} = A$ ).

Eine weitere Verbesserung erreicht man, wenn zu den geometrischen auch noch physikalische Überlegungen einbezogen werden. So ist nach dem Kontinuitätsgesetz bei stationärer Strömung der Durchfluss  $Q$  in jedem beliebigen Querschnitt konstant. Unter der Annahme einer über den gesamten Querschnitt gemittelten Geschwindigkeit  $v_i$  gilt:

$$Q = \bar{v}_1 A_1 = \bar{v}_2 A_2 = \text{const}$$

Wie bereits im Abschnitt 2.3.2 ausgeführt, bedeutet obige Formel in Worten ausgedrückt, dass das Produkt aus Fließgeschwindigkeit und Querschnittsfläche konstant ist. Die mittlere Fließgeschwindigkeiten ihrerseits sind allerdings das Ergebnis einer eindimensionalen HN-Modellierung, welche wiederum das Gewässerbett als Input benötigt. Eine entsprechende Profilanpassung nach dem Kontinuitätsgesetz kann also nur iterativ erfolgen. Dieser Aufwand kann sich insbesondere bei mehrdimensionaler Abflussmodellierung mit hohem Genauigkeitsanspruch lohnen, da gerade dem Gewässerbett in diesem Fall eine bedeutende Rolle zukommt. In der Abb. 3.13 sind verdichtete Zwischenpunkte dargestellt, wobei in diesem Fall im Gegensatz zur Abb. 3.13 die Wasser-Land-Grenze bei der Interpolation mitberücksichtigt wurde.

An dieser Stelle sei aber ausdrücklich darauf hingewiesen, dass auch eine noch so sorgfältige Modellierung des Gewässerbettes die Qualität der Datenerfassung nicht verbessern kann. Bei hohem Anspruch an die HN-Modellierung muss also das Gewässerbett mit entsprechender Genauigkeit und räumlicher Auflösung erfasst werden. Lokale Querschnittsformen wie tiefe Kolke, Flachwasserstellen oder gar inselförmige Schotterbänke können nur dann flächenmäßig korrekt aufbereitet werden, falls sich diese Details auch in den zur Verfügung stehenden Profildaten widerspiegeln.



**Abbildung 3.15:** DGM 500 m langen und 60 m breiten Gewässerbettstreifens der Elbe berechnet aus Fächerlotdaten, Höhenkodierung überlagert mit Schummerung; Datenquelle: Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), Koblenz

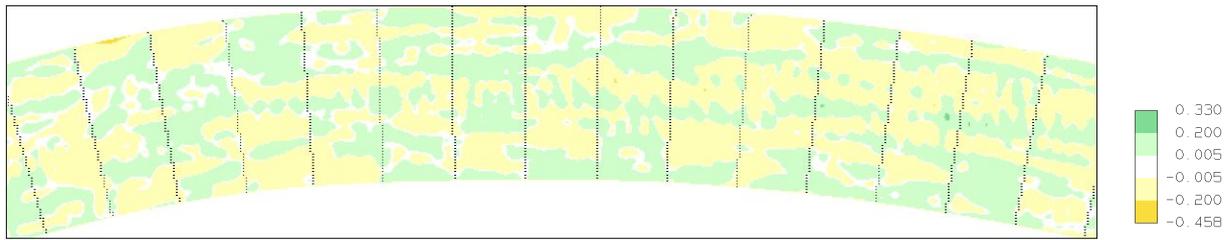
### 3.1.4 Vergleich: Fächerlot versus interpolierte Querprofile

In diesem Abschnitt erfolgt eine Evaluierung der in den vorangegangenen Abschnitten erläuterten Modellierung der Gewässersohle mittels Querprofilen. Als Referenz dient dabei eine flächenhafte Aufnahme der Fahrrinne der Elbe mittels Fächerlot. Aus den im regelmäßigen 1 m-Raster vorliegenden Daten wurden einerseits Querprofile im Abstand 25 m, 50 m, 100 m bzw. 200 m extrahiert und andererseits ein DGM eines etwa 500 m langen und 60 m breiten Gewässerbettstreifens interpoliert. Die künstlich erzeugten Querprofile wurden anschließend nach dem Verfahren des Abschnittes 3.1.2 verdichtet und daraus ebenfalls jeweils ein DGM bestimmt. Die Abb. 3.15 zeigt die aus Fächerlotdaten ermittelte Topographie des Gewässerbettes. In der Abb. 3.16 sind die Differenzmodelle der einzelnen Querprofil-Varianten im Vergleich zum Fächerlot-DGM dargestellt. Die Tabelle 3.1 enthält darüber hinaus eine statistische Zusammenfassung der Höhenabweichungen.

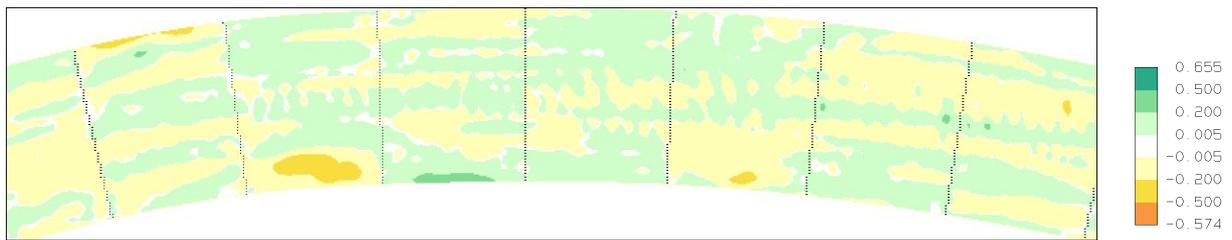
**Tabelle 3.1:** Statistik der Höhenabweichungen zwischen einem DGM aus Fächerlotdaten und solchen aus interpolierten Querprofilen

Profilabstand	Std.abw.	Mittel	dh max +	dh max -
25m	±0.06 m	0.00 m	0.40 m	-0.40 m
50m	±0.08 m	0.00 m	0.44 m	-0.49 m
100m	±0.12 m	-0.01 m	0.49 m	-0.78 m
200m	±0.20 m	-0.05 m	1.00 m	-1.01 m

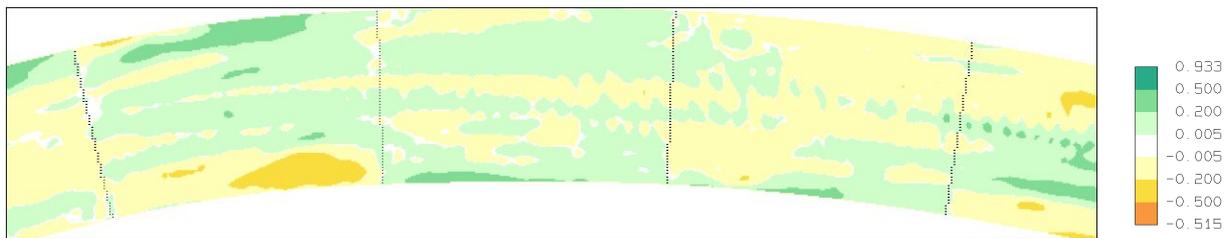
Aus Abb. 3.15 ist die feine Gliederung des Gewässerbettes im Fall einer flächenhaften Aufnahme mittels Fächerlot zu erkennen. Auffallend sind vor allem die Riffel-Strukturen quer zur Fließrichtung (Dünen-Effekt). Diese können bei einer Datenerfassung aus Querprofilen freilich nicht modelliert werden und treten in den Differenzmodellen der Abb. 3.16 deutlich hervor. Abgesehen davon aber zeigt sich, dass die wesentlichen Strukturen des Gewässerbettes auch bei querprofilbasierter Modellierung erfasst werden. Dies gilt insbesondere dann, wenn der Profilabstand entsprechend gering ist. So beträgt die Standardabweichung zwischen



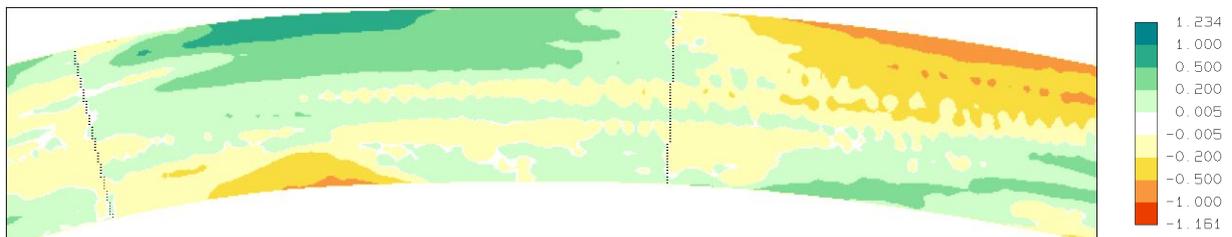
*Differenzmodell: Fächerlot minus 25 m-Profil*



*Differenzmodell: Fächerlot minus 50 m-Profil*



*Differenzmodell: Fächerlot minus 100 m-Profil*



*Differenzmodell: Fächerlot minus 200 m-Profil*

**Abbildung 3.16:** Differenzmodelle aus Fächerlotdaten und interpolierten Querprofilen, Höhenkodierte Darstellung mit eingezeichneten Profilsuren

dem DGM aus Fächerlotdaten und einem solchen aus 25 m-Profilen lediglich  $\pm 6$  cm. Die Abweichungen werden bei zunehmendem Profilabstand größer. Vor allem bei den Varianten mit 100 m bzw. 200 m-Profilabstand gehen bereits großräumige Strukturen des Gewässerbettes verloren und die maximalen Höhenabweichungen erreichen 1 m. Trotz allem übersteigt die Standardabweichung auch dort  $\pm 20$  cm nicht.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass eine Erfassung mit Fächerlotdaten eine sehr detaillierte Modellierung des Gewässerbettes erlaubt. Die wesentlichen Strukturen können aber auch mittels Querprofilen abgebildet werden, vorausgesetzt der Profilabstand ist nicht zu groß.

## **3.2 Modellierung der Wasseroberfläche**

Digitale Modelle der Wasseroberfläche (DWM) werden für zwei unterschiedliche Anwendungsgebiete benötigt. Im einen Fall werden sie aus prognostizierten Wasserspiegellagen als Ergebnis ein- oder mehrdimensionaler HN-Modellierung aufgebaut, um anschließend durch den Verschnitt mit dem DGM-W Überschwemmungsgrenzen abzuleiten,- das DWM ist hier also Bestandteil für die Gefahrenzonenplanung. Im anderen Fall benötigt man das DWM im Zuge der DGM-W-Generierung als Hilfsmittel zur Ableitung der aktuellen Wasser-Land-Grenze. Die WLK wiederum ist Grundlage für die Trennung von Vorland- und Gewässerbett-daten. Sie muss daher die Uferlinie zum Zeitpunkt der Erfassung der Vorlanddaten beschreiben. Als Datengrundlage für den DWM-Aufbau stehen in diesem Fall je nach Erfassungsmethode Reflexionen des Laser- oder Radarsignals an der Wasseroberfläche, manuell gemessene oder aus automatischer Bildkorrelation abgeleitete photogrammetrische Punkte oder dergleichen zur Verfügung. Wegen der Schwierigkeiten, welche die spiegelnde und glatte Wasseroberfläche bei der Messung oft bereiten (Totalreflexion oder Absorption des Lasersignals oder fehlende Textur bei photogrammetrischer Messung), ist die Datengrundlage oft lückenhaft und/oder grob fehlerbehaftet. Entsprechend robust müssen die eingesetzten Strategien zur DWM-Generierung sein. Diesen zwei hauptsächlichen Aspekten sind die folgenden beiden Unterabschnitte gewidmet.

### **3.2.1 Ableitung aus prognostizierten Wasserspiegellagen**

Neben der Fließgeschwindigkeit und -richtung sind auch die prognostizierten Wasserspiegellagen für einen bestimmten Abfluss das Ergebnis der HN-Modellierung. Zur Bestimmung von Überschwemmungsgrenzen wird aus den prognostizierten Höhen ein DWM aufgebaut und mit dem DGM-W durch Berechnung eines Differenzmodells verschnitten. Je nach Dimensionalität der HN-Modellierung liegen die Wasserspiegellagen in unterschiedlicher Datenanordnung vor. Beim Einsatz von 1D-HN-Modellen ergeben sich diese linienhaft als einzelne Höhenpunkte entlang der Gewässerachse. Das Ergebnis bei mehrdimensionalen Modellen hingegen ist eine Höhenkote für jeden Knoten des Rechnernetzes. Je nachdem sind für den DWM-Aufbau unterschiedliche Strategien einzusetzen.

## **DWM-Aufbau bei eindimensionaler HN-Modellierung**

Dem 1D-HN-Modell liegt die Vereinfachung zugrunde, dass die abflussrelevanten Größen wie Fließgeschwindigkeit und Wasserstand für einen gesamten Querschnitt gemittelt betrachtet werden. Eine Querneigung der Wasserfläche, wie sie sich vor allem in engen Bögen und bei hohen Abflüssen ergibt, wird vernachlässigt. Für die DWM-Generierung ist es also möglich, die diskreten Höhenkoten entlang der Gewässerachse jeweils zu horizontalen Profilen quer zur Achse zu erweitern. Auf diese Art ist aber dieselbe Datengrundlage geschaffen, wie sie bei der Modellierung des Gewässerbettes aus Querprofilen vorliegt. Der im Abschnitt 3.1.2 vorgestellte Interpolationsansatz kann also hier in gleicher Weise angewendet werden.

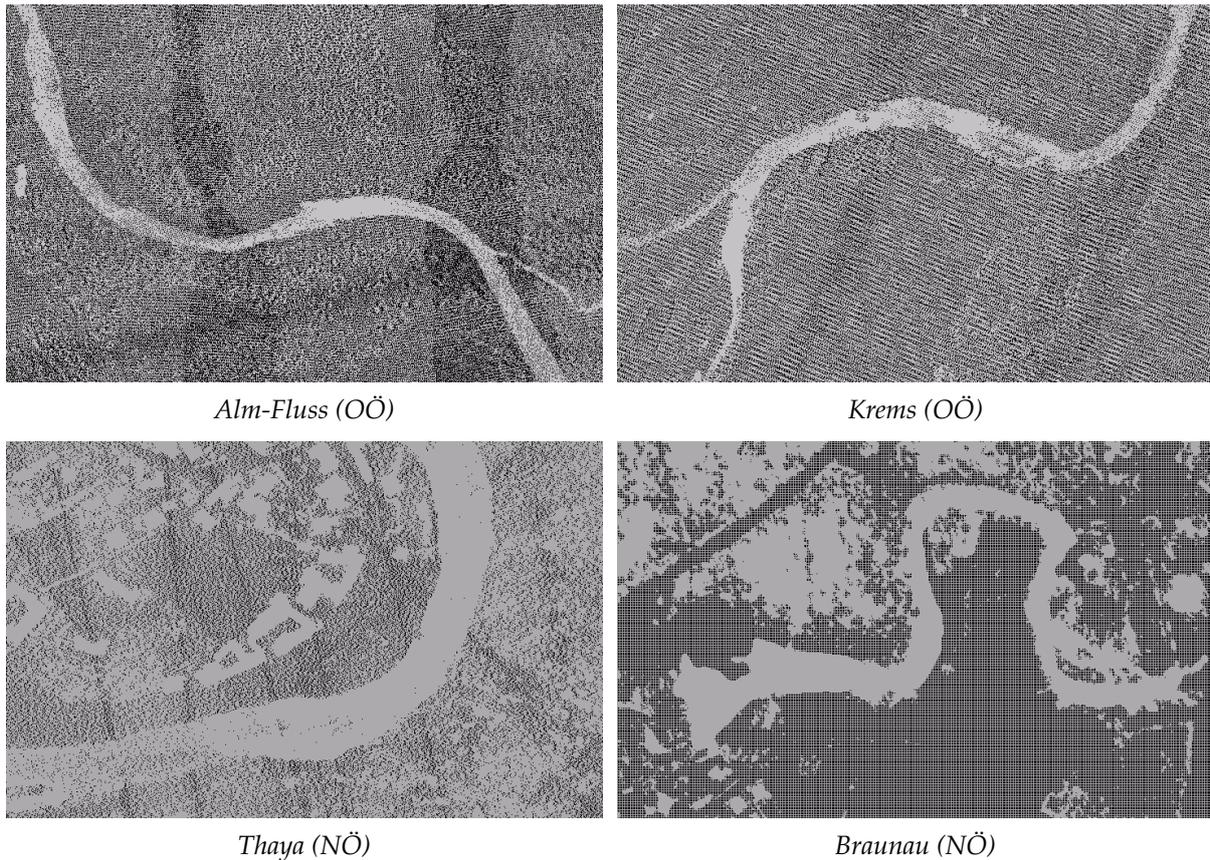
Während die Profile zur Beschreibung des Gewässerbettes lediglich von der einen zur gegenüberliegenden Uferböschung reichen, ist es zum Zweck des DWM-Aufbaues erforderlich, die Profile mit den prognostizierten Wasserständen auch zu beiden Seiten des Flusses in das Vorland hinein auszudehnen. Im Außenbogen schafft das keine Probleme, da sich die Profilsuren auseinander entwickeln. Im Innenbogen allerdings drängen sich diese immer weiter zusammen und überschneiden sich schließlich oftmals. In diesen Fällen ist es gängige Praxis, die Profile im inneren Vorlandbereich abknicken zu lassen. Für die Interpolation der Wasseroberfläche nach dem Verfahren des Abschnittes 3.1.2 ist das unproblematisch, da der Algorithmus krummlinige Profilverläufe unterstützt.

## **DWM-Aufbau bei mehrdimensionaler HN-Modellierung**

Im Falle von mehrdimensionaler Abflussmodellierung liegen die Höhenkoten der prognostizierten Wasserstände für jeden Knoten des Berechnungsnetzes vor. Die Interpolation des DWM aus diesen flächenmäßig verteilten Daten ist daher trivial. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass es sich bei dem DWM um eine äußerst schwach gekrümmte Fläche handelt. Es können daher sehr einfache Interpolationsverfahren eingesetzt werden. Insbesondere ist die DWM-Interpolation mittels gleitender Horizontal- oder Schrägebenen sowie durch Dreiecksvermaschung möglich.

### **3.2.2 Ableitung aus ALS-Punktwolke**

Airborne Laserscanning (ALS) hat sich in den letzten Jahren als Standardverfahren zur Datenerfassung des Flussvorlandes für die HN-Modellierung etabliert. Das Verfahren vereint die Vorteile von Wirtschaftlichkeit, guter Genauigkeit und hoher räumlicher Auflösung. Zur Trennung der ALS-Punktwolke in Vorland- und Gewässerbereich ist die Ableitung der Wasser-Land-Grenze zum Zeitpunkt der ALS-Befliegung notwendig. Sofern die WLK nicht aus simultan aufgezeichneten Bilddaten abgeleitet wird, setzt deren Bestimmung ein digitales Modell der Wasseroberfläche voraus. Neben den Punkten am festen Boden sind im ALS-Datensatz auch oftmals Reflexionen des Lasersignals an der Wasseroberfläche enthalten. Zwar kommt aufgrund von Absorption und Totalreflexion an der glatten Wasseroberfläche nicht für jeden ausgesendeten Laserimpuls die für eine Distanzmessung erforderliche Energie in der Empfängeroptik des Laserscanners an, aber dennoch ist es in der Regel möglich, die vorhandenen Daten zum Aufbau eines DWM zu nutzen. Die Abb. 3.17 zeigt typische Punktanordnungen im unmittelbaren Flussbereich anhand von ALS-Kampagnen verschiedener Flüsse in NÖ, OÖ



**Abbildung 3.17:** Typische ALS-Punktverteilung bei vier ausgewählten Flüssen; Daten: Amt d. öö. Landesregierung (Alm, Krems), Fa. GeoConsult (Thaya, Braunau)

und Kärnten. Daraus ist zu erkennen, dass die Dichte der Punkte an der Wasseroberfläche abschnittsweise sehr unterschiedlich ist. Ausschlaggebende Parameter dafür sind die Glattheit der Wasseroberfläche und der Einfallswinkel des Lasersignals. Da sich die Wasseroberfläche allerdings, abgesehen von Steilstufen, nur sehr träge ändert, können punktlose Bereiche durch Interpolation überbrückt werden.

Die ALS-Befliegung von Flussläufen erfolgt idealerweise bei Nieder- bis höchstens Mittelwasser, damit möglichst viel von der Uferböschung durch ALS-Punkte abgedeckt ist und folglich nicht durch interpolierte Gewässerbettdaten ergänzt werden muss. Die Querneigung der Wasseroberfläche kann in diesem Fall vernachlässigt werden. Unter diesen Voraussetzungen kann das DWM aus ALS-Punktwolken mittels folgender Teilschritte aufgebaut werden:

- Selektion aller ALS-Punkte innerhalb eines Bandes von etwa halber Gewässerbreite rund um die Achse
- Transformation der selektierten ALS-Punkte ins Profilkordinatensystem und Sortierung nach aufsteigender Stationierung
- Bildung von Segmenten konstanter Länge entlang der Achse und Einordnung der ALS-Punkte in die einzelnen Segmente

- Bestimmung einer repräsentativen Wasserspiegellage pro Segment durch Ausgleichung (Mittelbildung)
- Analyse der gemittelten Wasserspiegellagen und Herstellen der Kontinuitätsbedingung ( $z_1 \geq z_2 \geq z_3 \geq \dots \geq z_n$ )
- Ausbreiten der einzelnen ausgeglichenen Wasserspiegellagen zu horizontalen Profilen und Interpolation des DWM gemäß Abschnitt 3.1.2 bzw. 3.2.1

Die Einschränkung des Auswahlbandes auf etwa die halbe Gewässerbreite erfolgt bei der einleitenden Selektion der Gewässerpunkte vor allem, um die Punkte des unmittelbaren Uferbereiches vorweg auszuschließen. Die Ufer von Fließgewässern sind oft mit dichter strauch- oder baumartiger Vegetation bestanden und selbst bei Verwendung des letzten Laserechos (last pulse) sind in der Regel im Uferbereich viele Vegetationspunkte im ALS-Datensatz enthalten. Bei kleineren Flüssen reicht die Ufervegetation mitunter bis in die Flussmitte. Das hat zur Folge, dass bei den selektierten Punkten sowohl Gewässer- als auch Vegetationspunkte auftreten können. Aus diesem Grund sollte die Bestimmung der repräsentativen Wasserspiegellage innerhalb eines Segmentes nicht durch einfache Mittelbildung, sondern durch Formulierung eines Ausgleichsproblems erfolgen. Die Verbesserungsgleichungen haben dabei folgende einfache Form:

$$x = z_i + v_i \quad (3.1)$$

$x$  bezeichnet dabei die ausgeglichene Höhe (Wasserspiegellage),  $z_i$  die einzelnen beobachteten Höhen und  $v_i$  deren Verbesserungen. Damit ergibt sich ein konventionelles Ausgleichssystem:

$$\mathbf{v} = \mathbf{A} \mathbf{x} - \mathbf{l} \quad (3.2)$$

wobei die  $\mathbf{A}$ -Matrix zu einem an jeder Stelle mit 1 besetzten Vektor und  $\mathbf{x}$  zu einem Skalar degenerieren.  $\mathbf{l}$  schließlich bezeichnet den Vektor der beobachteten Höhen  $z_i$ . Unter Einbeziehung einer diagonalen Gewichtsmatrix  $\mathbf{P}$  lässt sich  $\mathbf{x}$  berechnen zu:

$$\mathbf{x} = (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{l} \quad (3.3)$$

Für gleichgewichtete Beobachtungen ist die Formel 3.3 tatsächlich identisch mit der des arithmetischen Mittels  $x = \frac{\sum z_i}{n}$ . Vorteile bei einer Formulierung als Ausgleichsproblem sind dann gegeben, wenn grobe Datenfehler (Vegetationspunkte, long ranges, ...) vorhanden sind. Durch eine iterative Anpassung der Gewichte im Sinne der robusten Ausgleichung (Iteratively Reweighted Least Squares) können die Vegetationspunkte und sonstige Ausreißer sukzessive isoliert und die korrekte Wasserspiegellage ermittelt werden. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass durch einfache Anpassung des Ausgleichssystems auch geneigte Wasserflächen modelliert werden können. In diesem Fall wird pro Segment nicht ein einzelner Höhenwert, sondern eine gegenüber der Horizontalen geneigte Gerade durch Ausgleichung ermittelt.

Sind die repräsentativen Höhen einmal für alle Segmente berechnet, so muss weiters noch sichergestellt werden, dass der Wasserspiegel in Fließrichtung betrachtet kontinuierlich abnimmt. Die Kontinuitätsbedingung lautet dabei:

$$z_1 \geq z_2 \geq z_3 \geq \dots \geq z_n \quad (3.4)$$

Die Formel 3.4 stellt ein Ungleichungssystem dar, welches mit den Mitteln der linearen oder quadratischen Programmierung beherrscht werden kann. Der klassische Ansatz bei der linearen Programmierung ist die Simplex-Methode. Diese wurde bereits in den 1940-er Jahren zur Lösung von Optimierungsaufgaben in der Produktions- und Transportwegeplanung eingeführt [Dantzig, 1966]. Sie basiert auf dem Grundgedanken, dass eine Zielfunktion (z.B. maximaler Ertrag) unter Berücksichtigung einer Reihe von Nebenbedingungen (z.B. verfügbare Maschinen  $\equiv$  Ungleichungen) maximiert oder minimiert wird. Im Gegensatz zur linearen Variante wird bei der quadratischen Programmierung die Zielfunktion im quadratischen Sinne maximiert/minimiert. Die Zielfunktion ist bei der Fragestellung der kontinuierlich abnehmenden Wasserspiegel daher so zu formulieren, dass die Summe der quadratischen Verbesserungen der einzelnen Wasserspiegelhöhen bei gleichzeitiger Einhaltung der Kontinuitätsbedingung minimal wird. Das Problem kann allgemein wie folgt formalisiert werden.

$$\text{Zielfunktion: } \mathbf{c}^T \mathbf{x} + \frac{1}{2} \mathbf{x}^T \mathbf{Q} \mathbf{x} \rightarrow \min \quad (3.5)$$

$$\text{Nebenbedingungen: } \mathbf{A} \mathbf{x} \leq \mathbf{b} \quad (3.6)$$

Der  $n$ -dimensionale Vektor  $\mathbf{x}$  enthält die Zuschläge zu den  $n$  vor-ausgeglichenen Wasserspiegelhöhen, deren quadratische Summe minimiert werden soll. Damit der Term  $\frac{1}{2} \mathbf{x}^T \mathbf{Q} \mathbf{x}$  die quadratische Summe der Zuschläge darstellt, muss  $\mathbf{Q}$  die  $n$ -dimensionale Einheitsmatrix sein. Der Vektor  $\mathbf{c}$  beschreibt etwaige lineare Terme der Zielfunktion und wird für das gegenständliche Problem nicht benötigt;  $\mathbf{c}$  ist in diesem Fall also ein Null-Vektor. Das Minimum für die Zielfunktion 3.5 ist unter den Nebenbedingungen 3.6 zu bestimmen. 3.6 ist dabei das Äquivalent zu Formel 3.4 in Matrixschreibweise.  $\mathbf{A}$  ist eine  $m \times n$ -Matrix. Die  $m = n - 1$  Zeilen geben jeweils die Differenz zweier benachbarter Wasserspiegelhöhen wider. Die  $\mathbf{A}_{i,i}$  sind dabei jeweils gleich 1, die  $\mathbf{A}_{i,i+1}$  gleich  $-1$  und alle anderen Elemente gleich 0. Der  $m$ -dimensionale Vektor  $\mathbf{b}$  schließlich enthält die berechneten, unkorrigierten Höhenunterschiede  $b_i = z_i - z_{i+1}$ .

Die Matrix  $\mathbf{Q}$  ist genau dann die Einheitsmatrix, wenn alle ermittelten Wasserspiegelhöhen  $z_i$  gleich genau sind. Die Genauigkeitsmaße aus der Vor-Ausgleichung der einzelnen  $z_i$  können allerdings in die Korrekturberechnung gemäß den Gleichungen 3.5 bzw. 3.6 einbezogen werden. In gleichem Maße können auch die unterschiedlichen Fließwege zwischen den einzelnen  $z_i$  berücksichtigt werden, falls diese nicht jeweils im gleichen Abstand ermittelt wurden. Möglich ist das alles durch Anpassung der Diagonalelemente der  $\mathbf{Q}$ -Matrix. Im Rahmen der Korrektur der Wasserspiegelhöhen lässt sich auch eine robuste Schätzung realisieren, indem die  $\mathbf{Q}$ -Matrix in Abhängigkeit der Verbesserungen der  $z_i$  iterativ angepasst wird. Dies ist vor allem günstig, um allzu große Treppen-Effekte, die sich aufgrund der Gleichungen 3.4 bzw. 3.6 ergeben können, zu mildern.

Eine monoton fallende Wasseroberfläche ist besonders für die nachfolgende Bestimmung der WLK von großer Bedeutung. Dort führen Höhenfehler im DWM zu einer Lageversetzung der Wasseranschlagslinie. Dies wiederum hat direkte Auswirkungen für die Interpolation von Querprofilen und für die Trennung von Vorland- und Gewässerbett Daten. Im ungünstigsten Fall bewirkt ein Fehler im DWM einen Höhengsprung im Uferbereich am Übergang vom Gewässerbett zur Uferböschung. Eine Erprobung des vorgestellten Ansatzes anhand unterschiedlicher Datensätze im praktischen Einsatz der DGM-W-Generierung steht dabei noch aus.



Abbildung 3.18: Uferbereich des Alm-Flusses, Orthophoto; Daten: Amt der öö. Landesregierung

### 3.3 Bestimmung der Wasser-Land-Grenzlinie

In ihrer Eigenschaft als Trennlinie zwischen trockenem und aquatischem Bereich kommt der Wasser-Land-Grenzlinie im Zuge der DGM-W-Generierung eine besondere Bedeutung zu. Sie wird einerseits als 2D-Clipping-Polygon zum Ausschneiden der ALS-Punkte an der Wasseroberfläche und andererseits als 3D-Polylinie für die Interpolation der Gewässerbettdaten benötigt.

Die Ableitung der WLГ aus Luftbildern durch photogrammetrische Messung im Stereomodell stellt den konventionellen Ansatz dar. Die Messung erfolgt dabei entweder manuell oder automations-unterstützt durch den Einsatz von Bildkorrelation und Linienverfolgung. Ein semi-automatisches Verfahren unter Verwendung von so genannten *snakes* ist in [Kerschner, 2003] beschrieben. Gegen die Bestimmung der WLГ aus Bilddaten sprechen allerdings eine Reihe von Argumenten. So können Bilddaten überhaupt nur verwendet werden, sofern diese zeitgleich zur Erfassung der Vorlanddaten aufgenommen sind, da die WLГ exakt für diesen Zeitpunkt (=Wasserstand) benötigt wird. Erfolgt die Erfassung der Vorland-Topographie z.B. mittels ALS, dann muss zusätzlich zum Laserscanner auch ein optischer Sensor synchron im Rahmen der Befliegung eingesetzt werden. Die meisten kommerziell einsetzbaren Systeme verfügen bereits über diese Ausstattung. Abgesehen davon stellt die Ufervegetation das Hauptproblem bei der Erfassung der WLГ aus Bilddaten dar. Während das Lasersignal zumindest teilweise in der Lage ist, die Vegetation zu durchdringen, verdeckt diese bei den annähernd senkrechten Luftbild-Aufnahmen die zu bestimmende WLГ. Ein weiteres Problem

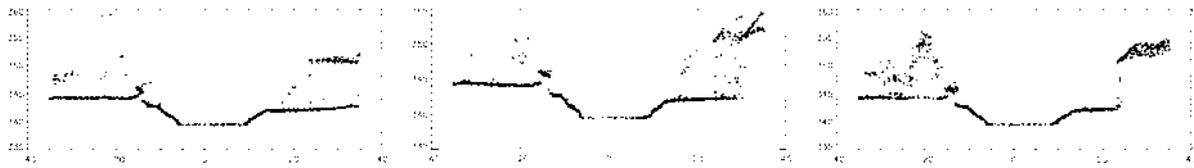


Abbildung 3.19:  $qz$ -Plots ausgewählter Profilstegmente, Krems (OÖ); Daten: Amt d. öö. Landesregierung

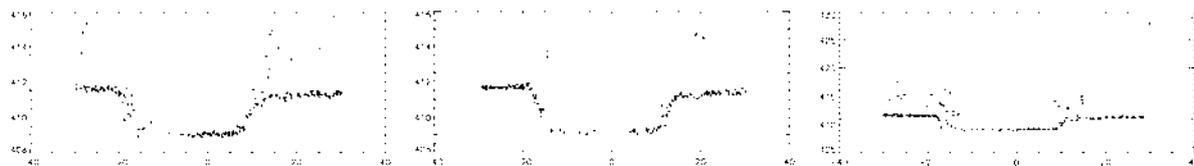


Abbildung 3.20:  $qz$ -Plots ausgewählter Profilstegmente, Alm-Fluss (OÖ); Daten: Amt d. öö. Landesregierung

sind die oft schwach ausgeprägten radiometrischen Unterschiede im (offenen) Uferbereich. Vor allem bei flachen Uferböschungen und entsprechend seichtem Wasser ist die WLK im Bild oftmals nicht als deutliche Grauwertkante ausgeprägt und ihre Bestimmung daher unsicher. Die Abb. 3.18 zeigt ein Beispiel, bei dem vor allem die üppige Ufervegetation eine Bestimmung aus Bilddaten unmöglich macht. Eine Zusammenfassung der Nachteile bei einer bildgestützten Erfassung der WLK ist in [Naumann u. a., 2002] beschrieben.

Im Folgenden wird der Fokus daher auf die Ableitung der WLK aus Höhendaten gelegt. Dabei werden zwei unterschiedliche Verfahren beschrieben: Im einen Fall basiert die Bestimmung ausschließlich auf der ALS-Punktwolke und wird durch einen segmentweisen Verschnitt der Uferböschung mit dem DWM realisiert (Abschnitt 3.3.1). Im anschließenden Fall wird eine Methode vorgestellt, bei der neben den ALS-Punkten auch die Gewässerbett Daten miteinbezogen werden und die Bestimmung der WLK iterativ durch den Verschnitt des DGM bzw. DGM-W mit dem DWM erfolgt (Abschnitt 3.3.2).

### 3.3.1 Ableitung aus ALS-Punktwolke

Es ist bereits festgestellt worden, dass die Kraft des fließenden Wassers eine formgebende Wirkung aufweist. Das gilt für die Gewässersohle, aber in gewissem Maße auch für die Uferböschung. Diese ist meist parallel zur Fließrichtung ausgerichtet und ändert ihre Form und Ausrichtung nur langsam. Bei der Ableitung der WLK kann man sich diesen Umstand genauso zunutze machen wie bei der Interpolation von Querprofilen.

Im Folgenden wird daher ein Verfahren zur WLK-Bestimmung vorgestellt, welches als Datenquelle ausschließlich die ALS-Punktwolke heranzieht und die Fließrichtung des Wassers zur Modellierung ausnützt. Darüber hinaus ist lediglich ein digitales Modell der Wasseroberfläche (DWM) erforderlich, welches seinerseits gemäß Abschnitt 3.2.2 aus ALS-Punkten, der Flussachse und Angaben über die Flussbreite gewonnen werden kann.

Die Grundidee für den Algorithmus leitet sich aus dem Studium der Daten einer Reihe von kleineren Flussabschnitten ab. Dazu werden die Projektkoordinaten  $(x, y, z)$  der ALS-Punkte

des gesamten Gewässerbereiches einschließlich der Uferböschung in Profilkordinaten  $(q, s, z)$  transformiert und anschließend in einzelne Segmente von etwa 5 m Stationierungs-Länge eingeteilt. Die einzelnen Segmente werden dann jeweils in einem ebenen  $qz$ -Koordinatensystem aufgetragen. In den Abb. 3.19 bzw. 3.20 sind für die Flüsse Krems und Alm jeweils  $qz$ -Plots von ausgewählten, typischen Querschnitten dargestellt. Daraus ist zu erkennen, dass sich die Punkte der jeweiligen Segmente im  $qz$ -Koordinatensystem entlang der Uferböschung konzentrieren. Das ist vor allem für die Querschnitte der Abb. 3.19 der Fall. In der Abb. 3.20 ist eine größere Streuung der Punkte zu beobachten. Dieser Effekt tritt dann auf, wenn die Uferböschung nicht rechtwinkelig zur Profilebene, oder mit anderen Worten parallel zur Achsrichtung verläuft. In den Beispielen der Abb. 3.19 ist das Vorhandensein von Ufervegetation deutlich zu erkennen. Durch die Zusammenfassung von mehreren Messpunkt-reihen des Laserscanners zu einem Segment liegen allerdings nicht alle Punkte des Segmentes auf der Vegetation. Vielmehr können in Stationierungsrichtung vor oder hinter der Ufervegetation durchaus auch Bodenpunkte vorkommen. Im  $qz$ -Plot äußert sich das dann derart, dass zu annähernd identischen Abszissen  $q$  unterschiedliche Ordinaten  $z$  auftreten.

Aus diesen Beobachtungen lassen sich folgende Schlussfolgerungen ziehen:

- Durch die Transformation ins Profilkordinatensystem und die Darstellung in einem  $qz$ -Koordinatensystem prägen sich flächenhafte Abschnitte der Uferböschung als lineare Features aus.
- Böschungsabschnitte parallel zur Achsrichtung zeichnen sich durch einen hohen Grad an Kompaktheit der Punkte aus (Clustering).
- Eine höhere Streuung der Böschungspunkte weist auf nicht achsparallele Böschungsabschnitte hin. Die Abweichung der Böschung von der Parallelität zur Achse kann durch Transformation (Drehung) der Profilebene bestimmt werden. Der Winkel, bei dem sich optimales Clustering einstellt, entspricht dem Verdrehungswinkel der Uferböschung.
- Die Zusammenfassung der ALS-Punkte in einzelne Segmente erhöht die Chance, dichte Ufervegetation zu eliminieren, sofern im Segment auch Bodenpunkte vorhanden sind.

Aufgrund dieser Überlegungen lässt sich zur Bestimmung der WLK aus ALS-Punkten unter Berücksichtigung der Fließrichtung des Wassers folgender Gesamtprozess aufstellen.

1. Selektion aller ALS-Punkte des Flussbereiches inklusive der Uferböschung
2. Transformation aller selektierten Punkte vom Projekt- ins Profilkordinatensystem
3. Sortieren der Punkte nach aufsteigender Stationierung  $s$
4. Einteilung in einzelne Segmente der Länge  $l (s_{ref} \pm \frac{l}{2})$  und Weiterbetrachtung im ebenen  $qz$ -Koordinatensystem unter Vernachlässigung der geringen Stationierungsdifferenzen der Punkte
5. Elimination der Vegetationspunkte mittels eindimensionaler robuster Interpolation (lineare Prädiktion oder Kriging)
6. Elimination der Punkte auf der Wasseroberfläche durch Threshold-Verfahren unter Verwendung des DWM

7. Selektion aller Punkte der Uferböschung und Bestimmung einer Ausgleichsgeraden für jedes Segment (getrennt für linke und rechte Uferböschung)
8. Ermittlung jeweils eines repräsentativen WLG-Punktes für das linke und rechte Ufer durch Verschnitt der Böschungsgeraden mit dem DWM (horizontale Gerade)
9. Transformation aller ermittelten WLG-Punkte vom Profil- ins Projektkoordinatensystem
10. Zusammenhängen der transformierten WLG-Punkte aller Segmente und Nachbearbeitung der entstandenen Wasser-Land-Grenze (Verdichtung/Ausdünnung der WLG in Bereichen mit starker/schwacher Krümmung)

Die Einbeziehung der Fließrichtung erfolgt im Wesentlichen durch die Transformation ins Profilkoordinatensystem und ermöglicht dadurch, das grundsätzliche Problem der Bestimmung von ebenen Teilflächen auf Geraden zu reduzieren. Es erfolgt also eine Verringerung der Dimension um die Zahl Eins. Die Anzahl der Unbekannten ist bei der Bestimmung von 2D-Geraden gegenüber der von 3D-Ebenen ebenfalls um Eins geringer. Die Böschungsgerade wird durch einen Ausgleich nach vermittelnden Beobachtungen mit folgenden Verbesserungsgleichungen ermittelt:

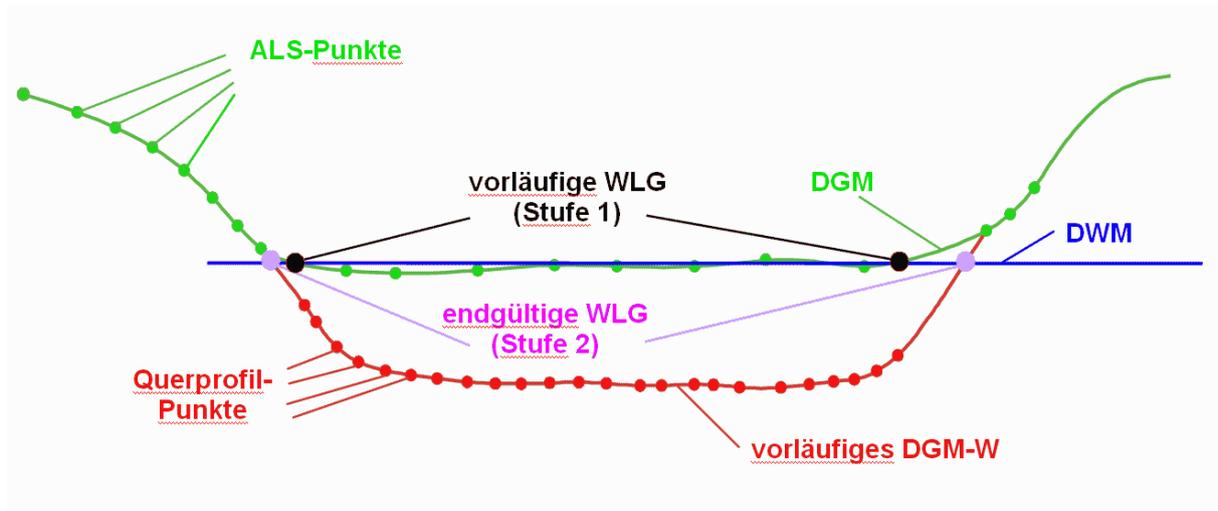
$$z_i + v_i = k q_i + d \quad (3.7)$$

$k$  ist dabei der Geradenanstieg und  $d$  der Ordinatenabschnitt bei  $q = 0$ . Eine Linearisierung der Verbesserungsgleichungen kann entfallen, da diese bereits linear sind. Die Bestimmung von  $k$  und  $d$  erfolgt dann nach den konventionellen Regeln des vermittelten Ausgleichs und wird hier nicht explizit ausgeführt. Bei einem Ansatz nach Formel 3.7 werden die Vertikalabstände der Böschungspunkte von der Geraden minimiert. Für sehr steile Böschungen empfiehlt es sich auf die implizite Geradengleichung überzugehen. Minimiert werden in diesem Fall dann die Normalabstände der Punkte von der Geraden. Die Verbesserungsgleichungen lauten:

$$v_i = a q_i + b z_i + c \quad (3.8)$$

wobei  $a$ ,  $b$  und  $c$  die Koeffizienten der Geradengleichung in allgemeiner Lage darstellen. Die Elimination der Vegetationspunkte erfolgt am besten vor der Bestimmung der Böschungsgeraden durch eindimensionale robuste Interpolation. Das Grundkonzept der robusten Interpolation ist in [Kraus u. Pfeifer, 1998] beschrieben (siehe auch Abschnitt 2.1.7). Eindimensional bedeutet hier, dass die Höhen ( $z$ ) im Profil in Abhängigkeit der einzigen Veränderlichen  $q$  geschätzt werden. Die Elimination der Vegetationspunkte kann theoretisch auch im Rahmen der Bestimmung der Böschungsgeraden durch robuste Ausgleichung erfolgen. Für die Selektion der Böschungspunkte ist es aber vorteilhaft, wenn die Vegetation bereits vorweg eliminiert wurde.

Das beschriebene Verfahren wurde anhand von einigen kleineren Datensätzen getestet und hat prinzipiell befriedigende Ergebnisse gezeigt. Probleme bestehen vor allem in Bereichen mit üppiger, in den Wasserlauf hineinragender Ufervegetation. Im Gegensatz zu einer globalen Methode hat der segmentorientierte Ansatz dabei den Nachteil, dass jeweils nur ein lokal begrenzter Datenbereich zur Bestimmung der einzelnen Teilstücke der WLG herangezogen wird. Wie bereits oben erwähnt, hat sich eine Vorab-Elimination der Ufervegetation daher als



**Abbildung 3.21:** Prinzipische Skizze zur zweistufigen Ableitung der WLG aus dem Verschnitt von DGM bzw. DGM-W und DWM

günstig erwiesen. Weiters ist festzuhalten, dass der Ansatz überall dort mit Vorteil eingesetzt werden kann, wo die Uferböschung annähernd parallel zur Achsrichtung verläuft. Für den Einsatz im Bereich von Buhnen dagegen ist er nicht geeignet. Eine alternative Methode, die auch bei stark unregelmäßigen Uferformen anwendbar ist, wird im nächsten Abschnitt präsentiert. Abschließend sei noch angemerkt, dass der segmentorientierte Ansatz eine Spezialisierung des allgemeineren Problems der Detektion und Modellierung von Geländekanten aus ALS-Punkten darstellt, worauf im Abschnitt 3.4 näher eingegangen wird.

### 3.3.2 Ableitung aus Verschnitt von DGM bzw. DGM-W und DWM

In diesem Abschnitt wird ein zweistufiges Verfahren zur Ableitung der WLG beschrieben, welches auf dem Verschnitt des DGM (Stufe 1) bzw. DGM-W (Stufe 2) mit dem DWM beruht. Dieser Verschnitt wird durch die Berechnung eines Differenzmodells aus "DGM minus DWM" realisiert. Das Ergebnis dieser Operation ist wieder ein digitales Modell mit derselben organisatorischen Struktur wie der des DGM (Gitterweite, Geländekanten, ...). Die WLG kann dabei generell aus dem Differenzmodell als Null-Isolinie extrahiert werden.

Grundvoraussetzung ist zunächst einmal ein digitales Geländemodell. Dazu werden aus der ALS-Punktwolke durch den Einsatz geeigneter Filterstrategien die Vegetationspunkte eliminiert. Auf die Filterung von ALS-Daten wurde bereits im Abschnitt 2.1.7 eingegangen. Bauwerke sind vor allem in unmittelbarer Ufernähe relevant für den Verlauf der WLG und daher ins DGM bzw. DGM-W einzubeziehen. Neben Widerlagern von Brücken, Kraftwerks- und Wehranlagen und Pegelhäusern sind auch Buhnen und Parallelwerke zu berücksichtigen. Sofern diese bei der Filterung eliminiert wurden, sind sie nachträglich wieder in den Datensatz aufzunehmen. Weiters wird, wie bereits oben erwähnt, ein digitales Modell der Wasseroberfläche (DWM) benötigt, dessen Herleitung im Abschnitt 3.2 beschrieben wurde. Die Ableitung der Wasser-Land-Grenze erfolgt nun in einem zweistufigen Prozess, welcher als Prinzipische Skizze auch in der Abb. 3.21 dargestellt ist.

Stufe 1:

- Zunächst wird aus allen ALS-Punkten (exklusive Vegetation) ein DGM berechnet.
- Anschließend wird ein Differenzmodell aus "DGM minus DWM" gebildet.
- Die vorläufige WLG ergibt sich dann als Isolinie aus diesem Modell. Da aufgrund des schleifenden Schnittes zwischen dem DGM und dem DWM die Null-Isolinie schlecht definiert und erfahrungsgemäß lückenhaft ist, begnügt man sich als vorläufige Näherung mit der +20 cm-Isolinie. Dies entspricht dem Verschnitt des DGM mit einem um 20 cm nach oben versetzten DWM.
- Diese vorläufige WLG dient nun einerseits, um die ALS-Punkte innerhalb dieser Linie und andererseits die Profilmesspunkte der Gewässerbett-Querprofile außerhalb davon (=Punkte des Landanschlusses) zu eliminieren.

Stufe 2:

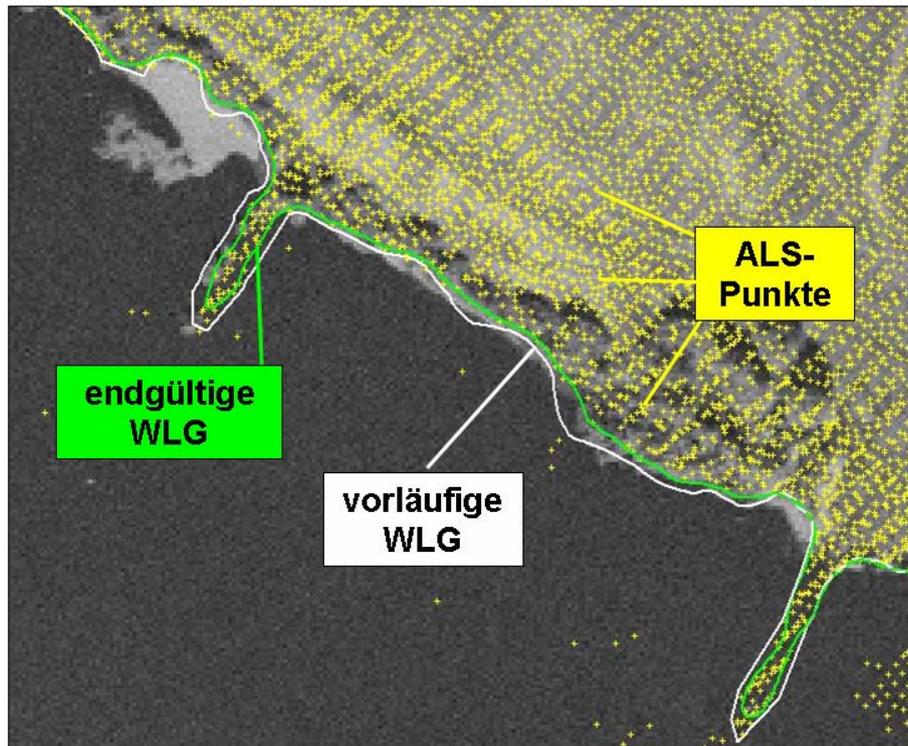
- Die Querprofildaten werden gemäß Abschnitt 3.1.2 unter Einbeziehung der vorläufigen WLG verdichtet.
- Aus den ALS-Punkten des Vorlandes und den originalen sowie interpolierten Gewässerbett-Querprofilen wird ein vorläufiges DGM-W berechnet.
- Aus dem vorläufigen DGM-W und dem DWM wird nun erneut ein Differenzmodell gebildet.
- Da das DGM-W durch die Berücksichtigung der Gewässerbett-Querprofile jetzt unter das DWM reicht, kann die endgültige Wasser-Land-Grenze aus dem neu berechneten Differenzmodell als Null-Isolinie extrahiert werden.

Dieser Ansatz stellt eine sehr allgemeine und vielseitig anwendbare Möglichkeit zur Ableitung der Wasser-Land-Grenze dar. Er nutzt einerseits alle zur Verfügung stehenden Höhendaten und kommt andererseits ohne zusätzliche Datenquellen (Bilddaten, terrestrische Vermessung, ...) aus. In der Abb. 3.22 ist für ein Beispiel an der Grenzoder die auf diese Art ermittelte vorläufige und endgültige WLG dargestellt. Man erkennt daraus, dass mit diesem Verfahren die WLG auch im Bereich von Buhnen erfolgreich abgeleitet werden kann.

Dieses Verfahren wird am I.P.F. bei praktischen Projekten zur DGM-W-Generierung standardmäßig angewendet. Die Vorteile liegen vor allem im hohen Automationsgrad und darin, dass es hinsichtlich der Form der Uferlinie voraussetzungsfrei ist. Wie bereits weiter oben erwähnt, wird die Wasser-Land-Grenze bei dem zweistufigen Verfahren als Isolinie aus dem Differenzmodell ermittelt. Für die Lagegenauigkeit können daher die allgemeinen Richtwerte für aus digitalen Geländemodellen abgeleitete Isolinien herangezogen werden. In [Kraus, 2000] wird diese mit  $\sigma_L = \sigma_z / \tan \alpha$  angegeben und ist demnach abhängig von der Höhengenaugkeit der ALS-Punkte ( $\sigma_z$ ) und Geländeneigung ( $\tan \alpha$ ). Die Neigung der Uferböschung hat daher einen wesentlichen Einfluss auf die Genauigkeit der WLG. In Bereichen mit flacher Uferböschung muss die automatisch bestimmte WLG gelegentlich interaktiv nachbearbeitet werden, wobei in diesem Fall für die Validierung Daten aus einer unabhängigen Erfassungsmethode (z.B. Orthophoto) heranzuziehen sind. Die Höhengenaugkeit wird in erster Linie von der Genauigkeit des DWM bestimmt.

### 3.4 Bestimmung hydraulisch relevanter Geländekanten

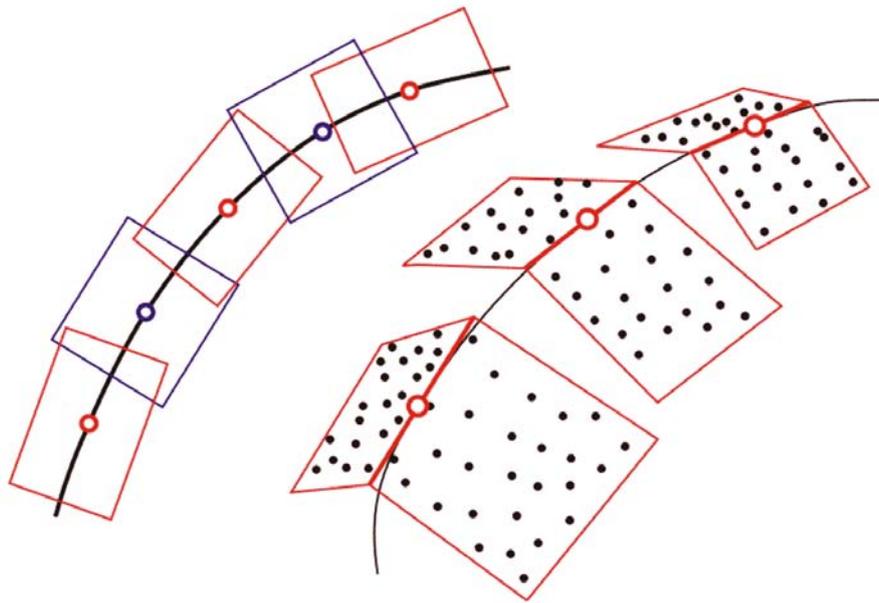
Bei der Aufbereitung einer optimalen Datengrundlage für die HN-Modellierung spielt die explizite Modellierung von hydraulisch relevanten Geländekanten eine bedeutende Rolle. Das



**Abbildung 3.22:** Vorläufige und endgültige Wasser-Land-Grenze, Grenzoder; Daten: Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz, Deutschland

klassische Verfahren zur dreidimensionalen Erfassung solcher Kanten ist die photogrammetrische Messung im Stereomodell. Darüber hinaus liefern moderne Sensoren wie Flugzeuggetragene Laser- oder Radarsysteme immer dichtere Punktwolken, die eine implizite Ableitung von Geländekanten ermöglichen. Aus hydraulischer Sicht sind vor allem folgende Typen von Kanten relevant:

- Böschungsoberkante: Die Oberkante der Uferböschung begrenzt den unmittelbaren Fluss-schlauch und wird im Zuge der HN-Modellierung vor allem für die Belegung der diskreten Flächenelemente mit Rauigkeitsbeiwerten benötigt.
- Deichoberkanten: Deiche sind künstliche, zum Zwecke des Hochwasserschutzes aufgeschüttete Dämme. Übersteigt bei einem Hochwasserereignis der Wasserspiegel die Oberkante des Deiches, dann tritt in der Regel eine großflächige Überflutung des dahinterliegenden Umlandes ein. Eine möglichst präzise Erfassung des höchsten Deichpunktes ist daher erforderlich.
- Straßen- und Bahndämme: Künstlich aufgeschüttete Trassen von Verkehrswegen wirken in der Nähe des Flussufers genauso wie Deiche als Hochwasserdämme. Besondere Sorgfalt ist hier auf die Erfassung von Durchlässen zu legen. Diese sind aus einer Datenerfassung mit annähernd vertikaler Aufnahmerichtung, d.h. beispielsweise mit allen gängigen Flugzeuggetragenen Verfahren, oft schwer zu erkennen. Durchlässe und Unterführungen sind aber in jedem Fall Bestandteil des DGM-W, da sie ein Abfließen des Wassers ermöglichen.



**Abbildung 3.23:** Basiskonzept für die Modellierung von Geländekanten aus dem Verschnitt von Ebenenpaaren nach Briese. Links: Grundriss der einzelnen überlappenden Patch-Paare, Rechts: Perspektivansicht ausgewählter Patch-Paare und deren zugehörige ALS-Punkte

- Gräben: Das Flussvorland ist oft von kleineren Gräben und Einschnitten durchzogen. Diese sind i.A. trocken, bei starken Regenereignissen allerdings auch wasserführend. Sie zeichnen sich dadurch aus, dass sie tiefer als das umliegende Vorland liegen, und nicht selten kann es durch solche Gräben - quasi als Flaschenhals - zu einer Überströmung von unabhängigen Vorlandbereichen kommen. Die Abb. 6.16 im Kapitel 6 zeigt etwa ein solches Beispiel, wo ein Graben eine Verbindung zwischen zwei durch einen Straßendamm getrennten Bereichen herstellt und das Überströmen ermöglicht.

Ein semi-automatisches Verfahren zur Modellierung von Geländekanten aus ALS-Punkten ist in [Briese, 2004] beschrieben. Darüber hinaus enthält [Briese u. Attwenger, 2005] Beispiele zur Anwendung des Verfahrens auf hydraulisch relevante Kanten. Ein weiterer Ansatz ist in [Brzank u. a., 2005] vorgestellt. Wegen der großen Bedeutung expliziter Kanteninformation für die HN-Modellierung sind die Grundzüge des Verfahrens im Folgenden kurz zusammengefasst.

Die Modellierung dreidimensionaler Geländekanten setzt auf den originalen Laserpunkten auf und startet mit einer 2D-Näherung. Die Näherung beschafft man sich entweder durch manuelles Digitalisieren, durch Kantenextraktion aus Bilddaten oder durch Analyse der lokalen Krümmungsverhältnisse aus einem Raster-DGM. Außerdem können auch 2D-Linienbestände aus einem digitalen Landschaftsmodell bzw. bereits photogrammetrisch erfasste Linien verwendet werden. Auf Basis der Näherungen ist eine Trennung der ALS-Punkte in eine linke und rechte Teilfläche möglich. Für einzelne Segmente (Patches) werden nun aus den ALS-Punkten simultan jeweils zwei Ebenen geschätzt. Dies geschieht durch eine Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen, welche zur Elimination von etwaigen Vegetationspunkten noch durch robuste Schätzung erweitert wird. Für ein Segment der Geländekante nimmt das System der Verbesserungsgleichungen die folgende Form an:

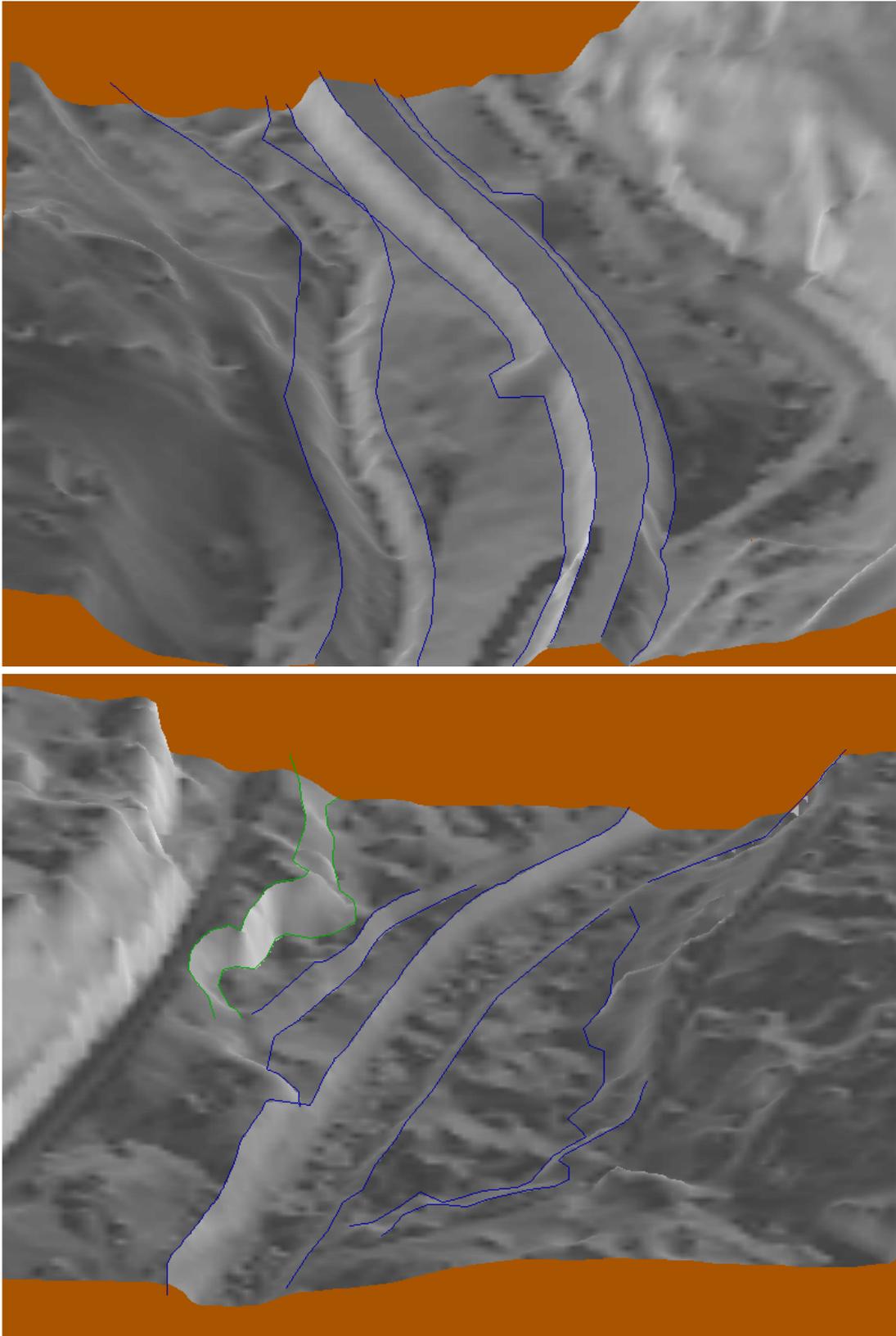
$$\begin{array}{ll}
3D \text{ Pkt. } P_{i,l}, \text{ links :} & r_{i,l} = +a_i X_{i,l} + b_i Y_{i,l} + c_i & -Z_{i,l} \\
3D \text{ Pkt. } P_{i,r}, \text{ rechts :} & r_{i,r} = & +a_i X_{i,r} + b_i Y_{i,r} + c_i & -Z_{r,l} \\
2D \text{ Pkt. } P_{i,b}, \text{ Näherung :} & r_{i,l} = +a_i X_{i,b} + b_i Y_{i,b} + c_i & -Z_{i,b} \\
& r_{i,r} = & -Z_{i,b} & +a_i X_{i,b} + b_i Y_{i,b} + c_i
\end{array} \tag{3.9}$$

Jeder ALS-Punkt  $P_{i,l}$  mit seinen Koordinaten  $(X_{i,l}, Y_{i,l}, Z_{i,l})$  trägt damit zur Schätzung der linken Ebene bei und entsprechend für die Punkte der rechten Seite. Zusätzlich tragen die Punkte  $P_{i,b}$  der 2D-Näherung mit ihren bekannten  $X$ - bzw  $Y$ -Koordinaten und der unbekanntem  $Z$ -Komponente zur Festlegung der beiden Ebenen bei. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass es sich bei der Formel 3.9 um eine 2.5D- Ebenendarstellung handelt. Für annähernd vertikale Ebenen ist diese Form ungeeignet und es ist auf eine allgemeine 3D-Ebenendarstellung überzugehen, was hier aber nicht weiter vertieft werden soll. Die Schnittgerade der beiden ausgeglichenen Ebenen ist dann jedenfalls eine Tangente der gesuchten Geländekante, auf der man - zweckmäßigerweise in der Mitte des Patches - einen repräsentativen Kantenpunkt festlegen kann. Dieser Ablauf wird durch Fortschreiten entlang der Näherung solange wiederholt, bis das Ende der Kante erreicht ist. In der Regel wird dabei mit überlappenden Flächenpatches gearbeitet. Zusätzlich zur gemeinsamen Bestimmung von linker und rechter Ebene pro Segment können auch die aufeinander folgenden Ebenenpaare im Rahmen einer simultanen Ausgleichung ermittelt werden. Abgesehen von der Vergrößerung des entstehenden Normalgleichungssystems und den damit verbundenen rechentechnischen Schwierigkeiten, erhöht sich bei der simultanen Bestimmung die Steifigkeit zwischen den einzelnen Patches. Unmotiviertes Ausschwingen der Geländekante kann dadurch eingedämmt werden.

Eine Linie kann erst dann als Geländekante betrachtet werden, wenn der Schnittwinkel der beiden Ebenen einen gewissen Betrag ( $\approx 10^\circ$ ) annimmt. Wird der kritische Schnittwinkel unterschritten, so kann man nicht mehr von einer Geländekante im Sinne einer Unstetigkeitsstelle der Geländeneigung sprechen. Für diesen Fall sind in der hybriden DGM-Struktur die sogenannten Gerippe- oder Formlinien vorgesehen. Sie zeichnen sich dadurch aus, dass die Krümmung quer zur Linie größer ist als in Richtung der Linie. Eine Unstetigkeit der Geländeneigung liegt dabei nicht vor. In [Briese, 2004] ist über die Modellierung von Geländekanten aus dem Verschnitt von Ebenenpaaren hinaus auch ein Ansatz zur Ableitung von Gerippelinien beschrieben. Dieser basiert auf der Schätzung einer lokalen Quadrik pro Flächensegment. Unter einer Quadrik versteht man eine Polynom-Fläche zweiten Grades, die je nach Betrag und Vorzeichen ihrer Koeffizienten ellipsoidische, parabolische oder hyperbolische Form annehmen kann. Durch Hauptachsentransformation und anschließende Bestimmung der Eigenwerte und der zugehörigen Eigenvektoren lassen sich die Hauptkrümmungsrichtungen der Quadrik bestimmen. Für weitere Details, wie etwa Ansätze zur Automatisierung und dergleichen, sei auf die angeführte Literatur verwiesen.

Mittlerweile wurde dieses Verfahren zur Modellierung von dreidimensionalen Geländekanten anhand einer Vielzahl verschiedener Datensätze erprobt und hat sich prinzipiell bewährt. Beispiele dafür zeigt die Abb. 3.24. Für die Ableitung hydraulisch relevanter Linieninformation ergibt sich dabei etwa folgendes Bild: Sofern die Kanten geometrisch gut ausgeprägt sind und eine entsprechende Punktdichte ( $\approx 1 \text{ Pkt} / \text{m}^2$ ) gegeben ist, gelingt die Modellierung genau und zuverlässig. Dies gilt insbesondere für künstliche Kanten wie Straßen- oder Bahndämme.

Nimmt die geometrische Ausprägung, d.h. der Schnittwinkel zwischen den Ebenenpaaren ab, dann wird die Bestimmung zunehmend unsicherer. Das tritt generell bei natürlichen Kanten



*Abbildung 3.24: Semi-automatisch abgeleitete Geländekanten and der Lainsitz (NÖ); Daten: Fa. GeoConsult, Wien*

und insbesondere bei der Oberkante der Uferböschung auf. Während diese bei großen Flüssen mit befestigten Ufern meist markant ausgebildet ist, ist ihre geometrische Definition bei kleineren, unregulierten Flüssen oft sehr unterschiedlich ausgeprägt. Bereiche mit steilen Uferböschungen bilden eine klare Oberkante im geometrischen Sinn aus, während die Böschung bei flachen und ausgeschwemmten Uferbereichen gelegentlich überhaupt keine Unstetigkeitsstelle der Geländeneigung aufweist. Ein rein Geometrie-basierter Ansatz muss daher zwangsläufig versagen. Die Böschungsoberkante ist aber dennoch in ihrer Gesamtheit für die HN-Modellierung von Interesse. Für den Fall, dass sie geometrisch nicht ausreichend definiert ist, muss daher auf ihre physikalische Definition als diejenige Linie, ab der es zu einer Ausuferung des Flusses kommt, übergegangen werden. Ein entsprechender querschnittsbezogener Ansatz zum Auffinden der Böschungsoberkante ist in [Parker, 2006] beschrieben. Die Methode beruht auf der Analyse der Kurve des über den Querschnitt gemittelten Abflusses  $Q$  (Abszisse) im Bezug zur der Wassertiefe  $h$  (Ordinate). Der Wasserstand nimmt zu Beginn mit zunehmendem Abfluss rasch zu. Wenn der bordvolle Abfluss erreicht ist und Wasser über die Ufer tritt, flacht die Kurve rasch ab. Dieser Knickpunkt im Kurvenverlauf erlaubt einen Rückschluss auf die Lage der Böschungsoberkante. Eine Kopplung der Ableitung aus geometrischen und physikalischen Ansätzen scheint hier jedenfalls sinnvoll.

Weitere Probleme ergeben sich bei Kleinstrukturen, deren Ausdehnung in den Bereich des mittleren Abstandes der ALS-Punkte fällt, was vor allem für kleine Gräben der Fall ist. Diese weisen gelegentlich eine Breite von nicht mehr als 2-3m auf und sind daher mit dem vorgestellten Modellierungsansatz schwer zu rekonstruieren. Betrachtet man allerdings die ALS-Punktewolke, so sind diese Strukturen visuell sehr wohl wahrnehmbar. Ein möglicher Ansatz zur Erfassung solcher Kleinstrukturen liegt in einer Erweiterung des Ausgleichungssystems. Dazu kann apriori-Wissen über die geometrische Form des zu modellierenden Objektes eingebracht werden. Ein Graben beispielsweise kann inklusive seiner Umgebung durch vier Ebenen beschreiben werden (linkes Vorland, linke bzw. rechte Grabenböschung, rechtes Vorland). Dazu müssen die Verbesserungsgleichungen 3.9 um zwei weitere Ebenen ergänzt werden. Ganz generell läuft dieser Gedanke darauf hinaus, die Modellierung von Geländekanten mit einem Katalog von geometrischen Primitiven zu verknüpfen.

### 3.5 Datenzusammenführung und Datenmanagement

Die Ausführungen der vorangegangenen Abschnitte haben gezeigt, dass in ein Wasserlauf-DGM Daten aus unterschiedlichen Erfassungsmethoden und Vorverarbeitungsschritten eingehen. Der Zusammenführung der einzelnen Teildatensätze kommt dabei eine wichtige Rolle zu. Es empfiehlt sich daher bereits bei kleineren Projekten von einigen  $km^2$  Größe der Einsatz eines datenbankbasierten Verwaltungssystems für topographische Daten. Bevor auf die Komponenten eines solchen Systems eingegangen wird, erfolgt eine systematische Zusammenfassung aller bei der DGM-W-Generierung beteiligten Daten.

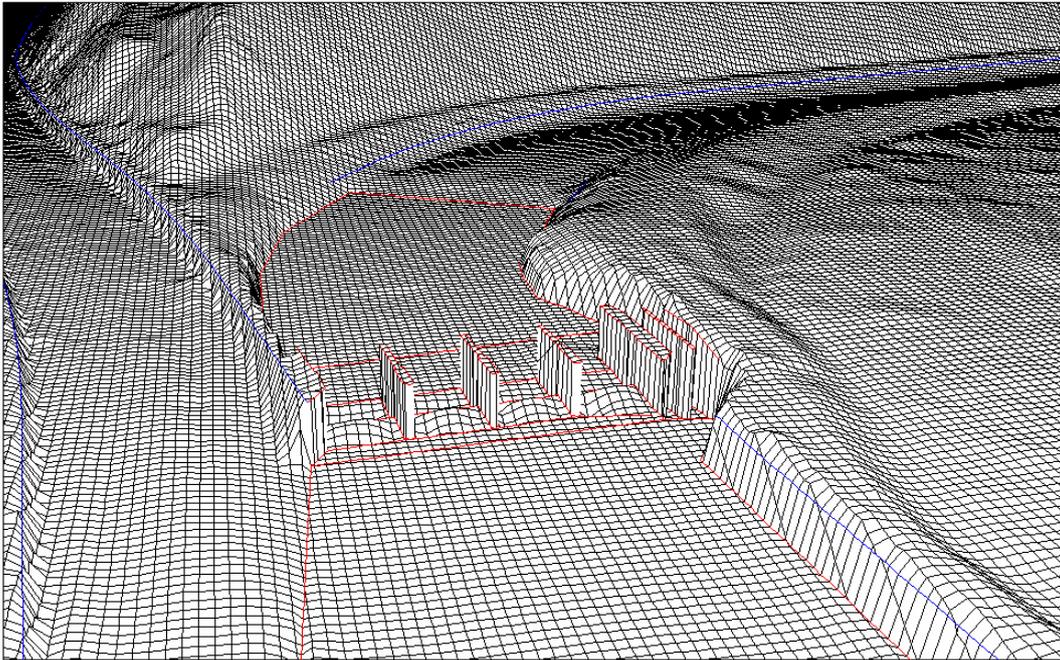
Generell kann eine Einteilung in Originaldaten (Primärdaten), aufbereitete Originaldaten und abgeleitete Daten getroffen werden. Unter Originaldaten versteht man die rohen Messdaten, wie sie direkt aus der jeweiligen Erfassungsmethode resultieren. Zu diesen zählen die relativ und absolut orientierten Luftbilder als Ausgangspunkt für photogrammetrische Auswertungen, die ungefilterte Punktewolke aus ALS, InSAR oder automatischer Bildkorrelation, die profil- oder flächenmäßig erfassten Gewässerbettdaten sowie Daten aus zusätzlichen Quellen wie Kataster, digitalem Landschaftsmodell (DLM) oder Geoinformationssystem (GIS). Allein

die Heterogenität und Quantität der Originaldaten macht den Einsatz eines entsprechenden Systems zur Datenverwaltung sinnvoll. Die Originaldaten selbst sind in der Regel noch nicht direkt zum Aufbau eines DGM-W einsetzbar. Vielmehr müssen diese durch unterschiedliche Vorverarbeitungsschritte aufbereitet, gefiltert und in einzelne Kategorien getrennt werden. Beispiele für derartig aufbereitete Originaldaten sind die klassifizierte Punktwolke, aufgeteilt in Boden-, Vegetations-, Gebäude- und Gewässerpunkte, verdichtete Profildaten des Gewässernetzes, digitalisierte oder automatisch abgeleitete Geländekanten und dergleichen. Eine von den Originaldaten separate Verwaltung dieser veredelten Daten ist anzustreben. Aus den aufbereiteten Daten schließlich erfolgt die Ableitung des DGM-W und anderer Datensätze (DGM, DOM, n-DOM, Neigungsmodell, Höhenlinienkarten, ...). Diese abgeleiteten Produkte stellen die dritte Ebene der Datenverwaltung dar.

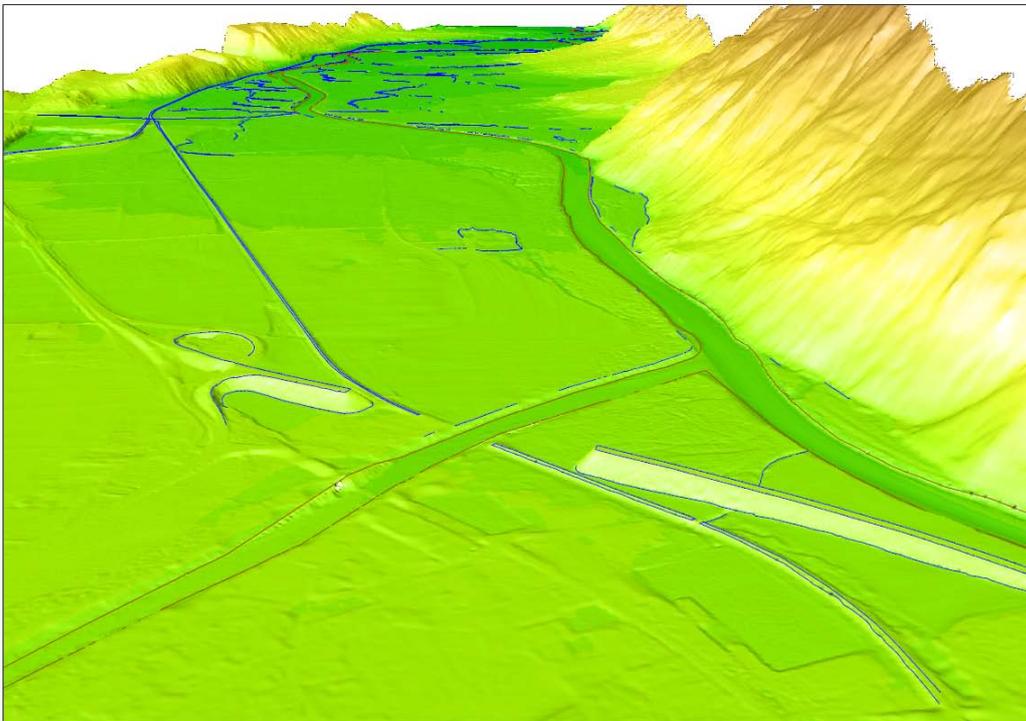
Die Speicherung und Verwaltung der topographischen Daten erfolgt zweckmäßiger auf Basis einer Datenbank in einem DBMS (Database Management System). Unter den bestehenden Datenbankkonzepten hat sich für das Management von Geometriedaten eine Mischung aus relationalem und objektorientiertem Datenbankmodell etabliert, wobei man dann von objektrelationalen Datenbanken spricht. Die relationale Datenbank (RDB) hat sich in den letzten Jahrzehnten als Standardmodell durchgesetzt. Entsprechend viele kommerzielle wie auch freie Software-Produkte sind daher am Markt verfügbar (Oracle, Informix, MySQL, MS Access, ...). Für relationale Datenbanken existiert auch die standardisierte Abfragesprache SQL (Structured Query Language). Mit einer RDB können allerdings nur einfache Datentypen (Zahlen, Datum, Zeichenketten, ...) verwaltet werden. Die Erweiterung um objektorientierte Ansätze ermöglicht bei der objektrelationalen Datenbank die effiziente Verwaltung von komplexen Datentypen. Bei einer Spezialisierung auf Geometriedaten spricht man dann von geo-relationalen Datenbanken. Entsprechende Erweiterungen des rein relationalen Modells existieren für viele der gängigen Datenbanken (Oracle Spatial, PostgreSQL, MySQL, ...).

Eine räumliche Datenbank (spatial database) ist der Kern eines Verwaltungssystems topographischer Daten. Darüber hinaus muss ein DBMS aber noch zusätzliche Funktionalität bereitstellen. Dazu gehören die grundsätzliche Unterstützung der Georeferenzierung (Verwaltung von Koordinatenbezugssystemen und die entsprechenden Transformationen), die Verwaltung der Objektkodierung (geometrischer und semantischer Typ von Geometrieobjekten), die Verwaltung von Metadaten (Datenerfasser, Nutzungsberechtigte, Erfassungsdatum, Genauigkeit in Lage und Höhe, ...) sowie die Ein- und Ausgabe von Daten. Aus Benutzersicht besteht letztlich der Anspruch, dass topographische Daten blattschnittfrei verwaltet und auf der Basis von beschreibenden Attributen (Metadaten) selektiert, exportiert und aktualisiert werden können. Das am Institut für Photogrammetrie (I.P.F.) entwickelte Verwaltungssystem TopDM (Topographic Data Management) [Hochstöger, 1995] basierend auf der geo-relationalen Datenbank TopDB (Topographic Database) [Loitsch u. Molnar, 1991] stellt ein System dar, welches obige Anforderungen erfüllt. TopDM wird am I.P.F. seit Jahren erfolgreich als DBMS zum Zweck der DGM-W-Generierung eingesetzt. Dort erfüllt es gleichermaßen die Aufgaben der Speicherung, Archivierung und Fusion von topographischen Daten.

Abschließend zu diesem Kapitel zeigen die Abbildung 3.25 bzw. 3.26 Ausschnitte aus Wasserlauf-DGMen an der Saar (Deutschland) bzw. Drau (Kärnten, Österreich).



**Abbildung 3.25:** DGM-W der Saar bei Schoden aufgebaut aus ALS-Punkten, Querprofiledaten des Gewässerbettes und Plandaten des Kraftwerks; Daten: Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz, Deutschland



**Abbildung 3.26:** DGM-W der Drau (Kärnten) aufgebaut aus ALS-Punkten, Querprofiledaten des Gewässerbettes und semi-automatisch extrahierten Geländekanten; Daten: Fa. GeoConsult (Wien)

## 4 Datenreduktion hybrider Geländemodelle

Die rapide Entwicklung im Bereich der Sensortechnik einerseits und der Einsatz von automatisierten Auswerteverfahren andererseits haben in den letzten Jahren eine immer detailliertere Erfassung des Geländes ermöglicht. Betrug Mitte der 90er Jahre die Auflösung landesweiter Geländemodelle etwa 25m ([Franzen u. Mandlbürger, 2003], [BEV, 2006], [swisstopo, 2006]) so wird heute auf der Basis von Laserscanner-Daten am flächendeckenden 1m-DGM gearbeitet. Moderne Sensoren liefern sogar Auflösungen im Bereich von einigen Dezimetern. Die hohe Punktdichte ermöglicht die Erfassung von topographischen Details im DGM zum Preis einer um mehrere Zehnerpotenzen gestiegenen Datenmenge. Aus diesem Grund ist das Thema Datenreduktion (data reduction) und Flächenvereinfachung (surface simplification) zu einem zentralen Gegenstand der Forschung in Geodäsie, Computer Vision, Computer Grafik, etc. geworden. Einen besonderen Stellenwert nimmt dieses Thema auch für angewandte Ingenieurwissenschaften wie die Hydraulik ein, in welcher die Strömungsphysik auf Basis eines Netzes finiter Elemente gelöst wird. Die Vorgabe lautet dabei, möglichst wenige dieser finiten Elemente zu produzieren ohne dass dabei die physikalisch interessanten Details verloren gehen. In diesem Kapitel werden daher zunächst vorhandene Reduktionsansätze gezeigt und dann ein Algorithmus zur effizienten Reduktion von hybriden Geländemodellen im Detail vorgestellt.

### 4.1 Übersicht über vorhandene Reduktionsansätze

Einen ausführlichen Überblick über vorhandene Algorithmen geben [Heckbert u. Garland, 1997]. In diesem Artikel werden sowohl Kurven- als auch Flächenapproximationen erläutert, wobei die Flächen entweder 2.5D (height fields) oder 3D (manifolds) sein können. Gemäß unserem Ziel der Datenreduktion von hybriden Geländemodellen wollen wir uns auf die Approximation von Flächen beschränken, die sich durch eine bivariate Funktion  $z = f(x, y)$  beschreiben lassen.

Prinzipiell soll, ausgehend von einer Oberflächenbeschreibung in Form von  $n$  stückweisen Teilflächen, als Ergebnis der Vereinfachung eine Fläche beschrieben durch  $m$  Teilflächen entstehen, wobei  $m \ll n$  sei. Die einzelnen Teilflächen können entweder linear oder von höherer Ordnung sein. In der Regel wird eine Beschreibung mit ebenen Dreiecksflächen als ausreichend angesehen. Als Stützpunkte für die approximierte Fläche können entweder ein Subset der originalen Stützpunkte oder auch andere Punkte der kontinuierlichen Fläche herangezogen werden, wobei überwiegend der erstere Fall zur Anwendung kommt. Diese allgemeine Definition von Datenreduktion ist auch direkt auf die hybride DGM-Struktur, bei der entweder drei- oder viereckige Teilflächen auftreten, anwendbar. Zur Beschreibung der Approximationsgenauigkeit werden entweder der maximale Fehler  $L_\infty = \max_{i=1}^n |u_i - v_i|$  oder der quadratische Fehler  $L_2 = \sum_{i=1}^n \sqrt{|u_i - v_i|^2}$  verwendet.  $|u_i - v_i|$  bezeichnet dabei die Abweichung zwischen der originalen und der approximierte Fläche. Optimierungen in Bezug auf  $L_\infty$  bzw.  $L_2$  werden *minimax-* bzw. *kleinste Quadrate-*Optimierungen genannt.

### 4.1.1 Vereinfachung von Kurven

Zur Approximation von Kurven hat sich der Algorithmus von Douglas-Peucker [Douglas u. Peucker, 1973] weitgehend durchgesetzt. Dabei wird zunächst der Punkt mit dem größten Normalabstand von der Sehne zwischen dem Anfangspunkt- und Endpunkt des Linienzuges gesucht. Überschreitet der Abstand einen gewissen Schwellwert, wird der Punkt eingefügt und der Algorithmus rekursiv auf beide Linienstücke angewandt. Dieser Prozess wird solange wiederholt bis die vorgegebene Toleranz eingehalten ist. Der Douglas-Peucker-Algorithmus verwendet also ein  $L_\infty$ -Fehlermaß. Er ist auf 2D- und 3D-Polygonzüge anwendbar und stellt in generalisierter Form die Basis für zahlreiche Ansätze zur Flächenapproximation dar.

### 4.1.2 Vereinfachung von Flächen

Etwas schwieriger und komplexer ist die Vereinfachung von Flächen. Entsprechend vielfältiger sind auch die existierenden Ansätze. In den meisten Fällen wird eine adaptive Polygonisierung aufgebaut, indem nur dort fein unterteilt wird, wo die Fläche stark gekrümmt ist. Für 2.5D Flächen sind folgende Verfahren beschrieben:

#### Statische Ausdünnung regelmäßiger Gitter

Für Flächen, die in regelmäßiger Gitterstruktur gegeben sind, besteht die einfachste Art der Approximation in einer statischen Ausdünnung, wobei vom ursprünglichen Gitter jede  $n$ -te Zeile und Spalte herangezogen wird. Diese Methode ist sehr schnell, liefert aber suboptimale Qualität, da gerade die bedeutsamsten Punkte häufig verloren gehen. Eine Verbesserung erreicht man durch Anwendung eines Tiefpass-Filters (Gauß Filter), wo jeder Gitterpunkt des reduzierten Datensatzes aus dem Mittel der umliegenden Punkte berechnet wird. Der wesentliche Nachteil der statischen Ausdünnung ist der nicht-adaptive Charakter. Andererseits können durch fortgesetzt hierarchische Anwendung einfach unterschiedliche Auflösungsstufen (Levels Of Detail, LOD) abgeleitet werden.

#### Hierarchische Unterteilung (Hierarchic Subdivision)

Bei der hierarchic subdivision wird die Fläche durch eine Dreiecksvermaschung aufgebaut, welche rekursiv verfeinert wird. Im Gegensatz zu allgemeineren Triangulationen (Delaunay, ...) entsteht dabei eine Baumstruktur. Die Arbeitsweise ist also vom Groben ins Feine (coarse-to-fine), wobei jedes Dreieck der übergeordneten Stufe in zwei, drei oder auch mehrere Dreiecke der nächst feineren Stufe aufgeteilt wird, solange bis gewisse Toleranzen eingehalten sind. Triangulationen mittels hierarchic subdivision lassen sich schnell aufbauen, liefern aber in der Regel weniger gute Approximationsergebnisse als allgemeine Triangulierungen. Der hierarchische Ansatz wiederum ermöglicht den Aufbau unterschiedlicher Auflösungsstufen.

## Feature Methoden

Bei diesen Methoden werden den einzelnen Originalpunkten Einflusszahlen zugeordnet, die meist durch Verwendung linearer oder nicht-linearer Filter aus einer 2x2 oder 3x3 Umgebung berechnet werden. Das Ergebnis ist dann ein Set von bedeutsamen Punkten, die anschließend trianguliert werden können. Interessante Anwendungen für die hybride DGM-Struktur entstehen, wenn auf Basis einer Constrained Delaunay Triangulierung zusätzlich Geländekanten und markante Höhenpunkte in das TIN eingegliedert werden.

## Verfeinerung (Refinement)

Unter *refinement* fallen all jene Algorithmen, bei denen ausgehend von einer minimalen Approximation in mehreren Durchläufen jeweils ein oder mehrere Punkte in eine Triangulierung eingefügt werden, bis ein gewünschter Fehler unterschritten oder eine vorgegebene Anzahl von Punkten erreicht ist. Als Fehlermaß wird zumeist die maximale vertikale Abweichung der Approximierten von der originalen Fläche - d.h. die  $L_\infty$  - herangezogen. Algorithmen, die den Punkt mit dem maximalen Fehler einfügen, werden auch *greedy insertion* (*gieriges Einfügen*) genannt. Ferner spricht man von sequentiellem Einfügen, wenn pro Durchlauf je ein einziger Punkt eingefügt wird. Das simultane Einschalten mehrerer Punkte dagegen wird als paralleles Einfügen bezeichnet. Die Arbeitsweise der refinement-Algorithmen verläuft vom Groben ins Feine (*coarse-to-fine*).

## Dezimierung (Decimation)

Genau umgekehrt wird bei der mesh decimation vorgegangen. Ausgehend von einer vollständigen Triangulierung werden sukzessive Punkte (Flächenstücke) gelöscht, wo sie zur Beschreibung der Fläche mit einer gewissen Fehlertoleranz nicht erforderlich sind. Da heutige Geländemodelle allerdings nicht selten aus mehreren hundert Millionen Punkten bestehen, erweist sich der umgekehrte Ansatz vom Feinen ins Grobe (*fine-to-coarse*) als ungünstig. Decimation Methoden werden daher eher dort angewendet, wo es um die Beschreibung von 3D-Objekten (Statuen, industrielle Objekte, ...) geht.

## 4.2 Anforderungen an die Datenreduktion

Im folgenden sollen die Anforderungen an einen allgemeinen Rahmen (framework) zur Datenreduktion hybrider Geländemodelle formuliert werden. Die Vorgaben haben sich in dieser Form aus Diskussionen mit DGM-Anwendern aus unterschiedlichen Gebieten herauskristallisiert und in der Praxis bewährt. Vorrangiges Ziel ist eine kompakte DGM-Beschreibung unter Beibehaltung der geometrischen Grundstruktur des hybriden DGM. Auf optimale Kompression wird daher von vornherein zu Gunsten der Erhaltung der Grundstruktur verzichtet. Folgende Anforderungen lassen sich formulieren:

- Input: Punkte und Linien eines hybriden DGM, d.h. ein regelmäßiges interpoliertes Gitter und Strukturinformation (markante Höhenpunkte, Geländekanten und Gerippelien)

- Output: Triangulierung (Constrained Delaunay Triangulation) oder reduzierte Punktmenge. Das gesamte DGM bestehend aus regelmäßigem Gitter und Strukturelementen ist dabei entsprechend auszudünnen.
- Zur Beschreibung der approximierten Fläche werden nur Punkte des originalen DGM herangezogen. Von einer Verschiebung der ursprünglichen Gitterpunkte in Lage oder Höhen wird abgesehen, da diese meist durch qualifizierte Interpolation (z.B. Kriging) bestimmt wurden. In den Knotenpunkten ist daher das originale DGM immer identisch zum reduzierten Netz.
- Eine maximale Höhentoleranz  $\Delta z_{max}$  soll eingehalten werden ( $\equiv L_\infty$ -Norm)
- Ein maximaler planimetrischer Punktabstand  $\Delta xy_{max}$  ( $= \Delta_0$ ) soll nicht überschritten werden. Das zugrunde liegende Gitter soll also in reduzierter Auflösung ( $\Delta_0$ -Niveau) erhalten bleiben. Dadurch weist auch das reduzierte Netz eine einigermaßen homogene Datenverteilung auf. Für Anwendungen, welche diese Homogenität nicht voraussetzen, kann  $\Delta_0$  entsprechend groß gewählt werden.
- Innerhalb des  $\Delta_0$ -Niveaus soll die approximierte Fläche solange verfeinert werden, bis die geforderte Höhentoleranz eingehalten ist. Die Unterteilung kann hierarchisch oder unregelmäßig erfolgen.
- Die Einhaltung der maximalen Höhentoleranz kann entweder durch Berechnung und Vergleich der Höhen aus originaler und approximierter Fläche sichergestellt, oder durch Anwendung geeigneter Kriterien abgeschätzt werden.

Input-Daten für den Reduktionsprozess sind diskrete Punkte und Linien eines hybriden DGM. Es sei an dieser Stelle ausdrücklich darauf hingewiesen, dass die Diskretisierung aus einer Interpolation mit qualifizierter Filterung der unregelmäßigen Messfehler hervorgehen sollte. Erst eine derart gefilterte Fläche schafft optimale Voraussetzungen für eine effiziente Datenreduktion. Bei ungefilterten DGMen leidet einerseits der Grad der erzielbaren Datenkompression, andererseits besteht die Gefahr, dass für die approximierte Fläche fälschlicherweise gerade die Punkte mit großem Messfehleranteil herangezogen werden. Ein Vergleich der Ergebnisse auf Basis eines gefilterten bzw. ungefilterten DGM wird in Kapitel 4.5 gebracht.

Wie in Abschnitt 4.1 dargelegt wurde, existieren unterschiedliche Herangehensweisen an die Datenreduktion sowohl hinsichtlich der Struktur der approximierten Fläche als auch was das Reduktionskriterium betrifft. Ein Rahmen für die Reduktion von hybriden DGMen soll demnach möglichst allgemein gehalten sein und unterschiedliche Strategien erlauben. Im Folgenden werden einerseits die adaptive TIN-Verdichtung (mesh refinement) und andererseits ein Ansatz, der auf der Analyse von lokaler Krümmung und Neigung aufbaut, weiterverfolgt. Je nach Verfahren entsteht als Ergebnis entweder eine Dreiecksvermaschung oder lediglich eine reduzierte Punktmenge. Aus letzterer lässt sich freilich leicht ebenfalls eine TIN ableiten. Dieselbe Flexibilität soll auch für die Struktur (Punkt- oder Dreiecksanordnung) der approximierten Fläche gelten. Demnach soll entweder eine hierarchische Unterteilung im Sinne eines Quad-Tree oder eine unregelmäßige Punktanordnung ermöglicht werden. Diese Flexibilität ist umso wichtiger, als verschiedene Anwendungen unterschiedliche Anforderungen an die Datenverteilung stellen. Die spezifischen Bedürfnisse der HN-Modellierung an die Aufbereitung der Topographie wird detailliert im Kapitel 5 beschrieben.

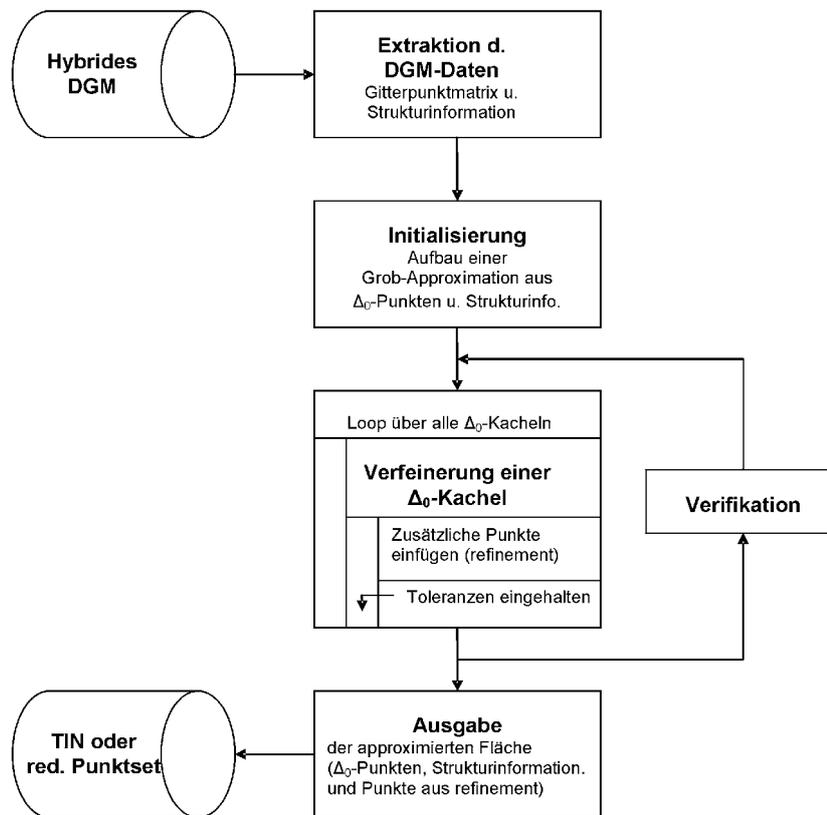


Abbildung 4.1: Ablaufdiagramm der DGM-Datenreduktion

### 4.3 Der Reduktionsalgorithmus

Gemäß der im vorigen Abschnitt formulierten Vorgaben lässt sich nun der generelle Ablauf der Datenreduktion in allgemeiner Form formulieren. Die beiden wesentlichsten Parameter zur Steuerung des Prozesses sind dabei die maximal zulässige Höhentoleranz  $\Delta z_{max}$  sowie der maximale planimetrische Punktabstand  $\Delta xy_{max}$ , welcher allerdings nicht explizit sondern implizit über die Anzahl der Reduktionsniveaus  $k$  angegeben wird. Die beiden Größen stehen dabei mit der DGM-Gitterweite ( $gw$ ) in folgendem Zusammenhang:

$$\Delta_0 = \Delta xy_{max} = 2^k gw \quad (4.1)$$

Beginnend bei der originalen DGM-Gitterweite ( $\Delta_k$ -Niveau) kann damit eine Datenpyramide aufgebaut werden, wobei die nächst höheren Pyramidenstufen aus einer  $2 \times 2$ -Reduktion (=Verdoppelung der Gitterweite) hervorgehen. Der Punktabstand der obersten Pyramidenstufe ( $\Delta_0$ -Niveau) entspricht damit aber genau dem maximalen planimetrischen Punktabstand  $\Delta xy_{max}$ .

Wie aus Abbildung 4.1 ersichtlich, besteht der generelle Ablauf des Algorithmus im Einlesen der Gitterpunkt-Matrix und der Strukturinformation aus dem hybriden DGM, dem Aufbau einer ersten Approximation, bestehend aus jedem  $2^k$ -ten Gitterpunkt ( $\Delta_0$ -Niveau) und den Strukturlinien sowie der Verfeinerung jeder einzelnen  $\Delta_0$ -Kachel, solange bis die geforderte Höhentoleranz eingehalten ist. Im Sinne der Ausführungen des Abschnittes 4.1 kann man den

Algorithmus als eine Kombination von Feature- und Refinement-Methoden bezeichnen. Die groben Formen (features) des Geländes werden durch die initiale Approximation ( $\Delta_0$ -Punkte und Linien) beschrieben, auf deren Basis der Refinement-Prozess aufsetzt. Die Verfeinerung wird dabei jeweils lokal innerhalb einer  $\Delta_0$ -Kachel vorgenommen. Da hierbei das Einfügen zusätzlicher Punkte auch Auswirkungen auf die bereits prozessierten Nachbarkacheln haben kann, ist die gefundene Approximation durch einen nochmaligen Durchlauf zu verifizieren. Die unterschiedlichen Schemata zur Unterteilung der  $\Delta_0$ -Kacheln werden in den folgenden Abschnitten beschrieben.

### 4.3.1 Hierarchische Unterteilung

Der Grundgedanke für die hierarchische Unterteilung ist dem *Progressive Sampling* [Makarov, 1976] - einem Standardverfahren der photogrammetrischen Geländedatenerfassung - entlehnt. Beim progressive sampling werden ausgehend von einem groben Ausgangsraster nur diejenigen Bereiche detaillierter erfasst, wo die Bewegtheit des Geländes dies erfordert. Aus Sicht der Datenstruktur entsteht dabei ein Quad-Tree, indem jede Kachel in vier Quadranten aufgeteilt wird. Jeder dieser Quadranten wird seinerseits, falls erforderlich, wieder in vier Sub-Quadranten unterteilt, bis das Gelände hinreichend genau beschrieben oder ein gewisses Diskretisierungsintervall (sampling interval) erreicht ist.

Auf die DGM-Datenreduktion lässt sich dieses Konzept direkt übertragen. Während die Entscheidung über eine weitere Unterteilung bei der Messung nur aufgrund der bereits erfassten Daten erfolgen kann, stehen bei der Anwendung des Progressive Sampling Konzepts für die Datenreduktion alle Punkte innerhalb einer betrachteten Kachel zur Entscheidungsfindung zur Verfügung. Die Sub-Aufteilung wird dabei solange fortgesetzt, bis die geforderte Höhentoleranz eingehalten oder die originale DGM-Gitterweite erreicht ist. Nacheinander werden die einzelnen Auflösungs niveaus  $\Delta_0, \Delta_1, \dots, \Delta_k$  durchschritten, wobei bei jedem Unterteilungsschritt jeweils fünf Punkte (Mittelpunkt der Quadrat-Kachel und Mittelpunkte der Quadratseiten) eingefügt werden. Die Abbildung 4.2 zeigt die hierarchische Unterteilung ausgehend vom  $\Delta_0$ -Niveau in drei Hierarchie-Stufen.

Aus programmtechnischer Sicht lässt sich die hierarchische Unterteilung sehr effizient als Rekursion lösen. Für die Entscheidung, ob eine Unterteilung notwendig ist, genügt es, innerhalb der betrachteten Kachel einen einzigen Punkt zu finden, für den die einzuhaltende Toleranz überschritten ist. Die beschriebene Vorgangsweise ist adaptiv und ergibt eine Datenverteilung, die den ursprünglichen Charakter des regelmäßigen DGM-Gitters betont. Eine Triangulierung auf dieser Datenbasis liefert vorwiegend rechtwinkelige Dreiecke mit gleich langen Katheten. Nur an den Stellen, an denen benachbarte Quadranten in unterschiedlichen Reduktionsniveaus aufgelöst werden, kann es zu schmalen Dreiecken kommen. Das ungünstigste Seitenverhältnis kann  $1 : 2^k \sqrt{2}$  betragen. Das häufige Auftreten solcher Konstellationen ist allerdings unwahrscheinlich, zumal es in der Praxis eher zu einer verlaufenden denn zu einer abrupten Änderung der Krümmung kommt. Die hierarchische Unterteilung bietet sich immer dann an, wenn an die Regelmäßigkeit der Datenverteilung höhere Ansprüche gestellt werden als an die Effizienz der Datenreduktion. Während der Prozessierung entstehen dabei als Nebenprodukt auch unterschiedliche Auflösungsstufen (LOD) in adaptiver Weise.

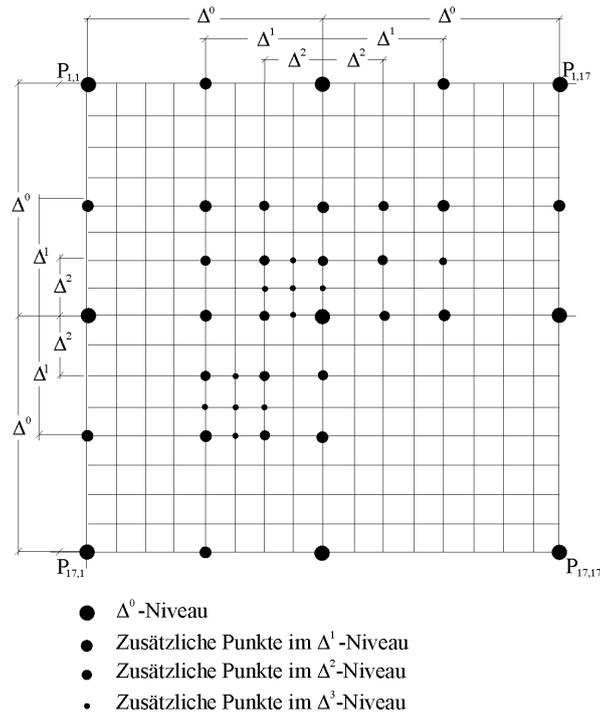


Abbildung 4.2: Hierarchische Unterteilung, Prinzipskizze

### 4.3.2 Unregelmäßige Unterteilung

Steht die Effizienz der Datenreduktion im Vordergrund, so empfiehlt sich die unregelmäßige Unterteilung. Innerhalb einer  $\Delta_0$ -Kachel werden dabei für alle DGM-Gitterpunkte, die nicht bereits Teil der approximierten Fläche sind, Fehlermaße berechnet, welche die Abweichung von der originalen Fläche beschreiben. In einem Durchlauf wird derjenige Punkt mit dem größten Fehlerbetrag eingefügt, sofern dieser die einzuhaltende Toleranz überschreitet. Für die verbliebenen Gitterpunkte werden nun unter der Berücksichtigung des eingefügten Punktes die Fehlermaße neu bestimmt und dieser Prozess des Evaluierens und Einfügens solange wiederholt, bis die vorgegebenen Toleranzen eingehalten sind. Die dargestellte Strategie, wonach jeweils der Punkt mit dem größten Fehlerbetrag eingefügt wird, bezeichnet man als *greedy insertion*. Sie kann als Verallgemeinerung des Douglas-Peucker-Algorithmus für Kurvenapproximation auf die Fläche verstanden werden. Eine Beschleunigung des Algorithmus kann noch erreicht werden, indem bei jeder Iteration die Fehlermaße nur für die Gitterpunkte neu berechnet werden, für welche sich durch das Einfügen von zusätzlichen Punkten die approximierten Fläche geändert hat.

Die Vorzüge dieser Unterteilungsmethode sind einerseits die Effizienz der Kompression und andererseits die Eigenschaft, dass sich die wesentlichen Geländeformen, welche nicht explizit als Kanten modelliert sind, durch die Punktanordnung ausprägen. Die Effizienz der Datenreduktion geht allerdings auf Kosten der Homogenität der Datenverteilung. Baut man mit der aus unregelmäßiger Unterteilung gewonnenen Punktmenge ein TIN auf, so beträgt das Verhältnis der Dreiecksseiten im ungünstigsten Fall wie bei der hierarchischen Unterteilung  $1 : 2^k \sqrt{2}$ . Allerdings haben empirische Untersuchungen gezeigt, dass schmale Dreiecke bei der unregelmäßigen Unterteilung bei weitem häufiger auftreten. Einige Beispiele dafür sind im Abschnitt 4.5 dargestellt.

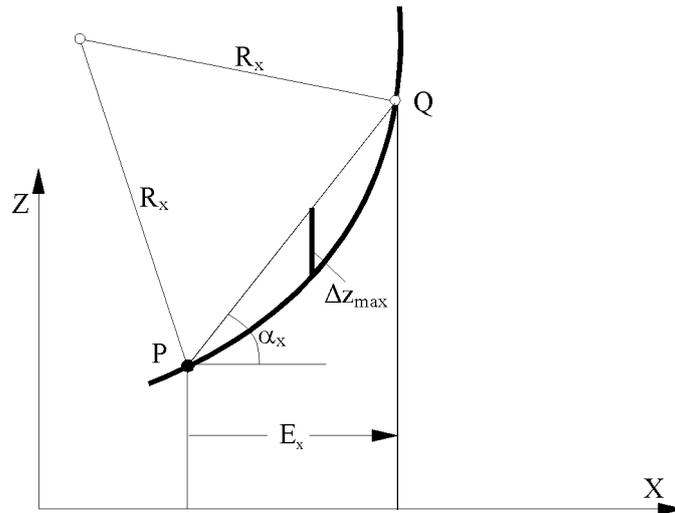


Abbildung 4.3: Zusammenhang zwischen Krümmung, Neigung und maximaler Extrapolationsweite, Prinzipskizze

## 4.4 Die Reduktionskriterien

Im vorangegangenen Abschnitt wurde der generelle Ablauf des Reduktionsalgorithmus sowie die Struktur der approximierten Flächen erläutert. In diesem Abschnitt werden nun konkrete Kriterien vorgestellt, die als Entscheidungsgrundlagen dienen, ob eine zusätzliche Verfeinerung der Fläche notwendig ist oder nicht.

### 4.4.1 Datenreduktion durch Krümmungs- und Neigungsanalyse

In seiner Grundform ist dieser am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung entwickelte Ansatz in [Briese u. Kraus, 2003] beschrieben. Er baut auf einer Analyse der lokalen Krümmungs- und Neigungsverhältnisse des Geländes auf.

#### Reduktionskriterium maximale Extrapolationsweite

In Abb. 4.3 ist der Zusammenhang zwischen den Parametern Geländeneigung ( $\alpha$ ), Geländekrümmung (Krümmungsradius  $R$ ) sowie der einzuhaltenden maximalen Höhentoleranz ( $\Delta z_{max}$ ) und der sogenannten *maximalen Extrapolationsweite* ( $E$ ) dargestellt. Ausgehend von einem Punkt  $P$  der approximierten Fläche und der dort herrschenden Krümmung und Neigung bezeichnet die Extrapolationsweite die maximale horizontale Distanz, die mittels einer linearen Verbindung (Sehne  $\overline{PQ}$ ) überbrückt werden kann, ohne einen Höhenfehler größer als  $\Delta z_{max}$  zu begehen. Die maximale Extrapolationsweite kann als Kriterium für eine weitere Verfeinerung herangezogen werden, indem diese mit den Distanzen zu den nächstgelegenen Punkten der approximierten Fläche verglichen wird. Ursprünglich wurde dieser Ansatz in Verbindung mit der hierarchischen Unterteilung eingeführt. Sind in einer Kachel des  $\Delta_i$ -Niveaus die  $E$ -Werte aller DGM-Gitterpunkte größer als  $\Delta_i$ , ist keine weitere Verfeinerung erforderlich. Anderenfalls kommt es gemäß Kapitel 4.3.1 zur weiteren Unterteilung in das  $\Delta_{i+1}$ -Niveau und die Überprüfung wird dort analog wiederholt. Eine Erweiterung des Ansatzes auf unregelmäßige

Unterteilung wird am Ende dieses Abschnittes angegeben. Ausgehend von der Formel für die Pfeilhöhe im Kreisbogen lässt sich die maximale Approximationsweite wie folgt ableiten:

$$h = \frac{a^2}{2R} \quad (4.2)$$

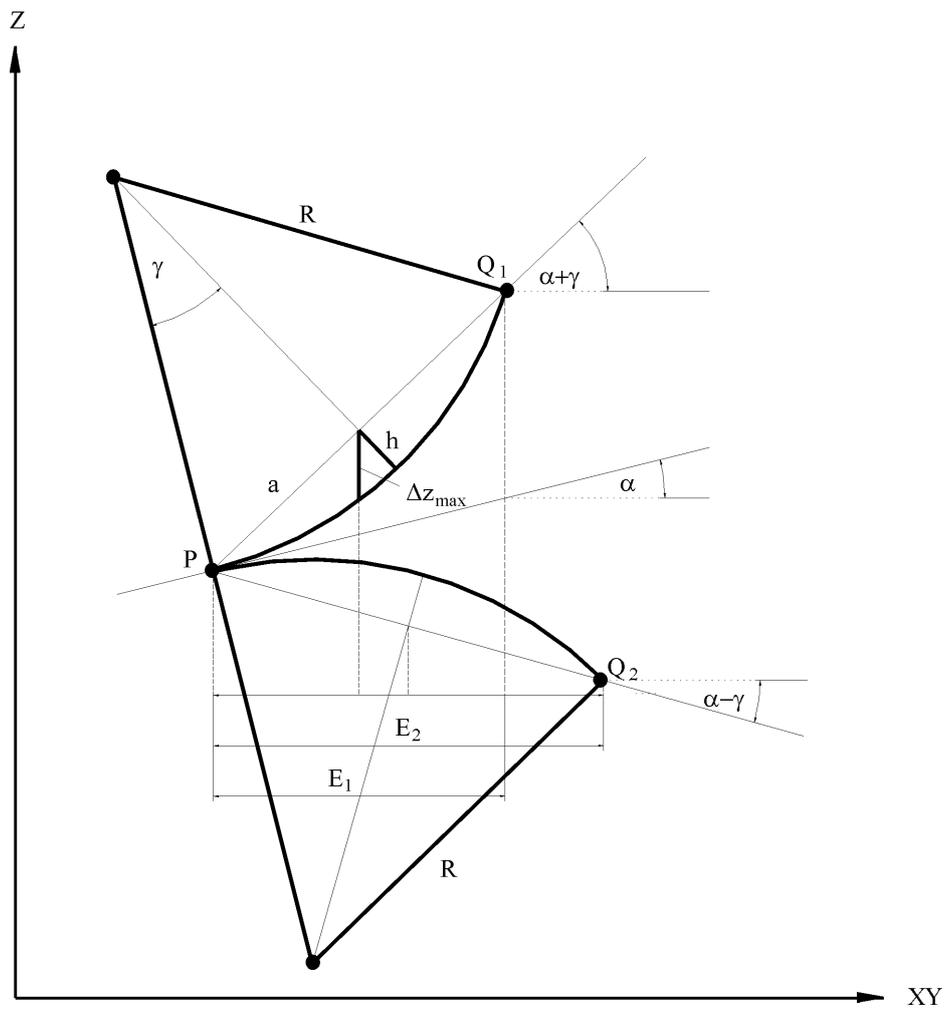
$$\begin{aligned} \frac{h}{\Delta z_{max}} &\approx \cos \alpha \\ \frac{a^2}{2R} &\approx \Delta z_{max} \cos \alpha \\ a^2 &\approx 2R \Delta z_{max} \cos \alpha \\ a &\approx \frac{E}{2 \cos \alpha} \\ 2R \Delta z_{max} \cos \alpha &\approx \frac{E^2}{4 \cos^2 \alpha} \end{aligned}$$

$$E \approx \sqrt{\Delta z_{max} 8R \cos^3 \alpha} \quad (4.3)$$

Man erkennt aus Formel 4.3 unmittelbar, dass  $E$  umso kleiner wird je größer der Neigungswinkel  $\alpha$  und je kleiner der Krümmungsradius  $R$  ist. Mit anderen Worten: je steiler und bewegter das Gelände desto kleiner die maximale Extrapolationsweite. Kleine Werte für  $E$  wiederum bedeuten, dass nur kurze Strecken ohne weitere Punkte überbrückt werden können und daher eine dichtere Datenanordnung zur adäquaten Approximation der Fläche erforderlich ist.

Dem originalen Ansatz liegen allerdings einige Vereinfachungen zugrunde. Einerseits bezeichnet  $\alpha$  in Figur 4.3 den Winkel zwischen der Horizontalen und der Sehne  $\overline{PQ}$ , während die tatsächliche Geländeneigung dem Winkel zwischen der Horizontalen und der Tangente an das Kreissegment  $\widehat{PQ}$  entspricht. Vernachlässigt wird dabei der Sehnen-Tangenten-Winkel  $\gamma$ . Andererseits wird in Formel 4.3 lediglich der Betrag der Krümmung in Form des Radius  $R$  berücksichtigt, nicht aber deren Vorzeichen. Krümmung und Neigung können aber entweder in dieselbe oder in die entgegengesetzte Richtung wirken. Je nachdem summieren sich die Einflüsse oder sie heben einander gegenseitig in gewissem Maße auf. Diesem Umstand wird bei der Berechnung der maximalen Extrapolationsweite  $E$  durch die Formel 4.3 nicht Rechnung getragen.

In der Abb. 4.4 sind die Verhältnisse daher etwas präziser gefasst. Die Geländeneigung  $\alpha$  tritt hier als Winkel zwischen der Tangente an das Kreissegment  $\widehat{PQ}_1$  und der Horizontalen auf. Der für die Berechnung der maximalen Extrapolationsweite maßgebliche Winkel setzt sich aus der Neigung  $\alpha$  und dem Sehnen-Tangenten-Winkel  $\gamma$  zusammen. Wirken beide Komponenten in dieselbe Richtung, dann summieren sich die Einflüsse von Neigung und Krümmung zu  $\alpha + \gamma$ . Dieser Fall entspricht in der Abb. 4.4 dem oberen Kreissegment  $\widehat{PQ}_1$ . Wirkt die betragsmäßig selbe Krümmung allerdings gegen die herrschende Neigung, wie im unteren Kreissegment  $\widehat{PQ}_2$  dargestellt, dann heben sich die Einflüsse teilweise auf, wodurch  $E$  aus der Differenz  $\alpha - \gamma$  zu berechnen ist. Ein kleinerer Winkel bewirkt aber nach Formel 4.3 eine größere maximale Extrapolationsweite, was sich in der erweiterten Prinzipskizze auch bestätigt findet ( $E_2 > E_1$ ).



**Abbildung 4.4:** Zusammenhang zwischen Krümmung, Neigung, Sehnen-Tangenten-Winkel und maximaler Extrapolationsweite, erweiterte Prinzipskizze

*Conclusio:* Für die korrekte Berechnung der maximalen Extrapolationsweite sind die Geländeneigung und -krümmung nicht nur betragsmäßig, sondern auch mit ihrem Vorzeichen zu berücksichtigen.

Die korrekte Formel zur Berechnung von  $E$  lautet demnach:

$$E \approx \sqrt{\Delta z_{max} 8R \cos^3(\alpha + \gamma)} \quad (4.4)$$

Der gesuchte Sehnen-Tangenten-Winkel  $\gamma$  lässt sich unter Anwendung des Additionstheorems für Winkelfunktionen wie folgt herleiten:

$$\begin{aligned} \frac{h}{\Delta z_{max}} &= \cos(\alpha + \gamma) = \cos \alpha \cos \gamma - \sin \alpha \sin \gamma \\ \frac{R-h}{R} &= \cos \gamma \\ h &= R(1 - \cos \gamma) = \Delta z_{max} \cos \alpha \cos \gamma - \Delta z_{max} \sin \alpha \sin \gamma \\ 1 &= \frac{\Delta z_{max} \cos \alpha + R}{R} \cos \gamma - \frac{\Delta z_{max} \sin \alpha}{R} \sin \gamma \end{aligned}$$

Durch die Substitution:

$$\begin{aligned} A &= \frac{\Delta z_{max} \cos \alpha + R}{R} \\ B &= \frac{\Delta z_{max} \sin \alpha}{R} \end{aligned}$$

und anschließendes Quadrieren der Gleichung ergibt sich:

$$\begin{aligned} A \cos \gamma &= 1 + B \sin \gamma \\ A^2(1 - \sin^2 \gamma) &= 1 + 2B \sin \gamma + B^2 \sin^2 \gamma \\ (A^2 + B^2) \sin^2 \gamma + 2B \sin \gamma + (1 - A^2) &= 0 \end{aligned}$$

$$\sin^2 \gamma + \frac{2B}{A^2 + B^2} \sin \gamma + \frac{1 - A^2}{A^2 + B^2} = 0 \quad (4.5)$$

Der Sehnen-Tangenten-Winkel  $\gamma$  lässt sich somit aus der quadratischen Gleichung 4.5 bestimmen.

Bei der Berechnung der maximalen Extrapolationsweite  $E$  ist ferner deren Richtungsabhängigkeit zu beachten. Die beiden Prinzipskizzen 4.3 und 4.4 zeigen die Verhältnisse jeweils in einem XZ-Profil. Tatsächlich variieren Neigung und Krümmung allerdings in Abhängigkeit der horizontalen Richtung. Unter Verwendung des Horizontalwinkels  $\phi$  ( $\rho = 0 \dots$  Osten, mathematisch positiver Drehsinn) lässt sich die Neigung für eine beliebige Richtung aus den Neigungen  $n_x$  und  $n_y$  in den beiden Koordinatenrichtungen folgendermaßen berechnen:

$$n_\rho = \tan \alpha(\rho) = n_x \cos \rho + n_y \sin \rho \quad (4.6)$$

Die Neigungswerte  $n_x$  und  $n_y$  sind dabei aus dem DGM zu bestimmen. Etwas aufwändiger gestaltet sich die Berechnung der richtungsabhängigen Krümmung, da zunächst die minimale und maximale Hauptkrümmung ( $\kappa_{min}, \kappa_{max}$ ) sowie die Richtung der maximalen Hauptkrümmung ( $r_{\kappa_{max}}$ ) bestimmt werden müssen. Dies erfolgt nach den Regeln der Differentialgeometrie aus den Fundamentalgrößen  $E, F, G$  bzw.  $L, M, N$ . Für Details sei hier auf die Literatur verwiesen (z.B. [Kerschner, 2003]). Die Krümmungsverhältnisse in einem beliebigen Geländepunkt sind durch die beiden Hauptkrümmungen vollständig bestimmt. Aus ihrem Betrag und Vorzeichen kann die lokale Flächenform gemäß Tabelle ... abgelesen werden.

**Tabelle 4.1:** Lokale Flächenform

$\kappa_{min}$	$\kappa_{max}$	Flächenform	Krümmung
$< 0$	$< 0$	ellipsoidisch	konvex
$> 0$	$> 0$	ellipsoidisch	konkav
$< 0$	$> 0$	hyperbolisch	
$> 0$	$< 0$	hyperbolisch	
$= 0$	$> 0$	zylindrisch	konvex
$= 0$	$< 0$	zylindrisch	konkav

Die richtungsabhängige Krümmung ergibt sich aus der Euler'schen Formel:

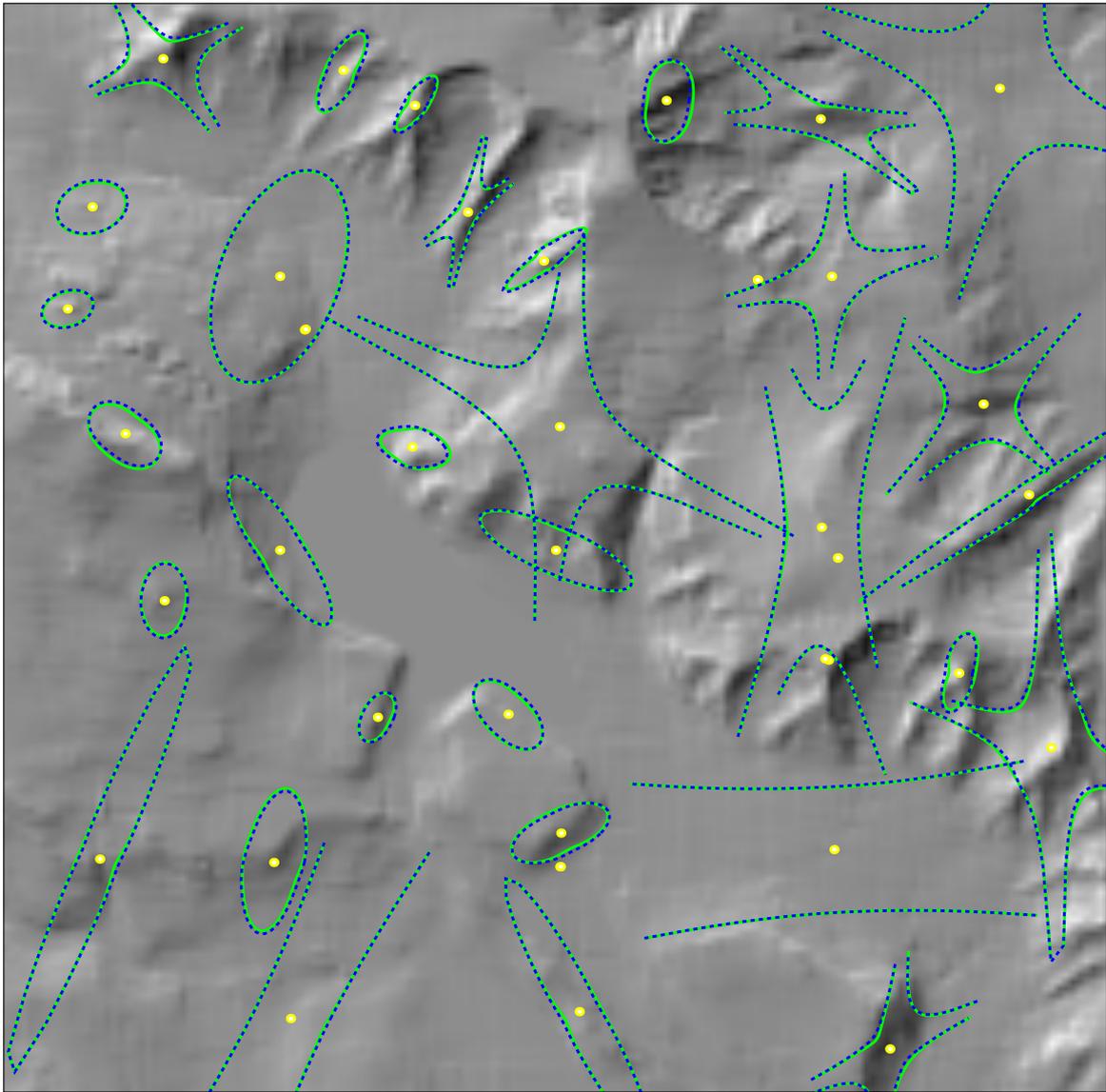
$$\kappa(\rho) = \kappa_{max} \cos^2 \Delta r + \kappa_{min} \sin^2 \Delta r, \quad (4.7)$$

wobei  $\Delta r = \rho - r_{\kappa_{max}}$ . Die maximale Extrapolationsweite ist also eine Funktion der konstanten maximalen Höhentoleranz  $\Delta z_{max}$  und der variablen Neigung  $\alpha$  bzw. Krümmung  $R = \frac{1}{\kappa}$ .

$$E = E(\Delta z_{max}, \rho, \alpha, R) = E(\Delta z_{max}, \alpha(\rho), R(\rho)) \quad (4.8)$$

### Analyse und Diskussion der E-Kurven

In Abb. 4.5 sind für ausgewählte Geländepunkte eines DGM die zugehörigen E-Kurven dargestellt. Dabei sind die blauen Linien nach Formel 4.3 und die grünen nach der erweiterten Formel 4.4 berechnet. Grundsätzlich ähneln diese Kurven Kegelschnitten, und zwar Ellipsen oder Hyperbeln je nach Betrag und Vorzeichen der beiden Hauptkrümmungen (siehe Tab. 4.1). Die Krümmung stellt also den dominierenden Anteil bei der maximalen Extrapolationsweite dar, überlagert vom Einfluss der Geländeneigung. Eine weitere Modulation erfahren die E-Kurven durch die Berücksichtigung des Sehnen-Tangenten-Winkels  $\gamma$ . Dieser führt entweder zu einer lokalen Stauchung der Kurve oder zu einem asymmetrischen Shift in Relation zum betrachteten Geländepunkt. Der Einfluss von  $\gamma$  ist im flachen Gelände sehr gering. Der Cosinus-Term in Gleichung 4.4 ist hier nahe bei Eins und die Änderung der Cosinus-Funktion ist in diesem Bereich gering. Eine größere Auswirkung ist hingegen in steileren Gebieten zu beobachten, was aus den Detail-Abbildungen 4.6 ersichtlich ist.



**Abbildung 4.5:** Maximale Extrapolationsweite ausgewählter Geländepunkte, grüne durchgezogene Linien=mit Berücksichtigung von  $\gamma$ , blaue gestrichelte Linien=ohne Berücksichtigung von  $\gamma$

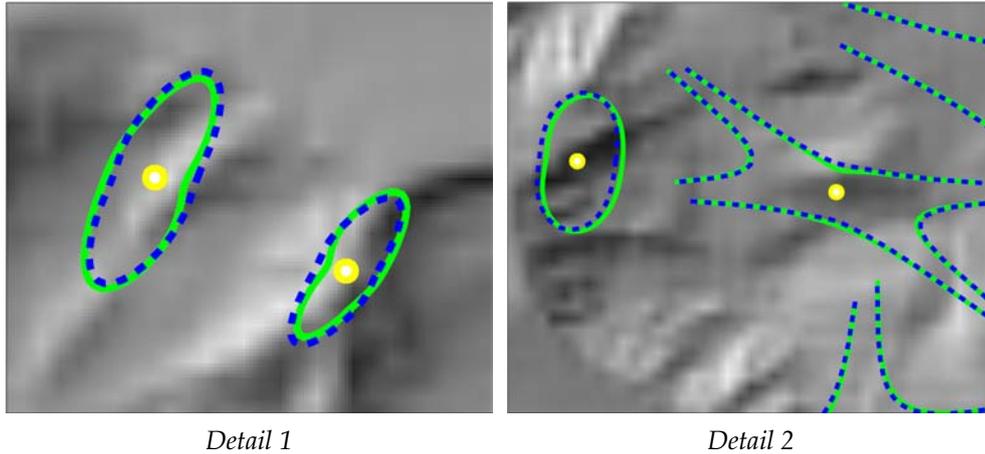
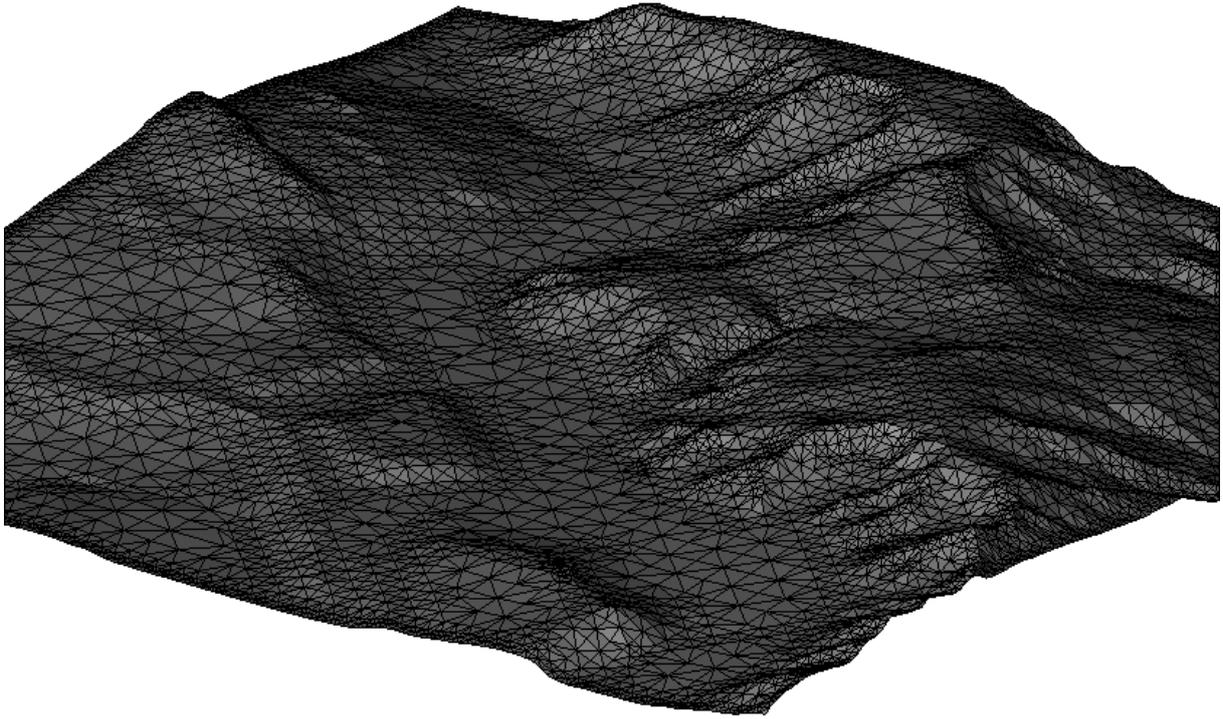


Abbildung 4.6: Maximale Extrapolationsweite, Detailansichten

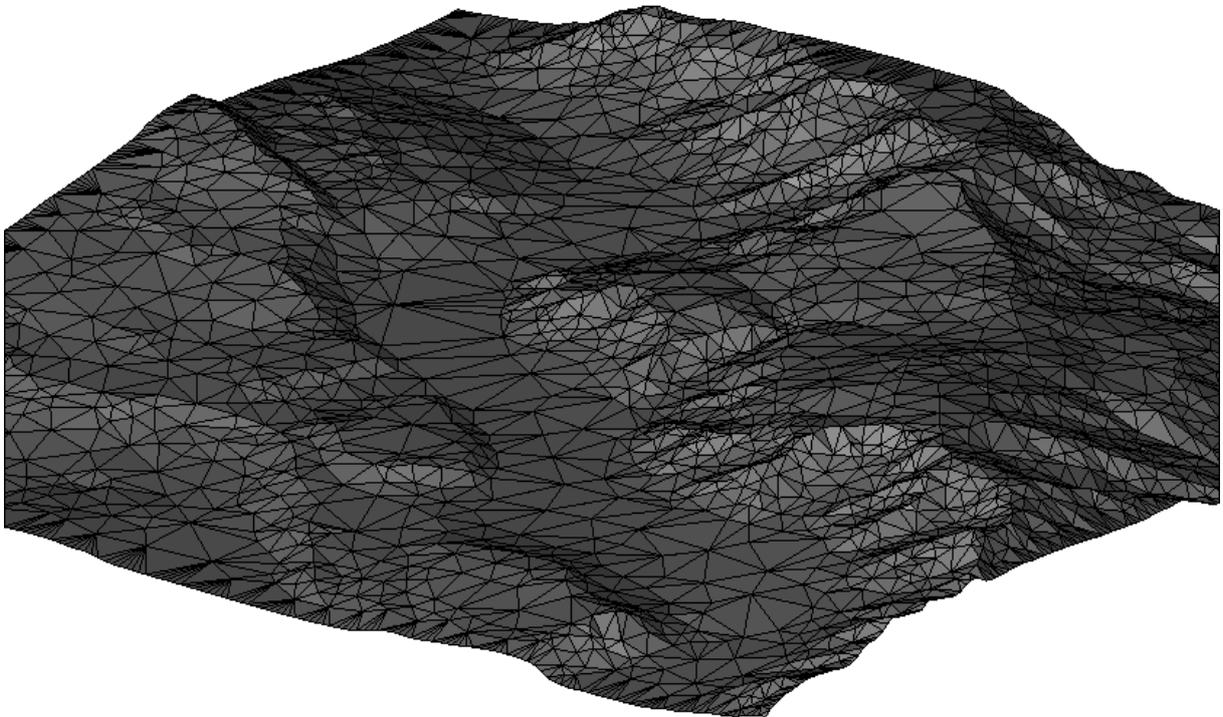
### Implementierung des Reduktionskriteriums

Der ursprünglich von [Briese u. Kraus, 2003] vorgeschlagene Anwendungsfall für die krümmungs- und neigungsbasierte DGM-Datenreduktion war im Zusammenhang mit der hierarchischen Unterteilung (Quad-Tree-Struktur). Der Vorteil liegt in diesem Fall vor allem in einer ausschließlich raster-basierten Prozessierung, was - eine entsprechend effiziente Krümmungsberechnung vorausgesetzt - Datenreduktion mit hoher Performance ermöglicht. Für die einzelnen Gitterpunkte muss lediglich überprüft werden, ob ihre maximale Extrapolationsweite größer als die Ausdehnung des betrachteten Reduktionsniveaus ist. Die Nachbarschaft zu bereits vorliegenden Punkten der approximierten Fläche wird dabei nicht benötigt und auch nicht genutzt. Für die Auswertung der Formel 4.4 zieht man zweckmäßigerweise den minimalen Krümmungsradius ( $R_{min} = \frac{1.0}{\kappa_{max}}$ ) und die maximale Geländeneigung ( $\alpha_{max} = \sqrt{n_x^2 + n_y^2}$ ) und den daraus resultierenden Winkel  $\gamma$  heran. Auf dieser Basis wurde das Beispiel der Abb. 4.4.1 berechnet.

Diese Vorgangsweise ist allerdings ausschließlich für die hierarchische Unterteilung geeignet und lässt sich nicht auf die unregelmäßige Unterteilung anwenden. Dazu muss eine Ordnung der Fehlerbeträge und damit ein Bezug zwischen den  $E$ -Wert eines Gitterpunkts und dem jeweils nächstliegenden Stützpunkt der approximierten Fläche hergestellt werden. Um den im Abschnitt 4.3 beschriebenen refinement-Ansatz zu realisieren, müssen die Punkte der approximierten Fläche inkrementell in eine baumartige Datenstruktur eingefügt werden, um die erforderliche Nächster-Nachbar-Suche effizient lösen zu können. Für die Gitterpunkte empfiehlt sich der Aufbau eines Quad- oder KD-Trees, während für die Linien bevorzugt ein R-Tree herangezogen wird. Bei Reduktion einer  $\Delta_0$ -Kachel wird für jeden Gitterpunkt, der noch nicht Teil der approximierten Fläche ist, die Distanz  $d$  und Richtung  $\rho$  zu seinem nächsten bereits eingeführten Nachbarn (Gitterpunkt oder Strukturlinie) ermittelt. Für die resultierende Richtung  $\rho$  wird gemäß den Formeln 4.5, 4.4, 4.6 sowie 4.7 das maximale  $E$  berechnet. Der Quotient  $\frac{d}{E}$  stellt schließlich ein normiertes Fehlermaß dar. Der Punkt mit dem maximalen Quotienten wird dann in die approximierte Fläche eingefügt und die restlichen Gitterpunkte erneut evaluiert, bis der maximale Quotient kleiner als 1 ist. Abb. 4.4.1 zeigt ein derart berechnetes Beispiel.



*Abbildung 4.7: DGM-Datenreduktion mittels max-E-Formel, hierarchische Unterteilung, Datensatz: Albis (CH); Datenquelle: swisstopo*



*Abbildung 4.8: DGM-Datenreduktion mittels max-E-Formel, unregelmäßige Unterteilung, Datensatz: Albis (CH)*

#### 4.4.2 Datenreduktion durch adaptive TIN-Verdichtung

Der im vorigen Abschnitt vorgestellte Ansatz zur Datenreduktion über die Analyse von Krümmung und Neigung liefert prinzipiell lediglich eine reduzierte Punktmenge. In vielen Fällen ist man für Folgeapplikationen aber an einer Flächenapproximation in Form eines TIN interessiert. Dies gilt insbesondere auch für Anwendungen im Bereich der Hydraulik, wo die häufig eingesetzten Rechenmodelle der Finiten Elemente oder Finiten Volumina auf einer Diskretisierung des Untersuchungsgebietes in ebene Teilflächen aufbauen. Setzt die Anforderung an das Endergebnis aber den Einsatz von TIN-Technologie voraus, so kann diese im Sinne des *mesh refinement* auch für den Prozess der DGM-Datenreduktion eingesetzt werden. Mit *mesh refinement* oder adaptiver TIN-Verdichtung haben sich viele Autoren aus unterschiedlichen Fachgebieten beschäftigt. Der Fokus dieser Arbeit liegt daher auf der Einbettung der adaptiven TIN-Verdichtung in den im Abschnitt 4.3 beschriebenen Gesamtrahmen zur Reduktion hybrider DGM-Daten.

Grundsätzlich entsteht die approximierte Fläche bei der adaptiven TIN-Verdichtung durch den Aufbau einer initialen, groben Triangulierung und dem anschließenden Einfügen von zusätzlichen Punkten in das Dreiecksnetz, bis die geforderte Toleranz eingehalten ist. Für die erste Näherung werden gemäß Abschnitt 4.3 alle Punkte des  $\Delta_0$ -Niveaus herangezogen. Darüber hinaus werden dann alle Strukturlinien, die Teil der hybriden DGM-Struktur sind, als Zwangskanten (constraints) in die Triangulierung eingefügt. Schließlich wird das initiale Dreiecksnetz noch durch alle im DGM gespeicherten markanten Höhenpunkte vervollständigt. Vor allem die Einbeziehung der Strukturinformation aus dem hybriden DGM ermöglicht bereits für das initiale Dreiecksnetz eine Approximation mit ansprechender Genauigkeit und Detaillierung. Die weitere Aufgabe besteht jetzt lediglich darin, das TIN dort zu verfeinern, wo lokale Abweichungen zum originalen DGM bestehen.

#### Reduktionskriterium Z-Differenz

Im Gegensatz zur Datenreduktion über die *E*-Formel, bei der die einzuhaltende maximale *Z*-Toleranz nur mittelbar zum Tragen kommt, kann das  $\Delta z_{max}$  bei der adaptiven TIN-Verdichtung in Form der *Z*-Differenz vom TIN zum originalen DGM angewendet werden. Das Reduktionskriterium lautet demnach:

$$|z_{TIN} - z_{DGM}| < \Delta z_{max} \quad (4.9)$$

Die DGM-Gitterpunkte, welche nicht Teil der approximierten Fläche (TIN) sind und im folgenden als *inaktiv* bezeichnet werden, sind also dahingehend zu überprüfen, ob ihr *Z*-Abstand zur momentanen TIN-Fläche kleiner als die maximal zulässige Höhenabweichung ist. Ein massiver Vorteil gegenüber der Datenreduktion über die *E*-Formel besteht vor allem darin, dass die Einhaltung der Höhentoleranz ( $L_\infty$ -Norm) durch das Reduktionskriterium sichergestellt ist, wogegen dies bei der *E*-Formel nur abgeschätzt wird.

Zur Bestimmung der Höhe aus dem TIN muss zunächst durch Traversieren der Triangulierung dasjenige Dreieck ( $P_1, P_2, P_3$ ) gefunden werden, in welchem der zu überprüfende Punkt *P* liegt. Die Berechnung der Höhe aus dem betroffenen Dreieck erfolgt dann durch die folgende Gleichung:

$$z = z_1 + \frac{\Delta x \Delta y_{13} \Delta z_{12} + \Delta y \Delta x_{12} \Delta z_{13} - \Delta x \Delta y_{12} \Delta z_{13} - \Delta y \Delta x_{13} \Delta z_{12}}{\Delta x_{12} \Delta y_{13} - \Delta x_{13} \Delta y_{12}} \quad (4.10)$$

$$\begin{array}{ll} \Delta x / \Delta y / \Delta z & \dots \text{ Koordinatendifferenzen } \overline{PP_1} \\ \Delta x_{ik} / \Delta y_{ik} / \Delta z_{ik} & \dots \text{ Koordinatendifferenzen } \overline{P_i P_k}, i, k \dots 1 - 3 \end{array}$$

## Implementierung des Reduktionskriteriums

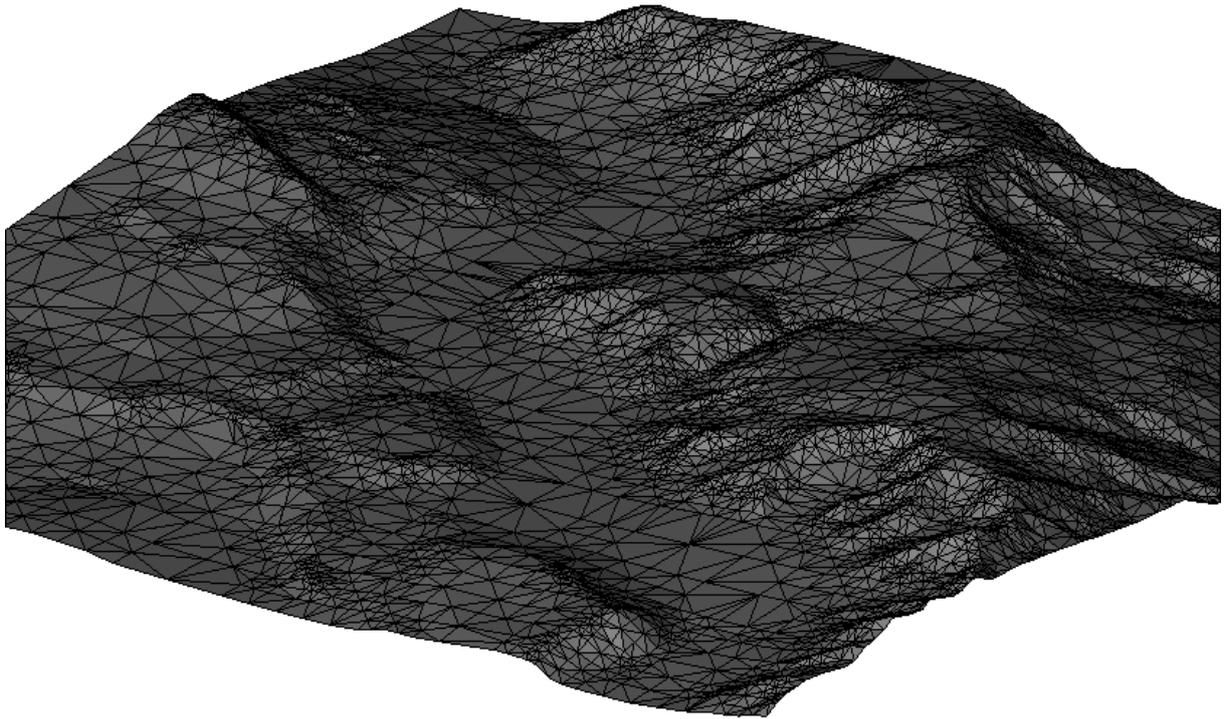
Der Einsatz dieses Z-Differenz-Kriteriums ist für die hierarchische Unterteilung ebenso möglich wie für die unregelmäßige. Bei der hierarchischen Unterteilung erfolgt die Aufteilung einer Kachel in vier Unter-Quadranten, sobald ein Gitterpunkt die maximal zulässige Z-Differenz überschreitet. Bei der unregelmäßigen Unterteilung hingegen müssen in jedem Fall alle nicht aktiven Gitterpunkte überprüft und deren Z-Abweichungen vom originalen DGM berechnet werden. Der Punkt mit der betragsmäßig größten Abweichung wird dann in die Dreiecksfläche eingefügt, sofern die Abweichung größer als  $\Delta z_{max}$  ist (sequential greedy insertion). Der restliche Ablauf des Re-Evaluierens und ggf. erneuten Einfügens zusätzlicher Punkte erfolgt wie im Abschnitt 4.3.2 beschrieben. Der Algorithmus kann noch beschleunigt werden, wenn pro Durchlauf gleichzeitig die Punkte mit der maximalen positiven und negativen Abweichung ins TIN eingefügt werden (parallel greedy insertion), vorausgesetzt beide Werte liegen über der Toleranzschwelle. Man erreicht dadurch eine Steigerung der Performance um etwa 50 % gegenüber dem sequentiellen Einfügen. Dies geht allerdings auf Kosten einer um etwa 10 % höheren Punktanzahl.

In den Abbildungen 4.4.2 und 4.4.2 ist jeweils ein Beispiel der Datenreduktion mittels adaptiver TIN-Verdichtung auf Basis von hierarchischer und unregelmäßiger Unterteilung dargestellt. Eine detaillierte Diskussion und Gegenüberstellung der Ergebnisse erfolgt im Abschnitt 4.5.

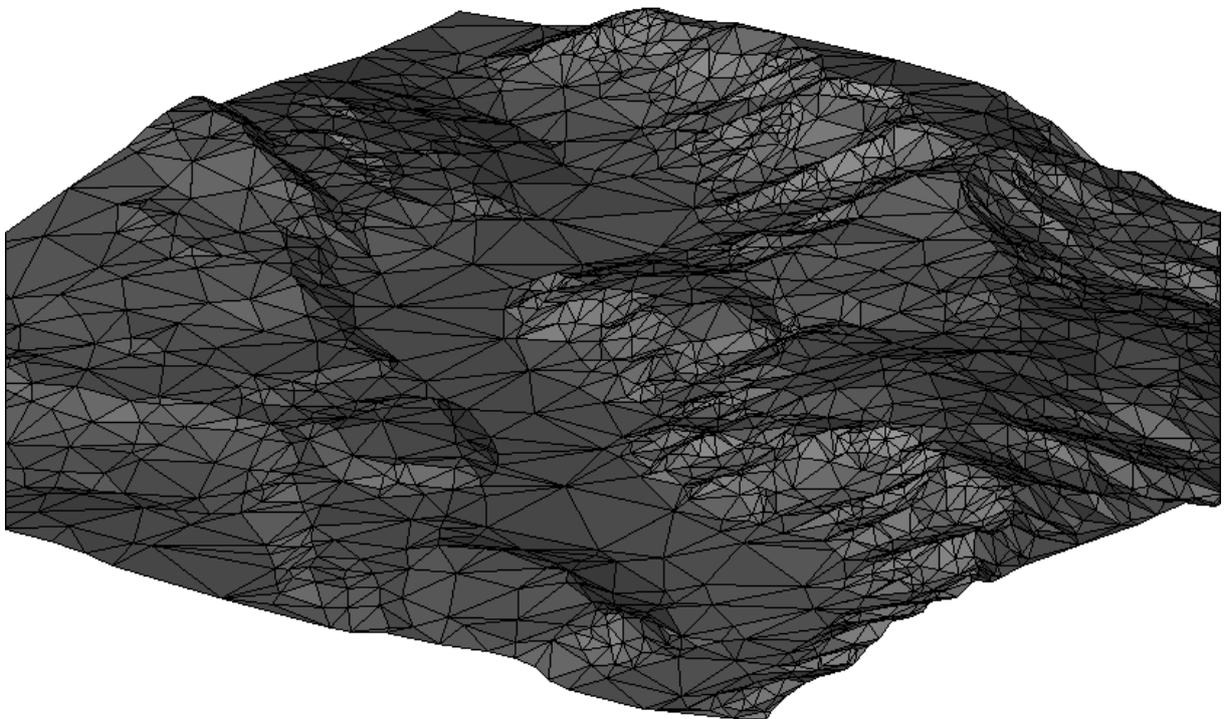
## 4.5 Diskussion und Vergleich der Reduktionsansätze

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der DGM-Datenreduktion für unterschiedliche Datensätze präsentiert und kritisch miteinander verglichen. Die folgenden Beispiele sind jeweils in Gruppen von fünf Abbildungen und eine Tabelle gegliedert. Die Abbildungen zeigen jeweils eine Schummerung des originalen Geländes sowie die vier unterschiedlichen Reduktionsvarianten. Die Tabelle enthält für jede Variante folgende charakteristischen Kenngrößen und Eigenschaften:

- Effizienz=Kompressionsrate (Reduzierte/Originale Punktanzahl)
- Performance=Geschwindigkeit (relativ zur adaptiven TIN-Verdichtung mit unregelmäßiger Unterteilung)
- Einhaltung der maximalen Höhentoleranz ( $L_\infty$ )
- Einhaltung der quadratischen Fehlernorm ( $L_2$ )



*Abbildung 4.9: DGM-Datenreduktion mittels adaptiver Dreiecksnetzverdichtung, hierarchische Unterteilung, Datensatz: Albis (CH)*



*Abbildung 4.10: DGM-Datenreduktion mittels adaptiver Dreiecksnetzverdichtung, unregelmäßige Unterteilung, Datensatz: Albis (CH)*

Zur Bezeichnung der einzelnen Varianten werden dabei die folgenden Abkürzungen benutzt:

- E1: Krümmungs/Neigungs-basierter Ansatz mit hierarchischer Unterteilung
- E2: Krümmungs/Neigungs-basierter Ansatz mit unregelmäßiger Unterteilung
- T1: Adaptive TIN-Verdichtung mit hierarchischer Unterteilung
- T2: Adaptive TIN-Verdichtung mit unregelmäßiger Unterteilung

Am Beginn steht ein synthetisches Beispiel (Kugelkalotte) anhand dessen man die prinzipiellen Unterschiede der einzelnen Varianten gut erkennen kann. Im Anschluss daran sind für die gängigen Methoden der DGM-Datenerfassung (InSAR, Photogrammetrie und Laserscanning) jeweils ein Beispiel angeführt.

#### **4.5.1 Krümmungs/Neigungs-basierter Ansatz mit hierarchischer Unterteilung (E1)**

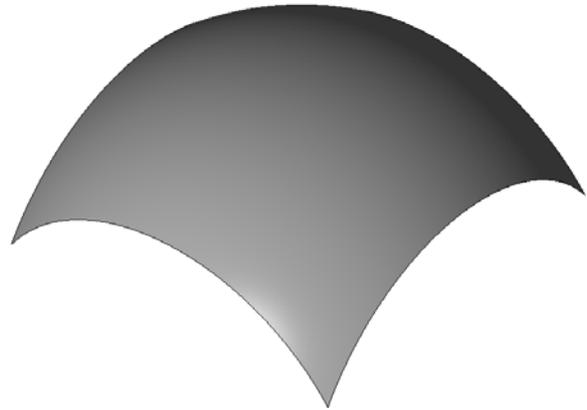
Diese Variante schneidet, was die Effizienz der Kompression betrifft, am schlechtesten ab. Man erreicht aber immer noch eine beachtliche Reduktion der Datenmenge auf etwa ein Fünftel, und das rein auf raster-basierter Abarbeitung. Voraussetzung ist allerdings eine korrekte Abschätzung der Geländekrümmung, bei der auch die Geländekanten berücksichtigt werden. Die Punktverteilung ist adaptiv, d.h. an die Geländeform angepasst. Die intuitive Vorstellung, dass bewegtes Gelände durch größere Werte der Geländekrümmung und -neigung gekennzeichnet ist, welche wiederum zu kleineren  $E$ -Werten und folglich mehr Punkten in der approximierten Fläche führen, findet sich durch die Abb. 4.15 bestätigt. Flache Bereiche sind durch entsprechend weniger Punkte repräsentiert, wobei auch in vollkommen horizontalen Gebieten (Seeoberfläche) ein gewisser maximaler planimetrischer Punktabstand nicht überschritten wird. Die ursprüngliche regelmäßige Gitterstruktur, welche dem hybriden DGM zugrunde liegt, ist bei dieser Variante der Datenreduktion noch gut erkennbar.

Die geforderte Einhaltung der maximalen Höhentoleranz ( $L_\infty$ -Norm) wurde überprüft, indem aus dem resultierenden Punktset ein TIN aufgebaut und dieses gegenüber dem Original-DGM verglichen wurde. Es stellt sich heraus, dass die geforderte  $Z$ -Toleranz nicht eingehalten wird, wohl aber bleibt die mittlere quadratische Abweichung deutlich unter  $\Delta z_{max}$ . Die Performance dieser Variante ist vor allem von der Geschwindigkeit der Krümmungsberechnung abhängig. Auf eine entsprechend effiziente Ableitung der Krümmung aus dem DGM ist daher großer Wert zu legen.

#### **4.5.2 Krümmungs/Neigungs-basierter Ansatz mit unregelmäßiger Unterteilung (E2)**

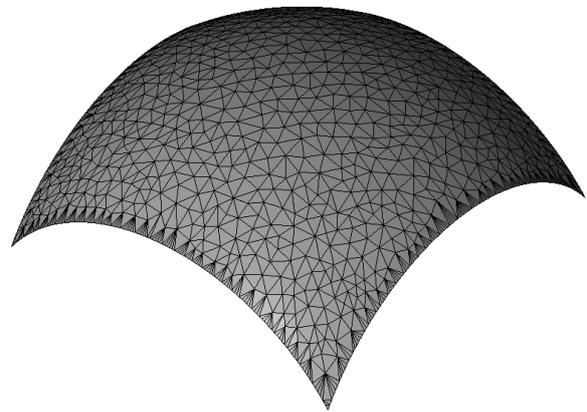
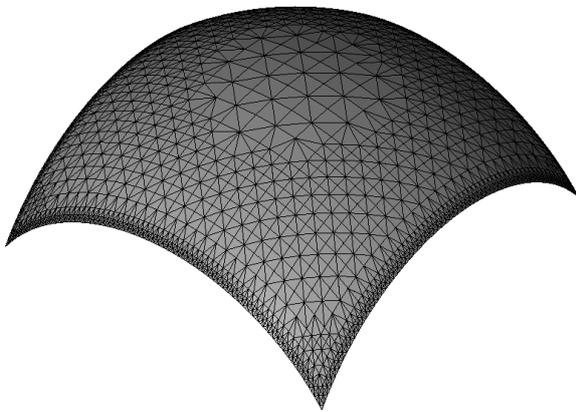
Die regelmäßige Punktverteilung ist bei dieser Variante zugunsten einer höheren Effizienz der Datenkompression aufgegeben. Die Anordnung der Punkte erscheint zufällig, obwohl einerseits auch in diesem Fall ein regelmäßiges Grundgitter aus den  $\Delta_0$ -Punkten vorhanden ist und andererseits lediglich Gitterpunkte des originalen DGM zur Approximation verwendet werden. Hervorstechend bei dieser Variante ist, dass der Algorithmus automatisch die Punkte entlang der Grate und Täler sowie entlang von abrupten Neigungsänderungen findet, auch

	K-Rate	Speed	$L_\infty$	$L_2$
E1	15 %	2.4	nein	ja
E2	7 %	4.0	nein	ja
T1	9 %	0.4	ja	ja
T2	6 %	1.0	ja	ja



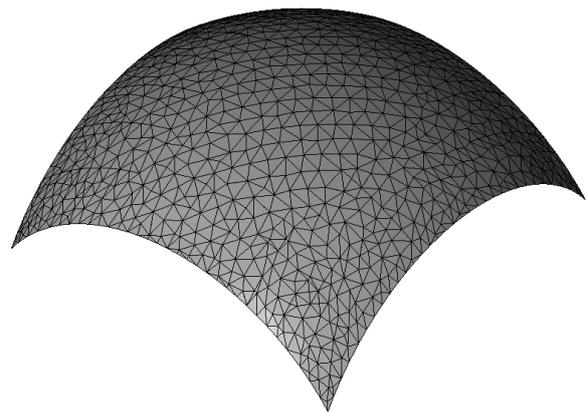
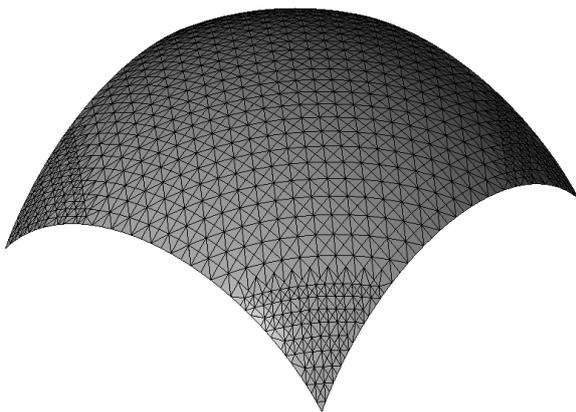
*Variantenvergleich*

*Original DGM*



*E-Formel, hierarch. Unterteilung*

*E-Formel, unregelm. Unterteilung*

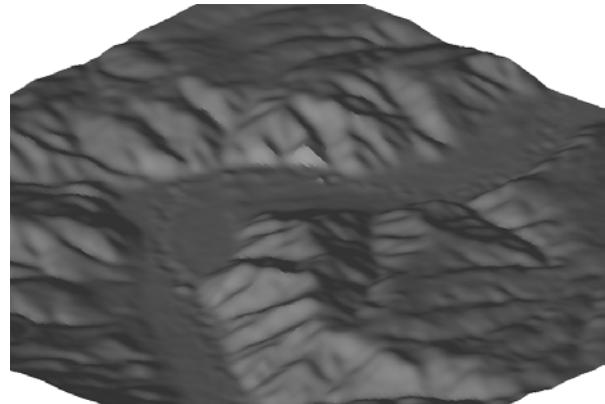


*Adaptive TIN, hierarch. Unterteilung*

*Adaptive TIN, unregelm. Unterteilung*

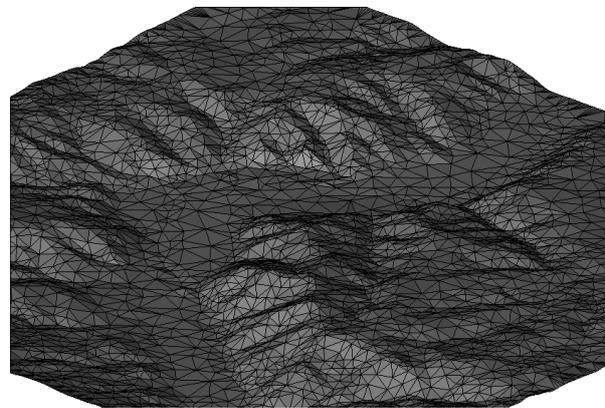
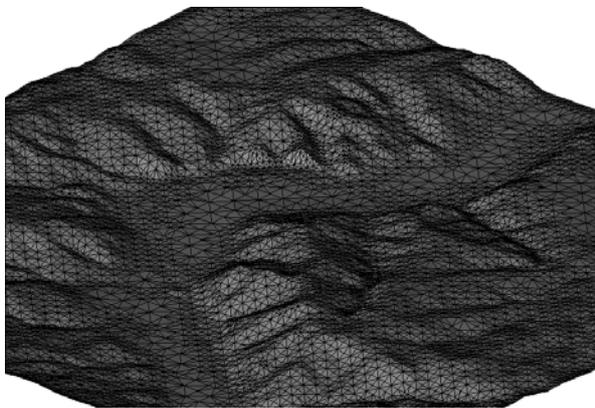
**Abbildung 4.11:** Synthetisches Beispiel: Kugelkalotte (Radius=100m), DGM-Gitterweite: 1m, Maximale Höhentoleranz: 0.1m

	K-Rate	Speed	$L_\infty$	$L_2$
E1	30 %	2.5	nein	ja
E2	12 %	4.8	nein	ja
T1	23 %	0.7	ja	ja
T2	8 %	1.0	ja	ja



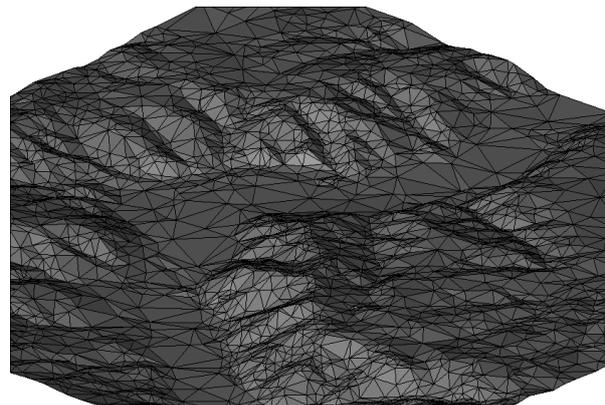
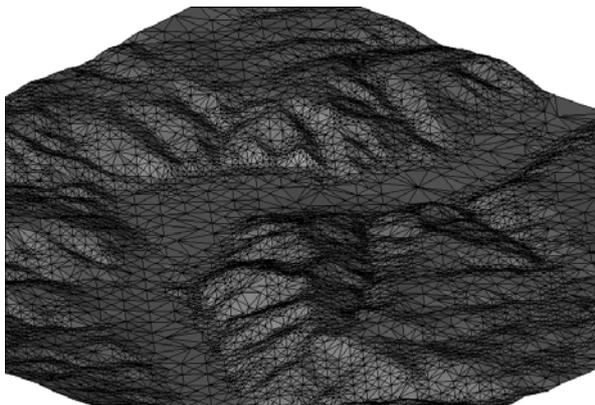
*Variantenvergleich*

*Original DGM*



*E-Formel, hierarch. Unterteilung*

*E-Formel, unregelm. Unterteilung*

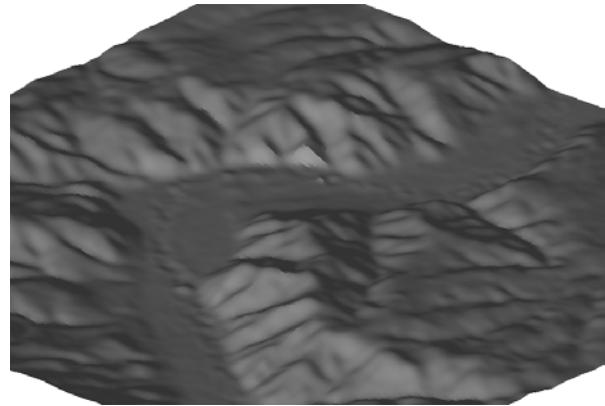


*Adaptive TIN, hierarch. Unterteilung*

*Adaptive TIN, unregelm. Unterteilung*

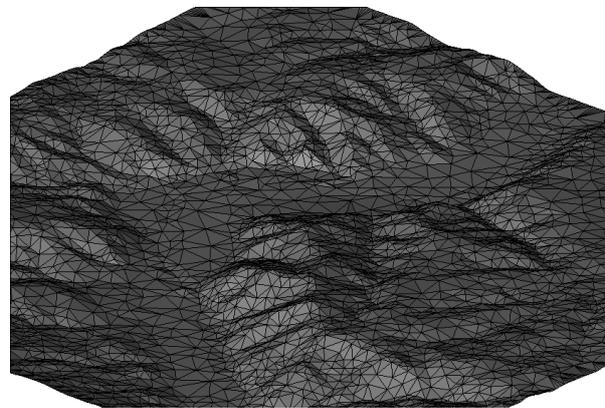
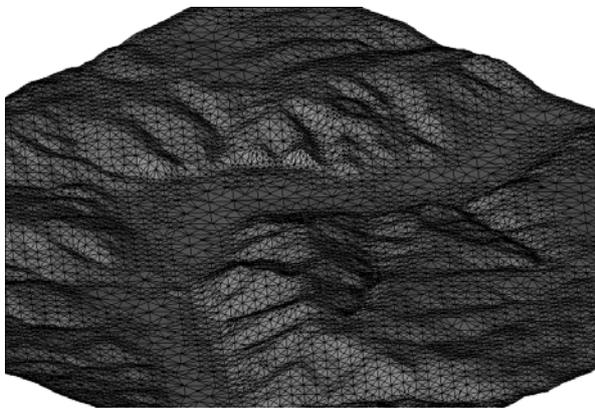
**Abbildung 4.12:** Datensatz: Wachau (NÖ) bei Rossatz, Datenerfassung: InSAR, DGM-Gitterweite: 50m, Maximale Höhentoleranz: 10m; Datenquelle: SRTM

	K-Rate	Speed	$L_\infty$	$L_2$
E1	20 %	2.7	nein	ja
E2	7 %	4.3	nein	ja
T1	15 %	0.5	ja	ja
T2	5 %	1.0	ja	ja



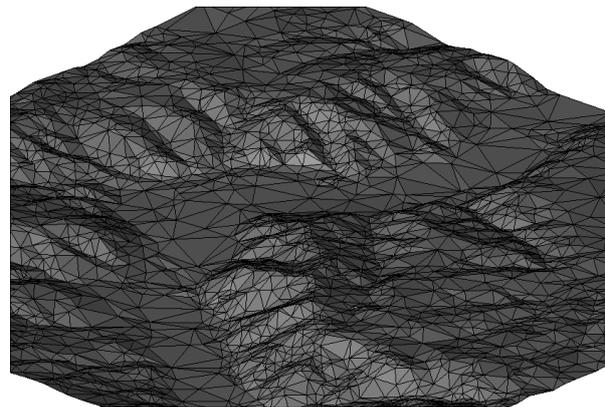
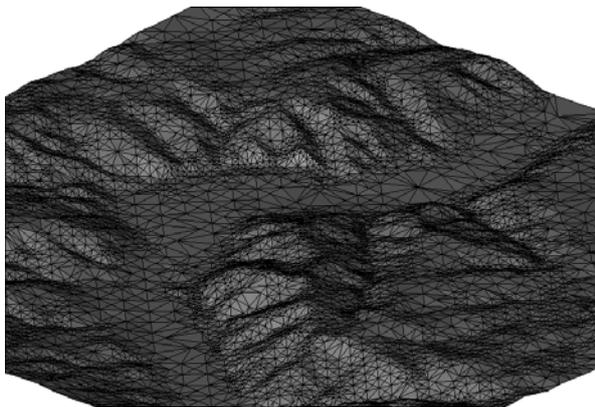
*Variantenvergleich*

*Original DGM*



*E-Formel, hierarch. Unterteilung*

*E-Formel, unregelm. Unterteilung*

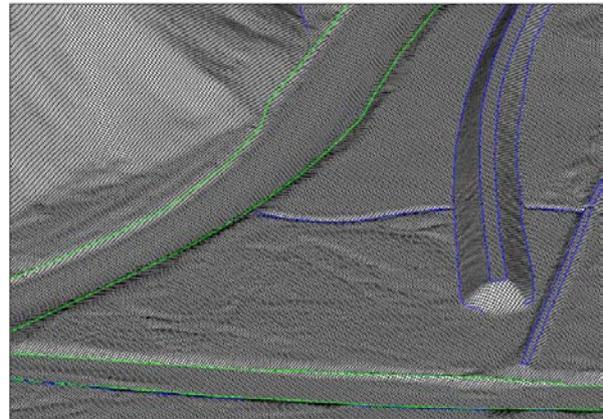


*Adaptive TIN, hierarch. Unterteilung*

*Adaptive TIN, unregelm. Unterteilung*

**Abbildung 4.13:** Datensatz: BEV-DGM, Datenerfassung: Photogrammetrie, DGM-Gitterweite: 10m, Maximale Höhentoleranz: 2m; Datenquelle: Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen, Wien

	K-Rate	Speed	$L_\infty$	$L_2$
E1	25 %	2.8	nein	ja
E2	9 %	4.9	nein	ja
T1	17 %	0.5	ja	ja
T2	6 %	1.0	ja	ja

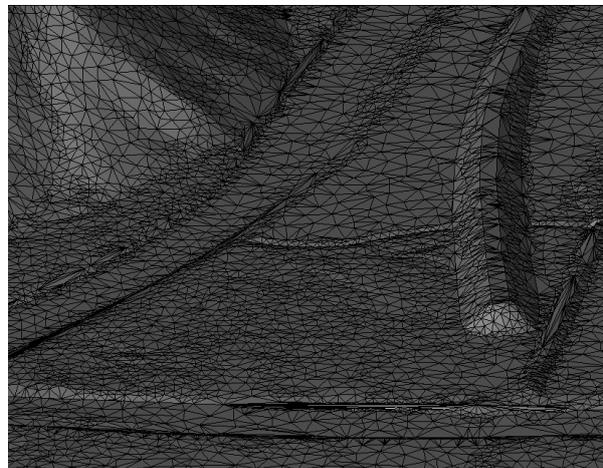


*Variantenvergleich*

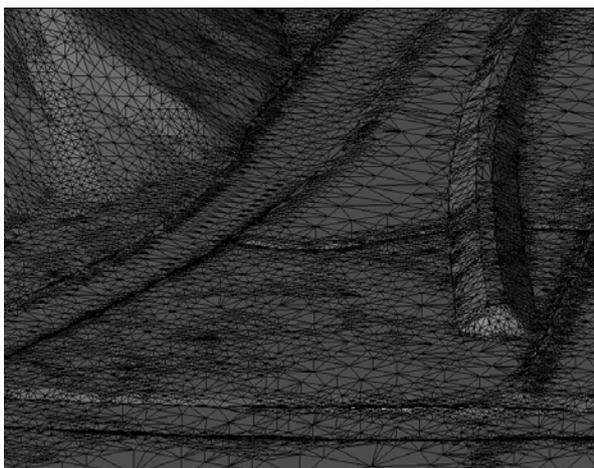
*Original DGM*



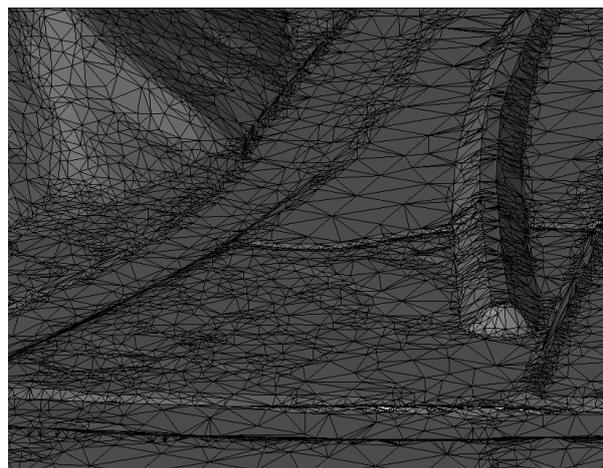
*E-Formel, hierarch. Unterteilung*



*E-Formel, unregelm. Unterteilung*

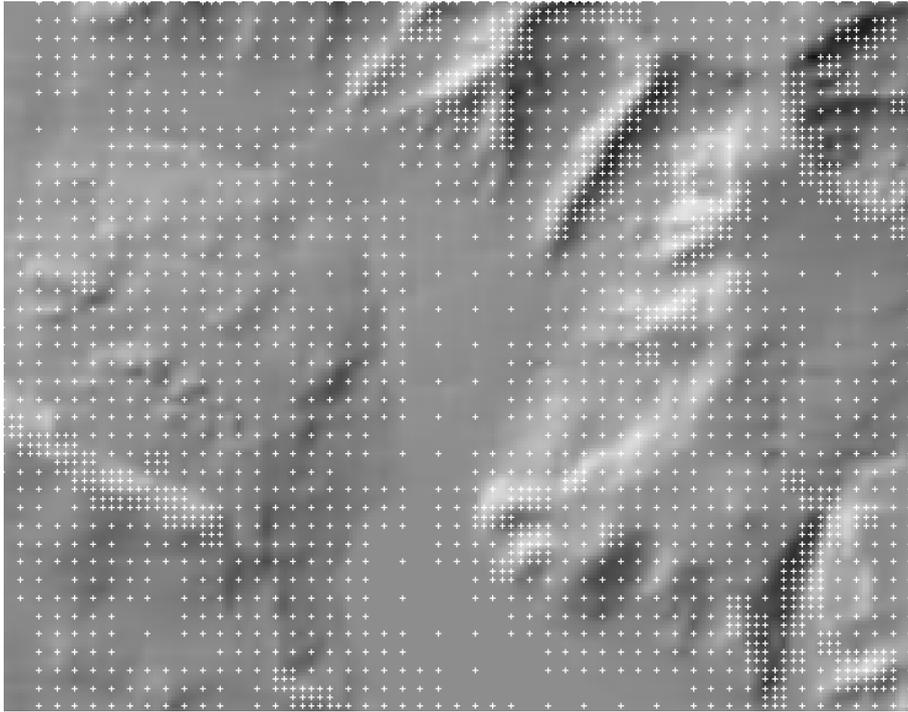


*Adaptive TIN, hierarch. Unterteilung*

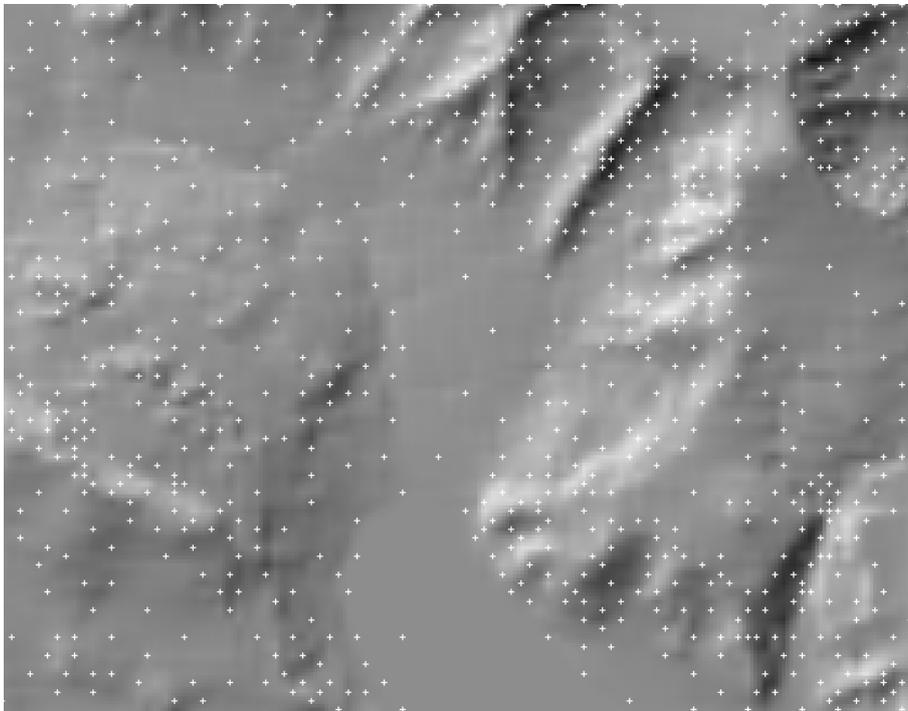


*Adaptive TIN, unregelm. Unterteilung*

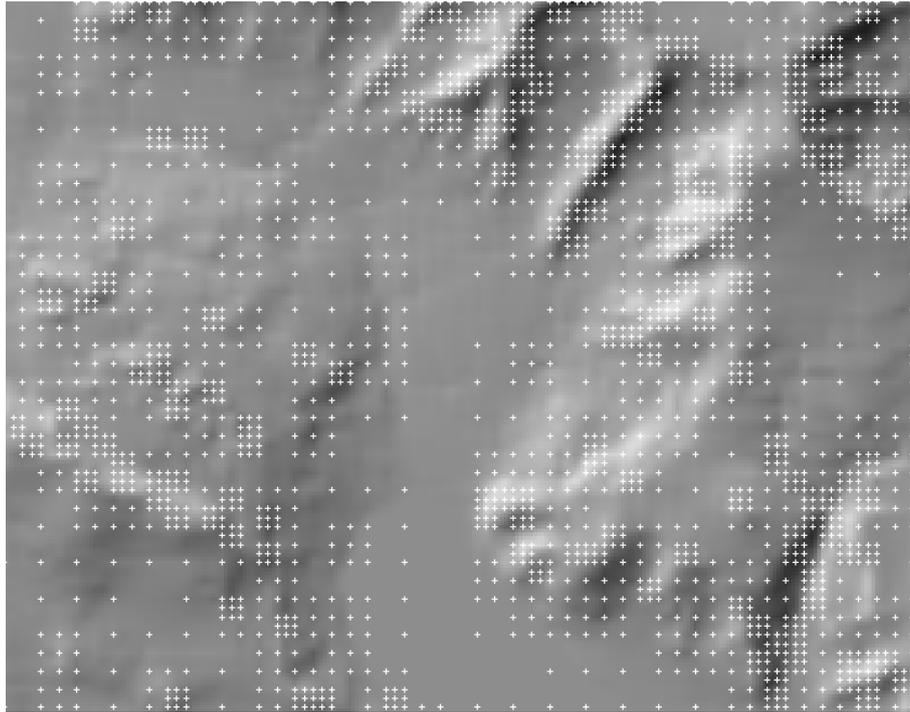
**Abbildung 4.14:** Datensatz: Drau (Kärnten), Möllbrücke, Datenerfassung: ALS, DGM-Gitterweite: 1m, Maximale Höhentoleranz: 0.2m; Datenquelle: Fa. GeoConsult, Wien



*Abbildung 4.15: Datenverteilung, E-Formel mit hierarchischer Unterteilung*



*Abbildung 4.16: Datenverteilung, E-Formel mit unregelmäßiger Unterteilung*



*Abbildung 4.17: Datenverteilung, TIN-Verdichtung mit hierarchischer Unterteilung*

wenn diese im Beispiel der Abb. 4.16 nicht explizit modelliert wurden, da es sich um ein reines Gitter-DGM (Matrixmodell des Bundesamtes für Landestopographie, swisstopo) handelt.

Die Abb. 4.16 bestätigt, dass der Algorithmus die Punkte mit den größten Krümmungen und Neigungen und folglich den kleinsten  $E$ -Werten eruiert. Darüber hinaus findet sich auch die Wirksamkeit der Berücksichtigung von Punktnachbarschaften belegt. Benachbarte Punkte weisen zwar ähnliche  $E$ -Werte auf, durch die Einbeziehung von Distanz und Richtung zum nächstliegenden Punkt bei der Berechnung des normierten Abweichungsmaßes können diese Punkte allerdings zu Recht reduziert werden. Der Preis für diese Eigenschaft ist allerdings - wie bereits im Abschnitt 4.4.1 erwähnt - die Notwendigkeit einer aufwändigeren Datenstruktur bei der Prozessierung, um die nächsten Nachbarn effizient bestimmen zu können. Eine rein rasterbasierte Abarbeitung ist daher nicht möglich. Für die Einhaltung der Höhentoleranz gilt dasselbe wie für die Variante E1.

### **4.5.3 Adaptive TIN-Verdichtung mit hierarchischer Unterteilung (T1)**

Was die Strukturierung und Anordnung der Datenpunkte betrifft, gilt bei dieser Variante dasselbe wie für die Variante E1. Der Kompressionsgrad ist allerdings bei der adaptiven TIN Verdichtung beträchtlich höher.

Der Unterschied wird vor allem im westlichen Teil der Abb. 4.15 und 4.17 deutlich. Die dort vorherrschende wellige Topographie führt bei der krümmungsbasierten Variante E1 dazu, dass eine fast durchgehende Verdichtung bis zum Niveau der doppelten Gitterweite erfolgt. Im Gegensatz dazu reicht bei der TIN-basierten Variante T1 oftmals eine Approximation auf Basis der vierfachen Gitterweite aus, da die Amplitude der Geländewellen unterhalb der geforderten

Höhentoleranz bleiben. Hier drückt sich der bereits erwähnte Vorteil des TIN-basierten Ansatzes aus, dass die einzuhaltende Toleranz unmittelbar in Form der Z-Differenz ( $z_{TIN} - z_{DGM}$ ) vorliegt, während beim krümmungsbasierten Ansatz über die Hilfsgröße der maximalen Extrapolationsweite darauf geschlossen wird. Aus diesem Grund ist bei der Variante T1 auch die Einhaltung der geforderten Höhentoleranz sichergestellt.

Es sei an dieser Stelle allerdings nachdrücklich darauf hingewiesen, dass dies nur für die im Zuge der Prozessierung sukzessive aufgebaute Triangulierung gilt. Gibt man für Folgeanwendungen nicht das gesamte TIN samt seiner Topologie, sondern nur deren Stützpunkte und Zwangskanten weiter, so kann es bei einer neuerlichen unabhängigen Dreiecksvermaschung trotz Delaunay-Kriterium sehr wohl dazu kommen, dass die maximale Toleranz überschritten wird. Die Ursache dafür ist die Unentschiedenheit des Delaunay-Kriteriums bei einer Datenanordnung, die an einem regelmäßigen Gitter ausgerichtet ist. Im einfachsten Fall von vier Punkten, die eine Quadratmasche bilden, bleibt es der TIN-Software freigestellt, ob die Diagonale von links unten nach rechts oben gezogen wird oder von rechts unten nach links oben. Für die Approximation einer 2.5D Fläche kann dieser Unterschied aber gravierende Auswirkungen haben. Leider ist im Bereich von TIN-Datenstrukturen das Fehlen von Industrie-Standards zu beklagen, wie das etwa mit DXF (Drawing Interchange Format) für den CAD-Bereich der Fall ist. Bis zu einem gewissen Grad hat sich das STL-Format (Stereo Lithography) zwar etabliert, in den Implementierungen von HN-Modellen hat es allerdings noch keine durchgehende Verbreitung gefunden. Dadurch besteht oftmals keine andere Möglichkeit, als die reduzierte Punktmenge abzugeben. Man sollte sich dann aber stets vor Augen halten, dass die Einhaltung einer gewissen Toleranz auch bei Anwendung der adaptiven TIN-Verdichtung nicht sichergestellt sein kann.

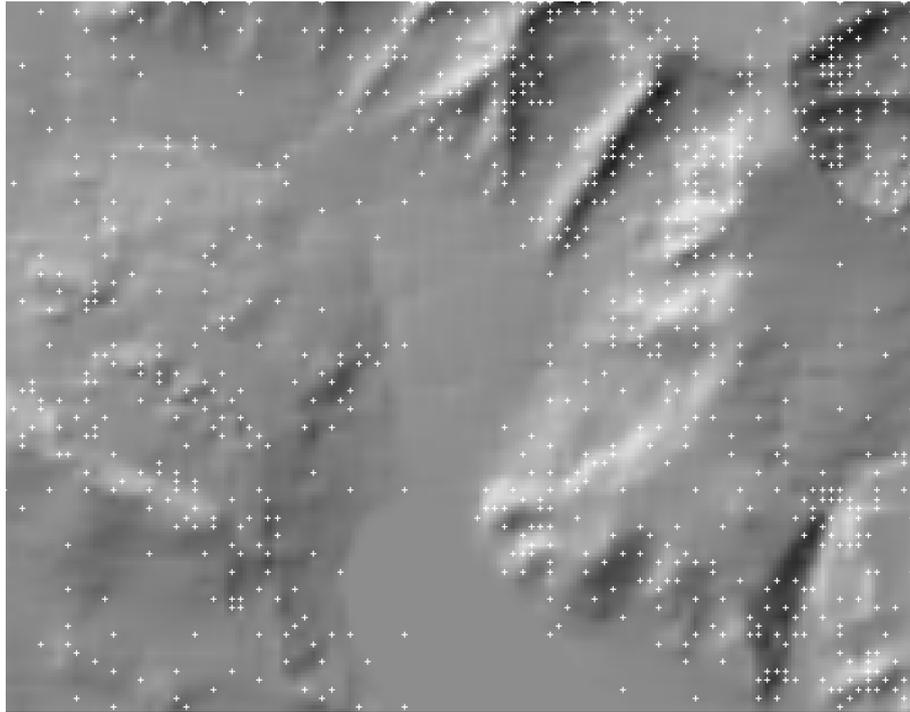
Die Variante T1 ist gegenüber E1 auch was die Performance betrifft überlegen. D.h. der Mehraufwand, der durch den TIN-Aufbau gegeben ist, wird durch den Wegfall der Neigungs- und Krümmungsabschätzung mehr als kompensiert.

#### 4.5.4 Adaptive TIN-Verdichtung mit unregelmäßiger Unterteilung (T2)

Diese Variante lieferte unter allen untersuchten Datensätzen immer die höchste Datenkompression unter gleichzeitiger Einhaltung der maximalen Höhentoleranz. Im Vergleich zur krümmungsbasierten Variante mit unregelmäßiger Unterteilung (E2) liefert der TIN-basierte Ansatz vor allem im flachen und wenig bewegten Gebiet deutlich weniger Punkte. Im Gegensatz dazu werden in steilem Gelände gegenüber der Variante E2 oftmals sogar ein wenig mehr Punkte zur Beschreibung der approximierten Fläche herangezogen.

In der Abb. 4.18 wird dieser Umstand vor allem an den Bergkämmen im nördlichen Bildbereich deutlich. Während bei der Variante E2 die Punkte fast ausschließlich am Fuße des Kamms bzw. am Grat zu liegen kommen, werden beim TIN-basierten Ansatz gelegentlich auch Punkte etwa in der Mitte des Abhangs gesetzt. Die dort vorhandene starke Neigung macht dies erforderlich, während die schwach ausgeprägte Krümmung bei E2 offensichtlich zu einer Überschätzung der maximalen Extrapolationsweite führt. Im Allgemeinen ist festzustellen, dass Variante T2 zu einer unregelmäßigeren Datenverteilung führt, bei der aber in jedem Fall die maximale Höhentoleranz eingehalten ist.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass bei den Varianten mit hierarchischer Unterteilung (E1, T1) eine homogenere Datenverteilung erzielt wird, die zu breiteren Dreiecken



*Abbildung 4.18: Datenverteilung, TIN-Verdichtung mit unregelmäßiger Unterteilung*

führt. Auch ist hier die ursprüngliche regelmäßige Gitterstruktur deutlicher erkennbar. Wird dem gegenüber mehr Wert auf möglichst starke Kompression gelegt, dann sind die Varianten mit unregelmäßiger Unterteilung (E2, T2) vorzuziehen. Besteht die Anforderung der strikten Einhaltung der Höhentoleranz, dann muss auf die adaptive TIN-Verdichtung zurückgegriffen werden. Reicht deren Einhaltung hingegen im Sinne einer mittleren quadratischen Abweichung aus, so sind die Varianten auf Basis der Analyse von Neigung und Krümmung eine echte Alternative. E1 zeichnet sich dabei algorithmisch dadurch aus, dass rein raster-basiert agiert werden kann, während E2 vor allem dadurch besticht, dass die bedeutsamsten Punkte gefunden werden und die Punktverteilung trotzdem relativ gleichmäßig ist. Als optimal kann daher eine Kombination aus E2 mit anschließender Feinkorrektur mittels T2 angesehen werden. Damit wird einerseits eine homogene Datenverteilung erzielt und andererseits die maximale Höhentoleranz strikt eingehalten.

#### **4.5.5 Performancevergleich**

Aus einer Reihe von Untersuchungen mit unterschiedlichen Datensätzen lässt sich etwa folgendes generelles Kompressions-Verhältnis der einzelnen Varianten ableiten:

$$E1 : T1 : E2 : T2 = 3.5 : 3 : 1.5 : 1$$

Dieses Verhältnis ist für alle untersuchten Gebiete, also auch für die unterschiedlichen Erfassungsmethoden und DGM-Auflösungen in etwa gleich. Sofern die maximale Höhentoleranz passend zu der für die Erfassungsmethode repräsentative Genauigkeit gesetzt wird, erhält man dieses einheitliche Bild.

Die absolute Effizienz und Performance der Datenreduktion hingegen hängt stark von der Morphologie des Geländes ab. In der Tabelle 4.2 sind die Ergebnisse für unterschiedliche Geländeformen zusammengestellt, wobei sich die Zahlen auf die Datenreduktion mittels adaptiver TIN-Verdichtung und unregelmäßiger Unterteilung beziehen. Es stellt sich heraus, dass die Punktmenge im Falle von sehr flachem Gelände auf bis zu 1 % der originalen Punktzahl reduziert werden kann. Bei steilerem und bewegterem Gelände erhöht sich das Verhältnis auf bis zu 10 %, was immer noch einer beträchtlichen Reduktion entspricht. Als Richtwert für gemischtes Gelände kann eine erreichbare Reduktion auf etwa 5 % der ursprünglichen Punktzahl genannt werden.

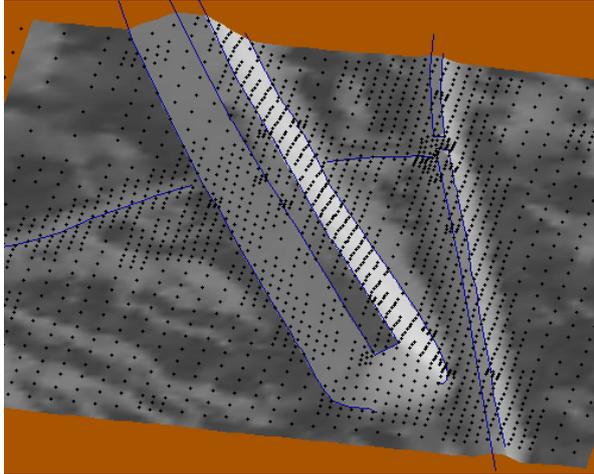
Weiters ist zu beobachten, dass die Berechnungszeit ebenfalls mit der Bewegtheit des Geländes zunimmt. Bei stark bewegtem Gelände muss der Prozess des Evaluierens des Toleranzkriteriums und Einfügens von zusätzlichen Punkten entsprechend öfter ausgeführt werden, was zu der angesprochenen Verlangsamung führt. Vor allem für die Varianten mit unregelmäßiger Unterteilung wirkt sich der maximale planimetrische Punktabstand ( $\Delta xy_{max} = \Delta_0$ ) stark aus. Je größer das  $\Delta_0$ -Niveau, desto öfter müssen die Gitterpunkte der gesamten Kachel evaluiert und zusätzliche Punkte eingefügt werden, bis die geforderte Toleranz eingehalten ist. Abschließend sei noch angemerkt, dass die Performance der Varianten mit hierarchischer Unterteilung zwar ebenfalls von der Geländeform, allerdings aufgrund der rekursiven Prozessierung weniger stark von der Größe des  $\Delta_0$ -Niveaus abhängig ist.

#### 4.5.6 Verhalten entlang von Geländekanten

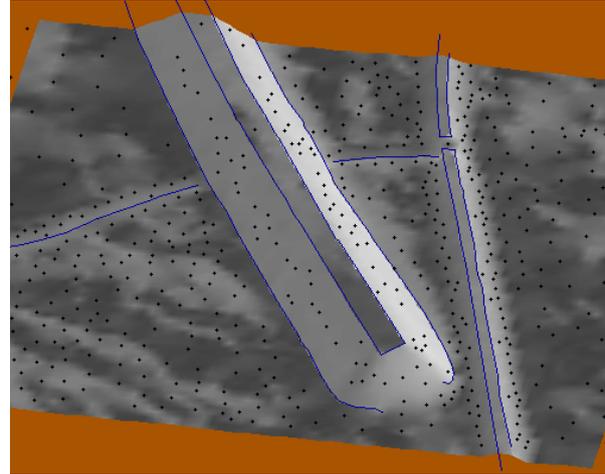
Das grundsätzliche Konzept des vorgestellten Gesamtrahmens zur DGM-Datenreduktion sieht eine rigorose Berücksichtigung der Strukturlinien des hybriden Modells vor. Für den Ansatz über die maximale Extrapolationsweite bedeutet dies eine konsequente Einbeziehung der Geländekanten und Gerippelinien bei der Abschätzung der Gelände­krümmung. Bei der adaptiven TIN-Verdichtung gehen die Strukturlinien bereits bei der initialen Approximation als Zwangskanten in das Dreiecksnetz ein. Für das Endergebnis ist man oftmals daran interessiert, dass im Bereich von Geländekanten möglichst keine oder wenige zusätzliche Stützpunkte auftreten, das Gelände also rein auf Basis der Kanten skizziert wird. Die Abb. 4.19 zeigt ein Detail aus dem Drau-DGM mit einem ausgeprägten Straßendamm (Auffahrt zur Möllbrücke) sowie den Böschungsoberkanten eines Eisenbahndamms und der Grabenlinie eines kleineren Baches (Möll-Zubringer). Darüber hinaus sind für die einzelnen Reduktionsvarianten die reduzierten Punkte eingezeichnet.

*Tabelle 4.2: Effizienz und Performance der Datenreduktion mittels adaptiver TIN-Verdichtung und unregelmäßiger Unterteilung bei unterschiedlichen Geländeformen*

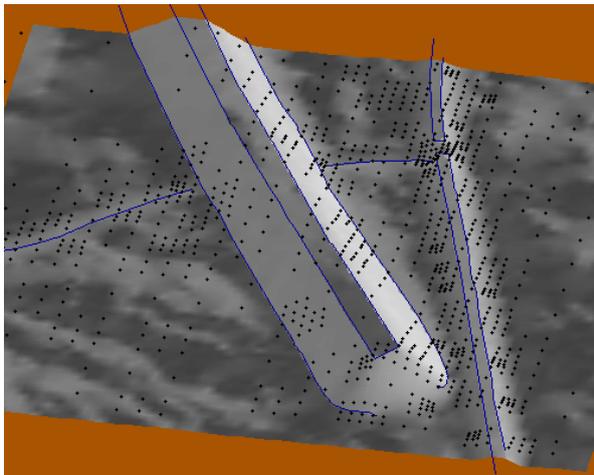
Gelände	Pkt. original	Pkt. reduziert	Kompression	Performance
sehr flach	72.225	705	1.0 %	9.3 sec
flach strukturiert	72.225	1.244	1.7 %	10.1 sec
bewegt	72.225	3.131	4.3 %	12.4 sec
steil	72.225	6.461	8.9 %	18.8 sec
sehr steil	67.137	7.693	11.5 %	20.3 sec
gemischt	72.225	3.828	5.3 %	14.1 sec



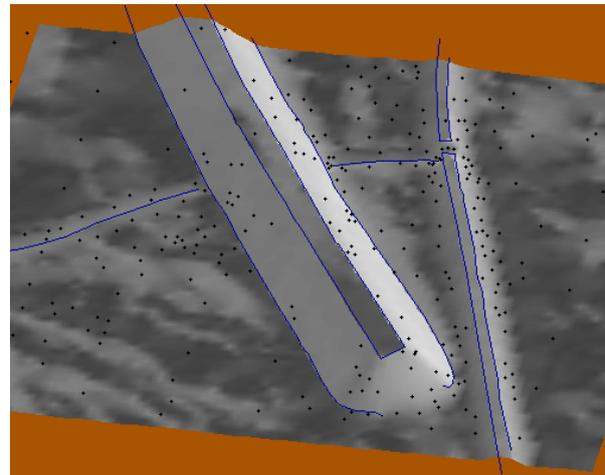
*E-Formel, hierarch. Unterteilung*



*E-Formel, unregelm. Unterteilung*



*TIN-Verdichtung, hierarch. Unterteilung*



*TIN-Verdichtung, unregelm. Unterteilung*

**Abbildung 4.19:** Verhalten der Reduktionsvarianten entlang von Geländekanten, Datensatz: Drau (Kärnten), Möllbrücke; Datenquelle: Fa. GeoConsult, Wien

Am besten im Sinne der obigen Anforderung schneidet die Variante E2 ab. Das bedeutet einerseits, dass die Kanten bei der Krümmungsberechnung ordentlich mitberücksichtigt wurden (q.e.e.) und andererseits auch Nachbarschaftsbeziehungen der Gitterpunkte zu den Kanten erfolgreich Einfluss genommen haben. Die Variante T2 hingegen bringt gelegentlich auch Punkte in der Nähe der Kanten, was allerdings in erster Linie auf das Vorhandensein von lokalen Geländeunebenheiten schließen lässt. Interessant ist auch die Situation beim Eisenbahndamm und Bachlauf. In beiden Fällen ist nicht die gesamte Geometrie durch Geländekanten erfasst worden, sondern es fehlen entweder die Unter- oder die Oberkante. Genau in diesen Bereichen mit fehlender Strukturinformation ist nun eine verdichtete Punktanordnung festzustellen, was einmal mehr die Wirksamkeit der vorgestellten Ansätze belegt. Die beiden Varianten mit hierarchischer Unterteilung weisen, was die Punktverteilung rund um die Kanten betrifft, ein bei weitem ungünstigeres Verhalten auf. Bedingt durch die Quad-Tree-Struktur erstrecken sich die einzelnen Punktgruppen oft zu beiden Seiten der Kanten.

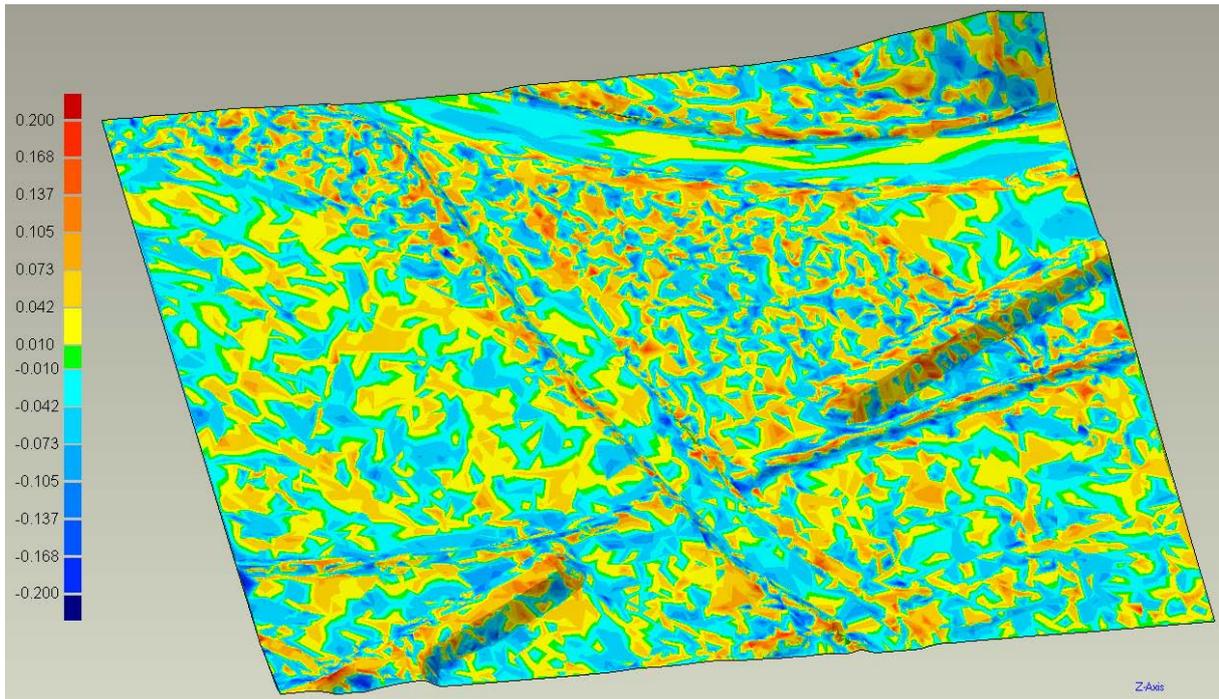
#### 4.5.7 Vergleich mit externer Methode

Zum Abschluss dieses Kapitels werden Ergebnisse der Datenreduktion mittels adaptiver TIN-Verdichtung und unregelmäßiger Unterteilung (T2) mit einer im Programmsystem *Geomagic Studio 9* [Geomagic Inc., 2006] implementierten Methode verglichen. Im Gegensatz zum hier vorgestellten Ansatz der Verfeinerung (mesh refinement) arbeitet Geomagic mit einer Dezimierungstechnik (mesh decimation). Aufbauend auf einer vollständigen Triangulierung aller Punkte werden dabei sukzessive Knoten aus dem Dreiecksnetz entfernt (fine-to-coarse-approach). Als Vergleichsbasis wurde das DGM-W mit einer maximalen Höhentoleranz  $\Delta z_{max}$  von 0.20 m reduziert (vgl. Abb. 4.14). Die approximierte Fläche besteht dabei aus 11478 Dreiecken, und auf ebenso viele Elemente wurde die vollständige Triangulierung mittels Geomagic dezimiert.

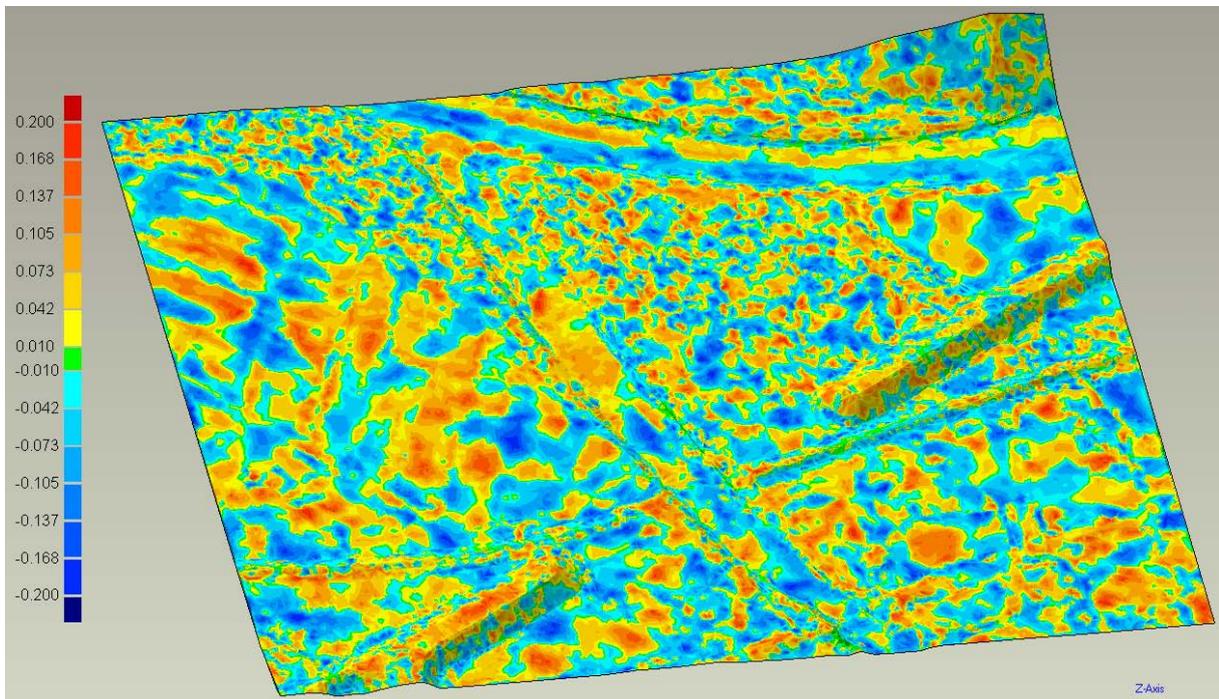
**Tabelle 4.3:** Vergleich der Abweichungen zwischen approximierter und originaler Fläche, Adaptive TIN-Verdichtung mit unregelmäßiger Unterteilung (T2) versus Geomagic

Variante	Max (+)	Max (-)	Mittel (+)	Mittel (-)	Std.abw.
Adaptive TIN (T2)	+20.0 cm	-20.0 cm	+5.0 cm	-5.0 cm	±6.5 cm
Geomagic	+31.5 cm	-48.1 cm	+3.2 cm	-3.2 cm	±4.4 cm

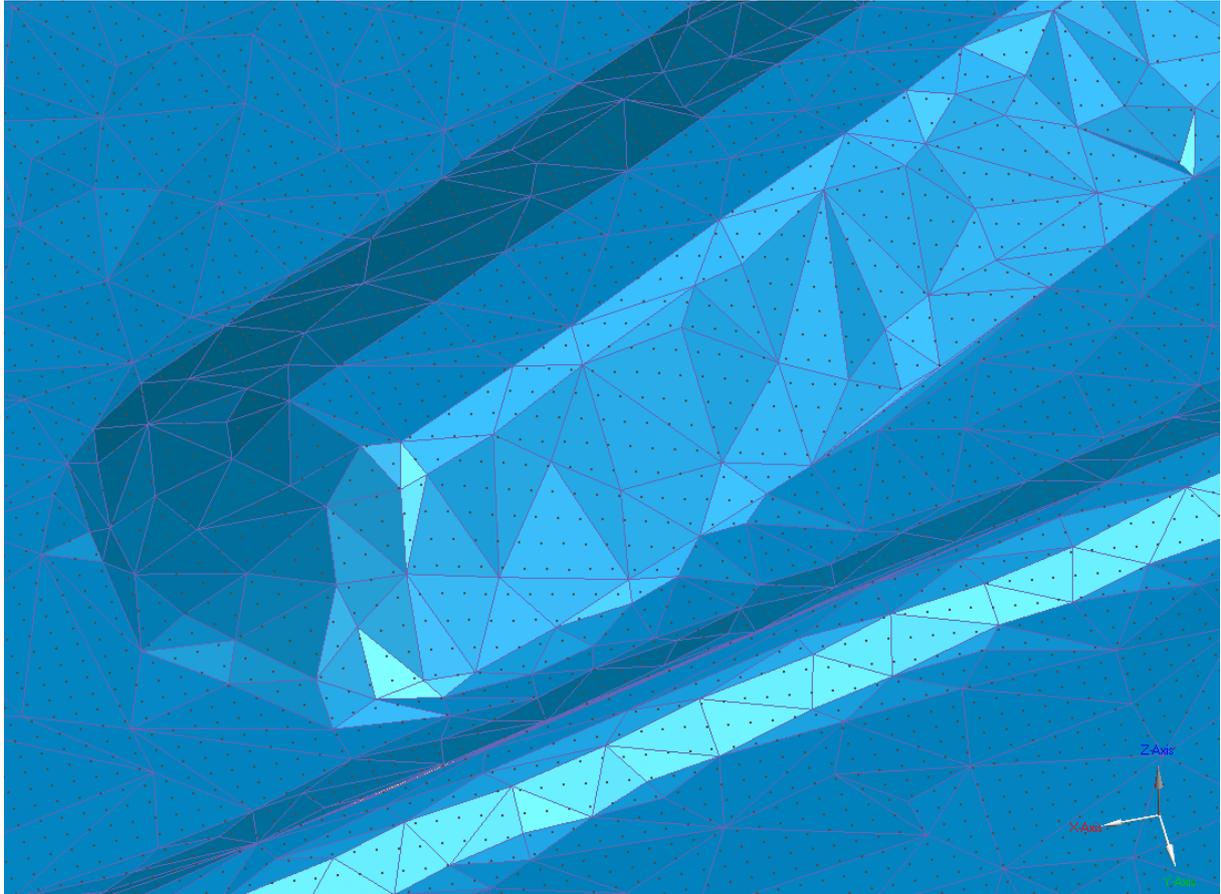
In den Abb. 4.20 und 4.21 sind jeweils die Abweichungen zwischen der approximierten und der originalen Fläche farbkodiert dargestellt. Eine statistische Zusammenfassung der Abweichungen enthält die Tabelle 4.3. Aus dieser ist abzulesen, dass die geforderte maximale Höhentoleranz bei der Variante T2 eingehalten wird, während sie bei der mit Geomagic ermittelten Approximation gleicher Dreiecksanzahl um bis zu 150 % (-0.48 m) überschritten wird. Im Gegensatz dazu sind die betragsmäßigen Abweichungen und die Standardabweichung bei der Geomagic-Variante etwa um 50 % günstiger, was sich auch anhand der Färbung der Abb. 4.20 und 4.21 direkt ablesen lässt. Geomagic erreicht diese im Mittel günstigeren Werte allerdings durch eine lage- und höhenmäßige Verschiebung der Netzknoten (DGM-Gitterpunkte), was aus der Abb. 4.22 zu erkennen ist.



**Abbildung 4.20:** Datenreduktion mittels Geomagic, Farbkodierte Darstellung der Abweichungen zwischen approximierter und originalen Fläche



**Abbildung 4.21:** Datenreduktion mittels Adaptiver TIN-Verdichtung und unregelmäßiger Unterteilung (T2), Farbkodierte Darstellung der Abweichungen zwischen approximierter und originalen Fläche



**Abbildung 4.22:** Detail aus der mittels Geomagic ermittelten approximated Fläche; Knoten der approximated Fläche  $\neq$  Gitterpunkte des DGM-W

# 5 Aufbereitung von DGM-Daten für die hydrodynamisch-numerische Modellierung

Im Kapitel 4 wurde ganz allgemein auf Konzepte zur Reduktion von DGM-Daten eingegangen. Die dort vorgestellten Ansätze sind - unabhängig vom Anwendungsgebiet - von allgemeiner Relevanz, was die Weitergabe qualifiziert reduzierter topographischer Daten betrifft. In diesem Kapitel soll hingegen speziell auf die Anforderungen für die HN-Modellierung eingegangen werden. Zunächst werden daher die Grundgedanken einer spezifischen Datenaufbereitung formuliert und konkrete Lösungsansätze vorgestellt. In einem weiteren Abschnitt werden besondere Anforderungen an die Organisation von topographischen Daten besprochen, damit diese bestmöglich als Grundlage für die Generierung des hydraulischen Netzes eingesetzt werden können. Ein weiterer Abschnitt ist schließlich Daten gewidmet, die nicht unmittelbar zur Topographie gehören, aber für hydraulische Anwendungen genutzt werden können. Dazu zählen vor allem Vegetations- und Gebäudedaten.

## 5.1 Anforderungen an die Datenanordnung

Wie bereits im Abschnitt 2.1.2 erläutert, wird als primäre Eingangsgröße für die HN-Modellierung die Geometrie in Form eines Wasserlauf-DGM benötigt. Dieses DGM-W beinhaltet im Wesentlichen das Gewässerbett und das angrenzende Vorland. Im Gegensatz zur Hydrologie, wo das gesamte Einzugsgebiet eines Flusslaufes betrachtet wird, hat man es in der Hydraulik mit einem relativ schmalen, aber langgezogenen Projektgebiet zu tun. Im Mittelpunkt des Interesses steht der Flusslauf, dessen Strömungsverhältnisse durch die HN-Modellierung ermittelt werden sollen. Das Vorland ist in weiterer Folge nur für größere Abflüsse interessant, bei denen es zu einer Ausuferung kommt (HQ30, HQ100, ...). Ist für eine genaue und zuverlässige Prognose von Überschwemmungsgrenzen die möglichst präzise Geometrie des unmittelbaren Vorlandes noch von entscheidender Bedeutung, so nimmt deren Einfluss für die hydraulische Modellierung mit zunehmender Entfernung vom Flusslauf und zunehmender Höhenlage ab. Die Beschreibung der Topographie kann in diesen Bereichen daher generalisierter erfolgen. Aus dem bisher Gesagten lässt sich der Grundgedanke dieses Kapitels ableiten. Für die HN-Modellierung ist nicht jeder Bereich des Projektgebietes gleich bedeutsam, vielmehr lassen sich etwa folgende Zonen unterschiedlicher Sensibilität und daher unterschiedlichen Genauigkeitsbedarfs formulieren:

- Gewässerbett: Das Gewässerbett ist der sensibelste Bereich für die hydraulische Modellierung. Zu seiner Beschreibung müssen daher die Fließwiderstände (Korngröße, Formeinflüsse) sorgfältig bestimmt und die Geometrie best möglich aufbereitet werden. Die physikalisch bestimmende Größe ist die Fließrichtung. Neben der bereits im Abschnitt 3.1 beschriebenen Bedeutung für die Interpolation von Querprofilen ist die Fließrichtung auch bei der Aufbereitung der Geometrie des Gewässerbetts zu berücksichtigen.

- Uferböschung: Die Uferböschung ist bei Mittel- oder Niederwasser nur zu einem geringen Teil benetzt. Ihre Geometrie wird daher im Zuge der Vermessung des Vorlandes i.A. mit erfasst. Vor allem bei naturnahen Gewässern zeichnet sie sich durch meist mittelhohen Bewuchs aus, dessen Widerstand wiederum durch entsprechende Rauigkeitsbeiwerte im HN-Modell berücksichtigt werden kann. Der Einfluss der Fließrichtung ist im Bereich der Uferböschung nicht mehr so vorherrschend, aber vor allem wegen der jährlichen Hochwässer dennoch Morphologie-bestimmend. Die Oberkante der Uferböschung markiert den Rand des Flusslaufs.
- Unmittelbares Vorland: Das unmittelbare Vorland schließt links und rechts an die Uferböschung an und wird nach außen hin - sofern vorhanden - von der Deich-Oberkante begrenzt. Es wird bei naturnahen Flüssen bereits bei den dekadischen Hochwässern (HQ10/HQ30) geflutet und ist zum Zwecke der Gefahrenzonenplanung geometrisch entsprechend detailliert abzubilden. Die Fließvektoren sind im Vorland nicht mehr unbedingt parallel zur Hauptfließrichtung ausgerichtet, wodurch die Aufbereitung der Topographie auch von dieser unbeeinflusst erfolgen kann. Allenfalls vorhandene Bauwerke wirken in jedem Fall abflusshindernd und sind daher entweder geometrisch oder über Rauigkeiten zu modellieren.
- Erweitertes Vorland: Das erweiterte Vorland ist nur noch von Hochwässern mit sehr großen Abflüssen (HQ100/HQ200) betroffen. Die Genauigkeitsansprüche sind hier nicht mehr so hoch und lassen in jeder Hinsicht eine stärkere Generalisierung zu.
- Umland: Das Umland ist von Hochwasserereignissen nicht mehr betroffen und wird bei Kampagnen zur Datenerfassung - wenn überhaupt - lediglich zum Zweck der Visualisierung mit aufgenommen. Eine schematisierte Abbildung der Geländeform ist hier ausreichend.

## 5.2 Ansätze zur fachgerechten Datenaufbereitung

Der in Kapitel 4 vorgestellte Algorithmus zur Reduktion hybrider Geländemodelle beruht auf der Vorgabe einer einzigen Toleranzgrenze. Im vorigen Abschnitt ist aber deutlich geworden, dass für den Einsatz des DGM-W im Bereich der HN-Modellierung zur Berücksichtigung von Bereichen unterschiedlicher Sensibilität individuelle Toleranzbeträge notwendig sind. Diese beiden Ansätze lassen sich aber elegant kombinieren, indem man  $\Delta z_{max}$  nicht als konstant, sondern im allgemeinen Sinn als Funktion der Lagekoordinaten  $x$  und  $y$  (oder  $\phi$  und  $\lambda$ , ...) ansetzt.

$$\Delta z_{max} = f(x, y) \quad (5.1)$$

Für den Reduktionsalgorithmus heißt das lediglich, dass für jeden Gitterpunkt zusätzlich zur Höhe und ggf. der Neigung und Krümmung die individuelle Höhentoleranz vorgehalten werden muss. Das Toleranzkriterium wird damit für jeden Gitterpunkt mit seinem individuellen Grenzwert evaluiert. Diese Vorgangsweise ist gleichermaßen für den krümmungsbasierten Ansatz wie für die adaptive TIN-Verdichtung anwendbar. Durch diese einfache Maßnahme erreicht man die Berücksichtigung fachspezifischer Anforderungen an die Genauigkeit der Geländeapproximation. Zur Steuerung der Toleranzbeträge stehen verschiedene Möglichkeiten zur Verfügung, die in den folgenden Unterabschnitten erläutert werden.

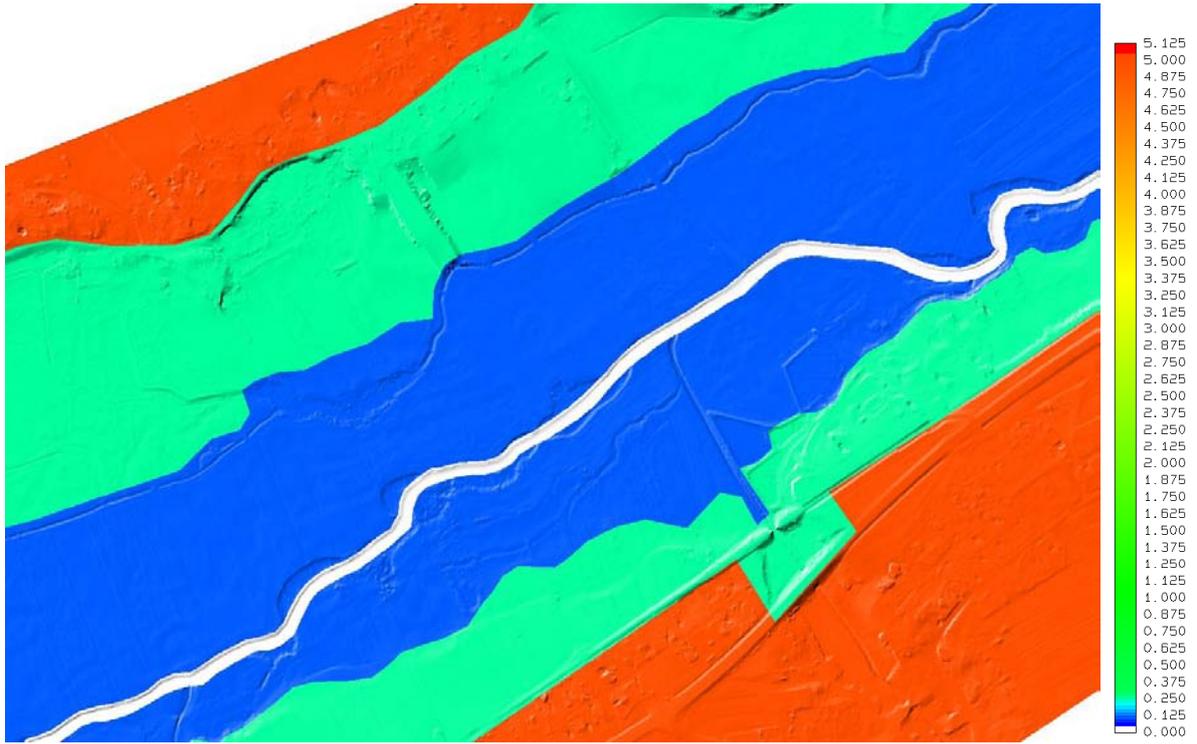
### 5.2.1 Zonen-basierte Steuerung der maximalen Toleranz

Im Abschnitt 5.1 wurden ausgehend vom Gewässerbett fünf Zonen mit unterschiedlicher Relevanz für die HN-Modellierung vorgestellt. Eine erste Möglichkeit zur Steuerung der Höhentoleranz besteht nun darin, jeder dieser Zonen einen eigenen konstanten Toleranzbetrag zuzuweisen. Bezeichnet man die einzelnen Zonen mit  $Z_i (i = 1 \dots 5)$ , dann lässt sich die maximale Höhentoleranz für einen Punkt  $P$  mit den Koordinaten  $(x, y)$  wie folgt angeben:

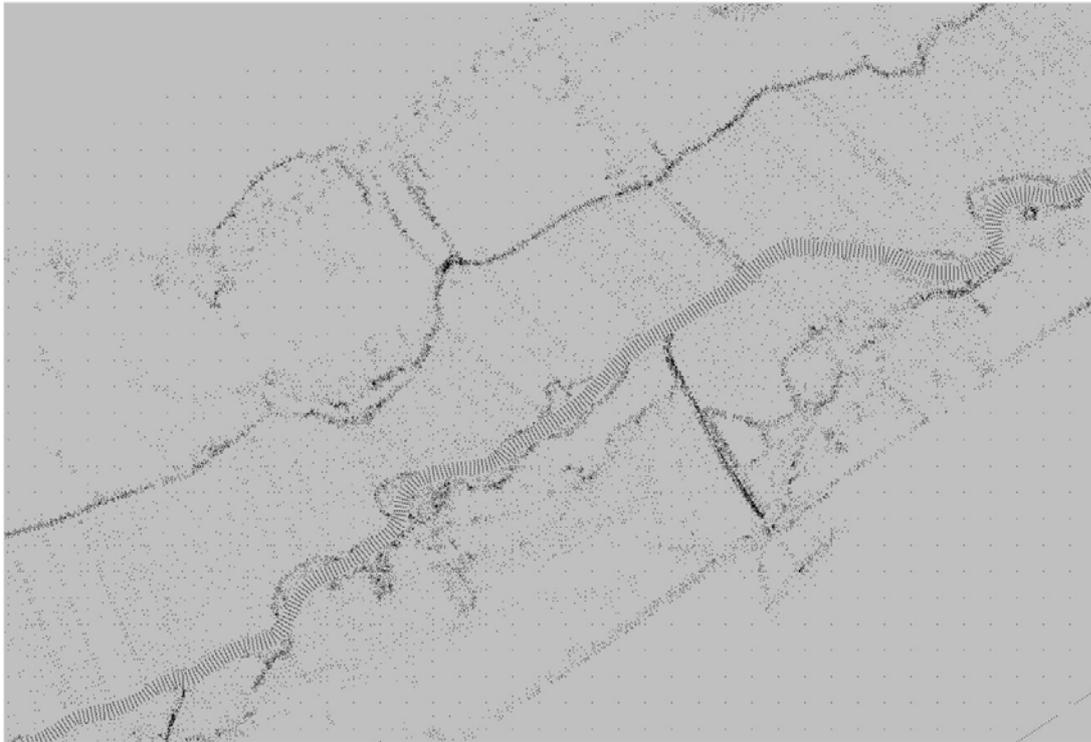
$$\Delta z_{max}(x, y) = \begin{cases} \Delta z_{max}^1 & \dots P \in Z_1(\text{Gewässerbett}) \\ \Delta z_{max}^2 & \dots P \in Z_2(\text{Uferböschung}) \\ \Delta z_{max}^3 & \dots P \in Z_3(\text{unmittelbares Vorland}) \\ \Delta z_{max}^4 & \dots P \in Z_4(\text{erweitertes Vorland}) \\ \Delta z_{max}^5 = \infty & \dots P \in Z_5(\text{Umland}) \end{cases} \quad (5.2)$$

Die  $\Delta z_{max}^i$  bezeichnen dabei die für die jeweilige Zone gültige maximale Höhentoleranz. Die Festlegung der Zonengrenzen kann beispielsweise auf der Basis von historischen Überschwemmungsgrenzen erfolgen. In vielen Fällen existieren auch bereits aus vorangegangenen HN-Modellierungen (z.B. aus 1D-Berechnungen) Wasser-Anschlagslinien für verschiedene Abflüsse. Sind solche Daten nicht verfügbar, können die Zonengrenzen auch durch Digitalisieren aus DGM-Folgeprodukten (Schummerung, Isolinien-Karte ...) oder Orthophotos gewonnen werden. In jedem Fall liegen die einzelnen Zonen dann als Set von geschlossenen Polygonen vor. Für einen beliebigen Punkt  $P$  besteht die Aufgabe nun darin, beginnend bei der genauesten Klasse durch wiederholten Point-in-Polygon-Test die zugehörige Klasse zu bestimmen, wodurch dann über deren Index  $i$  die relevante Höhentoleranz zugewiesen werden kann. Da die Point-in-Polygon-Prüfung für jeden Gitterpunkt relativ aufwändig ist, empfiehlt es sich in einem Vorverarbeitungsschritt ein digitales Modell der Höhentoleranzen zu erstellen. Bei der Abarbeitung des Reduktionsalgorithmus kann dann auf dieses DHM zugegriffen werden. Es sei noch darauf hingewiesen, dass der  $\infty$ -Wert bei der Umland-Klasse dazu führt, dass in diesem Bereich das Gelände durch die initiale Approximation, d.h. im Wesentlichen durch die  $\Delta_0$ -Punkte, beschrieben wird und keine weitere Verfeinerung der Geländeform vorgenommen wird. Die Abb. 5.1 zeigt einen im Sinne eines 4-Zonen-Modells (Gewässerbett inkl. Uferböschung, unmittelbares Vorland, erweitertes Vorland, Umland) aufbereiteten Datensatz. Im oberen Bild sind die Zonengrenzen in der farbkodierten Darstellung der Höhentoleranzen zu erkennen, während das untere Bild die resultierende Punktverteilung über dem Hintergrund der DGM-Schummerung zeigt.

Man erkennt aus Abbildung 5.1, dass sich die Steuerung des Detaillierungsgrades der Topographie auf Basis des Zonenmodells gut realisieren lässt. Vor allem im hydraulisch nicht relevanten Umland wird die Geometrie stark generalisiert abgebildet, während im Vorland die wesentlichen Strukturen, wie Straßendämme und Wiesengräben, auch ohne explizit erfasste Geländekanten gut erhalten bleiben. Sogar Detailstrukturen, wie die quer zur Flussrichtung orientierten Feldraine, können durch die adaptive Punktverteilung erfasst werden. Nachteilig ist allerdings, dass es an den Zonengrenzen teils zu abrupten Änderungen in der Datenverteilung kommen kann, die lediglich durch die veränderten Toleranzwerte, nicht aber durch den Einfluss der Topographie hervorgerufen sind. Das kann in der Folge bei der Netz-Generierung zu inhomogenen Dreiecksverhältnissen führen, die sich negativ auf das HN-Modell auswirken. Problematisch sind dabei vor allem langgestreckte Dreiecke sowie das Auftreten großer



Farbkodierte Darstellung der individuellen Höhentoleranzen  $\Delta z_{max}$



Reduzierte Punktmenge

**Abbildung 5.1:** Aufbereitung des DGM-W mit zonen-basierter Steuerung der maximalen Höhentoleranz  $\Delta z_{max}$ , Datensatz: Lainsitz (NÖ); Datenquelle: Fa. GeoConsult (Wien)

und kleiner Dreiecke in unmittelbarer Nachbarschaft. Kontinuierlichere Verfahren zur Steuerung der Höhentoleranz werden in den nächsten Abschnitten beschrieben. Eine detailliertere Diskussion der spezifischen Anforderungen an das hydraulische Berechnungsnetz erfolgt im Abschnitt 5.3.

## 5.2.2 Distanzabhängige Steuerung der maximalen Toleranz

Ausgangspunkt für diesen Ansatz ist die Idee, dass sich das Wasser immer vom Flussschlauch weg ausbreitet. Mit zunehmendem Abstand vom Fluss verringert sich aber die Wahrscheinlichkeit, dass ein Bereich überhaupt von einem Hochwasser-Ereignis betroffen ist. Diesem Gedanken folgend kann man die Höhentoleranz als Funktion des 2D-Abstandes von der Gewässerachse  $g$  folgendermaßen formulieren.

$$\Delta z_{max}(x, y) = f(d(x, y)) \quad (5.3)$$

Mit  $d(x, y)$  ist dabei die minimale Distanz zwischen dem Punkt  $P(x, y)$  und der Gewässerachse  $g$  bezeichnet. Die Abstandsberechnung eines Punktes von einem Polygon läuft auf die Bestimmung des zugehörigen Lotfußpunktes oder - wo dieser nicht definiert ist - des  $P$  am nächsten liegenden Stützpunktes von  $g$  hinaus. Die meisten gängigen Implementierungen von Polygon-Bibliotheken bieten dies als Standardfunktion an, weswegen auf eine weitere Vertiefung verzichtet wird. Eine weitere, sehr effiziente Möglichkeit die Distanz  $d$  abzuschätzen, bietet die so genannte *chamfer*-Funktion [Borgefors, 1986]. Die Übertragungsfunktion  $f(d)$ , welche jeder Distanz  $d$  eine bestimmte maximale Höhentoleranz zuweist, kann in Form einer look-up table realisiert werden. Allenfalls erforderliche Zwischenpunkte ermittelt man durch lineare Interpolation. Die Abb. 5.2 zeigt ein entsprechendes Beispiel.

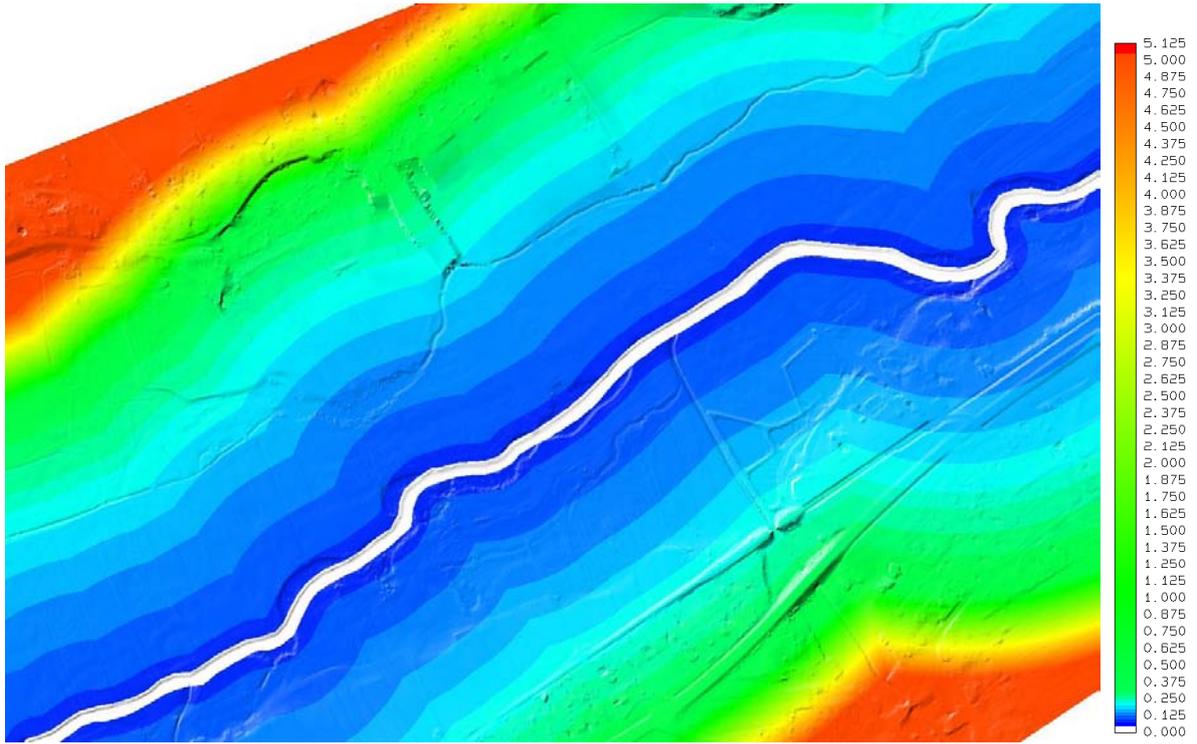
Man erkennt aus Abb. 5.2, dass die Variation der Datenverteilung kontinuierlicher ist als beim Zonenmodell. Besonders deutlich sieht man das an den homogenen Feldern und Wiesen nördlich des Flusslaufes, wo die Punktdichte mit zunehmender Entfernung vom Fluss sukzessive abnimmt. Nachteilig hingegen ist, dass die Steuerung rein lagemäßig erfolgt und die Höhen unberücksichtigt bleiben. So werden bei Überschwemmungsebenen weiter entfernt liegende Bereiche zu unrecht weniger detailliert abgebildet. Abhilfe schafft der folgende Ansatz.

## 5.2.3 Höhenabhängige Steuerung der maximalen Toleranz

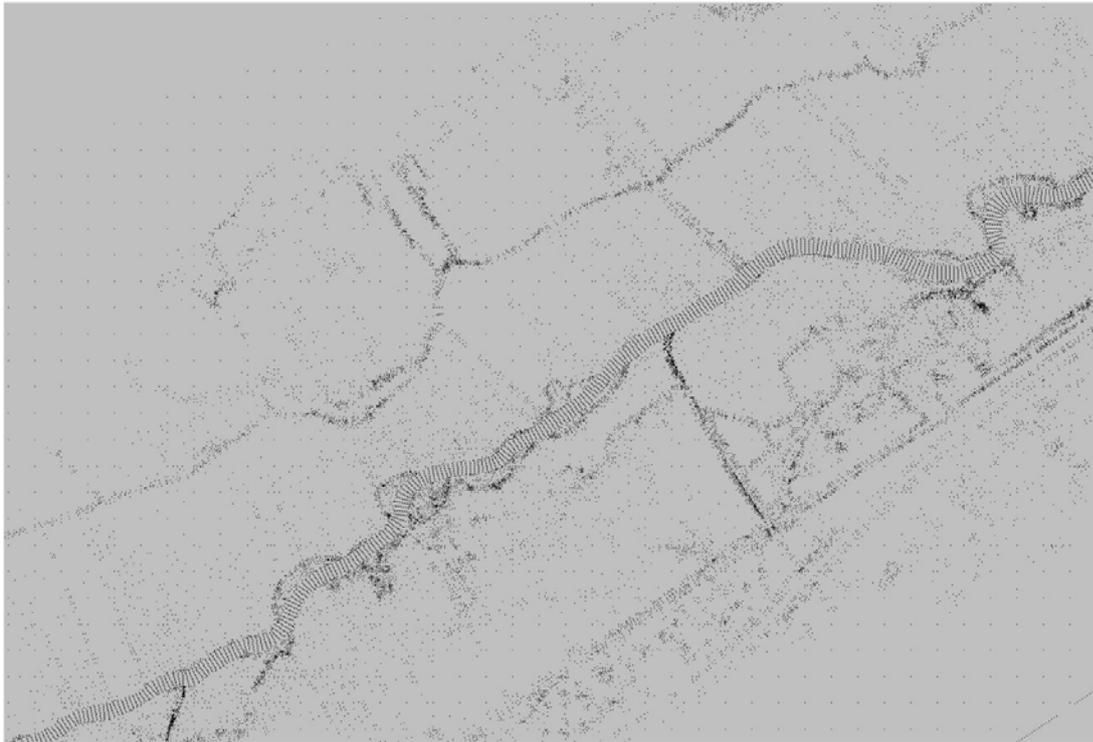
Es ist unmittelbar einleuchtend, dass die Wahrscheinlichkeit, ob ein Punkt  $P$  von einem Hochwasser-Ereignis betroffen ist, ein erster Linie eine Funktion seiner Höhe  $h$  ist. Je höher der Punkt liegt, desto weniger Hochwasser-gefährdet ist er und desto weniger relevant ist er auch für das HN-Modell. Somit lässt sich die Maximaltoleranz für die Datenreduktion wie folgt steuern.

$$\Delta z_{max} = f(h(x, y))$$

Genauer betrachtet hängt die Hochwasser-Wahrscheinlichkeit des Punktes  $P$  nicht von seiner absoluten Meereshöhe sondern vom Höhenunterschied ( $\Delta h$ ) zum zugehörigen Wasserspiegel ab. Somit ergibt sich folgender korrigierter Zusammenhang.



Farbkodierte Darstellung der individuellen Höhentoleranzen  $\Delta z_{max}$



Reduzierte Punktmenge

**Abbildung 5.2:** Aufbereitung des DGM-W mit distanzabhängiger Steuerung der maximalen Höhentoleranz  $\Delta z_{max}$ , Datensatz: Lainsitz (NÖ); Datenquelle: Fa. GeoConsult (Wien)

$$\Delta z_{max} = f(\Delta h(x, y)) \quad (5.4)$$

Zur Berechnung des Höhenunterschiedes  $\Delta h$  für den Punkt  $P(x, y, z)$  muss zunächst der zugehörige Punkt auf der Gewässerachse ermittelt werden. War die Bestimmung des Lotfußpunktes  $F$  von  $P$  auf  $g$  im vorigen Abschnitt nur Mittel zum Zweck, so wird  $F$  hier direkt zur Berechnung von  $\Delta h$  benötigt. Der Höhenunterschied berechnet sich trivialerweise aus  $\Delta h = z_P - z_F$ , woraus allerdings unmittelbar ersichtlich ist, dass im Gegensatz zum vorigen Abschnitt eine dreidimensionale Beschreibung der Gewässerachse  $g$  erforderlich ist. Also muss  $g$  als Funktion der 3D-Koordinaten  $x, y, z$  vorliegen, die ihrerseits meist über die Fluss-Kilometrierung parametrisiert sind ( $g = g(x, y, z) = g(x(s), y(s), z(s))$ ). Die Abbildung der berechneten Höhenunterschiede auf konkrete  $\Delta z_{max}$ -Werte geschieht wieder über eine look-up table. Die Auswirkungen der auf Basis der Formel 5.4 berechneten Maximaltoleranzen auf die Datenanordnung ist in Abb. 5.3 dargestellt.

Die gesamte Überschwemmungsebene ist hier sehr detailliert abgebildet (blauer Bereich in der Abb. 5.3). Besonders markant kommt bei dieser Variante der Datenaufbereitung der nördlich des Flusses und zu diesem etwa parallel verlaufende Wiesengraben heraus. Der Graben ist etwa 1m tief und 3m breit. Die explizite Erfassung in Form von drei Geländekanten (nördliche Oberkante, Grabenmitte, südliche Oberkante) stößt hier wegen der begrenzten Auflösung der ALS-Datenerfassung (hier: 1 Punkt/ $m^2$ ) an ihre Grenzen. Da der Graben nicht wesentlich über dem Flussniveau liegt, wird er bei einer höhenabhängigen Steuerung von  $\Delta z_{max}$  automatisch sehr detailliert durch entsprechend viele Punkte abgebildet. Darüber hinaus ist auch das flache Überschwemmungsgebiet nördlich des Grabens präzise erfasst. Der Datensatz der Lainsitz dient auch als Grundlage für eines der im Kapitel 6 präsentierten Beispiele. Dort wird sich herausstellen, dass gerade der Wiesengraben für das HN-Modell ein sehr sensibler Bereich ist.

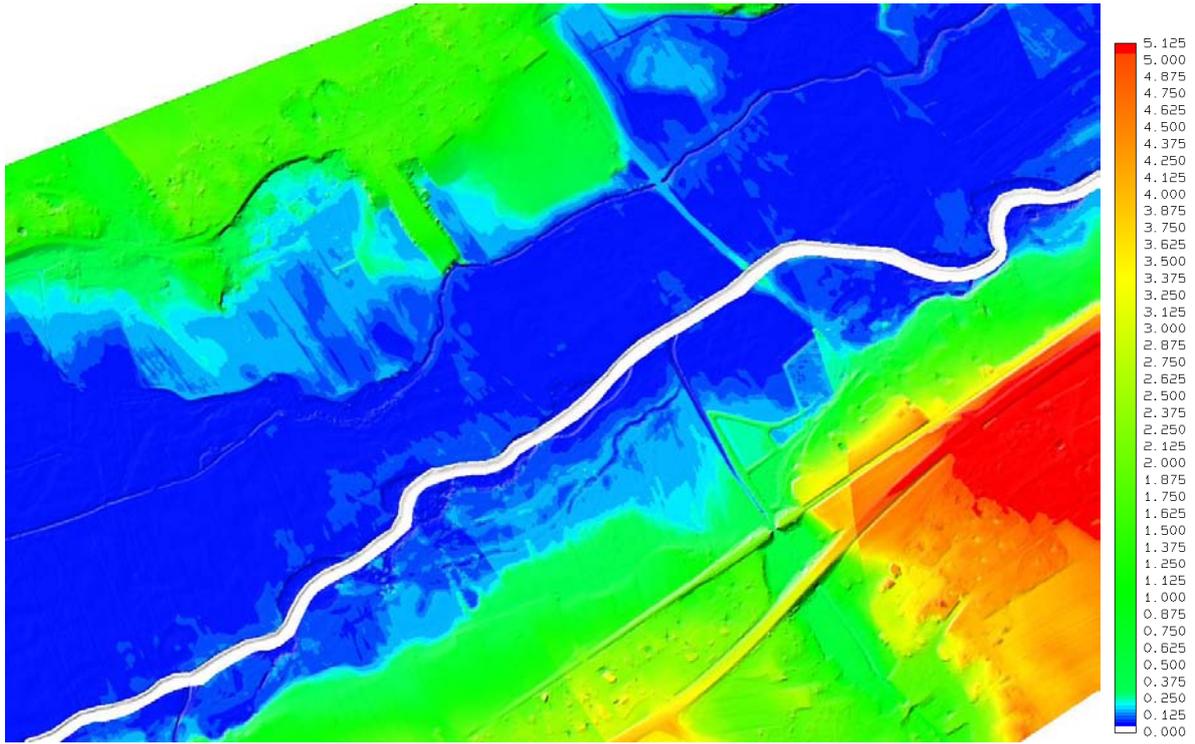
Man kann auch noch einen Schritt weiter gehen, und die Überlegungen zur distanz- und höhenabhängigen Steuerung der Toleranzen miteinander verbinden, indem man zwei Übertragungsfunktionen  $f_1(\Delta h)$  und  $f_2(d)$  kombiniert. Man erhält dann ein moduliertes Ergebnis.

$$\Delta z_{max}(\Delta h, d) = f_1(\Delta h) \times f_2(d) \quad (5.5)$$

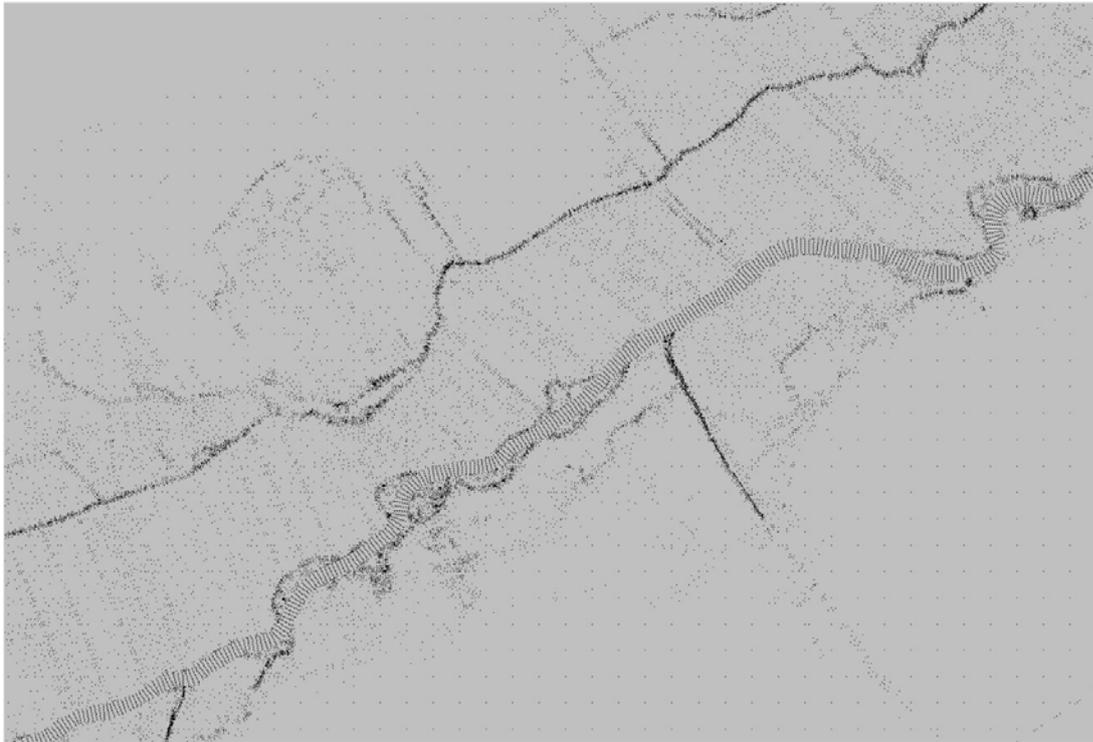
Hauptbestandteil ist dabei der Term  $f_1(\Delta h)$ , der zusätzlich noch distanzabhängig durch  $f_2(d)$  gedämpft oder verstärkt wird. Ein Anwendungsgebiet dafür ist z.B. dann gegeben, wenn ein Hochwasserdamm ein ebenes Vorlandgebiet teilt. Diesseits und jenseits des Dammes treten zwar dieselben Höhenunterschiede zum Wasserspiegel auf, aber durch die Schutzmaßnahme kann das jenseitige Gelände weniger detailliert abgebildet werden. In der Praxis lohnt sich dieser zusätzliche Aufwand allerdings meist nicht, da ähnliche Effekte auch mit Hilfe des Zonenmodells erreicht werden können.

## 5.2.4 Spezielle Datenanordnung im Gewässerbett

Bis jetzt wurden Zugänge zur Datenaufbereitung besprochen, die alle in unterschiedlicher Weise die maximale Höhentoleranz  $\Delta z_{max}$  für den im Kapitel 4 besprochenen Reduktionsalgorithmus adaptieren. Das ist für diejenigen Bereiche zulässig, wo keine ausgezeichnete Richtung vorherrscht und die reduzierten Punkte daher flächenhaft angeordnet werden können. Bei der

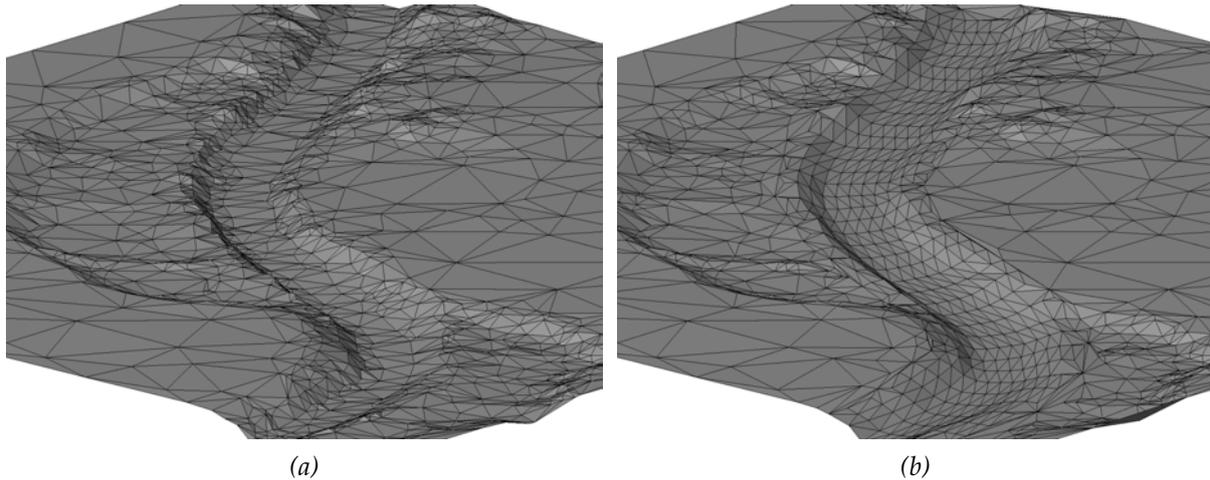


Farbkodierte Darstellung der individuellen Höhentoleranzen  $\Delta z_{max}$



Reduzierte Punktmenge

**Abbildung 5.3:** Aufbereitung des DGM-W mit höhenabhängiger Steuerung der maximalen Höhentoleranz  $\Delta z_{max}$ , Datensatz: Lainsitz (NÖ); Datenquelle: Fa. GeoConsult (Wien)



**Abbildung 5.4:** Unterschiedliche Datenaufbereitung im Bereich des Gewässerbettes,  $\Delta z_{max}$  jeweils 10cm; (a) Adaptives TIN (unstrukturiertes Gitter); (b) profilorientierte Punktanordnung (strukturiertes Gitter)

Besprechung der Verhältnisse im Gewässerbett (Abschnitt 5.1) ist allerdings deutlich geworden, dass dort die Fließrichtung des Wassers die physikalisch dominierende Richtung darstellt. Die Auswirkungen sind gleichsam geometrisch wie physikalisch. Auf Seiten der Geometrie ist festzustellen, dass die Ausformung der Gewässersohle und der Uferböschung von der Fließrichtung bestimmt ist, und die physikalischen Phänomene lassen sich befriedigend nur in einem System lösen, welches an dieser bestimmenden Richtung orientiert ist. Das linke Bild der Abb. 5.4 zeigt eine eher unregelmäßige Punktverteilung im Gewässerbett. Es entstehen dadurch allerdings Dreiecke, deren längere Seiten oft annähernd orthogonal zur Fließrichtung sind. Geometrisch gesehen ist das korrekt, solange die geforderten Toleranzen eingehalten sind. Da es sich bei der HN-Modellierung aber um die Lösung eines physikalischen Problems handelt, ist die Aufbereitung der Modell-Eingangsgrößen auch mehr im Sinne ihrer Relevanz für die Strömungsphysik zu betrachten und weniger aus geometrischen Gesichtspunkten.

Für eine stabile und performante Lösung der Differentialgleichungen des HN-Modells hat sich im Bereich des Gewässerbettes eine Datenanordnung in Profilen quer zur Fließrichtung als ideal herausgestellt. Der Punktabstand im Profil ist dabei entsprechend eng zu wählen (Richtwert: DGM-W-Gitterweite), während der Abstand der einzelnen Profile in Fließrichtung von einander etwa das Drei- bis Fünffache betragen kann und soll (vgl. rechtes Bild der Abb. 5.4). Dadurch entstehen Elemente, deren lange Seiten annähernd parallel zur Strömungsrichtung sind, was die Stabilität der numerischen Lösung des Modells begünstigt. Der größere Abstand der Profile gegenüber dem Abstand der Punkte im Profil ist auch geometrisch vertretbar, da sich die Profilform in Fließrichtung durch die Erosionskraft des Wassers nur langsam ändert. Aus Sicht der Geometrie wie auch der Datenreduktion wäre oftmals ein noch größeres Profilabstand-Punktabstand-Verhältnis gerechtfertigt, vor allem dort, wo sich das Profil entlang des Fließweges kaum ändert. Hier gebieten allerdings wiederum die physikalischen Rahmenbedingungen (Verhältnis von längster zu kürzester Seite eines Elementes) Einhaltung.

Durch diese spezielle Art der Datenanordnung nimmt die Datenmenge aber in größerem Maße zu, als es deren geometrischem Inhalt entspricht. Eine Möglichkeit zur Reduktion der Profildaten besteht in der Anwendung des Douglas-Peucker-Algorithmus für Linien [Douglas u. Peucker, 1973]. Dadurch kann vor allem bei größeren Flüssen mit trogförmigen Profilen eine

erhebliche Einsparung der Punktmenge erzielt werden. Doch sind der Anwendung dieser Reduktionsart wieder einmal durch die Einhaltung gewisser physikalischer Kriterien des hydraulischen Netzes enge Grenzen gesetzt.

Ferner sei an dieser Stelle kritisch angemerkt, dass die profilorientierte Aufbereitung der Daten oftmals bis zur Oberkante der Uferböschung ausgedehnt wird. Vor allem bei einer Datenerfassung mit Laserscanner gehen dadurch Details verloren, nachdem die Böschung meist eine größere Geländerauigkeit aufweist als das permanent benetzte Gewässerbett.

Die profilorientierte Datenanordnung im Gewässerbett lässt sich im Vorland mit der zonen-, distanz- oder höhenabhängigen Aufbereitungsvariante verbinden. Die Beispiele der Abb. 5.1, 5.2 und 5.3 wurden bereits in diesem Sinne erzeugt. Eine Erfassung der Topographie in dieser kombinierten Weise stellt jedenfalls eine sehr gute Grundlage für die HN-Modellierung dar.

### 5.3 Geometrisches Netz versus hydraulisches Netz

Im ersten Teil des vorliegenden Kapitels wurde viel über fachgerechte Flächenapproximation in Form von unregelmäßigen Dreiecksnetzen gesprochen. Dabei wurde implizit immer davon ausgegangen, dass dieses Gerüst auch die Grundlage für die Finiten Elemente im HN-Modell darstellt. Tatsächlich aber wird das geometrische Netz nicht immer als Berechnungsnetz herangezogen, sondern vielmehr gilt es zwei Netzbegriffe zu trennen.

- Geometrisches Netz: Darunter versteht man die Abbildung der Topographie in Form stückweiser Dreiecksflächen, oder kurz: die Abbildung des DGM-W als TIN.
- Hydraulisches Netz: Darunter versteht man ein Netz von polygonalen Teilflächen, welches als Grundlage für die Lösung des HN-Modells über die Methode der Finiten Differenzen, Finiten Elemente oder Finiten Volumina verwendet wird. Dieses Netz ist nicht notwendigerweise ein Dreiecksnetz. Vielmehr finden in der HN-Modellierung auch häufig Vierecks- bzw. Sechsecks-Netze Anwendung. Das hydraulische Netz entsteht durch eine 2D-Vermaschung des Projektgebietes unter Berücksichtigung der Gewässerbett-Geometrie aber i.A. unter Vernachlässigung der detaillierten Topographie des Vorlandes.

Es ist letztlich abhängig von der softwaremäßigen Implementierung, ob für das HN-Modell ein separates hydraulisches Netz aufgebaut, oder das geometrische Netz als Basis verwendet wird. Viele Programmsysteme sind mit einem Netzgenerator für den Aufbau des hydraulischen Netzes ausgestattet. Die Eingangsgrößen für diese *mesh generation* sind die Uferböschungsoberkante, ggf. Geländekanten im Vorland und Bauwerkspolygone, sowie die Randlinie des Projektgebietes. Die Vermaschung erfolgt dann meist unter Vorgabe einer gewissen Zellgröße für den Flusslauf und das Vorland. Die Höhen für die Knoten dieses hydraulischen Netzes werden in einem getrennten Prozess aus dem DGM-W extrahiert und auf das HN-Netz gemappt. Es sei an dieser Stelle kritisch angemerkt, dass Detailformen des Geländes dabei, auch wenn diese hydraulisch relevant wären, nicht berücksichtigt werden.

Andere Softwarelösungen wiederum verwenden das geometrische Netz als Basis für die Erstellung des hydraulischen Netzes. Aus geodätischer Sicht ist diese Variante vorzuziehen, da damit die Möglichkeit einer qualifizierten Berücksichtigung der Topographie gegeben ist. Das

Programmsystem SMS/Hydro\_AS-2D [Hydrotech, 2006], [Scientific Software Group, 2006] arbeitet auf eben dieser Basis und dient als Werkzeug für alle im Kapitel 6 präsentierten Beispiele hydrodynamisch-numerischer Simulationen. Im Rahmen des Aufbaus des HN-Netzes innerhalb von SMS erfolgt dabei automatisch eine Zusammenlegung von Dreiecks- zu Vierecksflächen, wo dies hydraulisch sinnvoll ist.

Für die Verwendbarkeit einer Netzkonfiguration als hydraulisches Berechnungsnetz sind allerdings einige Kriterien zu beachten. Wird deren Einhaltung bereits bei der Erstellung des geometrischen Netzes berücksichtigt, dann gelingt eine optimale Kombination geometrischer wie auch physikalischer Aspekte. Nach [Ferziger u. Peric, 2002] sind folgende Richtlinien zu beachten:

*Tabelle 5.1: Gegenüberstellung der Mittelwerte von minimalen/maximalen Winkeln sowie aspect ratio und expansion ratio bei den Reduktionsvarianten E1, E2, T1 und T2*

Variante	min. Winkel	max. Winkel	aspect ratio	expansion ratio	exp.rat.>10
E1	42°	88°	1.5	1.5	0.0%
E2	39°	85°	1.6	2.2	0.4%
T1	40°	88°	1.7	1.9	0.1%
T2	35°	90°	1.9	3.0	2.2%

- **Winkelkriterium (angle criterion):** Die Berücksichtigung der Winkeln muss bei der Netzgenerierung in zweifacher Hinsicht erfolgen. Physikalisch gute Ergebnisse können nur dann erzielt werden, wenn die Elemente des Netzes an der vorherrschenden Strömungsrichtung ausgerichtet sind. Dieser Aspekt wurde bereits im Abschnitt 5.2.4 behandelt. Die Aufbereitung der Gewässerbett-Geometrie in der dort beschriebenen Form entspricht exakt der physikalischen Vorgabe. Eine Nicht-Beachtung der Fließrichtung führt durch die so genannte numerische Diffusion zu fehlerhaften Ergebnissen. Jenseits der Bordvollkante im Vorland existiert diese praedominante Bezugsrichtung nicht mehr. Die Punktanordnung im Berechnungsnetz kann hier flächenorientiert erfolgen. Für jede Teilfläche sind allerdings gewisse Winkelbedingungen einzuhalten. Es gilt, sehr spitze oder stumpfe Winkel zu vermeiden. Bei Dreiecksnetzen ist eine Triangulierung nach dem Delaunay-Kriterium vorteilhaft, da sich dabei möglichst gleichseitige Dreiecke ergeben. Im Bereich der Geländekante (=TIN-Zwangskanten) können auch bei einer Delaunay-Triangulierung kleine Winkel auftreten. Eine gewisse Homogenität der Punktverteilung ist daher in jedem Fall erforderlich.
- **Seitenverhältnis (aspect ratio):** Neben den Winkeln ist auch das Verhältnis der Seiten der polygonalen Teilflächen maßgeblich. Ein Verhältnis der längsten zur kürzesten Seite von 10 sollte dabei tunlichst nicht überschritten werden. Anderenfalls stellen sich aufgrund von Oszillationseffekten numerische Probleme ein, welche die Konvergenz der Lösung negativ beeinflussen und zu langen Rechenzeiten führen. Optimale Verhältnisse sind bei einem Verhältnis kleiner als 3 gegeben. Bei Dreiecksnetzen wirkt das Seitenverhältnis in ähnlicher Weise wie das Winkelkriterium. Bereits beim Viereck allerdings kommt dem Seitenverhältnis eine eigenständige Bedeutung zu.
- **Ausdehnungsverhältnis (expansion ratio):** Legt man eine Gerade vom Mittelpunkt einer Zelle zu jenem einer beliebigen Nachbarzelle, so wird diese Gerade durch die ge-

meinsame Zellberandung in zwei Abschnitte geteilt. Das Verhältnis vom größeren zum kleineren dieser beiden Teilintervalle wird *expansion ratio* genannt. Es liegt optimalerweise bei etwa 1.2, ein Wert kleiner 3 sollte angestrebt und ein Maximalwert von 10 nicht überschritten werden. Bei größeren Verhältnissen kommt es zu physikalisch falschen (unplausiblen) Ergebnissen.

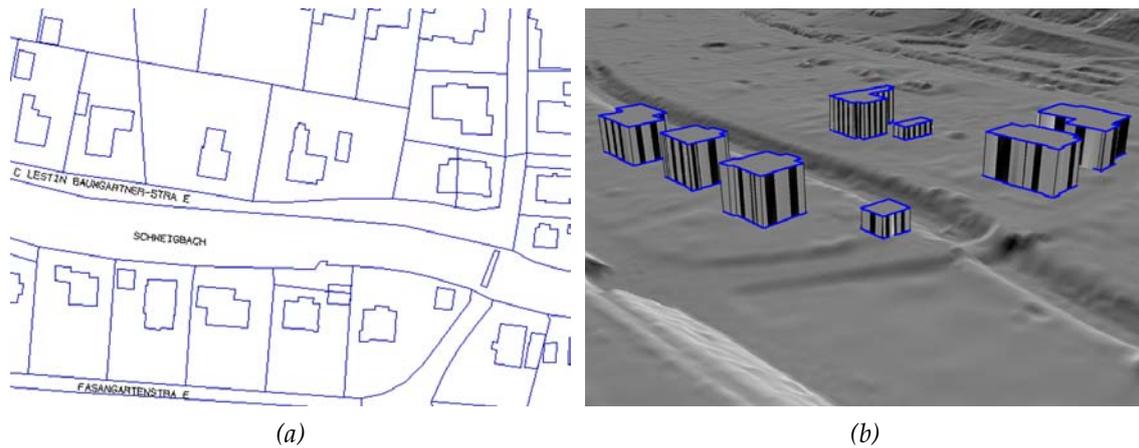
- Lage des Zellmittelpunktes: Dieser sollte möglichst innerhalb der Zellfläche liegen, was sich aus der Beachtung der oben genannten Bedingungen automatisch ergibt.

In der Tabelle 5.1 sind für den DGM-W-Datensatz der Drau (vgl. Abb. 4.14) die Kriterien für die Gitterqualität angeführt. Die minimalen bzw. maximalen Winkel liegen dabei im Mittel für alle Varianten im günstigen Bereich, ebenso wie das Seitenverhältnis. Ungünstigere Werte treten lediglich beim Ausdehnungsverhältnis auf. Die Varianten mit unregelmäßiger Unterteilung (E2, T2) weisen dabei größere Verhältnisse auf als jene mit hierarchischer Unterteilung (E1, T1, q.e.e.). Gerade das aber bedeutet, dass bei den Varianten E2 bzw. T2 das Umschalten zwischen glatten und bewegten Geländebereichen schnell funktioniert, was aus geometrischer Sicht absolut erwünscht ist. Wie aus der Abb. 4.14 ersichtlich ist, wechseln bei diesem Datensatz ebene Bereiche mit Straßen- und Eisenbahndämmen sowie kleineren Gräben ab. Der Übergang erfolgt dabei meist abrupt, wodurch am Übergang ein größeres Ausdehnungsverhältnis der einzelnen benachbarten Teilflächen auftreten kann. Es wurde bereits im Abschnitt 4.5 darauf hingewiesen, dass die Variante E2 gegenüber T2 die gleichmäßigere Punktanordnung aufweist. Dies spiegelt sich in der Tabelle 5.1 auch in einem geringeren Ausdehnungsverhältnis (E2: 2.2, T2: 3.0). Eine Kombination der beiden Varianten ist demnach auch aus hydraulischer Sicht sinnvoll.

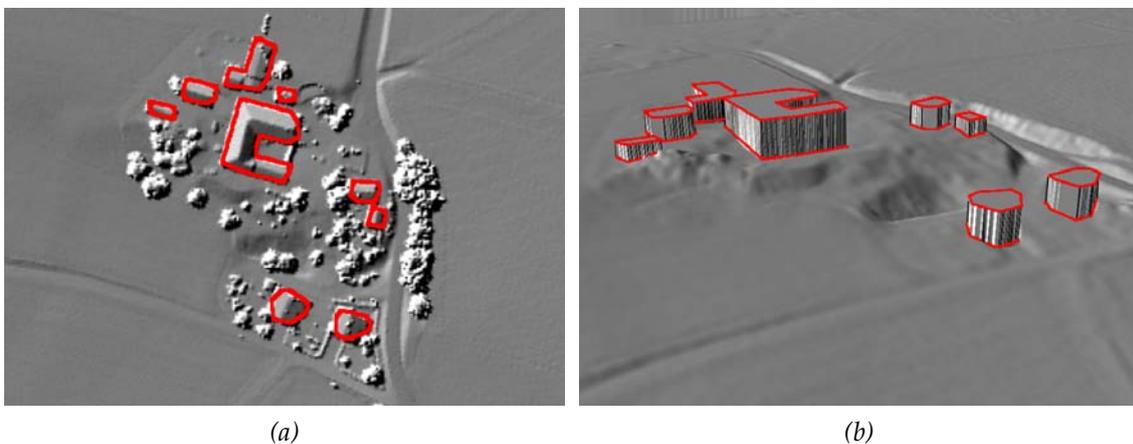
## 5.4 Aufbereitung zusätzlicher Daten

Bei einer Erfassung der Vorland-Geometrie mittels ALS können zusätzlich zum DGM bzw. DGM-W aus der Punktwolke noch weitere, für die HN-Modellierung verwertbare Daten abgeleitet werden. So lassen sich aus ALS-Punktwolken automatisch Gebäude- und Vegetationsmodelle generieren. Die meisten Methoden bauen auf dem normalisierten Oberflächenmodell (nDOM), also der Differenz zwischen dem DGM und dem DOM, auf. Das erste Echo des Lasersignals (first echo) wird dabei zur Ableitung des DOM genutzt, während das letzte Echo (last echo) in Zusammenhang mit entsprechenden Filterverfahren (siehe Abschnitt 2.1.7) zum Aufbau des DGM und des DGM-W herangezogen wird.

Die Einbeziehung von Informationen über den Vegetationsbestand erfolgt im HN-Modell über eine entsprechende Belegung mit Rauigkeitsbeiwerten. Gebäude können entweder auf dieselbe Weise oder aber geometrisch berücksichtigt werden. In den folgenden beiden Unterabschnitten wird daher auf die Ableitung von Gebäude- bzw. Vegetationslayer eingegangen. Die Ausführungen gelten mit gewissen Einschränkungen auch für photogrammetrische Daten aus automatischer Bildkorrelation, wobei vor allem für die Ausweisung von Vegetationsflächen durch die fehlende Durchdringung (penetration) des Messsignals ungünstigere Voraussetzungen gegeben sind.



**Abbildung 5.5:** Gebäuderekonstruktion als Blockmodell bei vorgegebenem Grundriss, (a) 2D-Grundriss-Polygone, (b) Perspektivansicht mit Gebäuden als Blockmodell

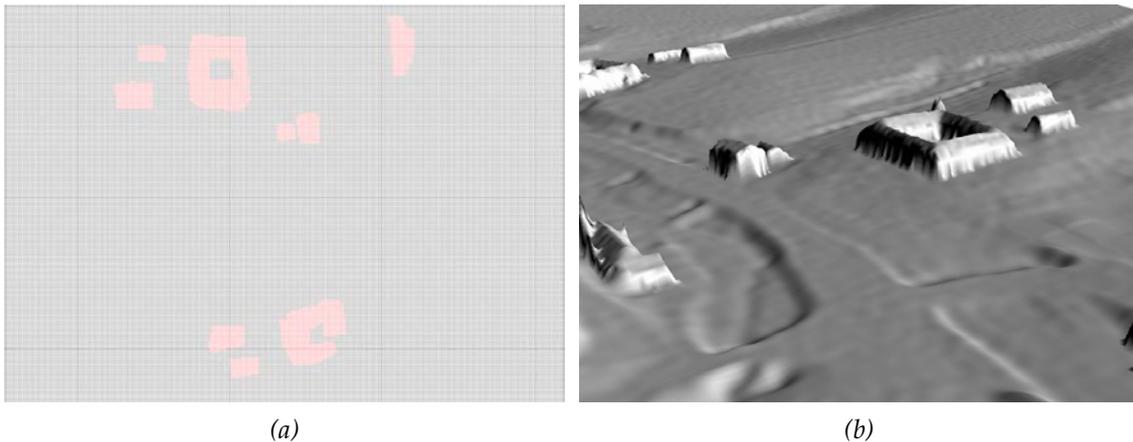


**Abbildung 5.6:** Gebäuderekonstruktion als Blockmodell automatisch detektierter Gebäudeumrisse, (a) automatisch detektierte Gebäudebegrenzungen, (b) Perspektivansicht mit Gebäuden als Blockmodell

### 5.4.1 Gebäudelayer

Gebäude können im HN-Modell physikalisch oder geometrisch berücksichtigt werden. Voraussetzung für eine physikalische Berücksichtigung über Rauigkeiten ist, dass die Grundrisse der Gebäude im hydraulischen Modell abgebildet sind. Wie im Kapitel 6 gezeigt werden wird, wirkt es sich darüber hinaus vorteilhaft auf die Ergebnisse der HN-Modellierung aus, falls alle Gebäude im Überflutungsbereich auch geometrisch berücksichtigt sind. Die geometrische Berücksichtigung kann auf zwei Arten erfolgen. Einerseits kann das Gebäude aus dem hydraulischen Netz ausgestanzt werden, was dem Einfügen einer unendlich hohen Säule entspricht. In diesem Fall ist lediglich der Gebäudegrundriss und keine Höheninformation erforderlich. Wird hingegen die dreidimensionale Gebäudestruktur erfasst und zumindest in abstrahierter Form ins HN-Netz einbezogen, dann kann auch eine eventuelle Überströmung modelliert werden.

Mit dem Thema Gebäudemodellierung aus ALS-Daten haben sich eine Reihe von Autoren be-

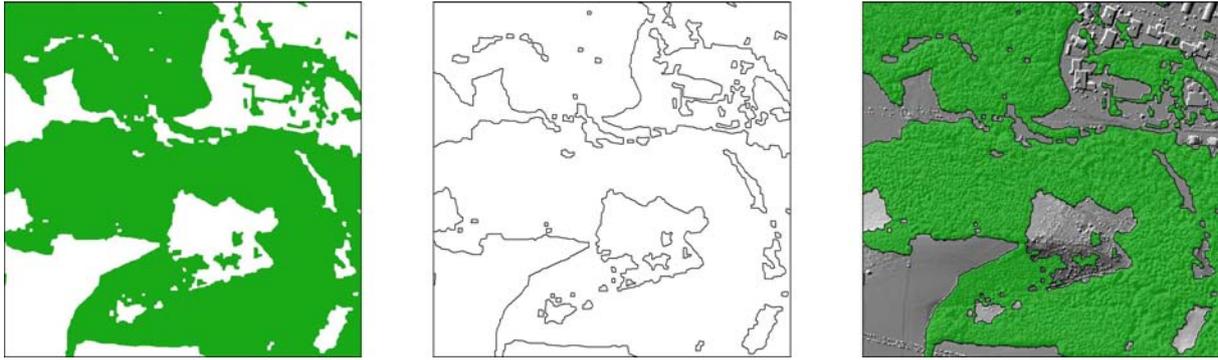


**Abbildung 5.7:** Gebäuderekonstruktion als DOM ohne explizite Erfassung der Gebäudeumrisse, (a) Klassifizierte Punktwolke (schwarz-Bodenpunkte, rot-Gebäudepunkte), (b) Perspektivansicht mit integrierten Gebäuden als DOM

schäftigt. Man kann prinzipiell Ansätze unterscheiden, bei denen die Modellierung auf Basis vorgegebener Grundrisse erfolgt und solche, bei denen auch die Gebäude selbst aus den Daten detektiert werden. Ansätze auf Basis gegebener Grundrisse sind etwa in [Haala u. a., 1998], [Brenner, 2000], [Vosselman u. Dijkman, 2001] und [Jansa u. Stanek, 2003] beschrieben. Voraussetzungsfree Zugänge finden sich in z.B. in [Weidner, 1997] und [Rottensteiner u. Briese, 2002]. Die Detektion von Gebäuden beginnt dabei beim nDOM. Zunächst wird aus allen First-Echo-Punkten ohne Glättung ein DOM und anschließend aus allen als Bodenpunkte klassifizierten Last-Echo-Punkten ein DGM berechnet. Aus dem nDOM werden alle Punkte über einem bestimmten Schwellwert als Gebäude-Kandidaten selektiert und durch Anwendung einer Analyse zusammenhängender Elemente (connected component analysis) erhält man eine anfängliche Gebäude-Maske. Die Elimination noch vorhandener Restvegetation gelingt durch eine Auswertung der Rauigkeit auf Basis der Normalenvektoren des DOM. Nach einer weiteren morphologischen Filterung ergeben sich die Gebäudegrundrisse schließlich als Randlinien der einzelnen segmentierten Gebäudebereiche.

Auf die weiterführende Rekonstruktion von Dachlandschaften wird nicht weiter eingegangen, da diese für die Zwecke der HN-Modellierung nicht relevant ist. Vielmehr ist es ausreichend, die einzelnen Gebäude in stark generalisierter Form zu berücksichtigen. Dies kann im einfachsten Fall durch Zuweisen einer für das gesamte Gebäude repräsentativen Höhe geschehen, wobei man dann von einem Block- oder Klötzchenmodell spricht. Entscheidend sind also die Gebäudebereiche. Diese stammen bei den auf bestehenden Grundrissen aufbauenden Ansätzen meist aus Daten des digitalen Katasters oder des digitalen Landschaftsmodells. 2D-Begrenzungen aus diesen Datenquellen bezeichnen das aufstrebende Mauerwerk oder, mit anderen Worten, den abflusswirksamen Gebäudebereich. Andererseits besteht bei Datensätzen dieser Art immer das Problem der Aktualität. Die automatische Detektion von Gebäudegrundrissen aus ALS-Daten hingegen liefert immer die Traufenlinien und daher eine aus hydraulischer Sicht zu große Fläche.

Bei der Klassifizierung mittels hierarchischer robuster Interpolation werden die Laserpunkte in Boden-, Vegetations- und Gebäudepunkte getrennt. Integriert man die Gebäudepunkte ins DGM-W, so besteht eine besonders einfache Möglichkeit zur Berücksichtigung der Gebäude-



*Abbildung 5.8: Vegetationslayer aus ALS-Punkten; Daten: Ager, Amt d. ö. Landesregierung; Links: Vegetationsflächen, Mitte: Begrenzungspolygone, Rechts: Vegetationsflächen überlagert mit DGM-Schumierung*

Geometrien im HN-Modell, ohne dass deren Grundrisse explizit erfasst werden müssen. Beispiele für die verschiedenen vorgestellten Detektions- und Modellierungsvarianten sind in den Abb. 5.5, 5.6 und 5.7 dargestellt.

## 5.4.2 Vegetationslayer

Wie bereits im vorigen Abschnitt erläutert, fallen im Zuge der Klassifizierung der ALS-Punktwolke mittels hierarchischer robuster Interpolation die Vegetationspunkte als separate Klasse an. Dieser Datensatz kann zur Ableitung eines Vegetationslayers genutzt werden. Für jeden als Vegetation klassifizierten Punkt wird dabei das korrespondierende First Echo ermittelt. Aus diesen Punkten wird dann ohne Glättung ein DOM interpoliert. Ist die Korrespondenz zwischen den einzelnen Echos nicht mehr herstellbar, etwa weil die First- und Last-Echo-Punkte lediglich mit ihren XYZ-Koordinaten in getrennten Dateien geliefert wurden, so kann der Aufbau des DOM auch auf Basis der Last-Echo-Punkte erfolgen. Bildet man unter Zuhilfenahme des DGM ein normalisiertes DOM, so enthält dies nun ausschließlich die Bestandshöhen der Vegetation. Um möglichst zusammenhängende Segmente zu erhalten, wird auf das DOM eine morphologische Filterung (closing, opening) angewandt. Zusätzlich können kleinere Vegetationsbereiche noch durch Schwellwertverfahren eliminiert werden. Um die Begrenzungen der einzelnen Teilflächen als Polygone weiterverwenden zu können, wird das gefilterte DOM schließlich vektorisiert. Für den Fall, dass das DOM aus Last-Echo-Punkten berechnet worden ist, können die korrespondierenden First-Echo-Punkte über eben diese Begrenzungspolygone geometrisch selektiert werden. Der Vegetationslayer liegt schließlich als Raster von Vegetationshöhen und als Set von Polygonen vor. Ein entsprechendes Beispiel ist in Abb. 5.8 dargestellt.

Bei der Berücksichtigung im HN-Modell in Form von Rauigkeiten ist die Vegetationshöhe maßgeblich, wobei man Klein-, Mittel- und Großbewuchs unterscheidet. Beim Kleinbewuchs ist die Vegetationshöhe im Vergleich zur Wassertiefe gering, sodass es zu einer vollständigen Überströmung kommt. Solche Vegetation kann als Rauigkeit der Gerinnewand angesehen werden. Der Mittelbewuchs ist etwa so hoch wie die Wassertiefe und wird folglich sowohl durch als auch überströmt. Großbewuchs schließlich ist so hoch, dass er ausschließlich durchströmt wird. Entsprechende Rechenansätze zur Bestimmung von Rauigkeitsbeiwerten aus Vegetationsdaten sind etwa in [DVWK, 1991] beschrieben. In Zusammenhang mit einer Abschätzung der Wasserspiegellagen (z.B. aus einer 1D-HN-Modellierung) stellt der Vegetationslayer die Grundlage für eine Klassifizierung in die drei unterschiedlichen Bewuchsklassen dar. Darüber

hinaus bildet er auch die Basis für die Erfassung von Detailparametern, wie Bewuchsabstand oder repräsentativem Durchmesser.

## 6 Beispiele hydrodynamisch-numerischer Simulationen

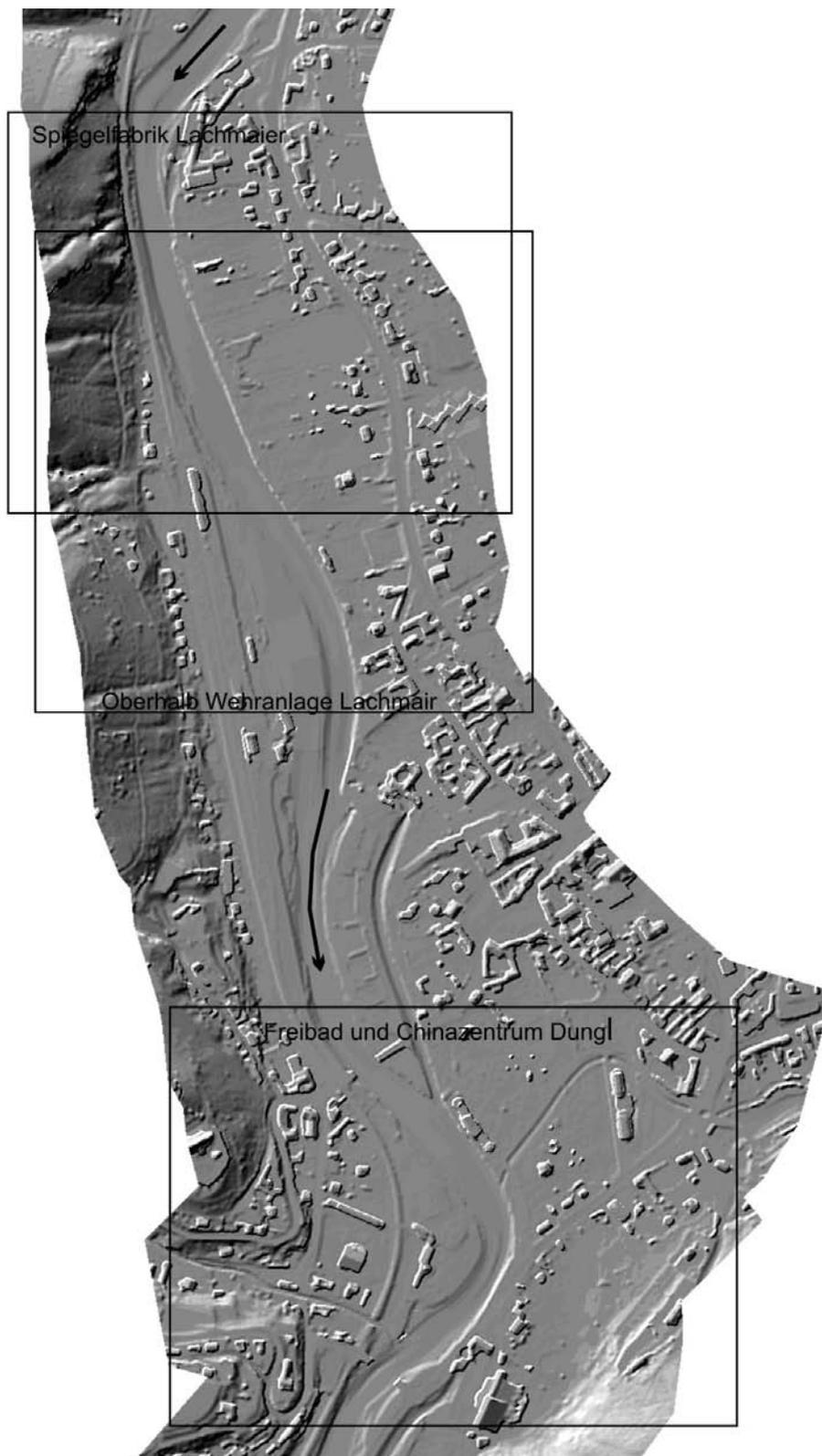
In diesem Kapitel werden anhand von Simulationen die Auswirkungen von unterschiedlichen Geometriedaten auf die Ergebnisse der HN-Modellierung dargestellt und diskutiert. Die gemäß Kapitel 4 bzw. 5 aufbereiteten Daten werden dabei jeweils einer als klassisch angesehenen Datengrundlage in Form eines groben Rasters fixer Zellgröße mit einbezogenen Geländekanten gegenübergestellt. Die vier Beispiele - je zwei am Kamp und an der Lainsitz - wurden so ausgewählt, dass möglichst unterschiedliche Fluss- und Vorlandcharakteristika abgedeckt sind. Fließstrecken mit starkem Gefälle in tief eingeschnittenen Tälern sind dabei ebenso vertreten wie flache Passagen mit weiten Überflutungsebenen bzw. Auwälder. In jedem Beispiel werden unterschiedliche physikalische oder geometrische Aspekte wie die Sohl Schubspannung, die Fließgeschwindigkeit, die Richtung der Fließvektoren oder die berechneten Wasserspiegelagen beleuchtet. Zunächst erfolgt dabei jeweils eine Beschreibung der Topographie und der hydrologisch-hydraulischen Besonderheiten des ausgewählten Gebietes. In Form von Abbildungen und interpretierendem Text werden dann die jeweiligen Ergebnisse vorgestellt und diskutiert.

### 6.1 Beispiel 1: Gars am Kamp

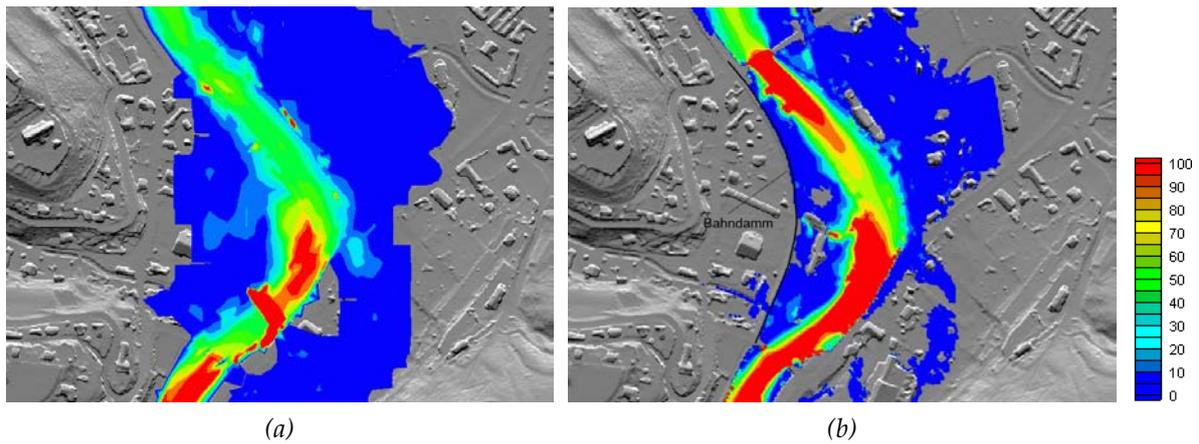
Beim Kamp (keltisch: kambos - der Krumme) handelt es sich um einen Fluss in Niederösterreich mit der Flussordnungszahl 5 nach Horton-Strahler. Er entsteht aus dem Zusammenfluss des Großen und des Kleinen Kamp bei Rappottenstein (671 m) im südwestlichen Waldviertel, speist östlich von Zwettl den Ottensteiner sowie den Dobra- und Thurnberger Stausee, wendet sich bei Rosenberg (268 m) nach Süden, fließt westlich des Manhartsbergs (Talweitung) in Richtung Tullner Becken und mündet südlich von Grafenwörth (190 m) in die Donau.

Das für das erste Beispiel gewählte Gebiet liegt im Bereich des Mittleren Kamptales bei der Stadt Gars am Kamp. In diesem Abschnitt hat sich der Kamp tief in das Tal eingeschnitten und weist neben gestreckten Passagen immer wieder die für ihn charakteristischen Bögen und Schlingen auf. Er wird hier durch einen Hauptarm mit einer mittleren Gewässerbite von 40 m (Minimum: 20 m) dominiert. Laufaufweitungen durch Seitenarme und Sedimentinseln sind nur lokal vorhanden, wobei die Breite dann bis auf ca.

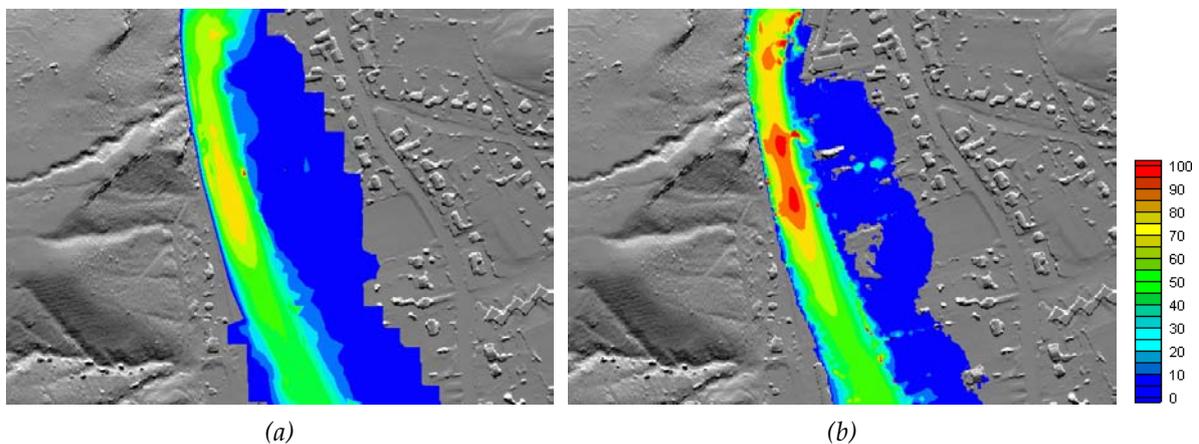
95 m ansteigen kann. Das mittlere Gefälle in diesem Flussabschnitt beträgt 2.5‰. Vor allem entlang der Prallhänge kommt es in den ausgeprägten Flussbögen zu einem hohen Anteil an Tiefwasserstellen mit meist *mäßig schneller* Fließgeschwindigkeit. Flachwasserstellen sind in diesem Abschnitt selten. Die Talform ist als Sohlenkerbtal ausgebildet und der Talbereich ist mit 100 bis 400 m eher schmal. Begrenzt wird dieser zumeist beidseits von steilen Hängen. Großflächige Ausuferungen sind in diesem Flussabschnitt daher nur an einigen wenigen Stellen möglich. Die freie Fließstrecke ist am Kamp generell durch zahlreiche Wehre eingeschränkt



**Abbildung 6.1:** Beispiel 1, Gars am Kamp, Digitales Oberflächenmodell, Bereiche Spiegelfabrik Lachmaier, oberhalb der Wehranlage Lachmaier sowie Chinazentrum Dungal



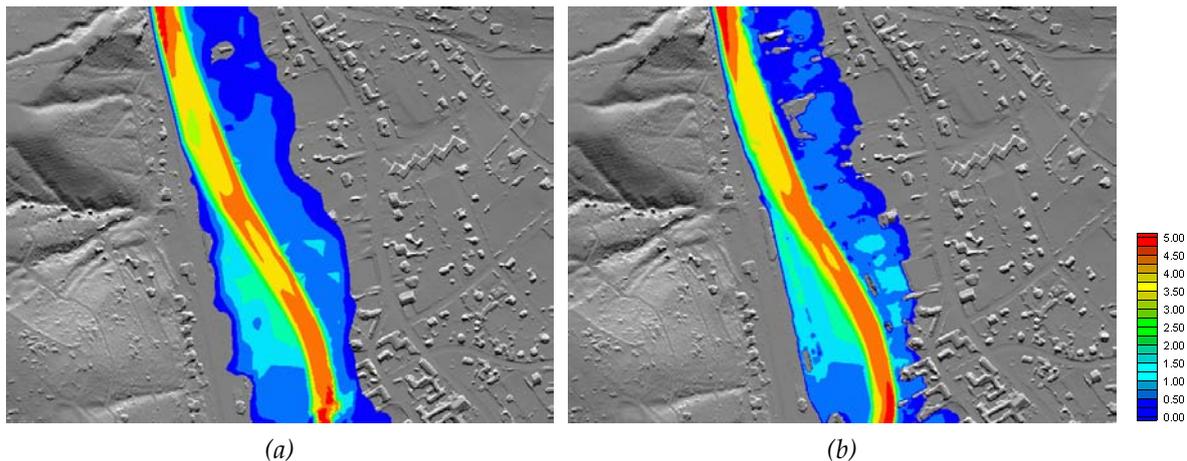
**Abbildung 6.2:** Visualisierung der Sohl Schubspannungen  $[N/m^2]$  eines HQ100 ( $463 m^3/s$ ) im Bereich des China-zentrums Dungal; (a) Modell  $20 \times 20 m^2$  Raster im Vorland + Geländekanten; (b) DGM-Datenreduktion mittels adaptiver TIN-Verdichtung,  $\Delta z_{max}=20 cm$



**Abbildung 6.3:** Visualisierung der Sohl Schubspannungen  $[N/m^2]$  eines HQ100 ( $463 m^3/s$ ) im Bereich der Spiegelfabrik Lachmair; (a) Modell  $20 \times 20 m^2$  Raster im Vorland + Geländekanten; (b) DGM-Datenreduktion mittels adaptiver TIN-Verdichtung,  $\Delta z_{max}=20 cm$

wie im konkreten Beispiel durch die Wehranlage Lachmair. In der Abb. 6.1 ist die Topographie des Untersuchungsgebiet als DOM-Schummerung dargestellt. In dieser Grafik finden sich auch die Umrisse der Gebiete eingetragen, welche in den Abb. 6.2, 6.3 bzw. 6.4 dargestellt sind und die Grundlage für die kritische Diskussion bilden. Als Datenbasis für die Ableitung des DGM-W standen ALS-Punkte in einem regelmäßigen 1m-Raster sowie Querprofile aus terrestrischer Vermessung im Abstand von 50m zur Beschreibung des Gewässerbettes zur Verfügung.

Den linken (a) und rechten (b) Grafiken der Abb. 6.2, 6.3 bzw. 6.4 liegt jeweils eine unterschiedliche Aufbereitung der Topographie zugrunde. Im jeweils linken Beispiel (a) ist das hydraulische Berechnungsnetz aus einem regelmäßigen 20 m-Gitter und Geländekanten aufgebaut, wobei der Grundriss der Kanten aus Plänen stammt und die Höhen aus den Laserdaten interpoliert sind. Für die rechten Beispiele wurde aus dem DGM-W ein adaptives kartesisches



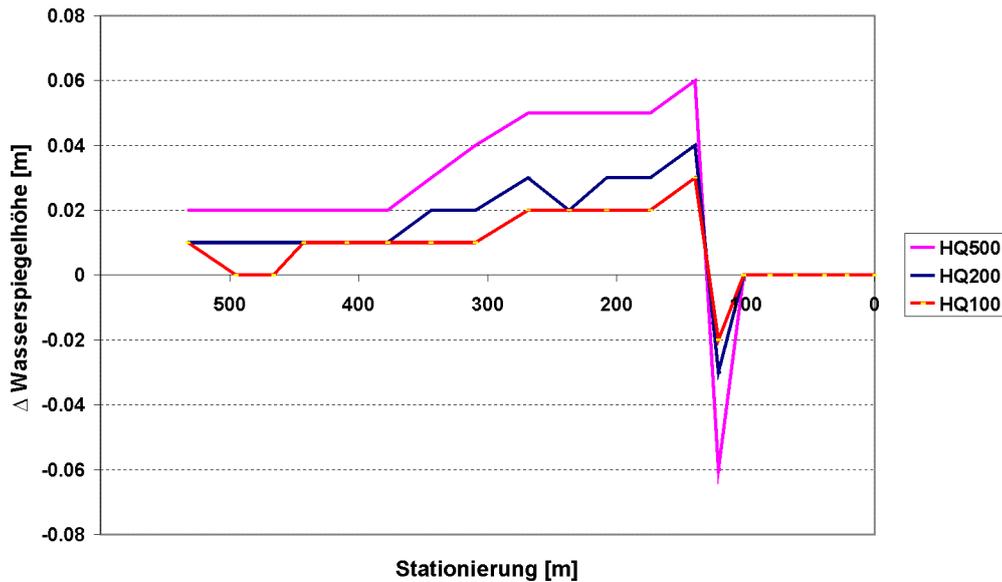
**Abbildung 6.4:** Visualisierung der Überflutungsbereiche bzw. der Wassertiefen eines HQ100 ( $463 \text{ m}^3/\text{s}$ ) im Bereich oberhalb der Wehranlage Lachmair; (a) Modell  $20 \times 20 \text{ m}^2$  Raster im Vorland + Geländekanten, (b) DGM-Datenreduktion mittels adaptiver TIN-Verdichtung,  $\Delta z_{\max} = 20 \text{ cm}$

Gitter (adaptive TIN-Verdichtung mit hierarchischer Unterteilung gemäß Kapitel 4, Variante T1,  $\Delta z_{\max} = 20 \text{ cm}$ ) abgeleitet. Daraus ergibt sich je nach Geländesituation ein variables Gitter mit Kantenlängen von 2 m, 4 m, 8 m, 16 m oder 32 m. Im Gegensatz zu (a) sind in (b) auch Gebäude in den Geometriedaten enthalten. Die Berücksichtigung der Geländekanten erfolgt hier nur implizit über die adaptive Gitterverdichtung.

Aus Abb. 6.2 ist ersichtlich, dass es bei der Variante (a) zu einer Ausuferung des Flusses über den Bahndamm westlich des Kamps hinaus kommt. In (b) hingegen ist der abflusswirksame Bereich durch den Bahndamm begrenzt und der Fließquerschnitt daher schmaler. Aus diesem Grund (Kontinuitätsgleichung) ergibt sich eine erhöhte Fließgeschwindigkeit im Flussschlauch, woraus auch eine Erhöhung der Sohlschubspannung resultiert. Anhand der beiden Abb. 6.2 und 6.3 ist auch der Einfluss von Bauwerken in den Vorländern auf die hydraulischen Parameter im Flussschlauch zu erkennen. Besonders deutlich tritt dieser Effekt bei der Abb. 6.3 auf, wo es vor allem im Bereich der Gebäude im östlichen Vorland zu einer Erhöhung der Sohlschubspannung von  $70 \text{ N}/\text{m}^2$  auf über  $100 \text{ N}/\text{m}^2$ . Bedingt durch die Stauwirkung der Bauwerke steigt das Energieliniengefälle an, um die Kontinuität zu gewährleisten, was in der Folge zu einer Erhöhung der Sohlschubspannung im unmittelbaren Bauwerksbereich führt.

Besonders kritisch muss die Ausuferung des Kamp über den Bahndamm hinaus im linken Bild (a) der Abb. 6.2 diskutiert werden. In der Variante (a) ist der Bahndamm weder durch Geländekanten noch durch Einzelpunkte erfasst und es kommt laut HN-Modell zu einem Überlaufen des Wassers. In der Berechnungsvariante (b) mit adaptivem Gitter sind die Geländekanten implizit über eine verdichtete Netzpunktanordnung abgebildet. Bei dieser Variante tritt keine Überströmung auf. Sind also im Zuge der DGM-W-Generierung keine Geländekanten bestimmt worden, dann gelingt eine Berücksichtigung im HN-Modell auch mittels einer entsprechend dichten Punktverteilung, wie sie sich aus der Datenreduktion automatisch ergibt.

In der Abb. 6.4 ist der Einfluss verschiedener Geometrien auf die Wasserspiegellagen und die in der Folge ausgewiesenen Überflutungsbereiche dargestellt. Gegenüber der Variante (a) ist bei einer Modellierung der Geometrie nach Variante (b) zu erkennen, dass die Anschlaglinie infolge der genaueren Berücksichtigung der Talraum-Geometrie die natürlichen Verhältnisse



**Abbildung 6.5:** Wasserspiegelländerung durch ein Gebäude als Ergebnis einer 1D-HN-Modellierung, Stationierung des Gebäudes: ca. 150 m

wesentlich präziser wiedergibt. Durch die Einbeziehung der Bauwerke in der Variante (b) kommt es zu einem lokalen Aufstau flussauf der Gebäude. Neben der Erhöhung des Wasserspiegels und dem damit verbundenen Effekt auf die Anschlaglinie ergibt sich ferner die bereits weiter oben beschriebene Erhöhung der Sohlschubspannung.

Anhand einer 1D-HN-Modellierung kann der Einfluss eines einzelnen Gebäudes auf die Änderung der Wasserspiegellage demonstriert werden. Ein Gebäude im Überflutungsgebiet entzieht dem Querschnitt einerseits abflusswirksame Fläche, und andererseits wirkt es sich auch als Rauigkeitselement direkt auf die Abflussleistung aus. Die Ergebnisse für drei verschiedene Abflüsse (HQ100, HQ200, HQ500) sind in Abb. 6.5 dargestellt. Daraus ist zu erkennen, dass es flussauf des Gebäudes (Stationierung  $\approx 150$ m) zu einer maximalen Aufspiegelung von 6cm kommt. Durch die Aufspiegelung erhöht sich flussab des Gebäudes das Energieliniengefälle. Als Kompensation kommt es in der Folge zu einem Fließwechsel von strömendem zu schießendem Abfluss. Strömendes Regime ergibt sich erst wieder nach etwa 50m Fließstrecke. Der Effekt von 6cm bei HQ500 ist zwar in Bezug auf den Hochwasserschutz in diesem Fallbeispiel nicht allzu kritisch zu bewerten, doch beinhalten die Ergebnisse der Abb. 6.5 nur den Einfluss eines Einzelobjektes. Durch die Summenwirkung, die von mehreren Gebäuden im Hochwasserabflussraum erzielt wird, ist eine beträchtliche Verschlechterung der Hochwasserabfuhr zu erwarten.

Als Schlussfolgerung aus diesen Ausführungen sollten alle Bauwerke des Überflutungsreichs konsequent ins DGM-W aber auch ins hydraulische Netz einbezogen werden. Für die mehrdimensionale HN-Modellierung ist dabei eine Berücksichtigung als Blockmodell ausreichend. Eine detailgetreue Rekonstruktion insbesondere der Dachlandschaften ist aus hydraulischer Sicht nicht erforderlich. Weiters kann festgehalten werden, dass Geländekanten die Qualität des HN-Modells erhöhen. Für hydraulische Anwendungen ist allerdings weniger der Lage- sondern vielmehr der Höhengenaugigkeit höchste Bedeutung beizumessen. Geländekanten, deren Höhen nur unzureichend genau erfasst sind, bringen keinerlei Qualitätsver-

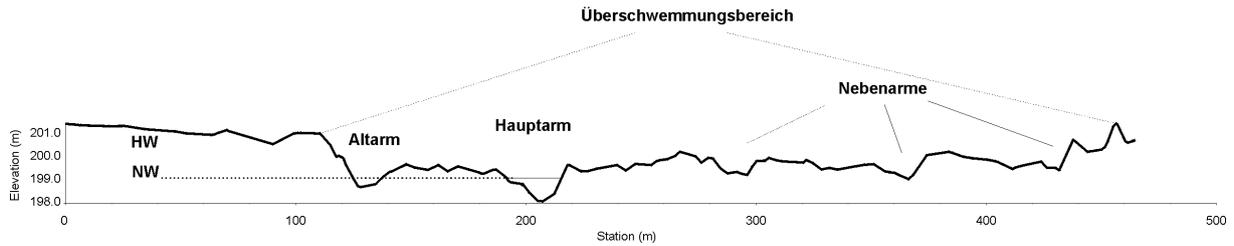


*Abbildung 6.6: Beispiel 2, Auwald bei Hadersdorf am Kamp, DGM-W, Schummerung überlagert mit Höhenkodierung*

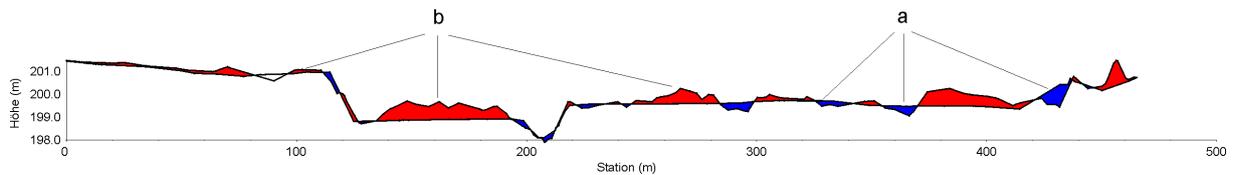
besserung der HN-Modellierung mit sich. Bei der Modellierung von Geländekanten aus ALS-Daten etwa ist, wie bereits im Abschnitt 3.4 festgehalten, möglichst die originale Punktwolke als Datengrundlage zu verwenden und nicht bereits geglättete Rasterdaten. Die implizite Berücksichtigung der Kanten über eine verdichtete Punktanordnung, wie sie sich aus der DGM-Datenreduktion ergibt, hat sich jedenfalls als ernsthafte Alternative erwiesen.

## 6.2 Beispiel 2: Auwald bei Hadersdorf am Kamp

Im Gegensatz zum Beispiel 1 ist dieser Abschnitt des Kamps durch ein geringeres Gefälle von 0.7‰ gekennzeichnet. Es handelt sich um den Unterlauf des Flusses, der bei Hadersdorf am Kamp in das Tullner Feld eintritt und schließlich in die Donau mündet. Der Flusstyp ist hier pendelnd und das Tal als Sohltal ausgeprägt. Neben dem Hauptarm erfolgt der Abfluss lokal auch in Seitenarmen und Sedimentinseln. Die Talbreite ist hier mit 250-1600m wesentlich größer als im Beispiel 1, was durch die flache Topographie des Tullner Beckens begründet ist. Bei dem konkret in Abb. 6.6 dargestellten Ausschnitt handelt es sich um einen Auwald bei Hadersdorf am Kamp. Hier erfolgt der Abfluss bei Nieder- und Mittelwasser im Hauptarm, doch bereits bei jährlichen Hochwasserereignissen (HQ1) sind die Alt- und Nebenarme



**Abbildung 6.7:** Profilschnitt, gegliederte Topographie mit Hauptarm, Altarm und im NW-Fall nicht angebundnen Seitenarmen; Datenbasis: DGM-W reduziert mittels Adaptiver TIN-Verdichtung,  $\Delta z_{max}=20\text{ cm}$  (vgl. Abb. 6.9)

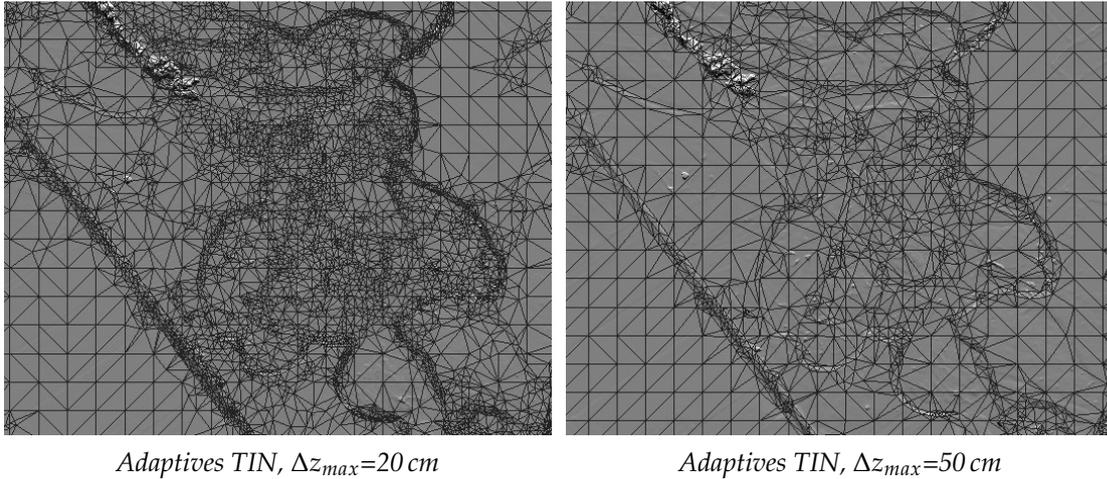


**Abbildung 6.8:** Profilschnitt, Gegenüberstellung von künstlichem Auf- und Abtrag bei einer Modellierung mit 20 m-Gitter + Geländekanten (a) gegenüber adaptiver TIN-Verdichtung (b); rot: TIN über 20 m-Gitter (Abtrag), blau: TIN über 20 m-Gitter (Auftrag)

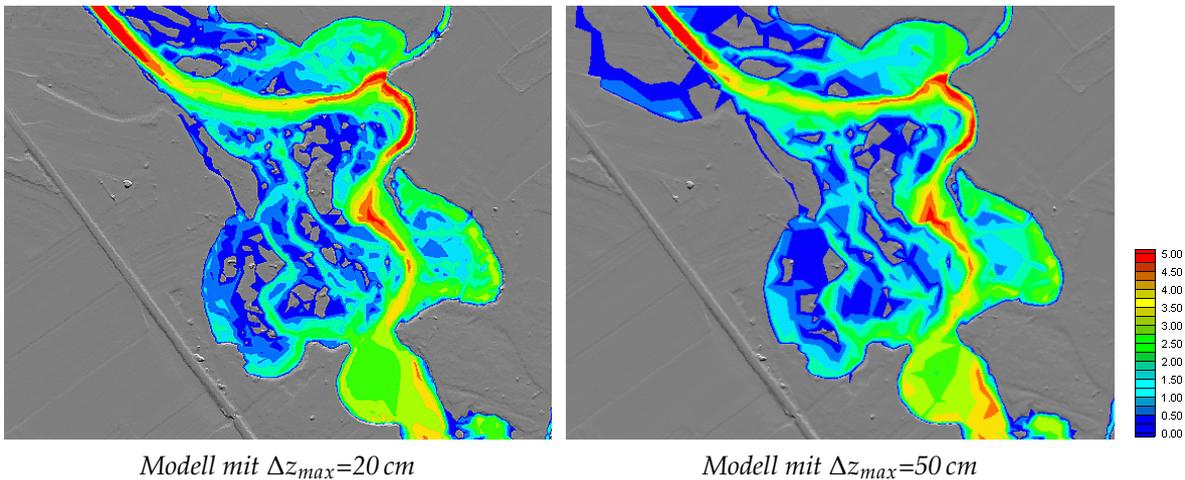
benutzt. Aufgrund des pluvio-nivalen Abflussregimes des Flusses treten Überflutungen des Auwaldes daher meist mehrmals pro Jahr (Schneeschnmelze, Starkregen) auf. Im Hochwasserfall dient der Auwald zahlreichen Fischarten als Rückzugsraum. Darüber hinaus sind die stehenden Wasserflächen, welche sich nach einer Benetzung im Hochwasserfall ergeben, für die Entwicklung bestimmter Fischarten von großer Bedeutung. Aus diesem Grund ist der Auwald ökologisch sehr wertvoll.

Die Abb. 6.6 zeigt ein DGM-W des Auwaldes und vermittelt einen Eindruck von der stark gegliederten Topographie. Neben dem ausgeprägten Hauptarm sind weiters ein Alt- und mehrere Seitenarme deutlich zu erkennen. Auch der Rand des Auwaldes ist durch eine Geländestufe markant vom umgebenden Vorland abgegrenzt. Die Detailstrukturen sind allerdings nicht von einzelnen Geländekanten geprägt, sondern durch morphodynamische Prozesse zustande gekommen (Sedimenttransport). Eine Modellierung der Geometrie in Form ausgewählter Kanten ist hier daher nicht zielführend. Vielmehr muss die gegliederte Struktur durch eine entsprechende Punktverteilung im Zuge der Datenreduktion und Datenaufbereitung abgebildet werden.

Wie schon im Beispiel 1 wird auch hier zunächst ein geometrisches Modell in Form eines regelmäßigen 20 m-Gitters inkl. Geländekanten (a) mit dem aus adaptiver TIN-Verdichtung (b) verglichen, wobei (b) aus dem hochauflösenden DGM-W durch Datenreduktion ( $T2$ ,  $\Delta z_{max}=20\text{ cm}$ ) ermittelt wurde. Aus der Variante (b) wurde auch jener in Abb. 6.7 dargestellte Profilschnitt extrahiert, der in der Grundrissdarstellung der Abb. 6.6 eingezeichnet ist. Im Schnitt sind wieder deutlich der derzeitige Hauptarm, ein flussab angebundener Altarm sowie zahlreiche periodisch angebundene Nebenarme zu erkennen. Generell ist das gesamte Profil durch diverse Feinsedimentablagerungen stark gegliedert. Trotz Datenreduktion erkennt man, dass die Detailstrukturen dennoch erhalten bleiben. Im Gegensatz dazu zeigt die Abb. 6.8 eine Gegenüberstellung von künstlichem Auftrag (blau) und Abtrag (rot), wie er sich im Vergleich zu einer Modellierung der Geometrie nach Variante (a) ergibt. Dabei ist ersichtlich, dass der Haupt-



**Abbildung 6.9:** Visualisierung des Auwaldes oberhalb von Hadersdorf am Kamp, Hydraulische Netze auf Basis Adaptiver TIN-Verdichtung des DGM-W; links:  $\Delta z_{max}=20\text{ cm}$ , rechts:  $\Delta z_{max}=50\text{ cm}$



**Abbildung 6.10:** Visualisierung des Auwaldes oberhalb von Hadersdorf am Kamp, Wassertiefen eines HQ1 ( $89\text{ m}^3/\text{s}$ )

arm und die Böschungen am Rand des Auwaldes gut abgebildet sind, da diese als Kanten erfasst sind. Innerhalb des Auwaldes hingegen gehen die Detailstrukturen gänzlich verloren. Aus Abb. 6.8 ist ferner deutlich eine wesentliche Überschätzung der benetzten Fläche bzw. des hydraulischen Radius bei bordvollem Abfluss erkennbar. Das Fassungsvermögen des gesamten Auegebietes wird durch eine Modellierung der Geometrie nach Variante (a) um mehr als 10 % überschätzt. Dies kann bei Modellierungen zum Zweck des Hochwasserschutzes zu einer Verfälschung des Ergebnisses führen. Darüber hinaus haben die Vereinfachungen auch einen Einfluss auf die Habitatmodellierung, was im Folgenden diskutiert wird.

Der Abb. 6.9 liegen zwei unterschiedliche Aufbereitungsvarianten desselben Auegebietes zugrunde. In beiden Fällen wurden die Gitterpunkte des originalen DGM-W mittels adaptiver TIN-Verdichtung reduziert. Im ersten Fall erfolgte die DGM-Datenreduktion dabei mit einer maximalen Höhentoleranz von  $\Delta z_{max}=20\text{ cm}$ , während die Höhentoleranz im zweiten Fall mit

50cm angesetzt wurde. Die Auswirkungen dieser unterschiedlichen geometrischen Grundlage auf die benetzte Fläche und die Wassertiefenverteilung ist in der Abb. 6.10 dargestellt. Vor allem in den ökologisch sensiblen Flachwasserbereichen kommt es bei dem Modell  $\Delta z_{max}=50\text{cm}$  zu einer Überschätzung der nutzbaren Flächen. Gerade die flachen Gewässerbereiche sind für juvenile Altersstadien sämtlicher Leitfischarten im Kamp (Nase, Barbe, ...) von größter Bedeutung.

An diesem Beispiel erkennt man, dass die Erfassung von relevanten Gewässerstrukturen nicht immer über Geländekanten erfolgen kann, sondern auch ein entsprechend flächenmäßiger Aufbereitungsansatz vonnöten ist.

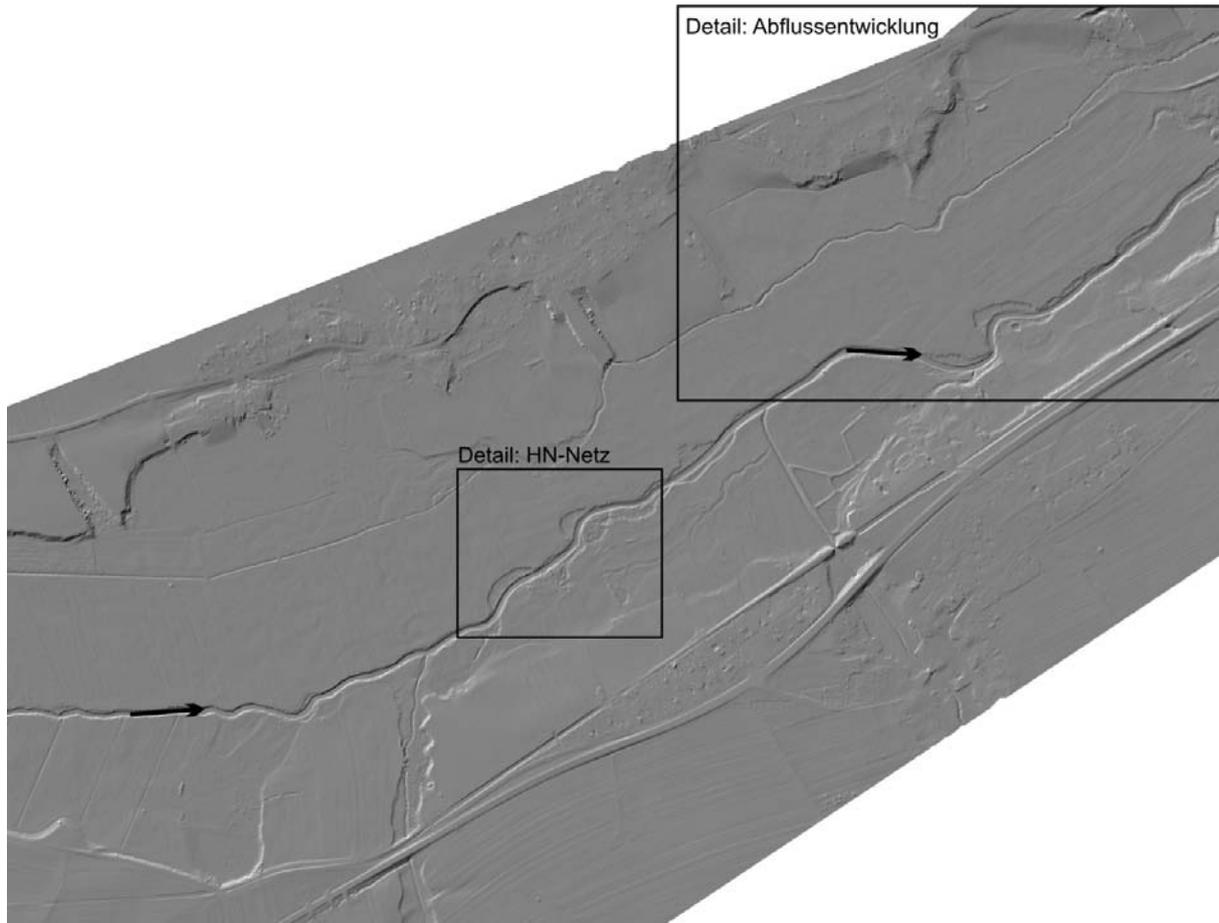
### 6.3 Beispiel 3: Unterlauf der Lainsitz

Die Beispiele 3 und 4 stammen aus einem Projekt entlang der Lainsitz, welches am I.P.F. im Rahmen des Christian Doppler Labors *Räumliche Daten aus Laserscanning und Fernerkundung* in Zusammenarbeit mit der Fa. GeoConsult (Wien) durchgeführt wurde. Die Lainsitz ist ein Fluss im nordwestlichen Waldviertel mit der Flussordnungszahl 5 nach Horton-Strahler. Sie entspringt nahe Karlstift (936m) an der Grenze zu Tschechien und fließt dann durch Weitra (562m) sowie Gmünd (499m). Anschließend verlässt sie österreichisches Territorium und mündet schließlich bei Thein in Tschechien in die Moldau.

Das Untersuchungsgebiet des Beispiels 3 befindet sich zwischen Eichberg und Wielands (Bezirk Gmünd, NÖ) im Unterlauf der Lainsitz. Die Länge des Flussabschnittes beträgt etwa 2.5 km. Bei einem Höhenunterschied von 5.7 m ergibt sich daraus ein mittleres Gefälle von 2.3 ‰. Der Fluss zeigt hier Übergänge zum mäandrierenden Flusstyp mit geringen Fließgeschwindigkeiten. Es herrscht feines Sohlsubstrat vor und die Prallhänge sind zum Teil als Steilufer ausgebildet. Das Vorland besteht aus flachen Wiesen und Feldern, wodurch sich eine große benetzbare Überschwemmungsfläche ergibt. In diesem Untersuchungsabschnitt sind zwei Brücken vorhanden, wobei eine mit dem anschließenden Straßendamm als Hochwasserbarriere wirkt und somit einen großen Einfluss auf das Abflussgeschehen ausübt. Durch den Straßendamm führt ein Rohrdurchlass, welches ebenfalls einen gewissen Abfluss zulässt. Generell ist das Gebiet orografisch linksufrig von einem Graben begleitet, rechtsufrig wirkt ein Bahndamm als Abflusshindernis.

Die Datengrundlage für die Beschreibung der Topographie als DGM-W bildete ein Laserscanner-Flug mit einer mittleren Punktdichte von  $1 \text{ Pkt}/\text{m}^2$ . Das Gewässerbett wurde durch terrestrisch gemessene Querprofile (GPS) im Abstand von ca. 100 m erfasst. Zusätzlich zu den regelmäßig angeordneten Profilen wurden auch Wehre und Widerlager von Brücken durch entsprechende Messquerschnitte einbezogen. Aus diesem Datenmaterial erfolgte die Ableitung des DWM und der WLГ zum Zeitpunkt des ALS-Fluges sowie die Verdichtung der Querprofile innerhalb der WLГ gemäß den in Kapitel 3 beschriebenen Verfahren. Abgesehen von der Oberkante der Uferböschung wurde auf eine explizite Modellierung von Geländekanten verzichtet, da die ALS-Punkte nur als bereits gefiltertes 1m-Raster vorlagen. Die Topographie des Untersuchungsgebietes (Schummerung des DGM-W) ist in Abb. 6.11 dargestellt.

Beim vorliegenden Beispiel wird der Fokus auf den Vergleich verschiedener Aufbereitungsvarianten der Geometrie gelegt. Dazu wurden zunächst aus dem originalen DGM-W, entsprechend der in den Kapiteln 4 und 5 beschriebenen Verfahren, jeweils unterschiedliche Dreiecksnetze generiert. Der Aufbau der Netze erfolgte dabei bis auf eine Ausnahme immer mittels



**Abbildung 6.11:** Beispiel 3, Unterlauf der Lainsitz, DGM-W (Hybrides Geländemodell: 1m-Raster, Brückenwiderlager als Geländekanten)

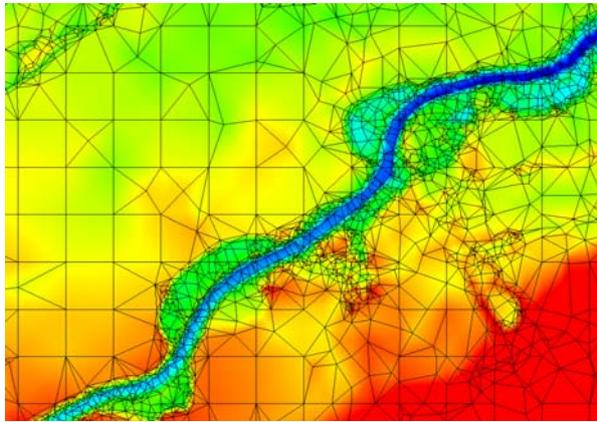
adaptiver TIN-Verdichtung und unregelmäßiger Unterteilung (T2, siehe Kapitel 4.5.4). Diese Reduktionsmethode wurde gewählt, weil sie den höchsten Grad an Kompression aufweist und gleichzeitig das verwendete HN-Modell (Hydro\_AS-2D) erfahrungsgemäß mit dieser Datengrundlage plausible Ergebnisse liefert. Die Höhentoleranzen pro DGM-W-Gitterpunkt wurden dabei gemäß Abschnitt 5.2 für jede Variante unterschiedlich angesetzt. Die Knotenpunkte und Geländekanten wurden dann in den Netzgenerator von SMS (Surface-water Modeling System) eingelesen, wo noch automatisch eine Zusammenfassung von Dreiecks- zu Vierecksflächen erfolgte, sofern dies hydraulisch sinnvoll war. Schließlich erfolgte für jede Variante eine 2D-HN-Simulation für HQ5 ( $30 \text{ m}^3/\text{s}$ ) mit dem Programm Hydro\_AS-2D. Folgende Geometrie-Varianten wurden einander dabei gegenübergestellt:

- (a) Adaptives TIN,  $\Delta z_{max} = \text{const} = 20 \text{ cm}$
- (b) Adaptives TIN,  $\Delta z_{max}$  variabel, Zonenmodell gemäß 5.2.1
- (c) Adaptives TIN,  $\Delta z_{max}$  variabel, abhängig von der Distanz zum Fluss gemäß 5.2.2
- (d) Adaptives TIN,  $\Delta z_{max}$  variabel, abhängig von der Höhe über dem Fluss gemäß 5.2.3
- (e) Regelmäßiges 16 m-Gitter

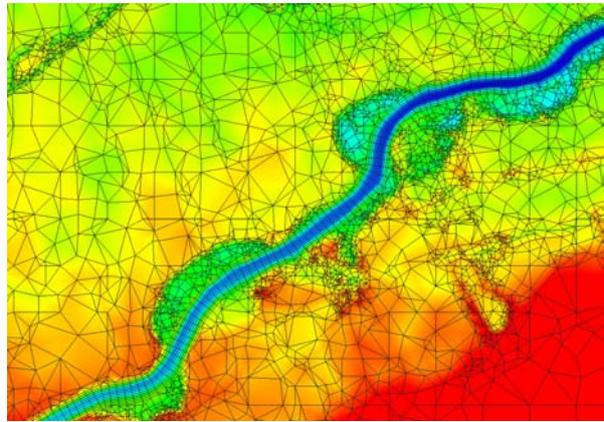
Bei den Aufbereitungsvarianten (b) bis (e) ist darüber hinaus das Gewässerbett bis zur Oberkante der Uferböschung profilartig, an die Fließrichtung angepasst, aufbereitet. Der Punktabstand im Profil beträgt dabei 1.5 m bei einem Profilabstand von 5 m. Die Punktanordnung der Varianten mit variabler Höhentoleranz sind bereits im Kapitel 5 in den Abb. 5.1, 5.2 und 5.3 dargestellt. Die Abb. 6.12 zeigt für einen Ausschnitt (Detail 1) das jeweilige hydraulische Netz.

Bei der Variante (a) wird auf die hydraulischen Besonderheiten des Flussschlauches keine spezielle Rücksicht genommen. Die Gitterpunkte des DGM-W werden hier rein auf Basis geometrischer Kriterien so reduziert, dass eine maximale Höhentoleranz  $\Delta z_{max}$  von 20 cm gegenüber dem originalen DGM-W nicht überschritten wird. Die wesentlichen Geländeformen (Uferböschung, Gräben, Dämme, ...) sind durch die Datenverteilung gut abgebildet. Innerhalb der Überschwemmungsebene (Wiesen, Felder) sind allerdings kaum Detailstrukturen zu erkennen. Beim Zonenmodell (b) wurde dieser unmittelbare Vorlandbereich mit einer niedrigeren Höhentoleranz von  $\Delta z_{max}=10\text{cm}$  ausgedünnt. Feinstrukturen, vor allem die quer zur Flussachse verlaufenden Felddraine, treten hier bereits ansatzweise zutage. Bei der Steuerung der maximalen Höhentoleranz in Abhängigkeit vom Abstand zur Gewässerachse (c) ist zu beobachten, dass die Detailstrukturen mit zunehmender Entfernung abnehmen, während bei der Variante (d) mit Steuerung von  $\Delta z_{max}$  abhängig vom Höhenunterschied über dem Fluss vor allem die tief gelegenen Detailstrukturen, wie Felddraine, am deutlichsten ausgeprägt sind. Mit zunehmender Höhe nimmt der Detaillierungsgrad hingegen ab. Die Variante (e) schließlich wurde in den Vergleich mit aufgenommen, um Aussagen gegenüber einer sehr einfachen Aufbereitung der Geometrie treffen zu können. In dieser Variante ist lediglich das Gewässerbett detailliert abgebildet. Bei dem aus hydraulischer Sicht strukturierten Rechengitter geht die Struktur der Topographie verloren.

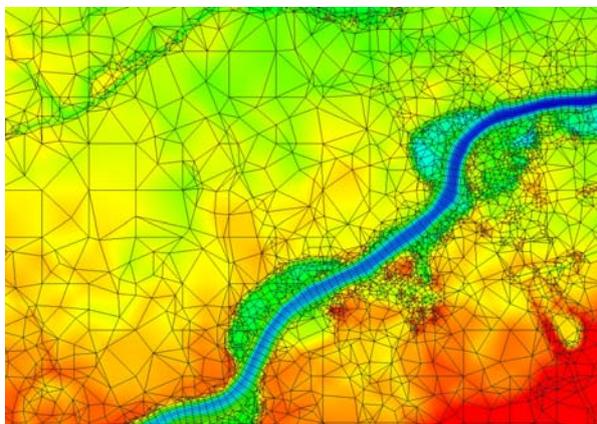
Neben den geometrischen Aspekten interessieren vor allem aber die Auswirkungen der unterschiedlichen Geometrien auf die Ergebnisse der HN-Modellierung. Als Erstes gibt die Abb. 6.13 einen Überblick über die berechneten Fließgeschwindigkeiten und -vektoren. Dabei wurde wie bereits in der Abb. 6.12 ein Ausschnitt aus dem Untersuchungsgebiet gewählt, welcher im Bereich der Prallhänge ausgeschwemmte Uferbereiche aufweist. Ähnlich dem Auwald des Beispiels 2 sind diese durch Mäandrierung des Flusses zustande gekommen. Zum Zeitpunkt der ALS-Befliegung lagen diese Bereiche trocken, wodurch ihre gegliederte Topographie erfasst werden konnte. Im Vergleich der fünf Varianten fällt zunächst einmal die um 0.6-0.8 m/s verminderte Fließgeschwindigkeit innerhalb des Flussbettes bei der Variante (a) auf. Im Gegensatz zu allen anderen Varianten ist bei (a) die Datenanordnung im Gewässerbett nicht profilartig entlang der Flussachse ausgerichtet, sondern im Zuge der DGM-Datenreduktion ausschließlich durch die geometrischen Gegebenheiten entstanden. Auf die Auswirkungen dieser zusätzlichen geometrischen Rauigkeit im Flussbett wird detaillierter im Beispiel 4 eingegangen. Weiters erkennt man aus Abb. 6.13, dass die Fließgeschwindigkeiten in den prallhangseitigen Retentionsbereichen bei (e) geringer sind als bei den übrigen Varianten. Auch ist hier die geometrische Abgrenzung zum Vorland weniger detailliert. Die verminderte Fließgeschwindigkeit ergibt sich in Folge einer geringeren Wassertiefe, die wiederum in der generalisierten Topographie ihren Ursprung hat. In den Varianten (a) bis (d) hingegen ist die gegliederte Topographie im hydraulischen Netz abgebildet und spiegelt sich in einer detaillierten Aussage über die Fließgeschwindigkeiten wider. Auch am Verlauf der Fließvektoren kann man die Verbesserung durch eine angepasste Aufbereitung der Geometrie erkennen. Während sich aus dem HN-Modell nach Variante (e) im linken unteren Bildbereich teilweise unrealistische Fließrichtungen ergeben, zeigen vor allem die Varianten (b), (c) und (d) mit variabler Höhentoleranz ein sehr abgestuftes Bild.



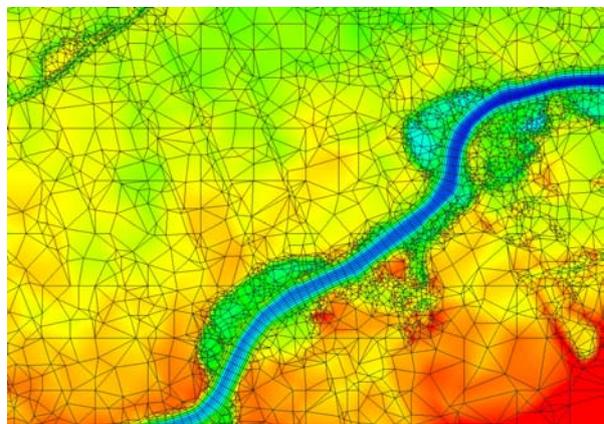
(a),  $\Delta z_{max} = \text{const} = 20 \text{ cm}$



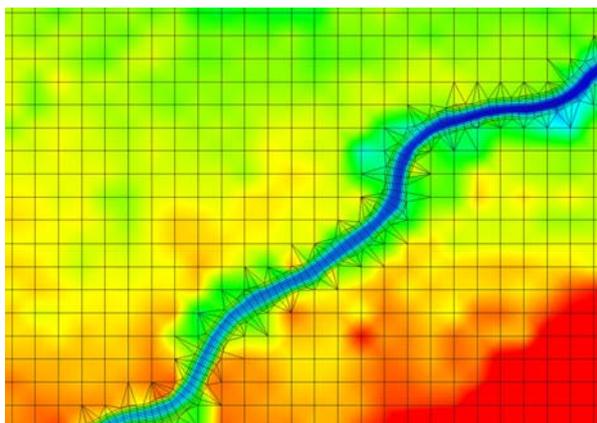
(b)  $\Delta z_{max} = \text{variabel} = \text{Zonen-abh\u00e4ngig}$



(c),  $\Delta z_{max} = \text{variabel} = \text{Distanz-abh\u00e4ngig}$

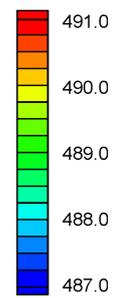


(d),  $\Delta z_{max} = \text{variabel} = \text{H\u00f6hen-abh\u00e4ngig}$



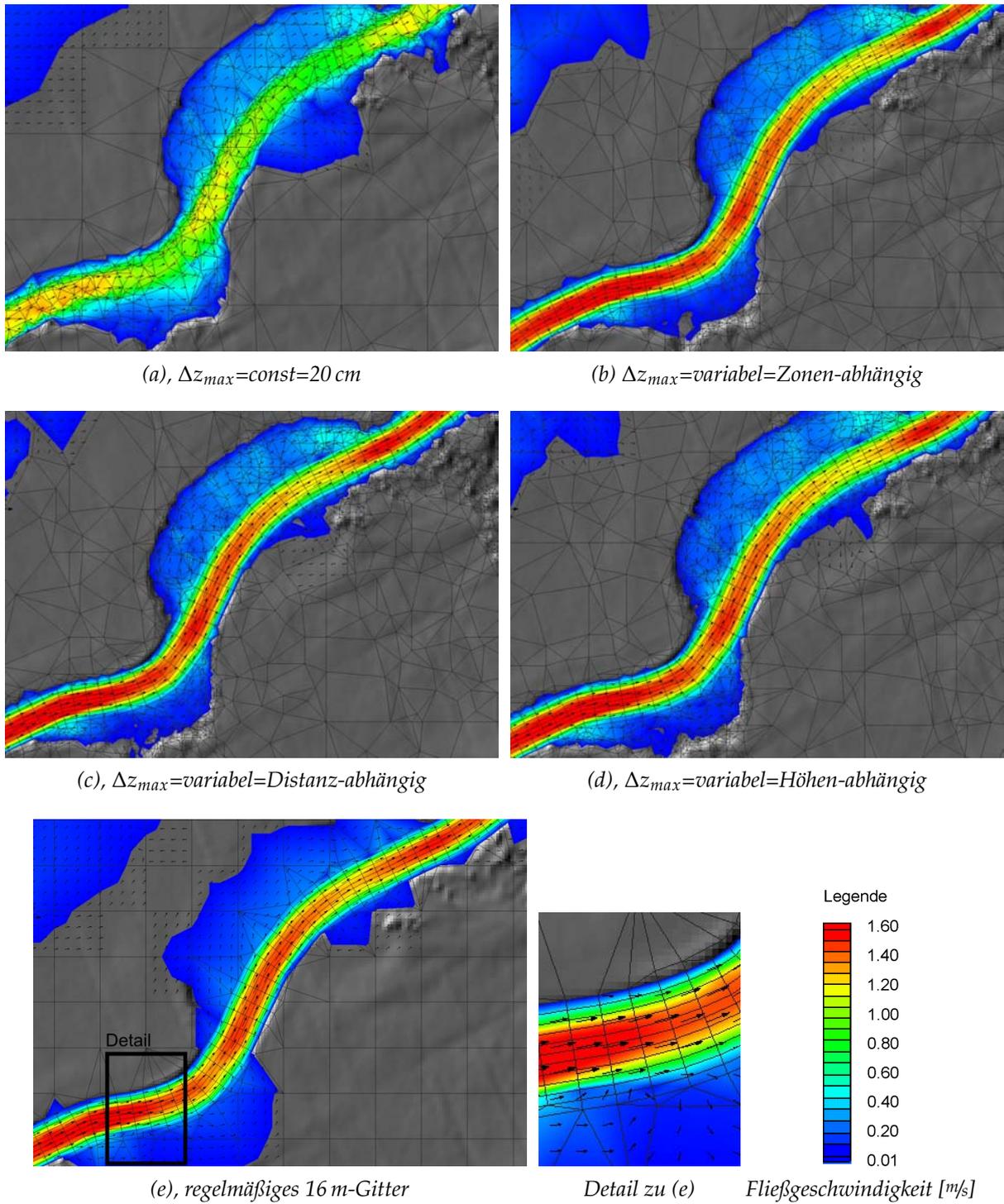
(e), regelm\u00e4\u00dfiges 16m16 m-Gitter

Legende

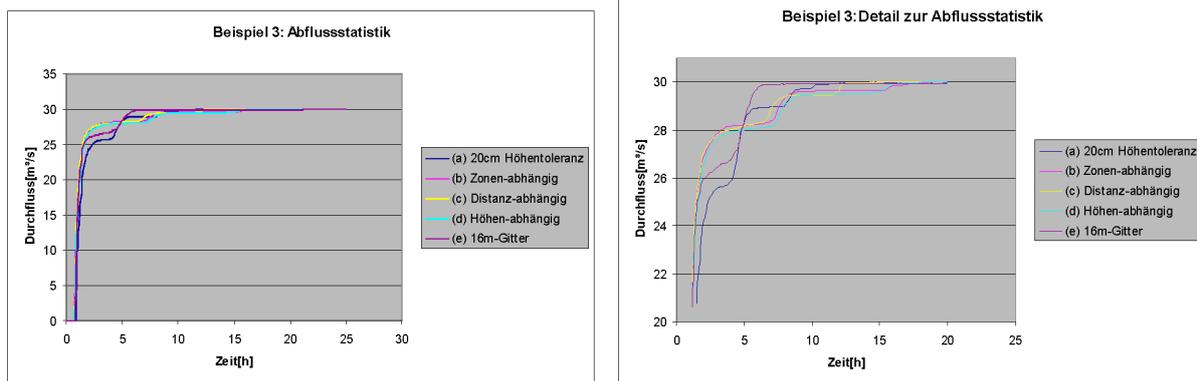


Gel\u00e4ndeh\u00f6he [m]

**Abbildung 6.12:** Hydraulisches Netz der unterschiedlichen Geometrie-Varianten (a) bis (e), Farbkodierte Visualisierung der Topographie



**Abbildung 6.13:** Flie\u00dfgeschwindigkeit (farbkodiert) und Flie\u00dfvektoren (Pfeile) bei HQ5 ( $30 \text{ m}^3/\text{s}$ ) als Ergebnis der 2D-HN-Modellierung auf Basis der unterschiedlichen Geometrie-Varianten (a) bis (e)



**Abbildung 6.14:** Zeitliche Entwicklung der Abflussmengen am Ausströmrand des 2D-HN-Modells bei HQ5 ( $30 \text{ m}^3/\text{s}$ ) auf Basis der unterschiedlichen Geometrie-Varianten (a) bis (e); links: Gesamtentwicklung bis zum Erreichen eines stationären Zustandes, rechts: Detailausschnitt mit zwei markanten Schwellen in der Abflussentwicklung

Neben der Fließrichtung ist ferner das Verhalten des HN-Modells bis zum Erreichen eines stationären Zustandes ( $\text{HQ5}$ ,  $30 \text{ m}^3/\text{s}$ ) auf Basis der unterschiedlichen Geometrie-Varianten interessant. In der Tabelle 6.1 sind für ausgewählte Modellzeitpunkte die jeweils am Ausströmrand ermittelten Abflüsse zusammengestellt. Eine grafische Darstellung der gesamten Abflussentwicklung zeigt die Abb. 6.14, wobei die Grafik auf der rechten Seite einen Detailausschnitt darstellt. Für die einzelnen Varianten ist eine unerwartet unterschiedliche Entwicklung zu erkennen. Auffällig sind in Abb. 6.14 vor allem zwei Schwellen, wo die Zunahme des Abflusses am Ausströmrand für eine längere Periode gebremst ist. Erst nach einer gewissen Zeit kommt es wieder zu einer Zunahme des Abflusses. Auch die Gesamtzeit (Modellzeit), nach der sich stationäre Verhältnisse einstellen, verhält sich für die einzelnen Varianten unterschiedlich.

Zur Klärung der Ursache für die beiden Schwellen in der Abflussentwicklung sind in den Abb. 6.15, 6.16 bzw. 6.17 für drei Geometrie-Varianten die Modellsituationen zu gewissen Zeitpunkten grafisch dargestellt. Bei dem abgebildeten Ausschnitt handelt es sich um die hintere, nord-östliche Hälfte des Untersuchungsgebietes, deren Begrenzung in der Topographieübersicht (Abb. 6.11) eingezeichnet ist.

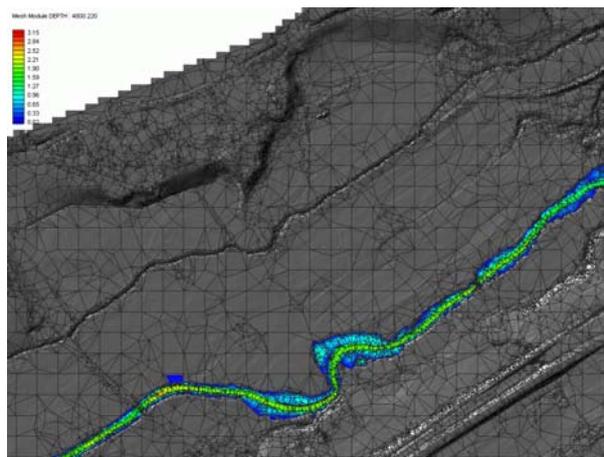
Die Analyse der Abflussentwicklung beginnt mit dem in Abb. 6.16 dargestellten Zonenmodell (b). Das Wasser fließt zunächst im Flussbett (I) bis zum Ausströmrand(II). Ab dann nimmt die

**Tabelle 6.1:** Abflussentwicklung [ $\text{m}^3/\text{s}$ ] bis zu stationären Verhältnissen des HN-Modells bei unterschiedlichen Geometrie-Varianten für HQ5 ( $30 \text{ m}^3/\text{s}$ )

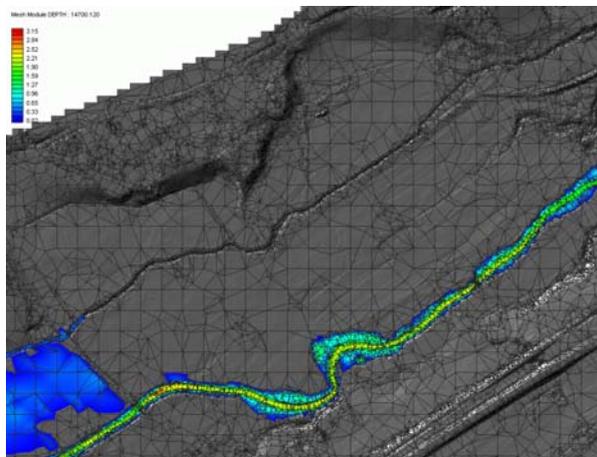
Modell	1h	2h	3h	5h	7h	10h	15h	18h	20h	25h
(a)	11.07	24.14	25.57	28.35	28.98	29.75	29.94	29.96	29.97	29.98
(b)	17.64	26.87	27.83	28.19	28.36	29.63	29.64	29.98	30.00	30.00
(c)	17.76	27.02	27.79	28.17	28.86	29.45	30.00	30.00	30.00	30.00
(d)	16.11	26.52	27.58	27.99	28.15	29.47	29.56	29.99	29.99	30.00
(e)	15.63	25.92	26.44	28.37	29.90	29.91	29.92	29.92	29.92	29.95



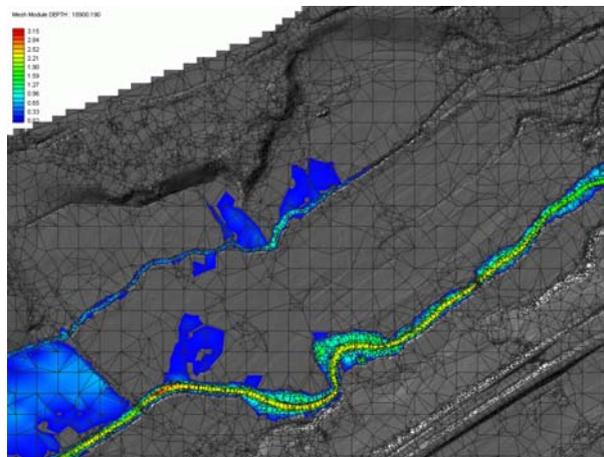
(I) Modellzeit 0:40h



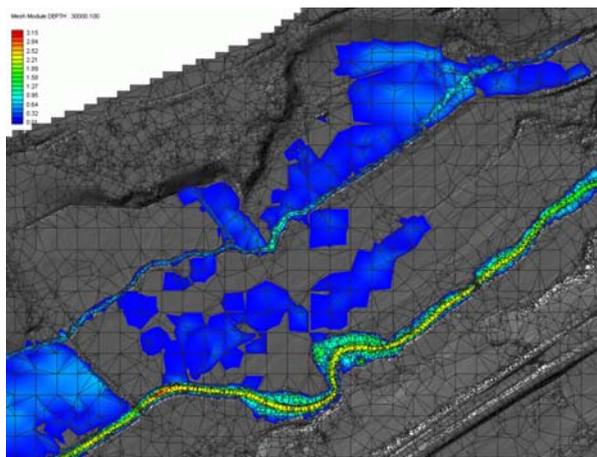
(II) Modellzeit 1:20h



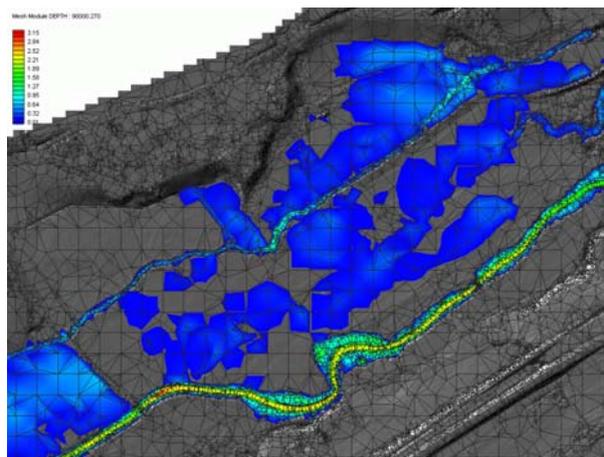
(III) Modellzeit 4:00h



(IV) Modellzeit 5:15h

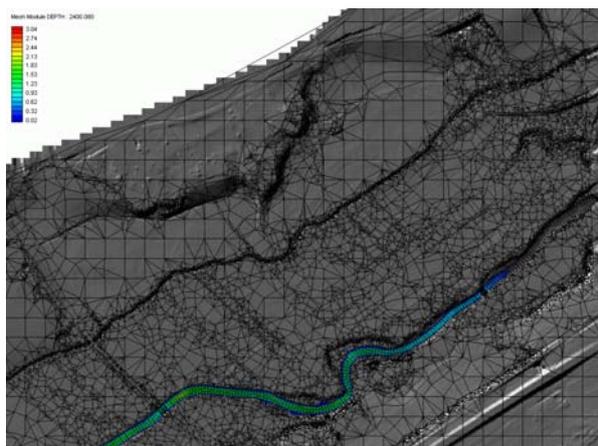


(V) Modellzeit 8:20h

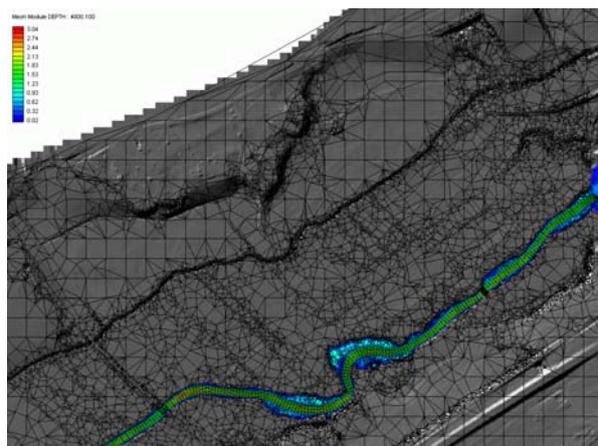


(VI) Modellzeit 25:00h

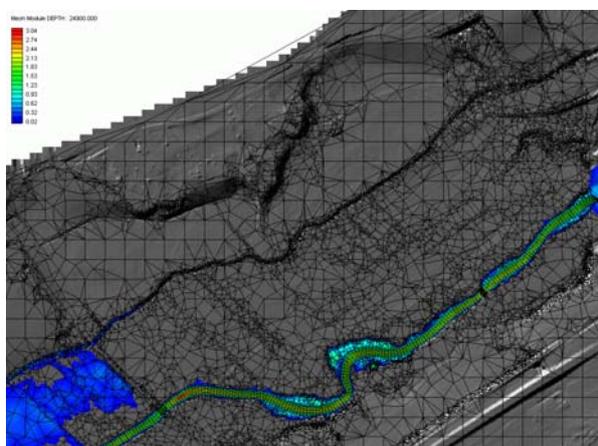
**Abbildung 6.15:** Abflusszustand zu ausgewählten Zeitpunkten im HN-Modell, Geometrie-Variante (a), Adaptives TIN,  $\Delta z_{max}=const=20\text{ cm}$



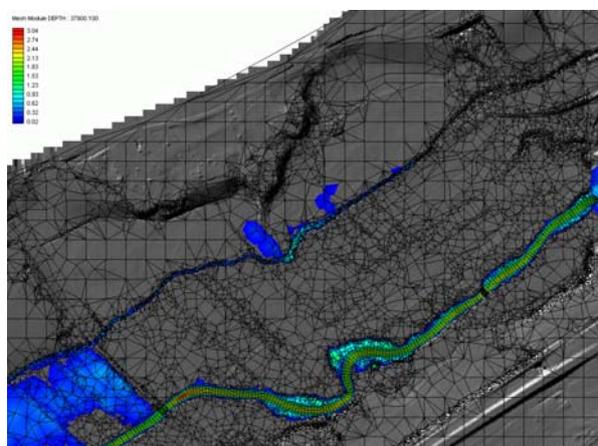
(I) Modellzeit 0:40h



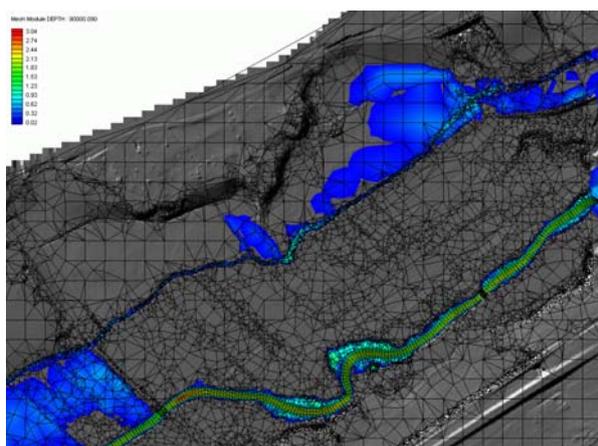
(II) Modellzeit 1:20h



(III) Modellzeit 7:00h

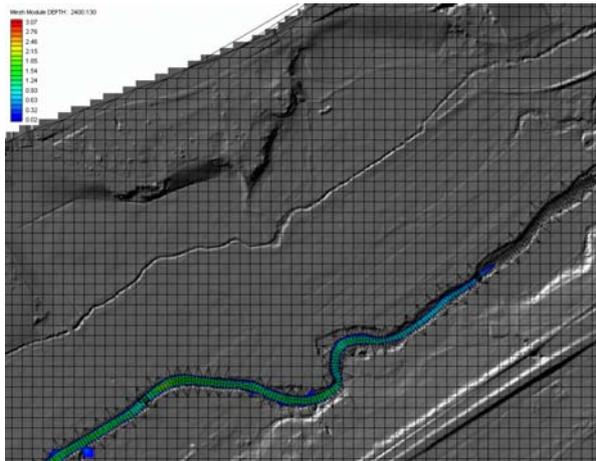


(IV) Modellzeit 10:30h

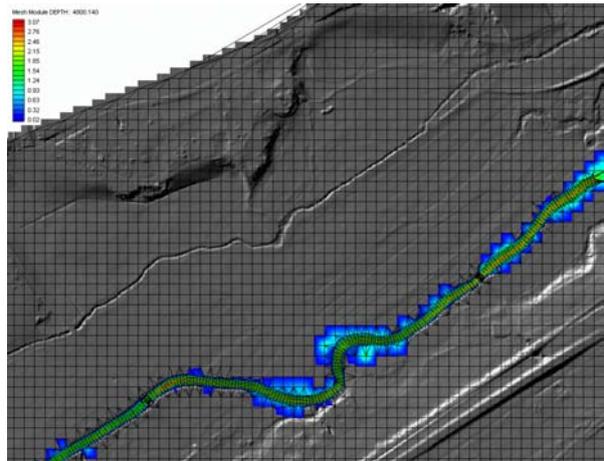


(V) Modellzeit 25:00h

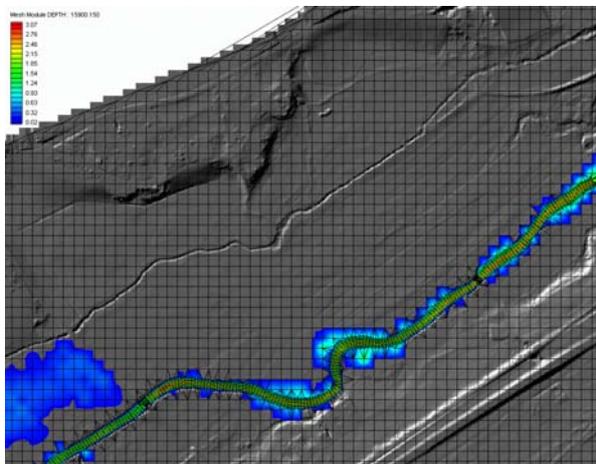
**Abbildung 6.16:** Abflusszustand zu ausgewählten Zeitpunkten im HN-Modell, Geometrie-Variante (b), Adaptives TIN,  $\Delta z_{max}$ =variabel=Zonen-abhängig



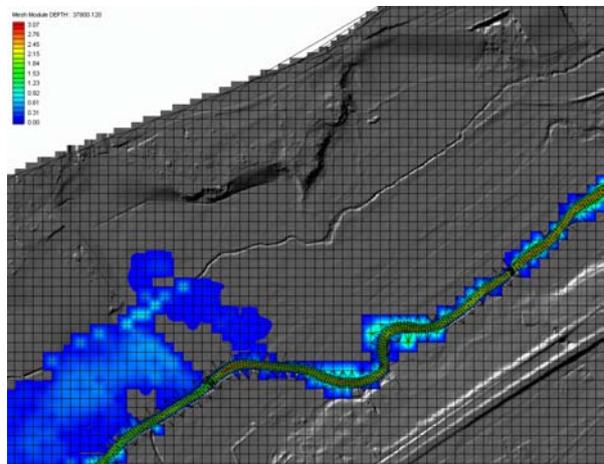
(I) Modellzeit 0:40h



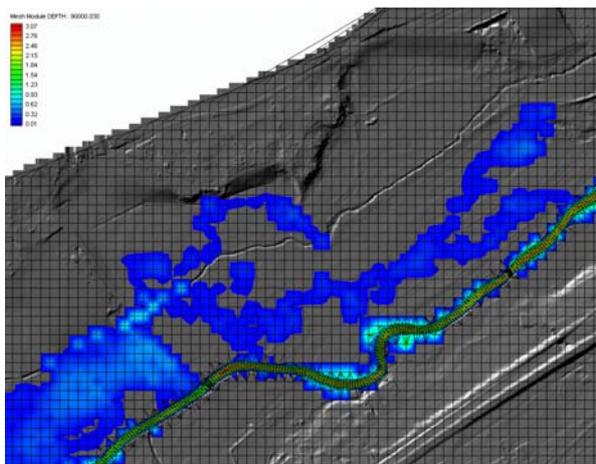
(II) Modellzeit 1:20h



(III) Modellzeit 4:25h



(IV) Modellzeit 10:30h



(V) Modellzeit 25:00h

**Abbildung 6.17:** Abflusszustand zu ausgewählten Zeitpunkten im HN-Modell, Geometrie-Variante (e), 16 m-Gitter

Abflussmenge bis zu einem Zeitpunkt von etwa 3.5 h kontinuierlich zu (vgl. 6.14), bleibt dann aber bei rund  $28 \text{ m}^3/\text{s}$  konstant. Diese erste Schwelle entsteht aus der örtlichen Geometrie, da das Wasser bei HQ5 an bestimmten Stellen über die Bordvollkante tritt und die umliegenden Wiesen geflutet werden. Das Wasser bahnt sich seinen Weg durch das Vorland und trifft dann etwa in der Mitte des Untersuchungsgebietes auf einen Straßendamm. Von diesem wird es wieder in den Fluss geleitet (III) und trägt erst dann - nach etwa 7.5 h - wieder zum Abfluss bei. Zwar kann ein geringer Anteil durch eine Unterführung unter der Straße abfließen, der größere Anteil kommt allerdings wieder ins Flussbett zurück. Daraus ergibt sich eine rasche Erhöhung des Abflusses auf rund  $29.5 \text{ m}^3/\text{s}$ , welcher nach etwa 9h erreicht ist. Danach kommt es abermals zu einem Auffüllen des Vorlandraumes. In diesem Fall wird der nordöstlich liegende Teil des Modells befüllt. Das Wasser setzt seinen Weg sehr verzögert in dem Wiesengraben fort (IV) und erreicht dann nach etwa 16h getrennt vom Hauptarm das Modellende (V), wodurch sich schließlich ein stationärer Zustand einstellt. Durch das Auffüllen des Wiesengrabens und dessen Vorlandgebietes ergibt sich die zweite Schwelle im Diagramm.

Beim höhen- und distanzabhängigen Modell ergeben sich aufgrund der vergleichbaren Aufbereitung der Geometrie ähnliche Ergebnisse. Auffällig ist allerdings das zeitlich frühere Auftreten der zwei Schwellen bei der distanzabhängigen Variante (c). Bei diesem Modell ist die Geometrie im Bereich des Wiesengrabens aufgrund der Entfernung zum Hauptfluss nicht mehr so präzise abgebildet. Dadurch breitet sich das Wasser im Vorland schneller aus und es kommt früher als beim Zonen- und höhenabhängigen Modell zu einem stationären Zustand.

Bei der Interpretation der Variante (a) mit konstantem  $\Delta z_{max}$  von 20 cm kann man zu den drei zuvor genannten Varianten (b), (c) und (d) wieder gewisse Ähnlichkeiten entdecken. Es ergeben sich hier auch zwei Schwellen, welche noch früher eintreten als beim distanzabhängigen Modell. Betrachtet man das Vorland bei der Variante (a), so ist zu erkennen, dass dieses weniger detailliert abgebildet ist. Aufgrund der geringeren geometrischen Rauigkeit läuft das Wasser somit schneller ab. Zu erwähnen wäre auch noch das mengenmäßig frühere Auftreten der Schwelle. Diese beginnt im Gegensatz zu den anderen Modellen ( $28 \text{ m}^3/\text{s}$ ) bereits bei  $26 \text{ m}^3/\text{s}$ . Durch die unregelmäßige Punktanordnung im Flussbett ergibt sich hier eine künstliche geometrische Rauigkeit. Wie bereits weiter oben erwähnt, führt das zu einer Verminderung der Fließgeschwindigkeit im Hauptarm. Um die Kontinuität zu gewährleisten, kommt es in der Folge zu einer Vergrößerung des Fließquerschnittes und damit zu einem Anstieg des Wasserspiegels. Daher tritt eine Ausuferung ins Vorland bei (a) früher ein als bei allen anderen Varianten. Bei der Variante (e) schließlich tritt, wie aus Abb. 6.14 ersichtlich, nur eine Schwelle auf, welche zusätzlich auch etwas abgeflacht ist. Diese ergibt sich durch das Befüllen des Vorlandes im Nordwesten des Untersuchungsgebietes. Auch in diesem Modell fließt das Wasser im Bereich des Straßendamms wieder ins Flussbett zurück. Als einziges Modell wird hier der Wiesengraben nicht befüllt, da er im Modell kaum abgebildet ist. Es wird zwar ein wenig Wasser in diesen Vorlandbereich gedrückt, jedoch trägt es nicht zum Abfluss bei. Die Varianten (a) bzw. (e) betreffend ist noch anzumerken, dass es in beiden Fällen zu einer Benetzung der südlich des Wiesengrabens gelegenen Wiesen und Felder kommt (vgl. Abb. 6.15 bzw. 6.17). Eine Ausuferung in diesen Bereich tritt bei den Varianten (b), (c) und (d) mit angepasster Aufbereitung der Geometrie nicht auf.

Als Resümee aus diesem Beispiel kann festgehalten werden, dass einer angepassten Aufbereitung der Geometrie bei der HN-Modellierung große Bedeutung zukommt. Diese sollte bei linienhaft ausgeprägten Elementen (z.B. Wiesengraben) im besten Fall durch Geländekanten erfolgen. Bei einer flächenmäßigen Gliederung der Topographie oder im Falle von schwach ausgeprägten Linien (z.B. der öfters zitierte Straßendamm) kann die Berücksichtigung auch

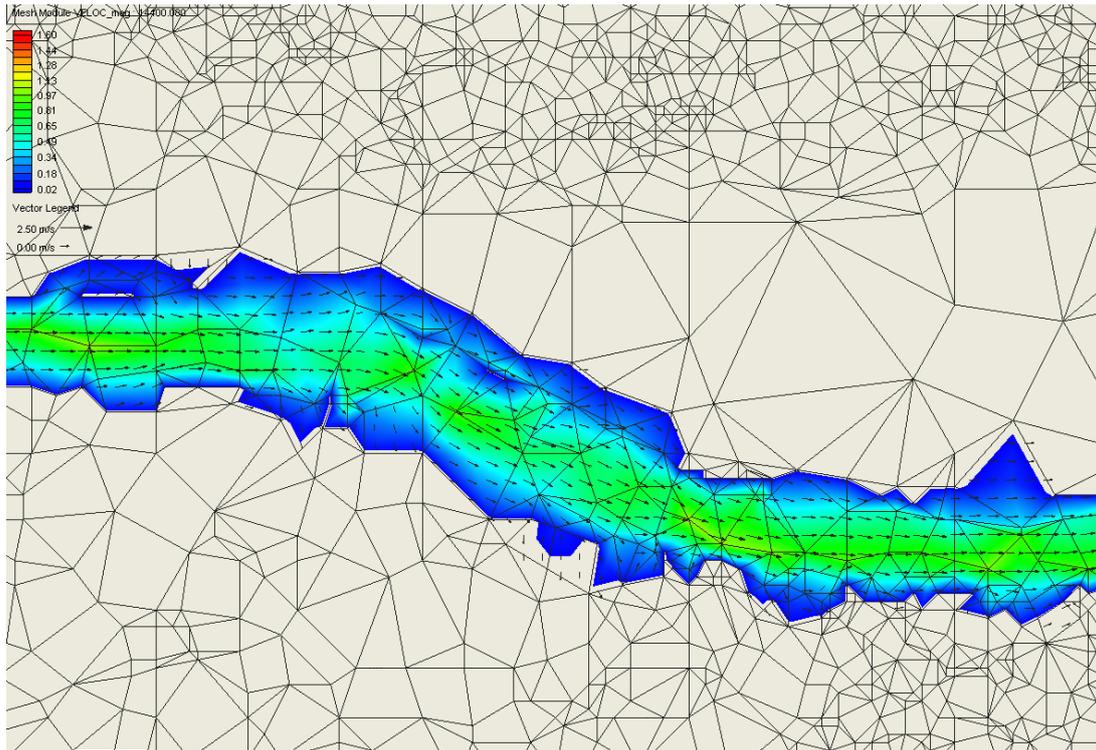


**Abbildung 6.18:** Beispiel 4, Mittellauf der Lainsitz, DGM-W (Hybrides Geländemodell: 1m-Raster, Brückenwiderlager als Geländekanten)

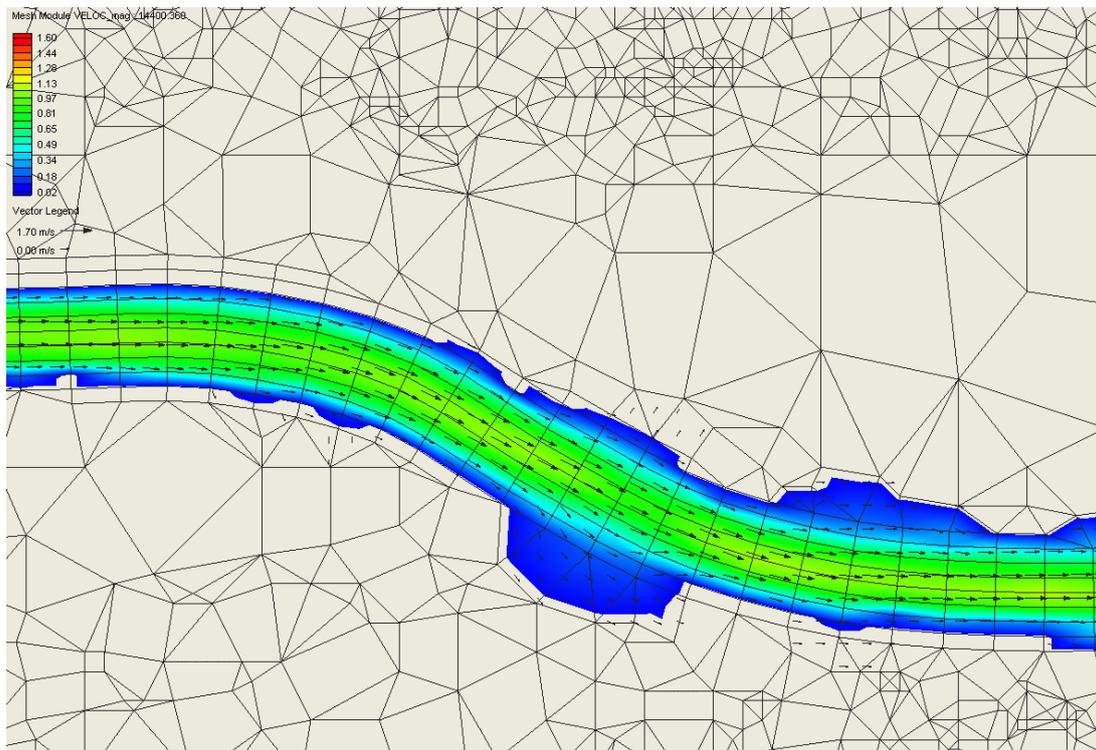
durch eine entsprechend dichte Punktanordnung im Zuge der Datenreduktion des DGM-W erfolgen. Von den unterschiedlichen Varianten zur Steuerung der maximalen Höhentoleranz haben sich in diesem Beispiel vor allem die zonenbasierte und die höhenabhängige Variante bewährt. Dadurch war eine automatische Berücksichtigung des kritischen Wiesengrabens im nördlichen Überschwemmungsbereich möglich. Dieses wichtige Detail wurde dagegen bei der distanzabhängigen Variante aufgrund der Entfernung zum Fluss nicht entsprechend repräsentiert.

#### 6.4 Beispiel 4: Mittellauf der Lainsitz

Das Beispiel 4 liegt im Bereich des Mittellaufs der Lainsitz und erstreckt sich auf einer Länge von rund 3.6 km von Schützenberg bis Weitra (Bezirk Gmünd, NÖ). Mit einem Höhenunterschied von 54.0 m ergibt sich in diesem Fall ein Gefälle von 14.9 ‰. Das Flussbett ist sowohl links als auch rechts von steilen Hängen begleitet. Es liegt ein gestreckter Flusstyp mit zum Teil großen Fließgeschwindigkeiten vor. Das Flussbett ist von bis zu 1m großen Steinblöcken geprägt, welche eine nicht unerhebliche Rauigkeit erzeugen. Durch den engen Talverlauf sind in diesem Flussabschnitt kaum Überflutungsmöglichkeiten gegeben. Aufgrund des Fehlens von Retentionsräumen kommt es im Hochwasserfall zu sehr hohen Fließgeschwindigkeiten. Neben fünf Brücken weist der untersuchte Abschnitt weiters eine alte Wehrschwelle mit einer Absturzhöhe von rund 3m auf.



(a), *Adaptives TIN,  $\Delta z_{max} = \text{const} = 20 \text{ cm}$*



(b), *Adaptives TIN,  $\Delta z_{max} = \text{variable} = \text{Zonen-abh\u00e4ngig}$*

**Abbildung 6.19:** Fließgeschwindigkeit (farbkodiert) und Fließvektoren (Pfeile) bei MQ ( $2.2 \text{ m}^3/\text{s}$ ) als Ergebnis der 2D-HN-Modellierung auf Basis der Geometrie-Varianten (a) und (b)

Da in diesem Beispiel durch den engen Talverlauf keine großräumigen Überflutungen des Vorlandes auftreten, eignet es sich besonders zur Analyse unterschiedlicher Aufbereitungsvarianten der Flussbett-Geometrie. In der Abb. 6.19 sind einander dabei die Varianten (a) und (b) gemäß dem vorigen Abschnitt gegenübergestellt. Das adaptive TIN der Variante (a) berücksichtigt dabei die besonderen morphologischen Charakteristiken des Flussbettes nicht. Die Punktanordnung erfolgt - wie bereits im Abschnitt 6.3 erwähnt - ausschließlich auf Basis geometrischer Kriterien. Dabei werden solange Punkte in das vorerst grobe Dreiecksnetz eingefügt, bis die geforderte Höhentoleranz von 20 cm eingehalten ist. Aus Abb. 6.19 ist ersichtlich, dass sich die entstandene TIN-Struktur nicht an das Gewässerbett und die Fließrichtung anpasst. Obwohl die geometrischen Toleranzbedingungen perfekt erfüllt sind, ist eine derartige Netzkonfiguration für die Strömungsphysik ungünstig. Die einzelnen Dreiecksflächen weisen nämlich in Fließrichtung kein einheitliches Gefälle auf, sondern pendeln vielmehr in ihrer Neigung hin und her. Das erzeugt eine künstliche, geometrische Rauigkeit. Diese geometrische Rauigkeit überlagert die Formrauigkeit, welche über den Strickler-Beiwert ohnedies ins hydraulische Modell miteinbezogen wird. Der Fließwiderstand wird daher künstlich vergrößert, was sich im HN-Modell in Form einer Unterschätzung der Fließgeschwindigkeit niederschlägt. Im konkreten Fall ist aus der Abb. 6.19 etwa eine Verminderung um  $0.4 \text{ m/s}$  abzulesen. Außerdem entspricht die querschnittsbezogene Geschwindigkeitsverteilung bei der Variante (a) bei weitem nicht den Erwartungen bei tiefengemittelter 2D-Betrachtung. Wie bereits im Abschnitt 2.3.3 ausgeführt wurde, treten die höchsten Fließgeschwindigkeiten in der Gewässermittte auf, während ufernahe Bereiche durch entsprechend niedrigere Werte gekennzeichnet sind. Im Gegensatz zu (a) weist die Variante (b) mit einer profilorientierten, an die Fließrichtung angepassten Punktanordnung im Gewässerbett genau diese Charakteristiken auf. Die unterschiedliche Aufbereitung der Flussbett-Geometrie hat schließlich auch Auswirkungen auf die Fließrichtungsvektoren. Während sie bei der Variante (b) homogen und weitgehend parallel zur Fließrichtung verlaufen, weisen die Vektoren bei (a) eine teilweise unmotivierte Unregelmäßigkeit auf. Die Aufspiegelung infolge der zusätzlichen geometrischen Rauigkeit bei der Variante (a) wurde bereits im Abschnitt 6.3 angesprochen. Auch in diesem Beispiel findet sich dieser Effekt durch die Gegenüberstellungen der beiden Varianten in der Abb. 6.19 bestätigt.

Die 2D-HN-Simulationen in diesem Beispiel haben klar gezeigt, dass eine profilorientierte, an die Fließrichtung angepasste Aufbereitung der Punktanordnung im Gewässerbett gegenüber einer unregelmäßigen Punktverteilung vorzuziehen ist. Der Preis dafür ist allerdings eine höhere Punkt- und daher auch Elementanzahl im hydraulischen Netz. Inwieweit sich eine Reduktion der Punktzahl in Profilrichtung - etwa durch Anwendung des Douglas-Peucker-Algorithmus - auf die Ergebnisse der HN-Modellierung auswirkt, bleibt noch zu untersuchen.

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

In den vorangegangenen Kapiteln wurden die einzelnen Aspekte des DGM-W-Aufbaus und der Datenaufbereitung für die Anwendung im Bereich der Hydrologie und Hydraulik ausführlich besprochen. In diesem abschließenden Kapitel sollen die wesentlichen Punkte überblicksmäßig zusammengefasst und ein Ausblick auf mögliche zukünftige Weiterentwicklungen gegeben werden. Eine kompakte Darstellung des gesamten Ablaufes, beginnend bei den rohen Messdaten bis hin zur ausgedünnten und für die HN-Simulation fachgerecht aufbereiteten DGM-W-Fläche, erfolgt dabei in Form einer Checkliste anhand eines Standardprojektes (Vorland: ALS, Gewässerbett: Querprofile). Im Anschluss an die stichwortartige Aufzählung folgt für einzelne Teilschritte eine eingehendere Diskussion und eine Zusammenfassung der jeweils relevanten Aspekte.

- Übernahme und Kontrolle der Vermessungsdaten, Überprüfung auf Vollständigkeit und Plausibilität, stichprobenartige Überprüfung von Abweichungen gegenüber Referenzdaten, ggf. Beanstandung beim Datenlieferanten.
- Speicherung aller originalen Messdaten samt Attributen (Metadaten) in einer Geo-Datenbank. Diese bildet die Datenbasis für den gesamten Projektablauf von der DGM-W-Generierung bis zur Abgabe der aufbereiteten Topographie an den Hydrologen bzw. Hydrauliker.
- Ableitung eines DOM aus den rohen ALS-Punkten (Abschnitt 2.1.6).
- Modellierung von dreidimensionalen Geländekanten basierend auf der originalen ALS-Punktewolke (Abschnitt 3.4), Nachbearbeitung und ggf. Korrektur der semi-automatisch abgeleiteten Kanten in einem graphischen Editor, Archivierung der Geländekanten in der Datenbank.
- Klassifizierung (Filterung) der ALS-Punkte in Gebäude-, Vegetations- und Bodenpunkte unter Einbeziehung der Geländekanten (Abschnitt 2.1.7), Archivierung der klassifizierten Daten in der Datenbank, Berechnung eines DGM aus allen Bodenpunkten.
- Ableitung von Gebäude- und Vegetationslayer (Abschnitt 5.4), Einbeziehung der Gebäudedaten ins DGM.
- Aufbau eines DWM aus allen Reflexionen des Lasersignals an der Wasseroberfläche (Abschnitt 3.2).
- Bestimmung der Wasser-Land-Grenzlinie aus ALS-Punkten, ggf. Berücksichtigung von Gewässerbettdateien (Abschnitt 3.3). Interaktive Überprüfung und Korrektur der automatisch abgeleiteten WLK in einem graphischen Editor auf Basis von digitalem Orthophoto oder DGM-Schummerung.

- Klassifizierung der ALS Daten in Vorland und aquatischen Bereich anhand der WLG, ggf. Archivierung der getrennten Datensätze in der Datenbank. Analoge Vorgangsweise für die Querprofilaten des Gewässerbettes.
- Verdichtung der Gewässerbett-Querprofile unter Einbeziehung der WLG (Abschnitt 3.1.2).
- Zusammenführen von ALS-Bodenpunkten, Gebäudedaten (inkl. Widerlager und Pfeiler von Brücken und Wehren), originalen und verdichteten Querprofilaten (Abschnitt 3.5), Interpolation des DGM-W (Abschnitt 2.1.6). Der Einsatz einer Interpolationsmethode mit Filterung der unregelmäßigen Messfehler (z.B. Kriging, Lineare Prädiktion) wird empfohlen.
- Definition der maximalen Höhentoleranzen  $\Delta z_{max}$  als Basis für die Ableitung einer ausgedünnten Fläche (Abschnitt 5.2). Steuerung von  $\Delta z_{max}$  abhängig von der Höhe über dem Fluss (Alternativen: zonenbasierte oder distanzabhängige Steuerung)
- Datenreduktion des präzisen und hochauflösenden DGM-W unter Berücksichtigung der individuellen  $\Delta z_{max}$  auf Basis der Variante T2 (Alternative: E2 kombiniert mit T2, Alternativen für HN-Modellierungen auf der Basis adaptiver kartesischer Gitter: E1, T1), spezielle Elementanordnung innerhalb der Uferböschung (Kapitel 4 und 5).
- Aufbau des hydraulischen Berechnungsnetzes auf Basis der ausgedünnten Triangulierung oder Punktmenge. Anpassung des Netzes aufgrund von numerischen Anforderungen (Winkelbedingungen, Seitenverhältnis, Ausdehnungsverhältnis), ggf. automatisches Zusammenfassen von Teilflächen durch den Netzgenerator bzw. manuelles Einfügen zusätzlicher Knoten, Berücksichtigung der Vegetationslayer bei der Rauigkeitsbelegung.

An einigen Stellen im Gesamtablauf werden entweder die originalen oder bereits teilweise prozessierte Daten als Input für weitere Bearbeitungsschritte benötigt. Der Einsatz eines flexiblen, datenbankbasierten Verwaltungssystems für topographische Daten ist daher bereits bei kleineren Projekten zu empfehlen. Dabei kommt der Archivierung sowohl der originalen Messdaten wie auch ausgewählter Zwischenergebnisse Bedeutung zu. So benötigt man für eine vollständige Neuprozessierung den originalen Datenbestand, während man bei einer Veränderung von Teildaten mit Vorteil auf bereits zwischengespeicherte Ergebnisse zurückgreifen kann. Liegen beispielsweise aktualisierte Daten für das Gewässerbett in Folge des Durchgangs einer Flut oder einfach wegen seiner periodischen Vermessung vor, so können die bereits klassifizierten ALS-Daten zur Neuberechnung des DGM-W herangezogen werden. Der Einsatz einer Geo-Datenbank erweist sich daher sowohl für laufende als auch für zukünftige Projekte als vorteilhaft.

Die Ableitung von dreidimensionalen Geländekanten findet sich sehr weit oben in der Prozessierungskette. Tatsächlich handelt es sich um einen Teilschritt, der einerseits auf den originalen, ungefilterten Daten aufsetzen sollte und andererseits einigen nachfolgenden Bearbeitungsschritten als zusätzlicher Input dient. Korrekt modellierte Geländekanten sind etwa für die Klassifizierung (Filterung) von ALS-Punktwolken sehr nützlich, da ansonsten vor allem im Bereich der Kanten leicht Klassifizierungsfehler wegen der starken Bewegtheit des Geländes auftreten. Weiters sind Geländekanten ein notwendiger Bestandteil von qualitativ hochwertigen Geländemodellen und daher bereits bei der Interpolation des Geländemodells zu berücksichtigen und nicht erst in Folgeanwendungen danach. Darüber hinaus wirken sie sich bei der Datenreduktion des fertigen DGM-W positiv auf die erzielbare Reduktionsrate aus und

sind schließlich auch für die HN-Modelle von wesentlicher Bedeutung. Eine Ableitung aus gefilterten Daten wie z.B. interpolierten Rastern ist strikt abzulehnen, da daraus Versetzungen der Kanten in Lage und Höhe resultieren. Vor allem der Höhengenaugigkeit der Geländekanten kommt bei der HN-Modellierung höchste Bedeutung zu. So entscheiden oft wenige Zentimeter darüber, ob ein Damm überströmt wird und damit weite Teile des dahinter liegenden Vorlandes überflutet werden. Die höchste Genauigkeit kann nur durch die Verwendung der originalen, unverfälschten Messdaten erzielt werden. Ein entsprechender Ansatz ist im Abschnitt 3.4 erläutert. Speziell für die HN-Modellierung sind oft kleine Gräben, deren Ausdehnung den Punktabstand der ALS-Punkte nicht wesentlich übersteigt, interessant. In diesem Fall gelingt eine Trennung der eng beisammen liegenden Kanten nicht immer. Abhilfe kann hier ein erweiterter Ausgleichungsansatz schaffen, was allerdings noch umgesetzt und erprobt werden muss. Kleinstrukturen und schwach ausgeprägte Geländekanten lassen sich allerdings auch durch eine entsprechend dichtere Punktanordnung, wie sie sich im Zuge der Datenreduktion automatisch ergibt, erfassen. Auf diesen Punkt wird weiter hinten noch gesondert eingegangen.

Die Gebäude des unmittelbaren Flusslaufes (Wehre, Brückenpfeiler und -widerlager) sind fixer Bestandteil des Wasserlauf-DGM und daher konsequent zu berücksichtigen. Das Beispiel 1 aus Kapitel 6 hat darüber hinaus gezeigt, dass alle Bauwerke im Überschwemmungsbereich Einfluss auf die Ergebnisse der HN-Modellierung haben. Dabei ist die Erhöhung des Wasserspiegels nur ein Teilaspekt. Ebenfalls zu nennen sind hier die Auswirkungen auf die Fließgeschwindigkeit und die Sohlschubspannung. Gegenüber einer Berücksichtigung ausschließlich durch Rauigkeitsbeiwerte hat die Einbeziehung der Gebäude-Geometrie bessere und realistischere Ergebnisse gebracht. Zumindest die genaue Lage der Gebäude sollte daher im HN-Modell berücksichtigt werden. Ansätze zum Aufbau eines Gebäudelayers sind im Abschnitt 5.4.1 beschrieben. Neben den Gebäuden sind auch Vegetationsdaten für die HN-Modellierung interessant. Diese fallen im Zuge der Klassifizierung der rohen ALS-Punktwolke als eigene Klasse an und können, als Vegetationslayer aufbereitet, für die Rauigkeitsbelegung herangezogen werden (siehe Abschnitt 5.4.2).

Einer der wesentlichen Aspekte der vorliegenden Arbeit ist der Aufbau einer zunächst möglichst präzisen geometrischen Datengrundlage in Form eines DGM-W. Zentraler Bestandteil in der Verarbeitungskette ist dabei die Ableitung der Wasser-Land-Grenze. Im Abschnitt 3.3 wurden zwei automatisierte Verfahren zu deren Ableitung vorgestellt. Vor allem die zweistufige Lösung (Abschnitt 3.3.2) ist sehr allgemein einsetzbar und hat sich in vielen praktischen Projekten bewährt. Eine etwaige Nachbereitung der automatisch bestimmten WLK hat sich allerdings als notwendig erwiesen. An die Genauigkeit der WLK werden sowohl hinsichtlich der Lage als auch der Höhe große Anforderungen gestellt. Eine hohe Lagegenauigkeit ermöglicht eine präzise Trennung von Vorland- und Gewässerbett-daten. Darüber hinaus ist eine gute Höhengenaugigkeit für die Verdichtung der Gewässerbett-Querprofile unter Einbeziehung der WLK erforderlich. Höhenfehler in der WLK wirken sich direkt auf die Höhen von interpolierten Zwischenpunkten im Uferbereich aus. Dadurch kommt es zu Diskontinuitäten im Anschluss an die Vorlanddaten, welche in der Folge die Ergebnisse der HN-Modellierung massiv beeinflussen. Grundsätzlich ist festzuhalten, dass für die Modellierung der Uferböschung soweit wie möglich die Vorlanddaten herangezogen werden sollten. Das setzt eine Befliegung bei möglichst niedrigem Wasserstand voraus. Bei der durchaus gängigen Praxis, den Flussschlauch bis zur Oberkante der Uferböschung aus interpolierten Querprofilen zu beschreiben, gehen wertvolle geometrische Details verloren, und es können gegenüber einer detaillierten Modellierung Abweichungen im Bereich von 1-2m auftreten. Was die Erfassung der

Uferböschung selbst betrifft, so ist die annähernd vertikale Aufnahmerichtung bei allen gängigen flugzeuggetragenen Erfassungsmethoden als suboptimal zu bezeichnen. Die Neigung der Uferböschung gegenüber der Aufnahmerichtung und vor allem der Einfluss von hoher Ufervegetation sind hier als ungünstige Parameter für eine präzise Erfassung zu nennen. Abhilfe könnten hier in der Zukunft Systeme mit schräger Aufnahmerichtung (z.B. side looking laser) schaffen. Durch zweimaliges Abfliegen etwa mit einem Helikopter könnten die linke und rechte Uferböschung getrennt erfasst werden. Dadurch wäre eine verbesserte Datenbasis sowohl für die Beschreibung der Uferböschung als auch für die Ableitung der WLG gegeben. Auch an den Einsatz von mit Messinstrumenten ausgestatteten Modellflugzeugen bzw. -hubschraubern ist hier zu denken.

Im Abschnitt 3.1.2 wurden Techniken zur Modellierung des Gewässerbettes aus weitabständigen Querprofilen vorgestellt. Diese haben sich in zahlreichen Projekten prinzipiell bewährt, wobei die Güte der interpolierten Gewässersohle in erster Linie von der Qualität der Datenerfassung abhängt. Sofern markante Änderungen des Flusslaufes wie plötzliche Aufweitungen oder Sohlschwelen in den Querprofilen nicht abgebildet sind, können diese auch durch die beste Interpolation nicht ins DGM-W Eingang finden. Eine Genauigkeitssteigerung und gleichzeitig eine Vereinfachung des Prozessablaufes lässt sich durch eine flächenhafte Datenerfassung mittels Fächerloten (multi beam echosounder) erreichen. Der Einsatz solcher Systeme ist derzeit noch auf größere Flüsse beschränkt. Durch Fortschritte in der Geräteentwicklung werden künftig allerdings vielleicht kleinere und transportablere Fächerlote verfügbar sein, die im Zusammenhang mit GPS und IMU auch die flächendeckende Vermessung von kleineren Flüssen erlauben werden. Auch die Entwicklung im Bereich der Laser Bathymetrie ist dabei nicht aus den Augen zu verlieren.

Einen weiteren Schwerpunkt der Arbeit bildete das Thema Datenreduktion und fachgerechte Datenaufbereitung von topographischen Modellen. Im Kapitel 4 wurde ein allgemeiner Rahmen für die Datenreduktion hybrider Geländemodelle vorgestellt. Grundsätzlich erfolgt die Approximation des originalen DGM durch sukzessive Verfeinerung einer zunächst groben Näherung (mesh refinement), ausgehend von einem Netz aus wenigen regelmäßig verteilten Gitterpunkten sowie der gesamten Strukturinformation (Geländekanten, Gerippelinien, markante Höhenpunkte). Die wesentlichen Merkmale des Ansatzes sind die Einhaltung einer maximalen Höhentoleranz und eines maximalen Punktabstandes der vereinfachten gegenüber der ursprünglichen Fläche. Die Repräsentation der approximierten Fläche erfolgt dabei entweder als Dreiecksvermaschung oder zumindest als Menge ausgesuchter Punkte und Linien (Geländekanten). Weitere Features des generellen Ansatzes sind die flexible Verwendbarkeit unterschiedlicher Reduktionskriterien und Unterteilungsmethoden. Die Entscheidung über das Einfügen weiterer Punkte erfolgt dabei entweder durch Analyse der lokalen Geländekrümmung und -neigung (approximatives Verfahren) oder durch den Vergleich des Abstandes der approximierten zur originalen Fläche (adaptive TIN-Verdichtung). Zusätzliche Punkte können entweder hierarchisch im Sinne eines Quad-Tree oder unregelmäßig eingefügt werden. Im ersteren Fall ergibt sich aus hydraulischer Sicht ein adaptives kartesisches Gitter. Dieses eignet sich beispielsweise sehr gut, falls die HN-Modellierung auf Basis eines Finite Differenzen Ansatzes durchgeführt wird. Im zweiten Fall ergibt sich, mit den Begriffen der Hydraulik ausgedrückt, ein unstrukturiertes Gitter, wobei unter "unstrukturiert" hier nicht das Fehlen einer Struktur (Topologie) verstanden werden darf. Es handelt sich also vielmehr um ein unregelmäßiges Gitter, welches vor allem bei der HN-Modellierung mittels Finiter Elemente oder Finiter Volumina Methode zum Einsatz kommt.

Die adaptive TIN-Verdichtung hat sich gegenüber dem krümmungs- und neigungsbasierten Ansatz als schneller und effizienter erwiesen. In flachen Gebieten etwa werden Reduktionsraten von bis zu 99 % erreicht. Bei der adaptiven TIN-Verdichtung mit unregelmäßiger Unterteilung treten allerdings vor allem am Übergang von glattem zu bewegtem Gelände auch Dreiecke mit spitzen Winkeln und großen Seitenverhältnissen auf. Das kann bei direkter Verwendung solch einer Triangulierung als hydraulisches Berechnungsnetz zu numerischen Problemen führen. Die krümmungs- und neigungsbasierte Variante hingegen besticht vor allem durch eine sehr homogene Punktverteilung. Aufgrund des approximativen Charakters dieses Reduktionsansatzes wird die geforderte Höhentoleranz aber nicht immer eingehalten. Eine Kombination der krümmungs- und neigungsbasierten Datenreduktion mit anschließender Verfeinerung im Sinne des adaptiven TIN hat sich folglich als optimal herausgestellt. Sofern im DGM Geländekanten vorhanden sind, wirken sich diese positiv auf die Effizienz und Performance der Datenreduktion aus. Einmal mehr unterstreicht dies die Wichtigkeit einer expliziten Modellierung und konsequenten Einbeziehung der wesentlichen strukturellen Elemente im Rahmen der Geländemodellierung.

Über den allgemeinen Ansatz zur DGM-Datenreduktion hinaus wurden im Kapitel 5 Konzepte zur fachgerechten Aufbereitung topographischer Daten für die Anwendung in der Hydraulik erarbeitet. Leitgedanke ist dabei, Geländebereiche unterschiedlicher Sensibilität für die HN-Modellierung entsprechend differenziert zu behandeln. So besteht im Flussschlauch eine physikalisch begründete Abhängigkeit von der Fließrichtung, welcher durch eine entsprechende profilorientierte Datenanordnung normal zur Gewässerachse (strukturiertes Gitter) Rechnung zu tragen ist. Außerhalb der Uferböschung nimmt der Einfluss dieser praedominanten Richtung ab. Die Punktverteilung kann sich hier also an den topographischen Details orientieren. Innerhalb des Vorlandes kann weiters eine Einteilung in Bereiche unterschiedlichen Genauigkeitsbedarfs vorgenommen werden (unmittelbares bzw. erweitertes Vorland, Umland). Die mehr oder weniger detaillierte Abbildung der entsprechenden Bereiche erreicht man dabei im Prozess der DGM-Datenreduktion durch eine individuelle Steuerung der maximalen Höhentoleranz. Entsprechende Ansätze einer zonen-, distanz- oder höhenabhängigen Steuerung der Toleranzwerte sind in Abschnitt 5.2 beschrieben. Der wesentliche Vorteil einer derartigen Datenaufbereitung besteht darin, dass damit ein hydraulisches Netz in Form zusammengesetzter Teilgitter (strukturiertes Gitter im Flussschlauch und adaptives kartesisches oder unstrukturiertes Gitter im Vorland) in einem Guss aus der präzisen Datenbasis des DGM-W abgeleitet werden kann. An dieser Stelle kommt es zu einer Berührung der Begriffe des geometrischen und des hydraulischen Netzes.

Die Beispiele des Kapitels 6 haben gezeigt, dass die gemäß Kapitel 5 erzeugten geometrischen Netze durchaus direkt als hydraulische Berechnungsnetze herangezogen und auf diese Weise plausible Ergebnisse erzielt werden können. Es kann also festgehalten werden, dass die angestrebte detailliertere Berücksichtigung der Topographie bei der HN-Modellierung gelingt. Aus den vorgestellten Ergebnissen kann weiters der Schluss gezogen werden, dass explizit modellierte Geländekanten und Gerippelinien (Formlinien) nicht nur für das digitale Geländemodell, sondern auch für das hydraulische Berechnungsnetz eine wesentliche Qualitätssteigerung bringen. Darüber hinaus ist aber ebenso klar geworden, dass es auch bewegte Geländebereiche gibt, die einerseits hydraulisch relevant, aber andererseits nicht durch Geländekanten modellierbar sind. Dies ist dann der Fall, wenn die Datendichte für eine Modellierung von Kleinstrukturen zu gering ist, die Kante als solche zu schwach ausgeprägt ist oder wenn die Variation der Geländeform überhaupt nicht-linearen Charakter hat. In jedem Fall ist hier eine adaptive Punktanordnung, wie sie sich aus der DGM-Datenreduktion gemäß Kapitel 4 auto-

matisch ergibt, sehr gut geeignet, um mit wenigen Elementen die relevanten Geländestrukturen abzubilden.

Ferner soll an dieser Stelle klar zum Ausdruck gebracht werden, dass bei den vorgestellten Ansätzen der Detailgehalt der Geometrie bevorzugt gegenüber einer optimalen Konfiguration im Sinne der Numerik für die HN-Modellierung betrachtet wurde. Alleine die prinzipielle Tatsache einer erfolgreichen Berücksichtigung detaillierter Geometrie sollte in Zukunft zum Anlass genommen werden, um den begonnen Dialog zwischen Geodäten und Hydraulikern weiter fortzusetzen und noch bessere Berechnungsnetze zu realisieren, welche sowohl die physikalischen als auch die geometrischen Anforderungen optimal erfüllen. Der Autor hofft in jedem Fall, mit der vorliegenden Arbeit einen kleinen Beitrag zur Verbesserung der interdisziplinären Zusammenarbeit geleistet zu haben.

# Literaturverzeichnis

## **Ackermann 1999**

ACKERMANN, Friedrich: Airborne laser scanning - present status and future expectations. In: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 54 (1999), S. 64–67

## **Ackermann u. Kraus 2004**

ACKERMANN, Friedrich ; KRAUS, Karl: Grid Based Digital Terrain Models. In: *Geoinformatics* 7 (2004), S. 18–31

## **Axelsson 2000**

AXELSSON, Peter: DEM Generation from Laser Scanner Data using adaptive TIN Models. In: *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXIII, B4*. Amsterdam, the Netherlands, 2000, S. 111–118

## **Bartelme 2000**

BARTELME, Norbert: *Geoinformatik*. 16. Springer, 2000

## **Bauerhansl u. a. 2004**

BAUERHANSL, Christoph ; ROTTENSTEINER, Franz ; BRIESE, Christian: Determination of Terrain Models by Digital Image-Matching Methods. In: *Proceedings of International Society for Photogrammetry and Remote Sensing XXth Congress*. Istanbul, Turkey, 2004, S. 414–419

## **Baumgartner u. Liebscher 1996**

BAUMGARTNER, Albert ; LIEBSCHER, Hans-Jürgen: *Allgemeine Hydrologie - Quantitative Hydrologie. (Lehrbuch der Hydrologie, Band 1)*. 2. Gebr. Borntraeger, Berlin-Stuttgart, 1996

## **BEV 2006**

BEV: *Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen*. Wien, Österreich : <http://www.bev.gv.at>, 2006. – [Letzter Zugriff: 23.10.2006]

## **Beyer 2005**

BEYER, Gert: *Wavelettransformationen hybrider Geländemodelle*. 1. Bayerische Akademie der Wissenschaften, Verlag C. H. Beck, 2005

## **Borgefors 1986**

BORGEFORS, G.: Distance Transformations in Digital Images. In: *Distance Transformations in Digital Images, CVGIP* 34 (1986), S. 344–371

## **Böth u. Brockmann 2002**

BÖTH, Harald ; BROCKMANN, Herbert: *Moderne Vermessungsverfahren zur Bestimmung von Stauräumen*. Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz, Deutschland, 2002

## **Bottelier u. a. 2000**

BOTTELIER, Peter ; HAAGMANS, Roger ; KINNEGING, Niels: Fast Reduction of High Density Multibeam Echosounder Data for Near Real-Time Applications. In: *The Hydrographic Journal* 98 (2000), S. 23–28

**Brenner 2000**

BRENNER, C.: *Dreidimensionale Gebäuderekonstruktion aus digitalen Oberflächenmodellen und Grundrissen*, Universität Stuttgart, Diss., 2000

**Briese 2004**

BRIESE, Christian: *Breakline Modelling from Airborne Laser Scanner Data*, Vienna University of Technology, Diss., 2004

**Briese u. Attwenger 2005**

BRIESE, Christian ; ATTWENGER, Maria: Modellierung dreidimensionaler hydrologisch und hydraulisch relevanter Geländekanten aus hochauflösenden Laser-Scanner-Daten. In: *Praxisorientierte und vielseitig nutzbare Fernerkundungseinsätze an der Elbe*, 2005, S. 35–46

**Briese u. Kraus 2003**

BRIESE, Christian ; KRAUS, Karl: Datenreduktion dichter Laser-Geländemodelle. In: *Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement (ZfV)* 5 (2003), Nr. 128, S. 312–317

**Brockmann u. a. 2000**

BROCKMANN, Herbert ; KRAUS, Karl ; MANDLBURGER, Gottfried ; MÜRLEBACH, Michael: Modellierung digitaler Höhendaten zur Bearbeitung hydrologisch/hydraulischer Fragestellungen an Wasserläufen. In: *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 45. Jahrgang, Heft 3 (2000), S. 112–119

**Brzank u. a. 2005**

BRZANK, Alexander ; LOHMANN, P. ; HEIPKE, Christian: Automated extraction of pair wise structure lines using airborne laserscanner data in coastal areas. In: *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, WG III/3, III/4, V/3*. Enschede, the Netherlands, 2005

**Dantzig 1966**

DANTZIG, George B.: *Lineare Programmierung und Erweiterungen*. Springer, Berlin, 1966. – (Originalausgabe: *Linear Programming and Extensions*, Princeton University Press)

**Douglas u. Peucker 1973**

DOUGLAS, David H. ; PEUCKER, Thomas K.: Algorithms for the reduction of the number of points required to represent a digitized line or its caricature. In: *The Canadian Cartographer* 10(2) (1973), S. 112–122

**Duchon 1976**

DUCHON, J.: Interpolation des fonctions de deux variables suivant le principe de la flexion des plaques minces. In: *RAIRO Analyse Numérique* 10 (1976), S. 5–12

**Dutter 1985**

DUTTER, Rudolf: *Geostatistik. Eine Einführung mit Anwendungen*. 1. B. G. Teubner, Stuttgart, 1985

**DVWK 1991**

DVWK: *Hydraulische Berechnung von Fließgewässern, DVWK-Merkblätter zur Wasserwirtschaft, Heft 220*. Paul Parey, Hamburg und Berlin, 1991

**Ferziger u. Peric 2002**

FERZIGER, Joel H. ; PERIC, M.: *Computational Methods for Fluid Dynamics*. 3. Springer, Berlin, 2002

**Franzen u. Mandlbürger 2003**

FRANZEN, Michael ; MANDLBURGER, Gottfried: Die neue Generation des digitalen Geländemodells von Österreich. In: *Österreichische Zeitschrift für Vermessung & Geoinformation* 3 (2003), S. 154–162

**Gajski 2004**

GAJSKI, Dubravko: *Rasterbasierte Geländeoberflächenanalysen*, Technische Universität Wien, Diss., 2004

**Geomagic Inc. 2006**

GEOMAGIC INC.: *Geomagic Studio 9*. Triangle Park, North Carolina : <http://www.geomagic.com>, 2006. – [Letzter Zugriff: 23.10.2006]

**Grossmann u. Kahmen 1985**

GROSSMANN, Walter ; KAHMEN, Heribert: *Vermessungskunde I*. 16. Walter de Gruyter, 1985

**Grossmann u. Kahmen 1988**

GROSSMANN, Walter ; KAHMEN, Heribert: *Vermessungskunde III*. 12. Walter de Gruyter, 1988

**Guenther u. a. 2000**

GUENTHER, Gary C. ; CUNNINGHAM, A. Grant ; LAROCQUE, Paul E. ; REID, David J.: Meeting the accuracy challenge in airborne lidar bathymetry. In: *Proc. 20th EARSeL Symposium: Workshop on Lidar Remote Sensing of Land and Sea*. Dresden, Germany, 2000

**Haala u. a. 1998**

HAALA, Norbert ; BRENNER, C. ; ANDERS, K.-H.: Urban GIS from Laser Altimeter and 2D Map Data. In: *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. XXXII-3/1. Columbus, Ohio, 1998, S. 339–346

**Habersack 2004**

HABERSACK, Helmut: *Computergestützte Gewässermodellierung, Vorlesungsskriptum 2004*. Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und Konstruktiven Wasserbau, Universität für Bodenkultur Wien, 2004

**Habersack u. a. 2000**

HABERSACK, Helmut ; MAYR, Peter ; GIERLINGER, Robert ; SCHNEGLBERGER, Stefan: *Mehrdimensionale Abflussmodellierung am Beispiel der Lafnitz*. 1. Prof. Dr. H.P. Nachtnebel, Universität für Bodenkultur Wien, 2000

**Heckbert u. Garland 1997**

HECKBERT, Paul S. ; GARLAND, Michael: Survey of Polygonal Surface Simplification Algorithms / School of Computer Science, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA. Version: 1997. [citeseer.nj.nec.com/heckbert97survey.html](http://citeseer.nj.nec.com/heckbert97survey.html). 1997. – Forschungsbericht

**Heitzinger 1999**

HEITZINGER, David: *Wissensbasierte 3D-Oberflächenrekonstruktion*, Technische Universität Wien, Diss., 1999

**Heitzinger u. Kager 1998**

HEITZINGER, David ; KAGER, Helmuth: High Quality DTMs from Contourlines by

knowledge-based classification of problem regions. In: *Proceedings of the International Symposium on "GIS - Between Visions and Applications"*, ISPRS Comm. 4 Bd. 32, Part 4. Stuttgart, Germany, 1998, S. 230–237

**Helf 2000**

HELF, Clemens: *Eine Finite-Elemente-Methode in allgemeinen Zellen für die Euler-Gleichungen mit integrierter, selbst-adaptiver Gittergenerierung*, Universität Stuttgart, Institut für Computeranwendungen, Diss., 2000

**Hirsch 1988**

HIRSCH, C.: *Numerical computation of internal and external flow*. Wiley & Sons, New York, 1988

**Hochstöger 1995**

HOCHSTÖGER, Franz: *Software for Managing Country-Wide Digital Elevation Data*. In: *International Archives for Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXI, Part B2, Vienna, Austria*, 1995, S. 160–163

**Hofbauer 2003**

HOFBAUER, Sonja: *Flussmorphologische Veränderungen am Kamp durch das Augusthochwasser 2002 anhand sechs likaler Verwerfungsstellen*. Österreich, Universität für Bodenkultur, Wien, Diplomarbeit, 2003

**Hydrotech 2006**

HYDROTECH: *Ingenieurgesellschaft für Wasser und Umwelt mbH*. Aachen, Deutschland : [http://www2.hydrotec.de/vertrieb/hydro\\_as\\_2d/](http://www2.hydrotec.de/vertrieb/hydro_as_2d/), 2006. – [Letzter Zugriff: 23.10.2006]

**Jansa u. Stanek 2003**

JANSA, Josef ; STANEK, Heinz: *Ableitung von Stadtmodellen aus Laser-Scanner-Daten, Grundrissplänen und photographischen Aufnahmen*. In: *Osterreichische Zeitschrift für Vermessung & Geoinformation* 4 (2003), S. 262–270

**de Jong u. a. 2002**

JONG, C.D. de ; LACHAPPELLE, G. ; SKONE, S. ; ELEMA, I.A.: *Hydrography*. 1. Delft University Press, 2002

**Journal u. Huijbregts 1978**

JOURNAL, A.G. ; HUIJBREGTS, Ch. J.: *Mining Geostatistics*. 1. Academic Press, 1978

**Kahmen 1986**

KAHMEN, Heribert: *Vermessungskunde II*. 14. Walter de Gruyter, 1986

**Kerschner 2003**

KERSCHNER, Martin: *Snakes für Aufgaben der digitalen Photogrammetrie und Topographie*, Technische Universität Wien, Diss., 2003

**Knothe u. Wessels 1991**

KNOTHE, Klaus ; WESSELS, Heribert: *Finite Elemente*. Springer Verlag, Berlin, 1991

**Konecny 2003**

KONECNY, Gottfried: *Geoinformation, Remote Sensing, Photogrammetry and Geographic Information Systems*. 1. Taylor and Francis, 2003

**Köstli u. Sigle 1986**

KÖSTLI, Andre ; SIGLE, Manfred: The random access data structure of the DTM program SCOP. In: *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. XXVI, Comm. IV. Edinburgh, Scotland, 1986, S. 42–45

**Kraus 1996**

KRAUS, Karl: *Photogrammetrie, Band 2, Verfeinerte Methoden und Anwendungen*. 3. Dümmler, 1996

**Kraus 1998**

KRAUS, Karl: Interpolation nach kleinsten Quadraten versus Krige-Schätzer. In: *Österreichische Zeitschrift für Vermessung & Geoinformation* 1 (1998), S. 45–48

**Kraus 2000**

KRAUS, Karl: *Photogrammetrie, Band 3, Topographische Informationssysteme*. Dümmler, 2000. – An english edition by Taylor and Francis (translator: H. Rüter) is in preparation

**Kraus 2004**

KRAUS, Karl: *Photogrammetrie, Band 1, Geometrische Informationen aus Photogrammetrie und Laserscanneraufnahmen*. 7. Walter de Gruyter, 2004

**Kraus u. Pfeifer 1998**

KRAUS, Karl ; PFEIFER, Norbert: Determination of Terrain Models in Wooded Areas with Airborne Laser Scanner Data. In: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 53 (1998), S. 193–203

**Lancaster 1990**

LANCASTER, Peter: *Curve and Surface Fitting*. Academic Press, London, 1990

**Landau u. Lifschitz 1991**

LANDAU, Lew D. ; LIFSCHITZ, Jewgeni M.: *Lehrbuch der theoretischen Physik, Band 6, Hydrodynamik*. 5. Harri Deutsch, 1991

**LaRocque u. West 1999**

LAROCQUE, Paul E. ; WEST, Geraint R.: Airborne Laser Hydrography: An Introduction. In: *Proceedings of the ROPME/PERSGA/IHB Workshop on Hydrographic Activities in the ROPME Sea Area and Red Sea*. Kuwait City, 1999

**Loitsch u. Molnar 1991**

LOITSCH, J. ; MOLNAR, Lazlo: A Relational Database Management System with Topological Elements and Topological Operators. In: *Proceedings of Spatial Data 2000, Department of Photogrammetry and Surveying, University College London*, 1991, S. 260–269

**Makarovic 1976**

MAKAROVIC, B.: Digital terrain model system. In: *ITC-Journal* (1976), Nr. 1, S. 57–83

**Mandlbürger 2000**

MANDLBÜRGER, Gottfried: Verdichtung von Echolot Querprofilen unter Berücksichtigung der Flussmorphologie. In: *Österreichische Zeitschrift für Vermessung & Geoinformation* 4 (2000), S. 211–214

**Mandlbürger u. Brockmann 2001**

MANDLBÜRGER, Gottfried ; BROCKMANN, Herbert: Modelling a watercourse DTM based on airborne laser-scanner data - using the example of the River Oder along the German/Polish Border. In: *Proceedings of OEEPE Workshop on Airborne Laserscanning and Interferometric SAR for Detailed Digital Terrain Models*. Stockholm, Sweden, 2001

**Meinguet 1979**

MEINGUET, Jean: Multivariate Interpolation at Arbitrary Points Made Simple. In: *ZAMP, Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Physik* 30 (1979), S. 292–304

**Miller u. Laflamme 1958**

MILLER, C.L. ; LAFLAMME, R.A.: The digital terrain model. In: *Engineering and Remote Sensing* 24 (1958), S. 433–442

**Naudascher 1992**

NAUDASCHER, E.: *Hydraulik der Gerinne und Gerinnebauwerke*. 2. Springer Verlag, Wien, New York, 1992

**Naumann u. a. 2002**

NAUMANN, Kathleen ; KERSCHNER, Martin ; MANDLBÜRGER, Gottfried ; JANSKA, Josef ; EBERHÖFER, Christian: Weiterentwicklung von Methodiken zur Bestimmung von Wasser-Land-Grenzen / Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Technische Universität Wien. 2002. – Forschungsbericht

**Parker 2006**

PARKER, Gary: *1D Morphodynamics of Rivers and Turbidity Currents*. Department of Civil and Environmental Engineering, University of Illinois : [http://cee.uiuc.edu/people/parkerg/morphodynamics\\_e-book.htm](http://cee.uiuc.edu/people/parkerg/morphodynamics_e-book.htm), 2006. – e-book

**Peucker 1978**

PEUCKER, Thomas K.: The triangulated irregular network. In: *Proceedings of the Digital Terrain Models Symposium of the American Society for Photogrammetry/American Congress on Surveying and Mapping*. St. Louis, Missouri, USA, 1978, S. 516–540

**Pfeifer 2002**

PFEIFER, Norbert: *3D Terrain Models on the Basis of a Triangulation*, Vienna University of Technology, Diss., 2002

**Pfeifer 2003**

PFEIFER, Norbert: Oberflächenmodelle aus Laserdaten. In: *Österreichische Zeitschrift für Vermessung & Geoinformation* 4 (2003), S. 243–251

**Pfeifer 2005**

PFEIFER, Norbert: A subdivision algorithm for smooth 3D terrain models. In: *ISPRS-Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 59/3 59 (2005), S. 115–127

**Pfeifer u. Briese 2001**

PFEIFER, Norbert ; BRIESE, Christian: Airborne Laser Scanning and Derivation of Digital Terrain Models. In: GRÜN (Hrsg.) ; KAHMEN (Hrsg.): *Fifth Conference on Optical 3-D Measurement Techniques*. Vienna, Austria, 2001, S. 80–87

**Pfeifer u. a. 2001**

PFEIFER, Norbert ; STADLER, Philipp ; BRIESE, Christian: Derivation of Digital Terrain Models in the SCOP++ Environment. In: *Proceedings of OEEPE Workshop on Airborne Laserscanning and Interferometric SAR for Detailed Digital Terrain Models*. Stockholm, Sweden, 2001

**Resnik u. Bill 2003**

RESNIK, Boris ; BILL, Ralf: *Vermessungskunde für den Planungs-, Bau- und Umweltbereich*. 2. Wichmann, 2003

**Rieger 1992**

RIEGER, Wolfgang: *Hydrologische Anwendungen des digitalen Geländemodelles*, Technische Universität Wien, Diss., 1992

**Rottensteiner u. Briese 2002**

ROTTENSTEINER, Franz ; BRIESE, Christian: A New Method for Building Extraction in Urban Areas from High-Resolution LIDAR Data. In: *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXIV/3A*. Graz, Austria, 2002, S. 295–301

**Scientific Software Group 2006**

SCIENTIFIC SOFTWARE GROUP: *Surfacewater Modeling System (SMS)*. [http://www.scisoft.com/products/sms\\_details/sms\\_details.html](http://www.scisoft.com/products/sms_details/sms_details.html), 2006. – [Letzter Zugriff: 18.10.2006]

**Sithole u. Vosselman 2001**

SITHOLE, George ; VOSSELMAN, George: Filtering of laser altimetry data using a slope adaptive filter. In: *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXIV, 3/W4*. Annapolis, MD, USA, 2001

**Sithole u. Vosselman 2003**

SITHOLE, George ; VOSSELMAN, George: Comparison of Filter Algorithms. In: *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXIV, 3/W13*. Dresden, Germany, 2003, S. 71–78

**swisstopo 2006**

SWISSTOPO: *Bundesamt für Landestopographie*. Wabern, CH : <http://www.swisstopo.ch>, 2006. – [Letzter Zugriff: 23.10.2006]

**Tritthart 2005**

TRITTHART, Michael: *Three-dimensional numerical modelling of turbulent river flow using polyhedral finite volumes*, Vienna University of Technology, Diss., 2005

**Vosselman 2000**

VOSSELMAN, George: Slope based Filtering of Laser Altimetry Data. In: *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXIII, B3*. Amsterdam, the Netherlands, 2000, S. 935–942

**Vosselman u. Dijkman 2001**

VOSSELMAN, George ; DIJKMAN, S.: 3D building model reconstruction from point clouds and ground plans. In: *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXII-3/W4*. Annapolis, Maryland, 2001, S. 37–43

**Weidner 1997**

WEIDNER, Uwe: *Gebäudeerfassung aus digitalen Oberflächenmodellen*, Universität Bonn, Diss., 1997

# Curriculum vitae

## Persönliche Daten

Name: Dipl.-Ing. Gottfried Mandlbürger  
Geboren: am 4.9.1969 in Wien als drittes Kind von Ing. Heinz und Christine Mandlbürger  
Familienstand: verheiratet  
Ehefrau: Judith Mandlbürger (Logopädin)  
Kinder: Nikolaus (geb. 1995), David (geb. 1997)

## Ausbildung

1975 – 1979 Volksschule in Wien Strebersdorf  
1979 – 1987 Gymnasium im Stift Melk, Niederösterreich, Neusprachlicher Zweig  
Juni 1987 Matura mit gutem Erfolg

## Studium

1987 – 1995 Studium Vermessungswesen an der Technischen Universität Wien,  
Wahlfachgruppe: *Ingenieurgeodäsie und Landesvermessung*  
Oktober 1992 1. Diplomprüfung  
1994 – 1995 Diplomarbeit: *Untersuchung systematischer Effekte bei einem Stollennivellament*  
04/1995 2. Diplomprüfung, Sponsion zum Dipl.Ing. für Vermessungswesen.

## Sonstige Hochschulausbildung

1991 – 1993 Hochschullehrgang für Chorleitung an der Hochschule für Musik und darstellende Kunst in Wien  
Juni 1993 Abschlussprüfung des Hochschullehrganges für Chorleitung

Wien, 30. Oktober 2006