



Digitale Geländemodelle zur Simulation von Überschwemmungsszenarien

Gottfried Mandlbauer, Georg Strobelberger, Wien

Dieser Beitrag wurde als „reviewed paper“ angenommen.

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. Neben den Fließwiderständen ist die Topographie in Form eines digitalen Geländemodells des Wasserlaufs (DGM-W) eine wesentliche Eingangsgröße für diese Modelle. Der Einsatz moderner Datenerfassungstechniken wie Airborne Laserscanning (ALS) ermöglicht eine immer detailreichere Beschreibung der Erdoberfläche. Aufgrund der großen Datenmengen ist eine Abstraktion der Geometrie für die Anwendungen im Bereich der Strömungsmodellierung erforderlich. Dafür werden oftmals simple Techniken angewendet, bei denen der in den Vermessungsdaten enthaltene Detailreichtum verloren geht, was im Endeffekt zu Unsicherheiten bei der Prognose von Überschwemmungsgrenzen führt.

In diesem Artikel wird daher auf die Ableitung eines zunächst möglichst präzisen DGM-W unter Nutzung aller zur Verfügung stehenden Messdaten eingegangen. Im Anschluss wird eine Methode zur Reduktion von DGM-Daten vorgestellt, bei welcher die wesentlichen geometrischen Details durch adaptive Verfeinerung eines Dreiecksnetzes erhalten bleiben. Um ein hochwertiges Berechnungsnetz für die anschließende hydraulische Modellierung zu erhalten, müssen neben geometrischen Aspekten auch hydraulische Parameter berücksichtigt werden. Dazu zählen etwa die Ausrichtung der Netzelemente entlang der Fließrichtung des Wassers sowie die Einhaltung gewisser maximaler Seiten- und Flächenverhältnisse. Abschließend wird anhand konkreter Beispiele gezeigt, dass eine detaillierte Berücksichtigung der Topographie für Hochwassersimulationen möglich ist und daher in einem interdisziplinären Dialog zwischen Geodäten, Hydrologen und Hydraulikern verbesserte Prognosen erzielt werden können.

Schlüsselworte: Airborne Laserscanning, DGM-Generierung, DGM-Datenreduktion, Hydraulische Modellierung

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. Besides flow resistances the topography provided as a Digital Terrain Model of the Watercourse (DTM-W) is an influential input for such models. Modern data acquisition methods like Airborne Laserscanning (ALS) enable an ever more precise and more detailed description of the earth's surface. 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. In this article first the generation of a precise DTM-W exploiting all available surveying data is focused on. Subsequently, a surface simplification approach based on adaptive TIN-refinement is presented, which reduces the amount of data significantly but preserves topographic details. To obtain a high quality computation grid for hydraulic modelling further physical parameters have to be considered. Among these are the alignment of the cells with respect to the flow direction within the river bed and the adherence of maximum aspect or expansion ratios. Finally, some practical results are presented demonstrating that a detailed description of the topography can indeed be established in hydraulic models. Thus, more reliable risk assessments can be achieved by the cooperation of geodesists and hydrologists.

Keywords: airborne laserscanning, DGM-generation, DGM-data reduction, hydraulic modelling

Einleitung

Die extremen Hochwasserereignisse der vergangenen Jahre haben die Themen Gefahrenzonenplanung, Hochwasserschutz und -simulation in den Blickpunkt des medialen Interesses gerückt. Neben dem persönlichen Leid der Betroffenen entsteht durch Hochwasserereignisse dieses

Ausmaßes auch ein beträchtlicher volkswirtschaftlicher Schaden, den es im Sinne des Gemeinwohls zu minimieren gilt.

Das Instrument zur computergestützten Simulation von Strömungsvorgängen ist die hydrodynamisch-numerische (HN-) Modellierung, im Folgenden kurz auch als hydraulische Modellierung

ung bezeichnet. 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. Die Berücksichtigung der Topographie erfolgt bei der HN-Modellierung allerdings i. A. nur 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, etc.). Moderne Datenerfassungsmethoden wie Airborne Laserscanning (ALS) bieten heute aber bereits die Möglichkeit einer sehr detaillierten Erfassung der Geometrie des Vorlandes und der Uferböschung. Die direkte Anwendung der daraus abgeleiteten dichten Geländemodelle als geometrische Basis für die HN-Modellierung ist aufgrund der enormen Datenmenge nicht möglich. Durch den Einsatz einfacher Verfahren zur Datenreduktion gehen allerdings wertvolle und für die hydraulische Modellierung relevante Details verloren. Im vorliegenden Artikel wird daher ein Verfahren beschrieben, welches eine verbesserte und effektivere Berücksichtigung der Topographie in den numerischen Modellen der Hydraulik erlaubt. Dies beinhaltet neben dem Aufbau einer genauen geometrischen Datengrundlage, welche möglichst alle in den Messdaten enthaltenen Details berücksichtigt, auch eine fachgerechte Aufbereitung der Geometrie, so dass diese bei der Weiterverarbeitung in Folgemodellen eine optimale Grundlage darstellen. Dabei sind neben rein geometrischen auch physikalische Aspekte zu berücksichtigen. Eine Auseinandersetzung mit den Grundlagen, Verfahren und Anforderungen der Hydraulik ist dafür die Voraussetzung.

Der weitere Artikel ist wie folgt gegliedert: Im Abschnitt 2 werden die Grundlagen der Modelle zur Simulation von Hochwasserrisiko erläutert. Abschnitt 3 beschäftigt sich mit dem Aufbau des Wasserlauf-DGM als die geometrische Basis für die nachfolgende hydraulische Modellierung, auf die im Abschnitt 4 näher eingegangen wird. Beispiele praktischer Simulationsergebnisse und eine Zusammenfassung schließen den Artikel ab.

2 Grundlagen und Begriffsbestimmungen

2.1 Wasserlauf-DGM

Wie bereits im vorangegangenen Abschnitt erwähnt, stellt die Geometrie in Form eines Wasserlauf-DGM (DGM-W) die einflussreichste

Eingangsgröße für HN-Modelle dar. Ganz allgemein wird im Folgenden unter einem digitalen Geländemodell eine kontinuierliche Beschreibung der Erdoberfläche verstanden, welche mathematisch durch die bivariate Funktion $z=f(x,y)$ beschrieben ist, wobei z die Höhe und x, y die Lagekoordinaten bezeichnen. Unter einem DGM-W im Speziellen versteht man ein digitales Geländemodell, welches den überflutungsrelevanten Bereich eines Flusslaufes einschließlich des Gewässerbettes enthält [1]. Neben dem Gewässerbett, der Uferböschung und dem Flussvorland sind im DGM-W auch alle abfluss-hindernden Bauwerke, wie Brücken oder Wehre, zu integrieren. 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 Querprofilen (Echolot oder tachymetrische Vermessung). Als DGM-Datenstrukturen haben sich vor allem das regelmäßige Gitter und das TIN (Triangular Irregular Network) durchgesetzt. In der vorliegenden Arbeit wird allerdings eine hybride Datenstruktur auf Basis eines regelmäßigen Gitters mit eingeketteten Geländekanten, Gerippelinien und markanten Höhenpunkten, wie in [2] beschrieben, bevorzugt. Diese gewährleistet sowohl direkten Datenzugriff (Gitter) als auch Flexibilität (TIN).

Um möglichst plausible und realistische Ergebnisse bei der nachfolgenden hydraulischen Modellierung erzielen zu können, muss das DGM-W als die geometrische Basis frei von systematischen Fehlern sein. Zusätzlich sollten zufällige Messfehler durch geeignete Filterung minimiert werden. Das setzt eine lückenlose Prozessierungskette, beginnend bei den rohen Messdaten bis hin zum fertigen DGM-W, voraus. Insbesondere bei der Verwendung von ALS als Datengrundlage ist auf eine präzise Sensorkalibrierung, eine sorgfältige Feinanpassung der Streifen Daten, eine möglichst fehlerfreie Trennung von Boden und Nicht-Bodenpunkten und eine Reduktion der zufälligen Messfehlereinflüsse bei der DGM-Interpolation zu achten. Ansätze zur Feinorientierung von ALS-Streifen sind in [3], verschiedene Ansätze der oft auch als Filterung bezeichneten Klassifizierung der ALS-Punktwolke in [4] beschrieben. Für die DGM-Interpolation haben sich vor allem die lineare Prädiktion [5] sowie das äquivalente Kriging [6] bewährt, da diese eine statistisch fundierte Minimierung der zufälligen Messfehler erlauben. Neben der Verarbeitung der ALS-Daten sind für die Erstellung eines präzisen

DGM-W weiters die Verdichtung der Gewässerbettprofile unter Berücksichtigung des gekrümmten Flussverlaufes sowie der Uferlinie und die korrekte Fusion von ALS- und Gewässerbettprofilen von Bedeutung. Weitere Details dazu werden im Abschnitt 3 erläutert. Ein Beispiel eines fertig aufbereiteten DGM-W in hybrider Geländemodellstruktur zeigt Abb. 1.

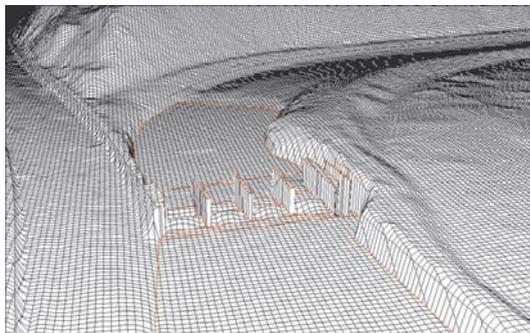


Abb. 1: DGM-W der Saar bei Schoden aufgebaut aus ALS-Punkten, Querprofilen des Gewässerbettes und Plandaten des Kraftwerks; Daten: Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz.

2.2 Hydraulische Modellierung

Die Grundlage für die hydrodynamisch-numerische Modellierung bilden drei fundamentale Erhaltungssätze der Physik: der Impuls-, der Energie-, und der Massenerhaltungssatz [7]. Letzterer wird auch oft als Kontinuitätsgesetz bezeichnet und besagt, dass während eines Zeitintervalls die Summe der ein- und ausströmenden Flüssigkeitsmasse gleich ist. Für inkompressible Flüssigkeiten (Dichte konstant) gilt:

$$\nabla \mathbf{v} = \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

Für stationären Abfluss erhält man durch die Einführung einer über den Querschnitt A_i gemittelten Fließgeschwindigkeit v_i die vereinfachte anschauliche Beziehung:

$$Q = \bar{v}_1 \cdot A_1 = \bar{v}_2 \cdot A_2 = \text{const} \quad (2)$$

Der Impulserhaltungssatz besagt, dass in einem abgeschlossenen System, auf das keine äußeren Kräfte einwirken, der Gesamtimpuls aller miteinander in Wechselwirkung stehenden Teile konstant ist. Komplettiert werden die hydromechanischen Grundgesetze durch den Energieerhaltungssatz, wonach bei stationärer Bewegung einer idealen, lediglich der Schwerkraft unterworfenen Flüssigkeit die Summe aus Orts-, Druck- und Geschwindigkeitshöhe konstant ist. Die Beschreibung der Ausbreitung von reibungsfreien Flüssigkeiten basiert auf den Euler'schen

Bewegungsgleichungen. Es handelt sich dabei um partielle Differentialgleichungen 1. Ordnung, die einen Zusammenhang zwischen der lokalen und konvektiven Beschleunigung \mathbf{v} , der Massenkraft \mathbf{k} (Kraft pro Masse) und der Oberflächenkraft (Druckkraft \mathbf{p}) herstellen. Erweitert um einen Term, der die innere Reibung (Zähigkeit ν) bewegter Flüssigkeiten beschreibt, erhält man die Navier-Stokes'schen Bewegungsgleichungen. Diese partiellen Differentialgleichungen 2. Ordnung stellen die fundamentalen Beziehungen der HN-Modellierung dar. Sie sind für turbulente Strömungen analytisch nicht mehr lösbar und werden daher in der Praxis auf numerischem Wege gelöst. In vektorieller Schreibweise lauten sie:

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \nabla) \mathbf{v} = \mathbf{k} - \frac{1}{\rho} \nabla \mathbf{p} + \nu \nabla^2 \mathbf{v} \quad (3)$$

Grundsätzlich stehen als numerische Lösungsverfahren die Finite-Elemente-Methode (FEM) und die Finite-Volumina-Methode (FVM) zur Verfügung. Bei der FEM wird das Interessensgebiet von einem Netz endlicher (=finiter) Elemente überzogen, welche jeweils durch gerade oder krummlinige Polygone begrenzt sind. In den Knoten der Elemente werden die gesuchten Variablen durch lineare Ansatzfunktionen beschrieben. Die Lösung des Gleichungssystems erfolgt elementweise, wobei in die einzelnen Gleichungen die Koeffizienten der anliegenden Knoten eingehen. Durch die Darstellung mit Dreiecks- und Vierecksflächen lassen sich komplexe Topographien sehr gut modellieren. Da die geometrische Form der einzelnen finiten Elemente einen starken Einfluss auf die numerische Stabilität des Verfahrens hat, sollten sehr spitze und stumpfe Winkel vermieden werden. Bei der FVM kommt es zu einer Zellaufteilung in Prismen, Tetraeder, Hexaeder und Pyramiden. Gegenüber der FEM ist die FVM numerisch stabiler, was geringere Anforderungen an die Form der Gitterzellen stellt und gut an die natürlichen Verhältnisse angepasste Geometrien erlaubt. Von der Dimensionalität her betrachtet, unterscheidet man ein- und mehrdimensionale hydraulische Modelle. Bei der 1D-Modellierung werden die gesuchten hydrodynamischen Größen, wie Wasserstand und Fließgeschwindigkeit, integriert für einen gesamten Querschnitt ermittelt. Demgegenüber erlaubt die 2D-Modellierung auch Aussagen über die horizontal differenzierte Geschwindigkeitsverteilung. Durch die gestiegene Rechnerleistung der vergangenen Jahre stellt die 2D-Modellierung heutzutage den state-of-the-art dar, vor allem wenn es um die Modellierung von naturnahen Flüssen mit variie-

render Gerinnebreite geht. Die 3D-Modellierung erlaubt darüber hinaus auch Aussagen über vertikale Geschwindigkeitsgradienten, wird aber derzeit nur in Spezialfällen, etwa im Bereich von Kraftwerksanlagen und Brückenpfeilern, eingesetzt.

Um eine Lösung des hydrodynamischen Problems mittels FEM oder FVM zu erhalten, muss die Topographie in Form von Rechnernetzen approximiert werden. Nach [8] sind dabei folgende Kriterien maßgeblich:

- Winkelkriterium (angle criterion): Um physikalisch einwandfreie Netze des Gerinnebettes zu erhalten, müssen diese an der vorherrschenden Strömungsrichtung (längere Seite in Fließrichtung, schmalere Seite quer dazu) ausgerichtet sein. Im Vorland hingegen kann die Punktanordnung im Berechnungsnetz unregelmäßig erfolgen, da hier keine vorherrschende Fließrichtung existiert. Sehr spitze oder stumpfe Winkel ($< 5^\circ$ bzw. $> 175^\circ$) sollen grundsätzlich vermieden werden.
- Seitenverhältnis (aspect ratio): Neben den Winkeln ist auch das Seitenverhältnis zu beachten, da sich bei zu großen Verhältnissen Oszillationseffekte einstellen, die zu langen Rechenzeiten führen. Ein Verhältnis der längsten zur kürzesten Seite von 10 sollte nicht überschritten werden; optimale Ergebnisse lassen sich bei einem Verhältnis kleiner als 3 erzielen.
- Ausdehnungsverhältnis (expansion ratio): Verbindet man die Mittelpunkte zweier Zellen und vergleicht die Teilstrecken der Mittelpunkte bis zum Zellrand, so erhält man das Ausdehnungsverhältnis. Dieses liegt optimalerweise bei 1,2, ein Wert kleiner 3 sollte angestrebt und ein Maximalwert von 10 darf nicht überschritten werden.

Die gängigen Netzgeneratoren berücksichtigen vorwiegend physikalische Kriterien, nicht aber geometrische Details. In diesem Artikel werden daher Methoden vorgestellt, die beim Aufbau des Rechnernetzes sowohl die in den Vermessungsdaten enthaltene Detailinformation als auch die physikalischen Randbedingungen berücksichtigen (siehe Abschnitt 4).

Neben der Geometrie stellt die Rauigkeit einen wichtigen Einflussfaktor für die Ergebnisse der HN-Modellierung dar. Die Rauigkeit selbst dient dazu, Fließwiderstände zu simulieren. Durch die Variation von Rauigkeitsbeiwerten (z.B. Strickler) ist es möglich, ein hydraulisches Modell zu kalibrieren. Unter Kalibrieren versteht man dabei

eine derartige Anpassung der einzelnen Modellparameter, dass die in der Natur gemessenen Wasserspiegellagen und Fließgeschwindigkeiten möglichst gut mit den aus dem Modell errechneten übereinstimmen [9]. Diese Anpassung erfolgt zumeist auf Basis von Hochwasserereignissen mittleren Ausmaßes, für welche in der Regel geeignete Eichdaten (Strömungsgeschwindigkeiten und -vektoren, Anschlaglinien, Wassertiefen, etc.) vorliegen.

Nicht unerwähnt soll an dieser Stelle der enorme Einfluss von Sohlveränderungen (Auflandung, Sohleintiefung, Veränderung der Korngröße) bzw. von Ablagerungen und Erosion im Vorland bleiben. Der Durchgang einer Hochwasserwelle verändert sowohl die Geometrie als auch die Rauigkeiten eines Fließgewässers und stellt daher eine gewisse Unsicherheit für die Hochwasserprognose dar.

3 Aufbau des Wasserlauf-DGM

Unter der Annahme einer Standard-Datenkonfiguration (ALS-Punktwolke und Gewässerbett-Querprofile) besteht die Ableitung des DGM-W aus folgenden Teilschritten:

- Modellierung hydraulisch relevanter Geländekanten
- Filterung (Klassifizierung) der ALS-Punktwolke
- Bestimmung eines DGM der Wasseroberfläche (DWM)
- Ableitung der Wasser-Land-Grenzlinie (WLG)
- Verdichtung (Interpolation) der Profildaten
- Datenzusammenführung und Interpolation des DGM-W „in einem Guss“

Die explizite Modellierung relevanter Geländekanten spielt für die HN-Modellierung eine große Rolle, insbesondere wenn diese Geländediskontinuitäten beschreiben, welche die Ausbreitungsrichtung des Wassers markant beeinflussen. Aus hydraulischer Sicht sind vor allem die Oberkante der Uferböschung, Deichoberkanten sowie Straßen- und Bahndämme relevant. Diese Elemente müssen als unverzichtbare Bestandteile eines hochwertigen hydraulischen Berechnungsnetzes auch konsequent in das DGM-W integriert werden. Neben den klassischen Verfahren der Kantenbestimmung (Stereo-Photogrammetrie, terrestrische Vermessung, Digitalisierung auf DGM-Basis) sind derzeit Verfahren in Entwicklung, die einen höheren Automationsgrad erlauben. Ein semi-automatisches Verfahren zur Modellierung von Geländekanten auf Basis der ALS-Punktwolke ist in [10] beschrieben.

Im Bereich des Flussvorlandes wird das DGM-W im Wesentlichen aus den Bodenpunkten des ALS-Datensatzes aufgebaut. Dazu ist eine Filterung der ALS-Punktwolke erforderlich. Einen Vergleich der gängigsten Filtermethoden enthält [4]. In dieser Arbeit wurde auch die am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung entwickelte Methode der robusten Interpolation ([11], [12]) evaluiert und, abgesehen von Abrundungstendenzen im Bereich der Geländekanten, gut bewertet. Eine Verbesserung des Filterergebnisses lässt sich in jedem Fall durch Einbeziehung der bereits davor explizit modellierten Geländekanten erreichen. Dies gilt insbesondere für die robuste Interpolation, aber auch für alle anderen Filterverfahren, die derzeit lediglich auf geometrischen Kriterien (i.A. die Höhenverhältnisse benachbarter Punkte) aufbauen. Die neueste Generation von Laserscannern bietet darüber hinaus nicht nur Distanzinformation, sondern die gesamte Wellenform des reflektierten Lasersignals. Daraus lassen sich zusätzliche Parameter pro Laserecho ableiten [13], welche im Fall der robusten Interpolation elegant zur Bestimmung von a-priori Punktgewichten herangezogen werden können [14]. Dadurch kann die Zuverlässigkeit der Filterung weiter gesteigert und die Qualität des abgeleiteten DGM verbessert werden.

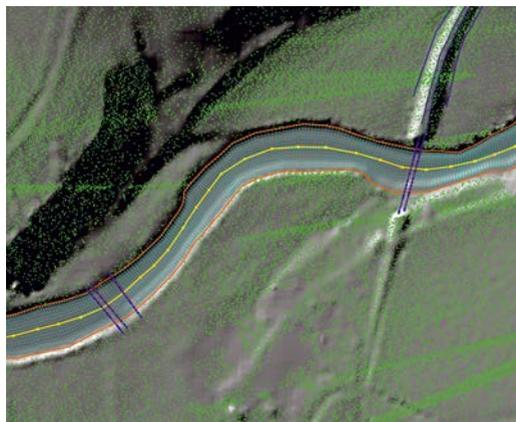
Die ALS-Punktwolke enthält auch gelegentlich Reflexionen an der Wasseroberfläche. Da das DGM-W allerdings das Gewässerbett, nicht aber die Wasseroberfläche beinhaltet, müssen diese Punkte aus dem Datensatz eliminiert und durch entsprechende gemessene oder interpolierte Punkte der Gewässervermessung ersetzt werden. In Abb. 2 sind die ursprüngliche und die aufbereitete Datenanordnung exemplarisch dargestellt.

Die Trennung von Punkten des aquatischen und trockenen Bereiches erfolgt auf Basis der Wasser-Land-Grenzlinie (WLG). Zur Ableitung der WLG ist in [1] ein zweistufiges Verfahren angegeben, welches auf dem Verschnitt eines DGM (Stufe 1) bzw. DGM-W (Stufe 2) mit einem digitalen Modell der Wasseroberfläche beruht. Das DWM kann aus den gelegentlichen Reflexionen des Lasersignals an der Wasseroberfläche aufgebaut werden, sofern der Wasserstand während der Befliegung nicht wesentlich variiert. Da sich die Wasseroberfläche, abgesehen von Steilstufen, nur sehr träge ändert, können punktlose Bereiche durch einfache Interpolationsverfahren überbrückt werden. Der Verschnitt wird durch die Berechnung eines Differenzmodells aus

„DGM minus DWM“ realisiert, aus dem die WLG als Null-Isolinie extrahiert werden kann. Die Prinzipskizze in Abb. 3 veranschaulicht die Zusammenhänge.



(a) Originale Messdaten: ALS-Punkte (grün), Gewässerbett-Querprofile (blau), Flussachse (gelb).



(b) Aufbereitete Messdaten, ALS-Bodenpunkte (grün), Gewässerbett-Querprofile (blau), interpolierte Gewässerpunkte (cyan), Wasser-Land-Grenze (rot), Geländekanten (blau), Flussachse (gelb).

Abb. 2: Originale (a) und aufbereitete (b) Datengrundlage zur Ableitung des DGM-W.

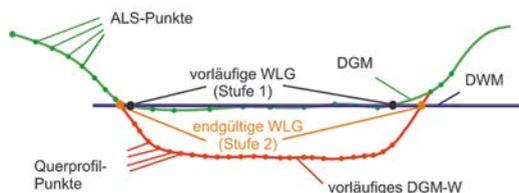


Abb. 3: Prinzipskizze zur zweistufigen Ableitung der WLG aus dem Verschnitt von DGM bzw. DGM-W und DWM.

In einer ersten Stufe wird zunächst ein DGM aus allen ALS-Bodenpunkten bzw. Reflexionen an der Wasseroberfläche aufgebaut und mit dem DWM verschnitten. Aufgrund des schleifenden Schnittes zwischen dem DGM und dem DWM ist die vorläufige WLG schlecht definiert und erfahrungsgemäß lückenhaft. Erfahrungsgemäß begnügt man sich deshalb als vorläufige Näherung mit einer um 20cm nach oben versetzten Schnittlinie. Auf Basis dieser vorläufigen WLG können alle ALS-Punkte innerhalb eliminiert und durch Punkte des Gewässerbettes ersetzt werden. Anschließend (Stufe 2) kann aus den verbleibenden ALS-Punkten und den Gewässerbett-daten ein vorläufiges DGM-W berechnet werden. Die endgültige Wasser-Land-Grenze gewinnt man schließlich aus dem neu berechneten Differenzmodell zwischen vorläufigem DGM-W und DWM. Für weitere Details sowie alternative Ansätze sei auf [15] verwiesen.

Damit die Punkte des Gewässerbettes gemeinsam mit den ALS-Bodenpunkten zu einem homogenen DGM-W interpoliert werden können, sind diese noch entsprechend aufzubereiten. Eine Profilverdichtung ist notwendig, da der Profilabstand in der Regel wesentlich höher ist als der Abstand der Punkte innerhalb eines Profils (siehe Abb. 2). Ein Ansatz zur Interpolation von Profildaten unter Berücksichtigung des gekrümm-

ten Flussverlaufes ist in [16] beschrieben. Die prinzipielle Funktionsweise zeigt die Abb. 4. In einem ersten Schritt werden die xy-Projektkoordinaten der Profilmomente über die als glatte Kurve (z.B. kubischer Spline) beschriebene Gewässerachse in Profilkordinaten qs umgerechnet (q = Querabstand von der Achse, s = Stationierung des Profils). In diesem System erscheinen die ursprünglich schiefwinkelig angeordneten Profile parallel. Die Homogenisierung der Datenverteilung erreicht man nun durch Einrechnen von Zwischenpunkten im Profilkordinatensystem durch bi-lineare Interpolation. 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. Für weiterführende Details sei wiederum auf [15] verwiesen.

Abschließend können die homogenisierten Gewässerbett-daten sowie die bereinigten ALS-Punkte und Geländekanten zu einem homogenen DGM-W interpoliert werden. Im DGM-W als geometrische Basis für weiterführende Analyse- und Modellierungsschritte sollte der Einfluss von zufälligen Messfehlern durch Verwendung entsprechender Interpolationsstrategien so weit wie möglich reduziert werden.

Ausgangsdaten:

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

Berechnungsablauf:

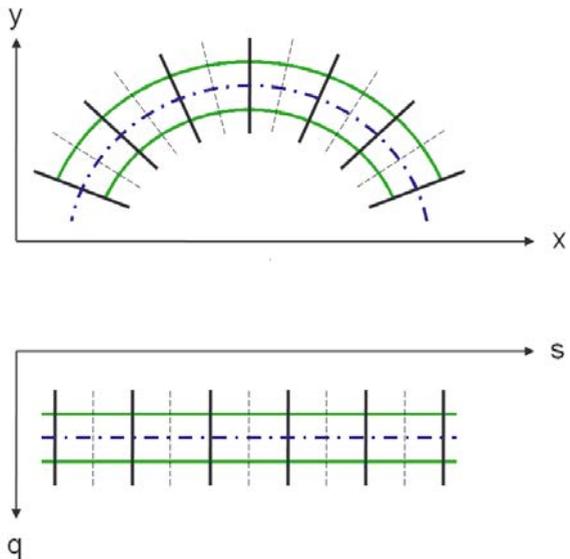
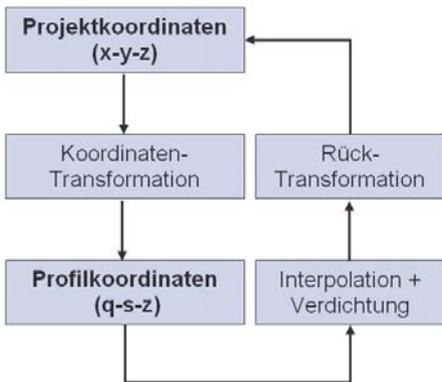


Abb. 4: Prinzipskizze zur Interpolation von Querprofil-daten.

4 Vom DGM-W zum hydraulischen Modell

Der Einsatz moderner Datenerfassungsmethoden wie ALS ermöglicht eine immer detailreichere Beschreibung der Topographie zum Preis einer um Zehnerpotenzen gestiegenen Datenmenge. Heutige Wasserlauf-Geländemodelle bestehen bereits für Projektgebiete von wenigen km^2 aus mehreren Millionen Punkten. Der direkte Einsatz solcher Modelle als Berechnungsnetze für die HN-Modellierung ist nicht möglich, da die Maximalanzahl der Zellelemente für hydraulische Netze typischerweise mit etwa 500.000 beschränkt ist. Die im folgenden Abschnitt vorgestellten Methoden haben daher die Aufbereitung der Geometrie für den Aufbau hochwertiger Berechnungsnetze zum Ziel. Die Topographie ist dabei derart zu approximieren, dass die Datenmenge wesentlich reduziert wird, aber gleichzeitig relevante geometrische Details erhalten bleiben (Abschnitt 4.1). Darüber hinaus sind neben geometrischen auch noch physikalische Parameter zu berücksichtigen (Abschnitt 4.2).

4.1 Datenreduktion hybrider Geländemodelle

Einen Überblick über vorhandene Methoden zur Vereinfachung von Flächen gibt [17]. Die gängigsten Ansätze sind statische Ausdünnung regelmäßiger Gitter, Dezimierungs- und Verfeinerungstechniken. Die statische Gitterausdünnung ist weit verbreitet und einfach, liefert aber suboptimale Qualität, da oft auch bedeutsame Punkte häufig verloren gehen. Eine qualitativ hochwertigere Approximation kann durch Dezimierungs- oder Verfeinerungstechniken auf Basis allgemeiner Dreiecksvermaschung wie der Delaunay Triangulation erreicht werden. Dezimierungsansätze arbeiten vom Feinen ins Grobe und sind für die Datenreduktion dichter ALS-DGMe nicht geeignet, da sie eine Triangulation der gesamten Punktwolke erfordern. Die Methode der Verfeinerung (mesh refinement) hingegen startet mit einer kleinen Menge ausgewählter Startpunkte und arbeitet vom Groben ins Feine. In einem iterativen Prozess werden immer mehr Punkte eingefügt, solange bis die geforderte Höhentoleranz gegenüber der ursprünglichen Fläche eingehalten oder eine gewisse maximale Punktanzahl erreicht ist.

Hohe Kompressionsraten können bei der Datenreduktion nur dann erreicht werden, wenn der zufällige Messfehlereinfluss im Zuge der Flächenbildung minimiert worden ist. Die oben angeführten Methoden zur Flächenvereinfachung setzen auf der originalen Punktwolke auf und sind

daher nicht die erste Wahl. Vielmehr sollte aus den rohen Messdaten, wie im Abschnitt 3 beschrieben, ein gefiltertes DGM-W abgeleitet werden. Im Folgenden wird daher ein Rahmen zur Reduktion hybrider Geländemodelle mittels adaptiver TIN-Verdichtung oder Analyse lokaler Krümmung und Neigung vorgestellt. Die Methode wurde am Institut für Photogrammetrie der TU Wien entwickelt ([18], [15]).

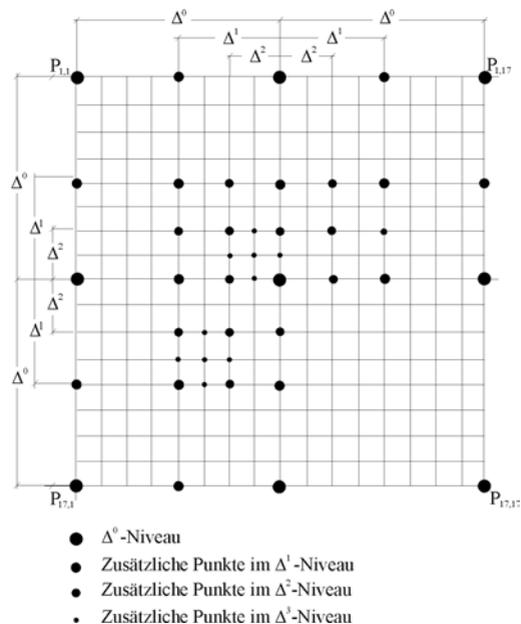


Abb. 5: Datenreduktion mittels hierarchischer Unterteilung, Prinzipskizze.

Die wesentlichen Parameter zur Steuerung des Reduktionsprozesses sind die maximal zulässige Höhentoleranz Δz_{\max} sowie der maximale planimetrische Punktabstand $\Delta xy_{\max} = \Delta_0$. Zunächst werden die Gitter-Matrix und die Strukturinformationen (Geländekanten, Gerippelinien, markante Höhenpunkte) aus dem hybriden DGM eingelesen. Anschließend wird eine erste Approximation, bestehend aus einem statisch reduzierten regelmäßigen Gitter (Δ_0 -Niveau) und den Strukturlinien, aufgebaut. Schließlich wird jede Δ_0 -Kachel solange verfeinert, bis die geforderte Höhentoleranz eingehalten ist. Die Unterteilung der Δ_0 -Kacheln kann dabei hierarchisch oder unregelmäßig erfolgen. Bei der hierarchischen Unterteilung wird die Δ_0 -Kachel im Sinne eines Quad-Trees durch Einfügen zusätzlicher Gitterpunkte solange in Quadranten unterteilt, bis entweder die geforderte Höhentoleranz eingehalten oder die originale DGM-Gitterweite erreicht ist

(siehe Abb. 5). Im Gegensatz dazu wird bei der unregelmäßigen Unterteilung in einem Durchgang jeweils der Gitterpunkt mit dem größten Fehlerbetrag gegenüber dem originalen DGM in die approximierte Fläche eingefügt. Dieser Prozess wird analog zur hierarchischen Unterteilung solange wiederholt, bis die geforderte Toleranz eingehalten ist. Die Vorzüge der unregelmäßigen Unterteilung sind die Effizienz der Kompression und die Eigenschaft, dass sich Geländekanten durch eine dichtere Punktanzordnung weitgehend automatisch ausdrängen. Mittels hierarchischer Unterteilung sind die erzielbaren Kompressionsraten etwa um einen Faktor drei geringer, die Punktverteilung ist allerdings homogener und der ursprüngliche regelmäßige Gittercharakter bleibt deutlicher erhalten.

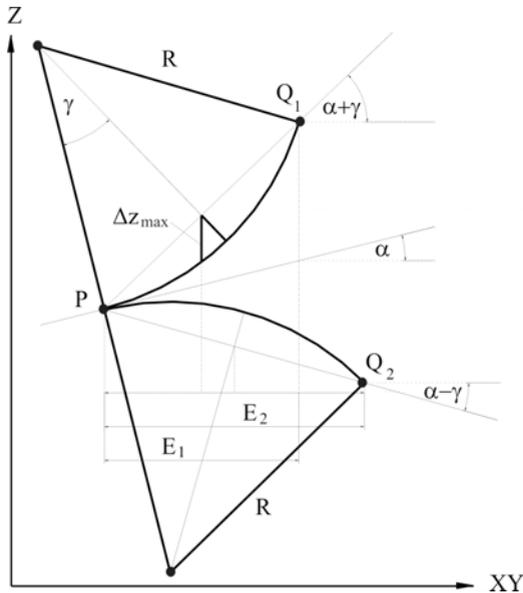
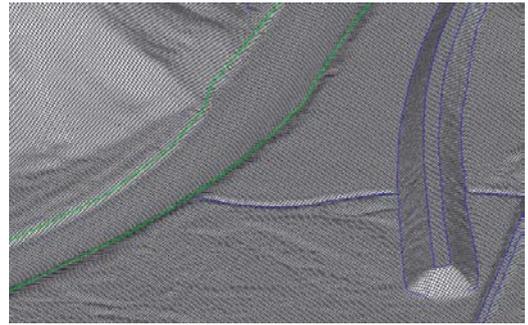


Abb. 6: Datenreduktion durch Analyse von Gelände­krümmung und -neigung, Prinzipskizze.

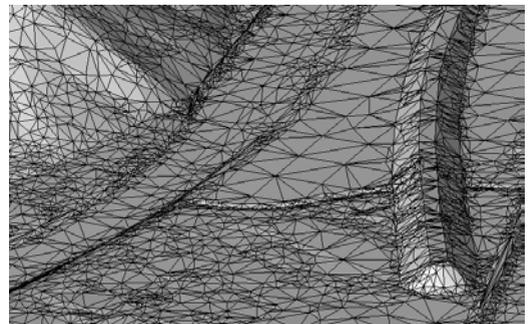
Die Entscheidung, ob zusätzliche DGM-Gitterpunkte eingefügt werden müssen, kann durch Analyse der lokalen Gelände­krümmung und -neigung erfolgen. Dabei wird für jeden Gitterpunkt aus der Geländeneigung α , dem Krümmungsradius R , dem Sehnen-Tangentenwinkel γ und der Höhentoleranz Δz_{\max} gemäß Gl. 4 eine maximale Extrapolationsweite E berechnet. Die geometrischen Zusammenhänge sind in Abb. 6 veranschaulicht. Sind in einer betrachteten Kachel die E -Werte aller Gitterpunkte, die noch nicht Teil der approximierten Fläche sind, größer als die entsprechende Kachelgröße Δ_i , dann



(a) Ursprüngliches hybrides DGM-W, Gitterweite: 2m.



(b) Adaptives TIN, hierarchische Unterteilung, $\Delta z_{\max} = 25\text{cm}$, Reduktionsrate: 83%.



(c) Adaptives TIN, unregelmäßige Unterteilung, $\Delta z_{\max} = 25\text{cm}$, Reduktionsrate: 94%.

Abb. 7: Originales DGM-W (a) und generalisierte TINs (b: hierarchische Unterteilung, c: unregelmäßige Unterteilung).

muss nicht weiter unterteilt werden. Im anderen Fall werden, wie oben beschrieben, ein oder mehrere zusätzliche Punkte eingefügt. Vor allem im Zusammenhang mit der hierarchischen Unterteilung ergibt sich dadurch die Möglichkeit einer rein rasterbasierten DGM-Datenreduktion. Der Nachteil dieser Methode ist allerdings, dass die

Einhaltung der Höhentoleranz über die Gl. 4 nur abgeschätzt, nicht aber sichergestellt wird. Überschreitungen der Abweichungsbeträge zwischen vereinfachter und ursprünglicher DGM-Fläche sind daher möglich. Außerdem liefert dieser Ansatz nur eine reduzierte Punktmenge und keine Flächenbeschreibung.

$$E \approx \sqrt{8 \cdot R \cdot dZ \cdot \cos^3(\alpha \pm \gamma)} \quad (4)$$

$$|z_{\text{TIN}} - z_{\text{DGM}}| \leq \Delta z_{\text{max}} \quad (5)$$

Alternativ dazu kann die Höhentoleranz durch den Vergleich der Höhen der DGM-Gitterpunkte mit denen eines TIN, welches im Zuge des Reduktionsprozesses sukzessive aus den ursprünglichen DGM-Gitterpunkten aufgebaut wird, überprüft werden (Gl. 5). In diesem Fall spricht man von adaptiver TIN-Verdichtung. Bei diesem Ansatz wird die Menge der DGM-Punkte deutlich reduziert und gleichzeitig eine vereinfachte Fläche in Form eines Dreiecksnetzes aufgebaut. Darüber hinaus ist die Einhaltung der maximalen Höhentoleranz durch den Reduktionsalgorithmus sichergestellt. Je nach Geländetyp lassen sich damit Reduktionsraten von etwa 90% in bewegten Gebieten, bis zu 99% bei flachem Gelände erreichen. Die Ergebnisse der DGM-Datenreduktion auf Basis adaptiver TIN-Verdichtung mit hierarchischer bzw. unregelmäßiger Unterteilung im Vergleich zum ursprünglichen hybriden DGM-W sind in Abb. 7 dargestellt.

4.2 Aufbau des hydraulischen Berechnungsnetzes

Mittels der im letzten Abschnitt vorgestellten Methode gelingt eine deutliche Reduktion der DGM-Datenmenge unter Berücksichtigung von Geländedetails. Um das entstandene Netz als Rechengrundlage für die HN-Modellierung verwenden zu können, sind darüber hinaus auch noch weitere physikalische Kriterien zu berücksichtigen.

In einem nächsten Schritt müssen daher die Geometriedaten weiter aufbereitet und die Datenverteilung an die Zonen von besonderem hydraulischem Interesse angepasst werden. Aus Sicht der HN-Modellierung können etwa folgende Zonen unterschieden werden: Gewässerbett, Uferböschung, unmittelbares und erweitertes Flussvorland. Das Gewässerbett ist permanent von Wasser durchflossen. Die Fließrichtung des Wassers, welche sich genähert durch die Richtung des Achsverlaufes beschreiben lässt, stellt die vorherrschende Kraftrichtung dar. Um physikalisch zuverlässige Modellierungsergeb-

nisse zu erhalten, müssen die Zellelemente in diesem Bereich an der Fließrichtung ausgerichtet sein. Gute Ergebnisse können auf Basis viereckiger Zellelemente mit der längeren Seite in Fließrichtung und der kürzeren quer dazu erreicht werden. In diesem Fall erfolgt die Höheninterpolation innerhalb der Zelle durch bilineare Interpolation. Alternativ dazu können auch gestreckte dreieckige Elemente mit der kurzen Seite quer zur Fließrichtung eingesetzt werden (vgl. Abb. 8). Dies gilt sinngemäß auch für die Uferböschung.

Jenseits der Böschungsoberkante ist die Strömung nicht mehr streng parallel zur Hauptfließrichtung, daher kann hier eine unregelmäßige Datenverteilung, wie im vorangegangenen Abschnitt beschrieben, gewählt werden. Das unmittelbare Flussvorland sollte dabei detaillierter modelliert werden als entfernte und höher gelegene Bereiche, da diese einem höheren Überschwemmungsrisiko ausgesetzt sind. Höhenfehler von wenigen cm können in diesem Bereich bereits gravierende Auswirkungen auf die Modellierungsergebnisse haben, was vor allem in besiedeltem Gebiet von besonderer Bedeutung ist. Mit zunehmendem Abstand vom Fluss oder zunehmender Höhenlage über diesem nimmt der Einfluss der Topographie auf die Ergebnisse der HN-Modellierung ab. Das Gelände kann daher stärker generalisiert werden. Im Rahmen des vorgestellten Reduktionsansatzes kann dieser unterschiedliche Bedarf an Approximationsgenauigkeit durch räumlich variierende Höhentoleranzen ($\Delta z_{\text{max}} = f(x, y)$) realisiert werden. Zur Steuerung der Höhentoleranzen können beispielsweise der Abstand eines Gitterpunktes von der Flussachse oder seine relative Höhe über dem Wasserspiegel herangezogen werden. Praktische Erfahrungen haben aber gezeigt, dass ein einfaches Zonenmodell, wobei jeder Zone ein konstanter Toleranzbetrag zugewiesen wird, ausreichend ist. Die Abgrenzungen der einzelnen Zonen können entweder aus Voruntersuchungen (z.B. 1D-Simulation) oder DGM-Visualisierungen (z.B. Schummerung, Höhenkodierung) ermittelt werden. Das so entstandene Netz muss noch hinsichtlich der Einhaltung der Gütekriterien (Winkelbedingung, Seiten- und Ausdehnungsverhältnis) überprüft werden und ggf. sind zusätzliche Punkte einzufügen. Die Abb. 8 zeigt ein derart aufbereitetes Netz für einen kleinen Flussausschnitt.

Bevor die HN-Modellierung gestartet werden kann, sind weiters noch Querbauwerke und andere hydraulisch relevante Einbauten ins Berechnungsnetz zu integrieren. Sofern diese

Informationen nicht bereits im DGM-W enthalten sind, müssen sie in der Hydraulik-Software zusätzlich berücksichtigt werden. Die entsprechenden Netzgeneratoren bieten zumeist die Möglichkeit, separate Liniendaten als Zwangskanten ins Berechnungsnetz einzubauen. Zusätzlich sind auch alle Informationen über Einbauten zu berücksichtigen, die nicht in der 2.5D-Repräsentation des Geländes enthalten sind. Dazu zählen die Höhen der Unter- bzw. Oberkanten von Brücken, die über den Einstau und die Überströmung des Bauwerkes Auskunft geben. Weiters sind Durchlässe (Lageverlauf, Querschnittsform und -größe) ins Berechnungsnetz einzuarbeiten. Um die unterschiedlichen Fließwiderstände zu berücksichtigen, muss schließlich jedem Netzelement noch ein entsprechender Rauigkeitsbeiwert zugewiesen werden. Aus ALS-Daten abgeleitete Gebäude- und Vegetationsmodelle können dabei zur Rauigkeitsbelegung herangezogen werden. In einem abschließenden Schritt müssen noch die Randbedingungen (Abflussmengen) festgelegt werden.

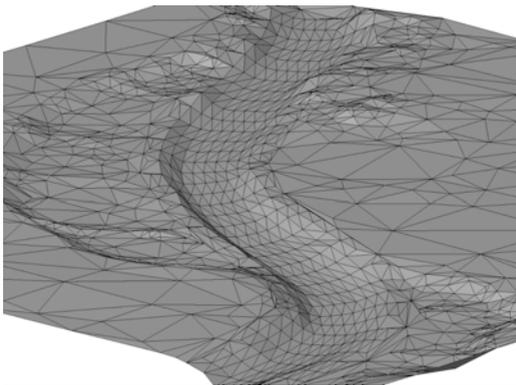


Abb. 8: Hydraulisches Netz abgeleitet aus einem dichten DGM-W unter Berücksichtigung geometrischer und physikalischer Anforderungen.

Ergebnisse

Die folgenden Ergebnisse stammen aus einer 2D-Abflussmodellierung an der Lainsitz im nördlichen Waldviertel. Dieses Projekt wurde am I.P.F. im Rahmen des Christian Doppler Labors „Räumliche Daten aus Laserscanning und Fernerkundung“ in Zusammenarbeit mit der Fa. GeoConsult Wien ZT GmbH durchgeführt. Die hydraulischen Berechnungen der potenziellen Überflutungsgebiete wurden mit dem Strömungsmodell Hydro_AS-2D [19, 20] durchgeführt. Das nume-

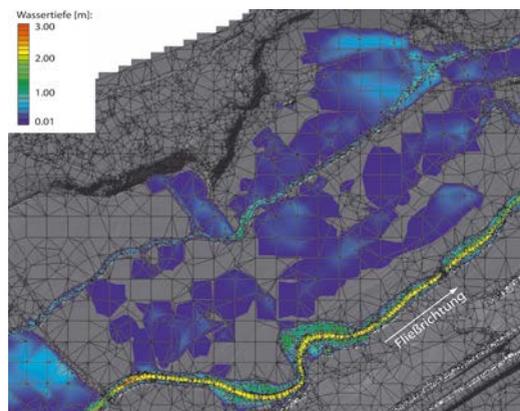
rische Verfahren basiert auf der diskreten Lösung der 2D-tiefengemittelten Strömungsgleichungen, auch als Flachwassergleichungen bekannt, mit der Finite-Volumina-Methode. Tiefengemittelt bedeutet dabei, dass die Impuls- und Kontinuitätsgleichungen über die Wassertiefe h integriert werden. Modelle dieser Art erlauben daher Aussagen über die horizontale, nicht aber über die vertikale Geschwindigkeitsverteilung.

Die Datengrundlage für die Beschreibung der Topographie als DGM-W bildete ein Laserscannerflug mit einer mittleren Punktdichte von 1 Punkt/m². Das Gewässerbett wurde durch terrestrisch gemessene Querprofile erfasst und innerhalb der WLK mit den im Abschnitt 3 erläuterten Methoden verdichtet. In der Abb. 9 sind die simulierten Wassertiefen für zwei unterschiedliche Aufbereitungsvarianten der Geometrie dargestellt. Das Berechnungsnetz für beide Varianten wurde auf Basis der adaptiven TIN-Verdichtung mit unregelmäßiger Unterteilung gemäß Abschnitt 4 abgeleitet. Bei der ersten Variante (a) wurde eine über das gesamte Gebiet konstante Höhentoleranz Δz_{\max} von 20 cm, bei der zweiten (b) hingegen eine zonenbasiert variable Höhentoleranz verwendet. In der Variante b wurde zusätzlich das Gewässerbett bis zur Oberkante der Uferböschung mit an der Fließrichtung ausgerichteten rechteckigen Zellen aufbereitet. Die 2D-HN-Modellierung wurde für einen Abfluss von 30 m³/s durchgeführt, was in diesem Flussabschnitt einem fünfjährigen Hochwasser (HQ5) entspricht.

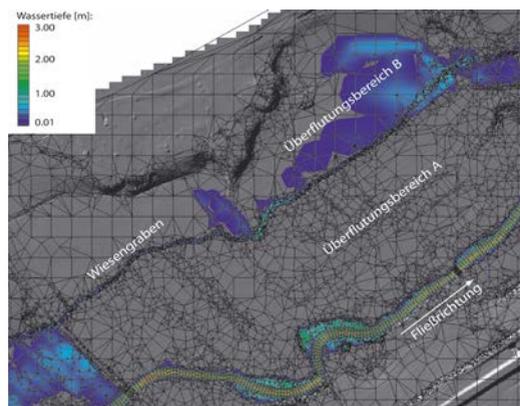
Die beiden Abb. stellen den stationären Zustand der Modellierung dar, wobei ein deutlicher Unterschied in den Ergebnissen zu erkennen ist. Im Modell (a) mit konstantem Δz_{\max} wird durch die unregelmäßige Anordnung der Netzelemente im Flussschlauch eine zusätzliche netzbedingte Rauheitswirkung erzeugt. Dies führt zu einer Verringerung der Geschwindigkeit und gemäß Gl. 1 zu einer Vergrößerung des Fließquerschnittes unter Anhebung des Wasserspiegels, was zu einer Ausuferung ins Vorland führt. Im Modell (b) mit zonenbasiert variablem Δz_{\max} ist der Flussschlauch durch homogene rechteckige Zellen repräsentiert. Durch diese Maßnahme wird die künstliche Rauheitserhöhung vermieden, so dass es zu keinen Überflutungen kommt.

Aus der Abb. 9 ist deutlich zu erkennen, dass es in den Überflutungsbereichen A und B bei der Geometrievariante (b) zu deutlich geringeren Ausuferungen kommt. Der Unterschied im Bereich B erklärt sich durch eine geometrisch

präzisere Approximation des abflussrelevanten Wiesengrabens im nördlichen Teil des Untersuchungsgebietes in der Variante (b). Durch die detaillierte Modellierung dieser Kleinstruktur wird ein größerer Abfluss ermöglicht, so dass es zu geringeren Ausuferungen kommt. Daraus erkennt man die Wichtigkeit, physikalische wie auch geometrische Aspekte bei der Datenaufbereitung zu berücksichtigen.



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

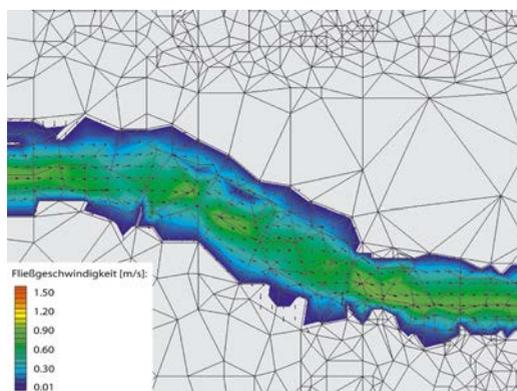


(b) *Adaptives TIN*, $\Delta z_{\max} = \text{zonen-abhängig variabel}$, Gewässerbett: Zellelemente an der Fließrichtung ausgerichtet.

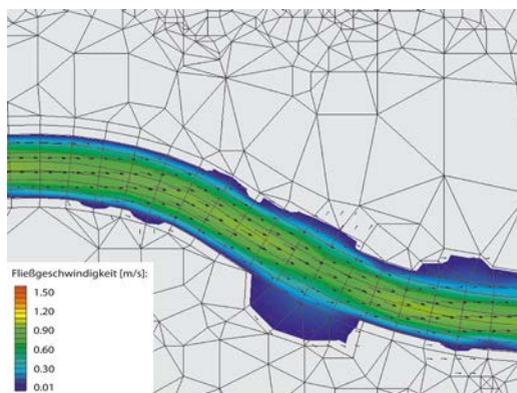
Abb. 9: Simulierte Wassertiefen für ein fünfjähriges Hochwasser (HQ5, $30 \text{ m}^3/\text{s}$) als Ergebnis einer 2D-HN-Modellierung auf Basis zweier Geometrievarianten, Daten: Lainsitz, Niederösterreich.

Das zweite Untersuchungsgebiet befindet sich in einem engen Talabschnitt mit nur geringer Überflutungsmöglichkeit. Abb. 10 zeigt die Strömungsvektoren eines Detailausschnittes für zwei Geometrievarianten, welche analog dem

obigen Beispiel aufgebaut wurden. Der Effekt von netzbedingten Rauigkeiten durch die Datenanordnung im Berechnungsnetz kann anhand dieses Beispiels anschaulich verdeutlicht werden.



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



(b) *Adaptives TIN*, $\Delta z_{\max} = \text{zonen-abhängig variabel}$, Gewässerbett: Zellelemente an der Fließrichtung ausgerichtet.

Abb. 10: Simulierte Fließvektoren für Mittelwasser (MQ, $2.2 \text{ m}^3/\text{s}$) als Ergebnis einer 2D-HN-Modellierung auf Basis zweier Geometrievarianten, Daten: Lainsitz, Niederösterreich.

Im Modell mit konstantem Δz_{\max} (a) ist das generalisierte TIN nicht an das Gewässerbett und die Fließrichtung angepasst, was beim zonenbasierten Modell (b) jedoch der Fall ist. Es kommt zu unplausiblen Strömungen, deren Vektoren zum Teil senkrecht zur Fließrichtung stehen. Obwohl die geometrischen Toleranzbedingungen erfüllt sind, ist eine derartige Netzkonfiguration für die Strömungsphysik ungünstig. Durch die zusätzliche netzbedingte Rauigkeit erhöht sich auch der Fließwiderstand bei gleichzeitiger Abminderung

der Fließgeschwindigkeit. Im Gegensatz dazu weisen die Fließrichtungsvektoren bei an die Fließrichtung angepasster Zellanordnung eine weitgehend homogene und parallele Ausrichtung auf. Die höchsten Fließgeschwindigkeiten treten hier, wie erwartet, in der Gewässermitte auf, während ufernahe Bereiche durch entsprechend niedrigere Werte gekennzeichnet sind. Durch die geringere künstliche Rauigkeit kommt es hier zu höheren Fließgeschwindigkeiten und einer verminderten Ausuferung.

Zusammenfassung

In diesem Artikel wurden Methoden zum Aufbau hochgenauer Wasserlauf-Geländemodelle und zur Weiterverarbeitung für die Zwecke der hydraulischen Modellierung vorgestellt. Der Schwerpunkt wurde dabei auf die vollständige Ausnützung aller in den Vermessungsdaten enthaltenen Informationen und deren Aufbereitung gelegt. Das Ziel liegt dabei in einer Verbesserung der Möglichkeiten zur Prognose des Gefährdungspotentials durch Hochwasserereignisse. Dies gelingt nur durch eine lückenlose Prozessierungskette, beginnend von den rohen Messdaten über ein sorgfältig gefiltertes DGM-W bis hin zum fertig aufbereiteten Berechnungsnetz für die HN-Modellierung. Um zuverlässige Modellierungsergebnisse, wie Hochwassergrenzen und dergleichen, zu erhalten, ist es notwendig, dass die grundlegenden Geometriedaten frei von systematischen Messfehlereinflüssen sind und zufällige Fehler soweit wie möglich reduziert worden sind. Für den Geodäten als Produzenten der erforderlichen Geobasisdaten bedeutet dies größtmögliche Sorgfalt bei der Orientierung der Laserscanner-Streifendaten, der Filterung der Punktwolke, der Zusammenführung mit den Vermessungsdaten des Gewässerbettes und der Ableitung eines gefilterten DGM-W.

Aufgrund der enormen Datenmengen ist die Aufgabe für den Geodäten nicht mit der Lieferung des präzisen Geländemodells getan. Vielmehr müssen die Geometriedaten für eine weiterführende Anwendung in den Modellen der Hydraulik fachgerecht aufbereitet werden. Das beinhaltet eine Generalisierung der Topographie unter weitestgehender Beibehaltung der relevanten Geländedetails, sowie darüber hinaus auch eine Anpassung der Datenverteilung mit Hinblick auf zusätzliche hydraulische Kriterien. Entsprechende Ansätze zur Reduktion dichter DGM-Daten und zur fachgerechten Datenaufbereitung wurden in diesem Artikel vorgestellt. Die praktischen Beispiele haben gezeigt, dass eine

detaillierte Berücksichtigung der Topographie in hydrodynamisch-numerischen Modellen möglich ist und daher das Potential der in den modernen Vermessungsdaten enthaltenen Details auch wirklich ausgenutzt werden kann. Gute Simulationsergebnisse können in jedem Fall nur durch eine Kooperation zwischen Geodäten und Hydraulikern erzielt werden. In diesem Sinn will der vorliegende Artikel einen kleinen Beitrag zur Verbesserung der interdisziplinären Zusammenarbeit leisten.

Literaturverzeichnis

- [1] Mandlbürger, G., Brockmann, H. (2001): 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
- [2] Köstli, A., Sigle, M. (1986): 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
- [3] Kager, H. (2004): Discrepancies Between Overlapping Laser Scanning Strips - Simultaneous Fitting of Aerial Laser Scanner Strips. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXV, B1. Istanbul. 555-560.
- [4] Sithole, G., Vosselman, G. (2004): Experimental comparison of filter algorithms for bare-Earth extraction from airborne laser scanning point clouds. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 59. (1-2), 85-101.
- [5] Kraus, K. (2000): Photogrammetrie, Band 3, Topographische Informationssysteme. Dümmler Verlag
- [6] Journel, A., Huijbregts C. J. (1978): Mining Geostatistics, 1 ed.. Academic Press.
- [7] Schlichting, H., Gersten K. (2005): Grenzschicht-Theorie, 9. Auflage, Springer-Verlag
- [8] Ferziger, J., Peric, M. (2002): Computational methods for fluid dynamics. Springer Verlag, Berlin [u.a.], 2002
- [9] Habersack, H., Mayr, P., Gierlinger, R., Schneglbauer, S. (2000): Mehrdimensionale Abflussmodellierung am Beispiel der Lafnitz. Wiener Mitteilungen Band 165, Universität für Bodenkultur Wien
- [10] Briese, C. (2004): Three-dimensional modeling of breaklines from airborne laser scanner data. Proceedings: ISPRS XXth congress, Istanbul, Vol XXXV, Part B/3, pp. 1097-1102.
- [11] Kraus, K., Pfeifer, N. (1998): Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 53, 193–203.
- [12] Kraus, K., Pfeifer, N. (2001): Advanced DTM generation from LIDAR data. In: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXIV, 3/ W4, Annapolis, MD, USA, pp. 23–30.

- [13] *Wagner, W., Ulrich, A., Ducic, V., Melzer, T., Studnicka, N. (2006): Gaussian Decomposition and Calibration of a Novel Small-Footprint Full-Waveform Digitising Airborne Laser Scanner. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 60 (2). 100 - 112.*
- [14] *Mandlbürger, G., Briese C., Pfeifer N. (2007): Progress in lidar sensor technology - chance and challenge for DTM generation and data administration. In Proceedings of the 51th Photogrammetric Week, D. Fritsch (ed.), Heidelberg, Germany. Herbert Wichmann Verlag.*
- [15] *Mandlbürger, G. (2006): Topografische Modelle für Anwendungen in Hydraulik und Hydrologie. Dissertation, Technische Universität Wien.*
- [16] *Mandlbürger, G. (2000): Verdichtung von Echolot Querprofilen unter Berücksichtigung der Flussmorphologie. In: Österreichische Zeitschrift für Vermessung & Geoinformation 4 (2000), S. 211–214*
- [17] *Heckbert, P., Garland, M. (1997): Survey of Polygonal Surface Simplification Algorithms / School of Computer Science, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA. Version: 1997*
- [18] *Briese, C., Kraus, K. (2003): Datenreduktion dichter Laser-Geländemodelle. In: Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement (ZfV) 5 (2003), Nr. 128, S. 312–317*
- [19] *Nujic, M. (1998): Praktischer Einsatz eines hochgenauen Verfahrens für die Berechnung von Tiefenmittelten Strömungen, Institut für Wasserwesen, Universität der Bundeswehr München, Dissertation am Lehrstuhl Hydromechanik und Hydrologie, Prof. W. Bechteler, Mitteilungen Nr. 62*

Web-Referenzen:

- [20] www2.hydrotec.de/vertrieb/hydro_as_2dHydrotech: Ingenieurgesellschaft für Wasser und Umwelt mbH. Aachen, Deutschland, [Letzter Zugriff: 31.08.2007]

Anschrift der Autoren

Dr. Gottfried Mandlbürger und Dipl.-Ing. Georg Strobelberger, Christian Doppler Labor für "Räumliche Daten aus Laserscanning und Fernerkundung" am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Technische Universität Wien, Gusshausstr. 27-29, A-1040 Wien.

email: gm@ipf.tuwien.ac.at, gs@ipf.tuwien.ac.at

