

Detaillierte städtische Höhenmodelle aus Laserscannerdaten zur Simulation oberflächigen Wasserabflusses

Norman Ettrich und Walter Sieh

Zusammenfassung

Die Simulation des Abflusses von Wasser auf der Oberfläche erfordert die Erstellung von Höhenmodellen, auf denen Flachwassergleichungen gelöst werden. Durch den Einsatz von luftgestützter Laserscanningtechnik stellt nunmehr die Beschaffung von genauen und engmaschig vermessenen Höhendaten auch in städtischen Räumen kein Problem mehr dar. Die automatisierte Bearbeitung dieser Daten unter Einbeziehung zusätzlicher in den Liegenschaftskarten vorliegender linienförmiger Elemente wie Gebäudebegrenzungen, Bordsteine etc. erlaubt die Erstellung sehr detaillierter Dreiecksgittermodelle unter Erhaltung der wesentlichen strukturellen Elemente der Stadt mit einer vertikalen Auflösung im Bereich weniger Zentimeter. Die Modelle können für gekoppelte Abflusssimulationen auf der Oberfläche und im unterirdischen Kanalnetz verwendet werden.

Summary

Simulating the runoff of water requires generating elevation models for solving shallow water equations. Current laser scanning technique is able to provide elevation data with the density necessary to construct such models in urban areas. Additional input elements like boundaries of houses, curbs etc. are needed to let an automated process convert the irregularly distributed measured points to triangular meshes of the surface. Vertical resolution of these models is within a range of few centimetres and the structural elements of the cities are preserved. The models generated are useful for coupled simulation of surface runoff and flow through sub-surface sewer systems.

1 Einleitung

Die Abschätzung von Überflutungsrisiken und die Dimensionierung von Entlastungsbauwerken wie Kanalnetzen oder Dämmen gehören zu den Aufgaben der Hydrologie bzw. der Stadthydrologie. Computergestützte Simulationen der von Starkregenfällen hervorgerufenen Abflussvorgänge sind aufgrund der Komplexität der beteiligten Prozesse unbedingter Bestandteil einer erfolgreichen Projektbearbeitung. Zu den Abflussvorgängen zählen das Fließen des Wassers auf der Oberfläche, in urbanen Gebieten dazu der Transport durch das Kanalsystem, der Wasseraustausch zwischen diesen beiden Regimes, ferner die Wechselwirkung mit dem Grundwasser und die Propagation von Hochwasserständen aus dem Einzugsgebiet durch Gerinne in das gefährdete Untersuchungsgebiet.

Die Physik der zugrunde liegenden Prozesse kann durch Flachwassergleichungen beschrieben werden, deren eindimensionale Vertreter (St.-Venant-Gleichungen) für den Abfluss in Kanalnetzen gelöst werden und die in zweidimensionaler Formulierung in verstärktem Maße auch zur Berechnung des Abflusses auf der Oberfläche zum Einsatz kommen (z.B. Anastasiou und Chan 1997). Neben anderen Parametern wie der Bodenbeschaffenheit beeinflusst im Wesentlichen die Topographie den Fluss des Wassers. Die Flachwassergleichungen müssen daher durch gute Höhenmodelle parametrisiert werden. Naturräumliche Einzugsgebiete mit ihren überwiegend glatt verlaufenden Strukturen erlauben eine einfache Interpolation der Höhen auch zwischen relativ weit voneinander entfernten Messpunkten. Die Ansprüche an die Punktdichte und auch an die Höhengenaugkeit sind hier als relativ gering anzusehen (größere Probleme bereitet dagegen die physikalische Beschreibung der Bodeneigenschaften).

Anders verhält es sich in urbanen Gebieten, die durch vom Menschen geschaffene, linienförmige Objekte segmentiert sind. Höhenwerte dürfen hier nicht durch die Teilgebietsgrenzen hindurch interpoliert werden. Sollen z.B. solch subtile Effekte wie das Einspeisen von Oberflächenwasser durch Sinkkästen in das Kanalsystem oder die Beeinflussung von Überschwemmungsflächen durch Bordsteinhöhen untersucht werden, so müssen Modelle gebaut werden, die die Höhendaten der Bürgersteige streng von den Höhendaten der Straßen separieren. Messpunkte müssen also für jedes dieser Einzelregimes (Bürgersteig, Straße) in ausreichender Zahl vorliegen und dazu müssen die Elemente, die die Regimes voneinander trennen, in ihrer lateralen Ausdehnung bekannt sein.

Kommunale Datenbanken führen diese linienförmigen Elemente, zu denen Bordsteine, Mauern und auch Gebäudebegrenzungen gehören, bereits in ihren automatisierten Liegenschaftskarten. Dagegen konnte die geforderte hohe Messpunktdichte für Höhendaten von ca. 1 Punkt pro m² bisher nicht erreicht werden. Meist lagen nur wenige handvermessene Punkte in urbanen Räumen vor, was die Anwendbarkeit von Softwaresystemen erschwerte, die zur Simulation des bidirektional gekoppelten Abflusses auf der Oberfläche und im Kanal im Sinne von Überschwemmungsnachweisführungen geeignet wären (wie z.B. die Software *RisoSim*, Ettrich et al. 2005, Schmitt et al. 2004). Die innerhalb der vergangenen Jahre etablierte Technik, Geländehöhen durch Laserscanning aus der Luft massenhaft zu erfassen, hat die Situation jedoch erheblich verbessert. Datensätze mit einer schon jetzt angebotenen vertikalen Genauigkeit von 10–15 cm sollten ein

guter Ausgangspunkt sein, um durch zusätzliche Bearbeitung Höhenmodelle für den städtischen Raum zu generieren, die für die Simulation des Oberflächenwasserabflusses geeignet sind. Als Kriterien gelten dabei eine geringe Restwelligkeit der Modelle mit Amplituden im Bereich weniger Zentimeter und die exakte Darstellung der Geometrie der den Wasserfluss beeinflussenden Elemente.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, anhand eines Beispieldatensatzes zu untersuchen, ob derzeitige Laserscannerdatensätze als Datengrundlage zur Modellgenerierung im städtischen Raum für Abflussberechnungen geeignet sind und wie die Bearbeitung der Daten mit möglichst geringem Benutzeraufwand, also mit einem sehr hohen Automatisierungsgrad, erfolgen kann. Eine genaue Spezifizierung der benötigten Eingabedaten soll die problemlose Anwendung des o.g. Softwarepaketes *RisoSim*, in dessen Oberflächenmodellgenerator die vorgestellte Methodik implementiert ist, auf beliebige Stadtgebiete garantieren.

2 Die Daten

Der verwendete Datensatz wurde Anfang 2001 über eine Laserscannerbefliegung (Airborne Laserscanning) generiert. Die Daten wurden durch die Befliegungsfirmen vor-klassifiziert (Trennung von Boden- und Hochpunkten) und als Punktwolke im ASCII Format (x, y, z) im Bezugssystem Gauß-Krüger, Potsdam-Datum mit normalorthometrischen Höhen DHHN 92 dem Landesbetrieb Geoinformation und Vermessung (LGV Hamburg) geliefert. Im Bereich von Gebäuden war eine Nachklassifizierung der Daten notwendig. Dazu wurden auf Basis der DSGK (Digitale Stadtgrundkarte) die Gebäudegrundrisse entnommen und um einen fiktiven Wert für den Dachüberstand vergrößert. Die innerhalb dieser skalierten Gebäudeflächen liegenden Laserpunkte wurden vom Bestand der Bodenpunkte in die Gruppe der Hochpunkte umklassifiziert. In einem letzten Schritt wurden aus den so bereinigten Bodenpunkten Model Keypoints abgeleitet. Insgesamt liegen für das ca. 755 km² große Gebiet der Freien und Hansestadt etwa 560 Millionen Höhenpunkte vor, die für vielfältige Anwendungen z.B. in den Bereichen Lärmschutz, Hochwasserschutz oder Stadtentwicklung genutzt werden.

Die hier vorliegende Untersuchung zur Nutzung der Daten für urban-hydrologische Zwecke beschränkt sich auf einen Ausschnitt von 1 × 1 km² im Bereich Hamburg-Altona. Für diesen Bereich liegen ca. 680.000 als Bodenpunkte klassifizierte Messpunkte vor, was aufgrund der durch herausgeschnittene Gebäudeflächen verminderten Nettogröße des Gebietes einer Punktdichte von ca. 1 Punkt pro m² entspricht. Die Punkte wurden als x,y,z-Tripel als unregelmäßige Punktwolke und somit an den ursprünglichen Messpositionen bereitgestellt; auf ein regelmäßiges Raster interpolierte Punkte sollten nicht ver-

wendet werden. An strukturellen Elementen wurden der digitalen Stadtgrundkarte u. a. Polygone für die Gebäudebegrenzungen und Linienzüge für Bordsteine entnommen. Orthofotos mit möglichst hoher Auflösung, hier mit 20 cm Bodenauflösung, sind für die Interpretation der Eingabedaten unverzichtbar.

Abb. 1 zeigt in Ausschnitten die geschilderten wesentlichen Eingabeelemente, deren nachfolgend geschilderte



Abb. 1: Ausschnitte aus dem Testgebiet Hamburg-Altona. Obere Abbildung (Größe ca. 400 m × 400 m): Das unterliegende Orthofoto interpretiert die für die Modellgenerierung verarbeitete polygonale Information für Gebäudebegrenzungen (rot) und Bordsteine (gelb). Untere Abbildung (Größe ca. 80 m × 80 m): Laserscannerpunkte mit Höheninformation. (Luftbildaufnahme mit Zustimmung der LGV Hamburg.)

Bearbeitung automatisch erfolgt. Die Hausberandungen müssen durch geschlossene Polygone repräsentiert sein. Liegen Häuser direkt aneinander, so werden diese zu Gebäudeblöcken zusammengefasst. Die Linienzüge für die Bordsteine können stückweise zusammengesetzt sein. Kleinere Lücken zwischen den Einzellinien werden nach Vorgabe eines Genauigkeitsparameters geschlossen. Ein Resampling der Knoten entlang von Linienzügen auf einen vom Benutzer wählbaren Mindestabstand (Größenordnung 1 m) vermeidet bei der nachfolgenden Triangulierung das Entstehen zu vieler kleiner Zellen, da die durch dicht aufeinanderfolgende Knoten gebildeten Segmente als Dreiecksseiten verwendet würden.

Die untere Abbildung von Abb. 1 gibt einen Eindruck von der vorliegenden Dichte der als Bodenpunkte klassifizierten Laserscannerpunkte. Straßen, Verkehrsinseln und Bürgersteige werden auf ihrer Breite von mehreren Punkten überdeckt, so dass Höhenverläufe nicht nur in Längsrichtung, sondern auch in Profilrichtung dieser Elemente darstellbar sind. Die hohe Punktdichte sollte ein Mittel der Höhen zu Messpunkten innerhalb gleicher Einheiten und damit eine effektive Reduzierung der durch Messungenauigkeiten bedingten Welligkeit der Daten ermöglichen.

3 Methodik der Modellerstellung

Die wesentlichen Schritte der Datenbearbeitung werden zunächst an einem einfachen generischen Beispiel erläutert. Ziel ist es, die regellos an den Messpunkten vorliegenden Höheninformationen auf ein Dreiecksgitter, auf dem die Flachwassergleichungen gelöst werden sollen, zu interpolieren, ohne die strukturgebenden Elemente der Stadt wie Bordsteine, Gebäude etc. in ihrer geometrischen Form zu verändern oder Höhendifferenzen quer zu ihnen zu verschmieren. Die Datenbearbeitung unterteilt sich in die drei Schritte: a) Datenaufbereitung für die Triangulierung, b) die Triangulierung, für die die Software *triangle* (Shewchuk 1996) verwendet wird, und c) die nachfolgende Zuweisung von Höhen zu jedem Dreieck (wofür die in *triangle* vorliegende Routine nicht verwendet werden kann).

Der typische Dateninput für die Modellgenerierung besteht aus Punkten – den Messpunkten, die die alleinigen Träger der Höheninformation sind, und Linien, also angeordneten Punkten (Abb. 2).

Die äußere Berandungslinie kann beliebig, auch nicht-konvex geformt sein. Es können auch mehrere äußere Berandungslinien angegeben werden, womit sich unzusammenhängende Gebiete darstellen und triangulieren lassen. Dies kann in Gebieten, die hydrologisch oberflächlich nicht zusammenhängend sind, doch über ein Kanalnetz Wasser austauschen, vorteilhaft sein und kann auch bei mehrwertiger Höheninformation verwendet werden, um etwa ein Höhenmodell für eine Straßenunterführung

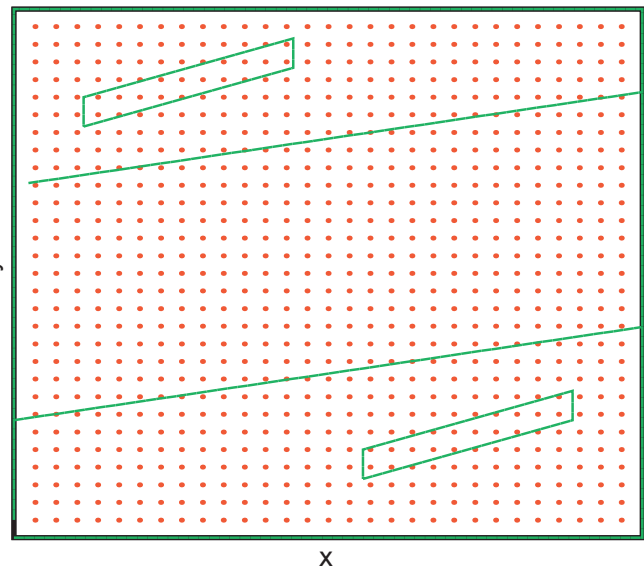


Abb. 2: Eingabelemente für städtische Höhenmodelle. Die roten Punkte tragen die Höheninformation; die grünen Linien regulieren die nachfolgende Triangulierung. Die Linien können geschlossene Polygonzüge ergeben (äußere Berandung und die Polygone oben links und unten rechts) oder aber nichtgeschlossene Linien mit beliebigem Anfangs- und Endpunkt sein (die beiden parallelen Linien, verlaufend von links nach schräg rechts oben).

und eines für die darüber liegende Straße getrennt zu erstellen und per Randbedingungen aneinander zu koppeln. Weitere geschlossene Polygone können im Inneren des Gebietes angegeben werden (in Abb. 2 die Polygone oben links und unten rechts). Werden diese im Dateninput als Löcher markiert, so werden die umrandeten Bereiche aus dem nun mehrfach zusammenhängenden Gebiet herausgeschnitten, d. h. für sie werden keine Dreieckszellen angelegt. Als reale Objekte kommen für derartige herausgeschnittene Teilgebiete Gebäude in Frage, die vom Wasser umflossen und nicht überflossen werden und daher nicht Teil des Dreiecksgitters für die Abflussberechnung sein dürfen. Die Eingabe von nicht zu Polygonen geschlossenen Linienzügen ist ebenfalls möglich. Reale Objekte, die nach derartiger Eingabe verlangen, sind z. B. Bordsteine. Ihre Einzelsegmente werden bei der Triangulierung als Dreiecksseiten verwendet, weshalb diese Linien bei der Triangulierung ihre Form behalten. Außerdem ist der nachfolgend beschriebene Glättungsalgorithmus so gestaltet, dass keine Verschmierung der Höheninformation quer zu den Linien erfolgt. Die Orientierung der eingegebenen Polygone ist beliebig, was eine wichtige Eigenschaft im Hinblick auf die Handhabbarkeit und Automatisierbarkeit des Datenaufbereitungsprozesses ist.

Das obere (Bordstein)Polygon in Abb. 2 hat keine Verbindung zum linken Rand. Dies kann den realen Verhältnissen entsprechen. Kleinere derartige Lücken haben ihre Ursache aber häufig in ungenügend genau vorliegender Geometrieinformation der Polygonpunkte und sind unerwünscht wegen der möglichen Verschmierung von Höhen durch diese Lücken und wegen der zahlreichen

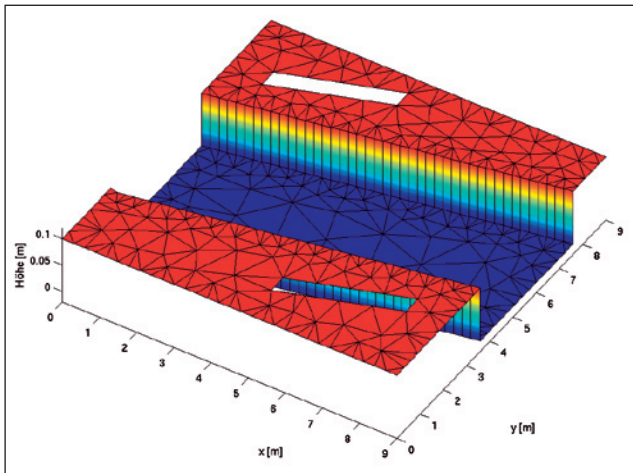


Abb. 3: Dreiecksgitter mit Höhen (blau: 0,0 m, rot: 0,1 m) auf Grundlage der Dateneingabe von Abb. 2. Aus Darstellungsgründen sind zusätzlich zu den Dreieckszellen auch die vertikalen Bordsteinwände abgebildet.

kleinen Dreiecke, die im Bereich der diese Lücke begrenzenden Punkte entstehen können. Der Benutzer kann daher eine Grenzentfernung angeben, unterhalb derer benachbarte Punkte jeweils zweier verschiedener Linien zu einem Punkt zusammengezogen werden.

Im Beispiel von Abb. 2 wurden den Höhendatenpunkten zwischen den parallelen nicht-geschlossenen Linien Höhen von $z=0,0\text{ m}$ und allen anderen Punkten $z=0,1\text{ m}$ zugewiesen. Es könnte sich also um ein Bürgersteig-Straße-Bürgersteig-Profil handeln. Abb. 3 ist die generierte Dreiecksnetzstruktur zu entnehmen. Die Anzahl und Größe der Zellen wird durch den Knotenabstand entlang der eingegebenen Linien, durch eine Eingabe für die maximale Zellengröße und durch das Winkelkriterium gegeben, das besagt, dass auftretende Winkel in den Dreiecken nicht kleiner als ein vorzugebendes Minimum sein sollen. Der für die Numerik der nachfolgenden Abflusssimulation ideale Winkel von 60 Grad ist ein rein theoretischer Wert. Praktisch wird beobachtet, dass mit steigendem Minimalwinkel die Anzahl der Dreiecke sehr stark zunimmt, so dass hinsichtlich der Anwendbarkeit auf größere Gebiete ein Minimalwinkel von 20 Grad einen guten Kompromiss darstellt.

Aufgrund der nachfolgend in der Abflusssimulation verwendeten Finite-Volumen-Technik wird jedem Dreieck nur ein konstanter Höhenwert zugewiesen. Für Gebiete mit ausgeprägter Topographie kann daher eine von der lokalen Neigung des Geländes abhängige lateral variierende maximale Zellengröße angegeben werden. Die Dreieckshöhen ergeben sich aus den Höhen der Messpunkte, die innerhalb des jeweils betrachteten Dreiecks liegen. Die Zuweisung von Höhenpunkten zu Dreiecken gelingt effizient, wie zahlreiche andere Prozesse der Datenbearbeitung auch, durch ein Binning der Punkte und der Dreiecke. Liegen mehrere Punkte in einem Dreieck, so erhält das Dreieck den Mittelwert der Höhen der beteiligten Punkte zugewiesen. Dieser Prozess beinhaltet bereits eine Glättung mit einer Operatorlänge, die von der Drei-

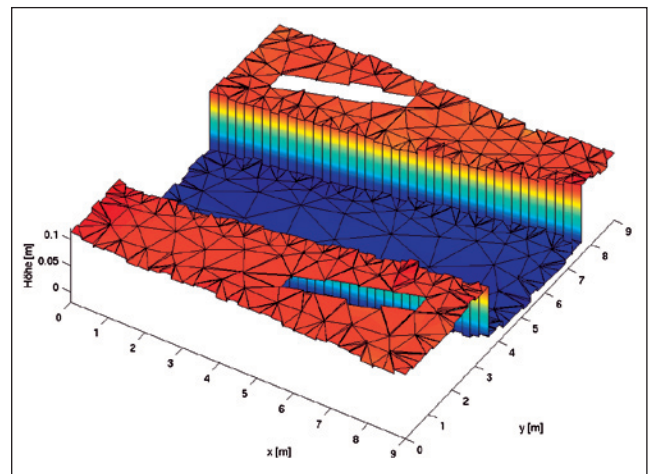
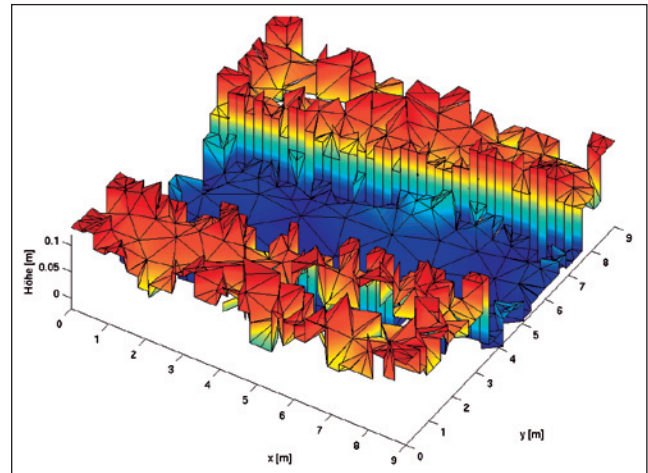


Abb. 4: Dreiecksgitter mit Höhen für verrauschte ($\Delta z = \pm 5\text{ cm}$) Daten, oben: ungeglättet, unten: geglättet mit 1 m Operatorlänge.

ecksgröße abhängig ist und entsprechend lateral variieren kann.

Bei verrauschten Daten kann eine zusätzliche Glättung notwendig sein. Abb. 4 zeigt, wie rauschbehaftete Daten, deren Fehler auf regellosen Abweichungen um die Mittelwerte (nicht aber auf systematischem Bias) beruhen, auf eine für Abflusssimulationen brauchbare Restwertigkeit geglättet werden können, ohne die Konturen zu verschmieren. Zu diesem Zweck werden innerhalb einer kreisförmigen, im Radius durch die Länge des Glättungsoperators spezifizierten Umgebung nur die Messpunkte in die Mittelung einbezogen, die in Dreiecken liegen, die vom aktuellen Dreieck aus erreicht werden können, ohne Segmente von Eingabelinien zu überqueren. Aus diesem Grunde ist es wichtig, unbeabsichtigte Lücken zwischen den Linien zu schließen, da sonst vom Algorithmus nicht erkannt wird, ob etwa Bordsteine überquert und somit Höhen von Bürgersteigen mit Höhen von Straßen gemittelt werden. Abb. 5 zeigt einen derartigen unerwünschten Effekt im oberen linken Bereich, da im Gegensatz zu Abb. 4, unten, die Lücke zwischen oberem Bordstein, links, und Berandung (siehe Abb. 2) nicht geschlossen wurde.

Es ist zu beachten, dass auch die Lateralpositionen der eingegebenen Linien mit einem Fehler behaftet sind. Um

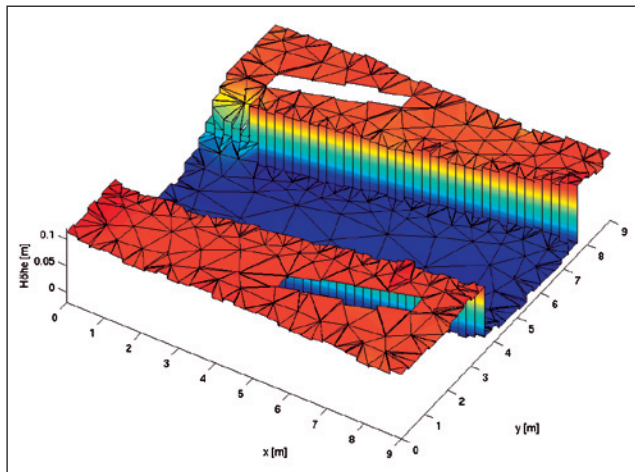


Abb. 5: Geglättetes Höhenmodell zu verrauschten Eingangsdaten. Im Unterschied zu Abb. 4, unten, ist das obere Polygon links nicht an die äußere Berandung angeschlossen.

dadurch mögliche Zuweisungen von Messpunkten an das falsche Teilgebiet zu vermeiden, empfiehlt es sich, zu dicht an diesen Linien gelegene Messpunkte nicht zu verwenden. Die notwendige Schwelle kann vom Anwender in eventueller Kenntnis der Fehler bestimmt werden; den Autoren scheint ein Wert von 25–50 cm sinnvoll. Eine Alternative wäre es, die in Briese und Attwenger (2005) vorgestellte Technik zur Extraktion von Bruchkanten aus den Daten mit den eingegebenen Linien als Startwerte auf die hier vorliegende kleinräumige Skala (Bordsteine als Bruchkanten) zu adaptieren.

4 Anwendung auf die realen Daten

Die Laserscannerdaten des Hamburger Datensatzes wurden mit einer Genauigkeitsangabe für die Lage mit < 50 cm und in der Höhe mit ± 15 cm geliefert. Untersuchungen beim LGV Hamburg zeigten jedoch, dass sich in eindeutig definierten Bereichen, wie z. B. auf Straßenflächen – und damit in Bereichen, die für die geplante Abflussmodellierung von entscheidender Wichtigkeit sind – die Höhendifferenzen im Vergleich zu terrestrisch gemessenen Punkten im ersten Drittel der Fehlerangabe bewegten. In Bereichen mit Vegetation, insbesondere in den für den angesprochenen Zweck weniger wichtigen Wald- und Strauchgebieten, kann dieser Genauigkeitsanspruch nicht gehalten werden.

In einem ersten Test sollte zunächst beurteilt werden, ob die Daten bereits ohne Glättung für die geplanten hydrodynamischen Anwendungen brauchbare Modelle liefern, bzw. ob vorhandene Welligkeit mit der vorangehend geschilderten Glättung auf ein vertretbares Maß reduziert werden kann.

Abb. 6 zeigt ein kleines, auf einen Straßenabschnitt mit Bürgersteigen beschränktes Teilgebiet. Anhand der Farbkodierung sind kurzwellige Schwankungen der Mess-

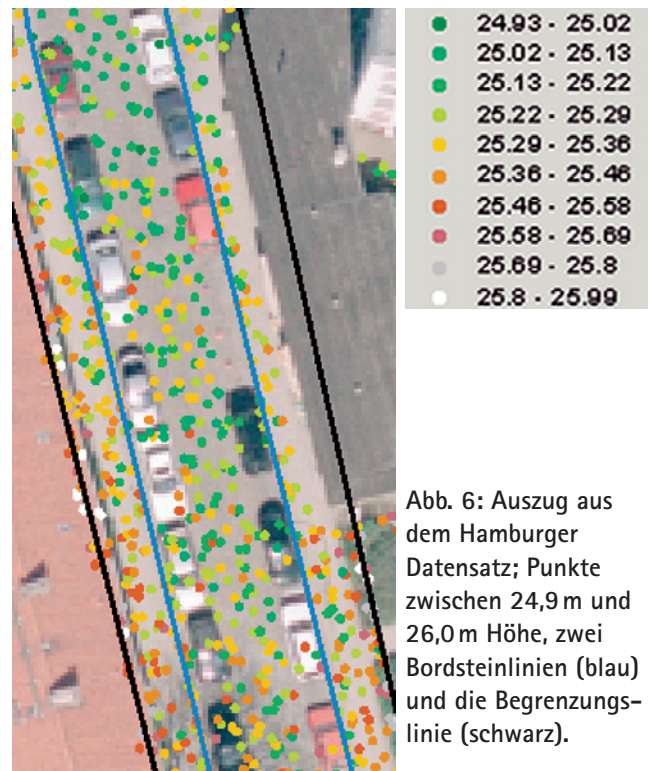


Abb. 6: Auszug aus dem Hamburger Datensatz; Punkte zwischen 24,9 m und 26,0 m Höhe, zwei Bordsteinlinien (blau) und die Begrenzungslinie (schwarz).

punkthöhen in der genannten Größenordnung auszumachen. Daher ist das nach Interpolation auf das Dreiecksgitter entstehende Modell (Abb. 7, oben) augenscheinlich für Abflussmodellierungen ungeeignet. Durch Anwen-

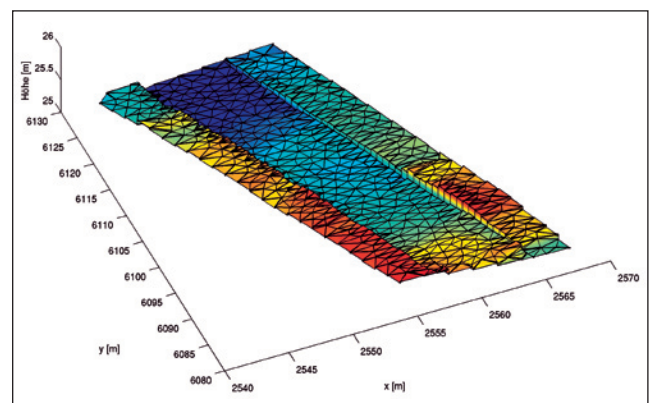
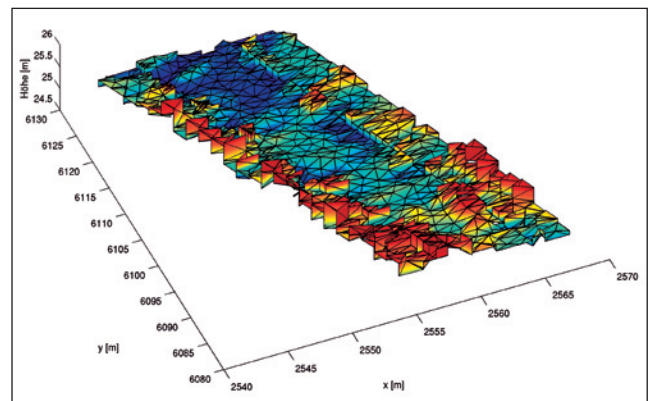


Abb. 7: 3D-Darstellung des Dreiecksgitters mit Höhen zu dem Ausschnitt der Abb. 6, oben: ungeglättet; unten: geglättet mit 4 m Operatorlänge.

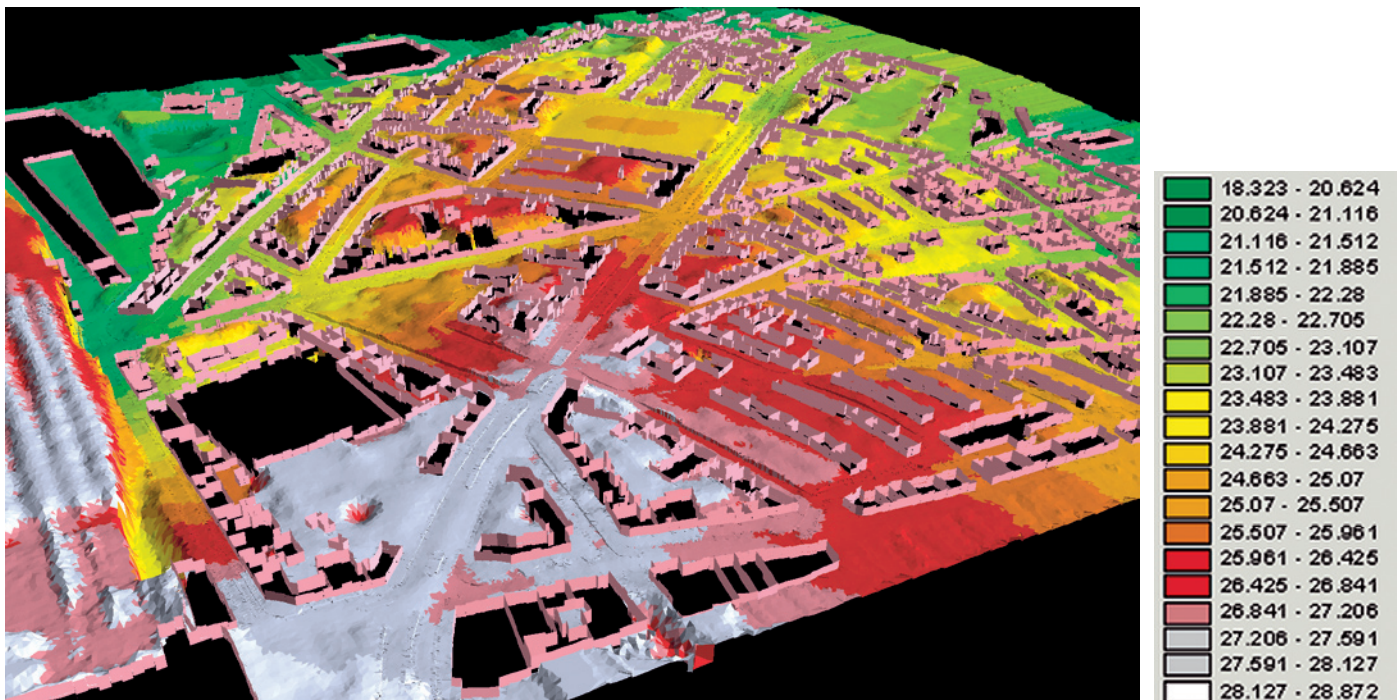


Abb. 8: Darstellung des Dreiecksgitters mit Höhen. Gebäude werden durch rote Wände symbolisiert. Die von ihnen umschlossenen Bereiche sind aus dem Oberflächengitter herausgeschnitten. Die Berandungslinien der Dreieckslinien sind nicht dargestellt. Vertikale Wände entlang der Bordsteine sind durch 4-Punktpolygone repräsentiert (hier optisch nicht auflösbar, jedoch in den folgenden Abbildungen). Die Höhen sind 7-fach überhöht dargestellt.

dung von kreisförmigen Glättungsoperatoren mit Radius, d. h. Operatorlänge 4 m gelingt es hingegen, die Welligkeit auf Straße und Bürgersteigen auf ein geringes Maß zu reduzieren und den Höhenversatz zwischen Bürgersteig und Straße zu modellieren (Abb. 7, unten). Es ist zu beachten, dass auch bei ausgeprägter Topographie eine Glättungslänge von 4 m kaum Auswirkungen auf den gröberskaligen Verlauf der Höhen hat. Bei zweiseitiger Glättung werden Ebenen konstanter Neigung in ihrem mittleren Höhenverlauf nicht verändert und auch bei Syn- oder Antiklinalen werden durch kreisförmige Glättungsoperatoren Hoch- bzw. Tiefpunkte nur wenig angehoben bzw.

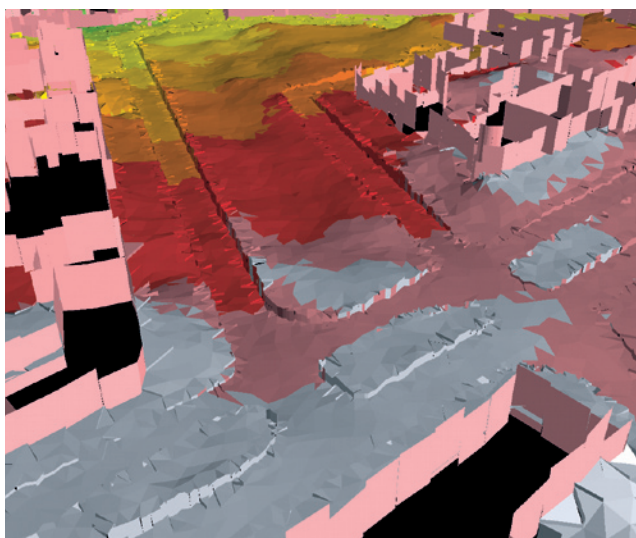


Abb. 9: Ausschnitt aus Abb. 8 (mittlerer Bereich). Für weitere Erläuterungen siehe Abb. 8.

abgesenkt. So beträgt der Absenkungsbetrag für das Maximum von Antiklinalen mit eindimensional parabolischem Verlauf und einer in 10 m Entfernung von diesem Maximum um 1 m reduzierten Höhe (im Mittel also 10 % Neigung) nur ca. 4 cm.

Aufgrund dieser Voruntersuchungen wurde auch das Gesamtgebiet von 1 km² Größe mit einer Glättungslänge von 4 m bearbeitet. Die Höhen in diesem Gebiet bewegen sich zwischen 18 m und 29 m. Abb. 8, Abb. 9 und Abb. 10 zeigen das mit Höhen belegte Dreiecksgitter in einer 3D-GIS-Darstellung. Sehr gut zeichnen sich Bürgersteige und Verkehrsinseln über dem Straßenniveau ab. Bordsteinabsenkungen im Bereich von straßenkreuzenden Fahrradwegen sind zu erkennen. Auch Details wie

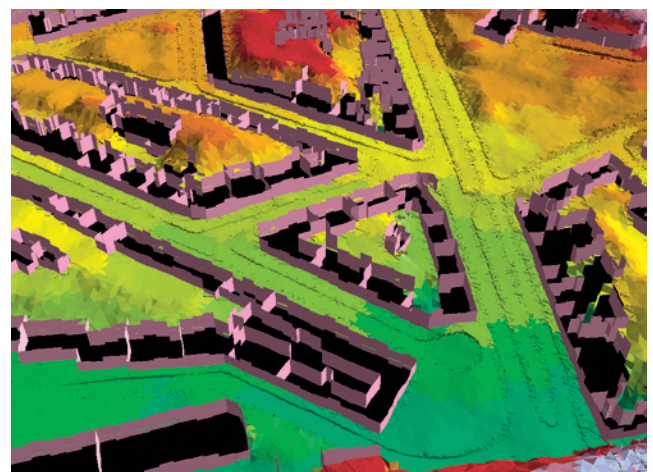


Abb. 10: Ausschnitt aus Abb. 8 (linker mittlerer Bereich). Für weitere Erläuterungen siehe Abb. 8.

der Wendeplatz in Abb. 10 konnten durch eine Ortsbegehung bestätigt werden. Die Farbcodierung zeigt, dass die Restwelligkeit auf den Straßen wesentlich geringer ist als die strukturellen Höhenunterschiede zwischen Straßen und Bürgersteigen. Einige Bereiche, die offensichtlich weiche Strukturen zeigen (wie in Abb. 8 der Bahnhof im linken Bereich und die Mulde im vorderen Bereich), sind damit zu erklären, dass hier keine strukturbegrenzenden linienförmigen Elemente eingegeben wurden. Das gleiche Argument gilt für abschnittsweise zu stark angehobene Bordsteine (Abb. 9), da dort die Eingabe einer weiteren Linie zur Abtrennung von Bürgersteig und angehobenem Vorgartenniveau notwendig gewesen wäre.

Die Länge des Glättungsoperators von 4 m ist größer als die halbe Breite vieler Straßen. Die Abbildung der Höhenverläufe in Profilrichtung gelingt daher nicht. Eine gegenwärtige Verbesserung der Methodik beschäftigt sich daher mit der Verwendung elliptisch verzerrter Glättungsoperatoren, deren verlängerte Hauptachse in Straßenlängsrichtung zeigt.

Straßenachsenrichtungen lassen sich mit Ausnahme der Kreuzungen für den Straßenraum und für die Bürgersteige automatisch aus den eingegebenen Bordsteinlinien ableiten (siehe Abb. 11).

Die gezeigten Abbildungen und ein Durchfahren der Struktur in 3D-GIS-Viewern erlaubt in Kombination mit einer erfolgten Ortsbegehung die qualitative Aussage, dass die erstellten Modelle hinsichtlich der Abtrennung der Einzelregimes Straße, Bürgersteig etc. und der glatten Höhendarstellung jeweils innerhalb dieser Regimes für Abflussberechnungen, auch zu niedrigen Wasserständen

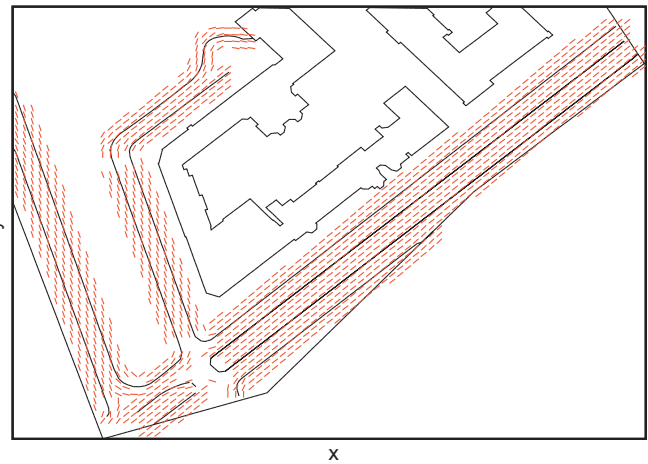


Abb. 11: Automatisch aus den Bordsteinlinien extrahierte Richtungen der Straßenverläufe für einen kleinen Teilbereich des Hamburger Datensatzes.

auf der Oberfläche, geeignet sind. Die absolute Genauigkeit der Höhen liegt in Bereichen weniger Zentimeter.

Abb. 12 zeigt exemplarisch berechnete Wasserstände auf dem Modell der Abb. 8. Sämtliches Wasser entstammt 30 fiktiven Schächten, die mit Raten zwischen $0,3 \text{ m}^3/\text{s}$ und $1,6 \text{ m}^3/\text{s}$ überstauen sollen. Um die Ausbreitung entlang der Straßen besser optisch darstellen zu können, soll kein Regen auf die anfangs trockenen (Farbe braun) Straßen fallen. Deutlich ist zu sehen, wie Bordsteine bis zu einer Wasserstandshöhe, die der Bordsteinhöhe entspricht, das Wasser führen und das Ausschwemmen auf die Bürgersteige verhindern. Erhöhte Mittelstreifen zwischen den Fahrbahnen zeigen diesen Effekt ebenfalls.



Abb. 12: Berechnete Wasserstände (blaue Farbcodierung, braune Farbe: Wasserstand kleiner als 0,001 m) auf der Oberfläche des Modells von Abb. 8 zu überstauenden Schächten (schwarze Kreise). Beachte: Sowohl das durch die Schächte repräsentierte Kanalmodell als auch das Szenario des gleichzeitigen Überstaus sind rein fiktiv und nur zu Demonstrationszwecken so gewählt.

Im Rahmen einer Kopplung von Abfluss auf der Oberfläche und Abfluss im Kanalnetz kann also zum einen simuliert werden, wie Wasser über Sinkkästen, die sich zumeist direkt an Bordsteinen befinden, dem Kanalsystem zugeführt wird, und zum anderen, wie sich Wasser aus überstauenden Schächten auf der Oberfläche verteilt. Die realitätsnahe Simulation der zwischen Kanalnetz und Oberfläche gekoppelten Abflussvorgänge ist daher möglich.

5 Diskussion

Anhand der vorliegenden Beispieldaten konnte gezeigt werden, dass Laserscannerdatensätze als Datengrundlage für Höhenmodelle im städtischen Raum für den Zweck der Abflussmodellierung auf der Oberfläche dienen können. Die direkte Verwendung der Daten führt zunächst zu Höhenmodellen mit einer zu starken Welligkeit, die aber durch die erläuterte Methode strukturerhaltend ausgeglichen werden kann. Zusätzliche linienförmige Elemente wie Gebäudebegrenzungen, Bordsteine etc. werden zu diesem Zwecke den automatisierten Liegenschaftskarten entnommen und als Eingabeelemente für die automatische Modellgenerierung verwendet.

Die detaillierten Höhenmodelle erlauben eine hydrodynamische Simulation des Oberflächenwasserabflusses. Da mit den Schächten und den Sinkkästen die Kopplungsstellen mit dem Kanalnetz exakt im Oberflächenmodell lokalisiert werden können, ist eine realitätsnahe Simulation des Wasseraustausches zwischen Oberfläche und Kanalnetz und somit eine gekoppelte Simulation der Abflussvorgänge in beiden Regimes möglich. Der hohe Detaillierungsgrad der Oberfläche erlaubt es, Überschwemmungsflächen sehr genau auszuweisen und die Effekte einzelner Maßnahmen, wie etwa das Hochziehen von Bordsteinen, oder, etwas gröber, das Errichten von Mauern zu berechnen.

Derart detaillierte Modelle lassen sich nicht für ganze Städte generieren. Momentan sind maximale Größen bis zu etwa 5 km² mit noch vertretbarem Aufwand zu handhaben. Eine iterative Vorgehensweise, die über eine (konventionelle) Gesamtgebietssimulation kritische Stel-

len im Untersuchungsgebiet ausweist, um diese dann, wie vorgestellt, detaillierter zu erfassen, ist eine sinnvolle Herangehensweise. Es ist ferner zu beachten, dass die Verwendung von Dreiecksgittern es auch erlaubt, fein aufgelöste Gebietsbereiche mit gröber aufgelösten in einem Modell zu vereinen, da die unterschiedlichen Dreiecksgrößen sich über eine vom gewählten minimalen Dreieckswinkel abhängige Übergangszone einander anpassen können. Daher kann ein Stadtgebiet der vorangehend genannten Größenordnung durchaus noch um ein größeres anliegendes, gröber dargestelltes naturräumliches Einzugsgebiet erweitert werden.

Literatur

- Anastasiou, K. und Chan, C.T.: Solution of the 2D shallow water equations using the finite volume method on unstructured triangular meshes. In: International Journal for Numerical Methods in Fluids, Vol 24, S. 1225–1245, 1997.
- Briese, C. und Attwenger, M.: Modellierung dreidimensionaler hydrologisch und hydraulisch relevanter Geländekanten aus hochauflösenden Laser-Scanner-Daten. Bundesanstalt für Gewässerkunde, Veranstellungen 1/2005.
- Ettrich, N., Steiner, K., Thomas, M. und Rothe T.: Surface models for coupled modelling of runoff and sewer flow in urban areas. In: Water Science & Technology, Vol 52 No 5, S. 25–33, 2005.
- Schmitt, T.G., Thomas, M. und Ettrich, N.: Analysis and Modelling of Flooding in Urban Drainage Systems. In: Journal of Hydrology, 299, S. 300–311, 2004.
- Shewchuck, J.: Triangle: Engineering a 2D quality mesh generator and Delaunay triangulator. In: First workshop on applied computational geometry., S. 124–133, ACM, 1996.

Anschrift der Autoren

Dr. Norman Ettrich
 Fraunhofer Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik
 Fraunhofer-Platz 1, 67663 Kaiserslautern
 ettrich@itwm.fhg.de

Dipl.-Ing. Walter Sieh
 Landesbetrieb Geoinformation und Vermessung Hamburg
 Sachsenkamp 4, 20097 Hamburg
 walter.sieh@gv.hamburg.de