

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Conference Paper, Published Version

Peterseim, Svenja; Schlenkhoff, Andreas; Oertel, Mario

Hydrodynamische Simulation von Sturzflutereignissen im urbanen Raum

Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen

Zur Verfügung gestellt in Kooperation mit/Provided in Cooperation with:

Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/103505>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Peterseim, Svenja; Schlenkhoff, Andreas; Oertel, Mario (2013): Hydrodynamische Simulation von Sturzflutereignissen im urbanen Raum. In: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik (Hg.): Technischer und organisatorischer Hochwasserschutz - Bauwerke, Anforderungen, Modelle. Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen 48. Dresden: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik. S. 241-250.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



Hydrodynamische Simulation von Sturzflutereignissen im urbanen Raum

Svenja Peterseim
Andreas Schlenkhoff
Mario Oertel

Starkregenereignisse und hieraus resultierende Sturzfluten werden auch auf Grund des Klimawandels in den nächsten Jahren vermehrt auftreten. Die meteorologischen Ereignisse bezüglich des Auftretens in Raum und Zeit sind derzeit kaum vorherzusehen. Wenn der Boden vollständig mit Wasser gesättigt ist, oder die Infiltrationsrate durch Versiegelung gegen Null geht und die lokale Kanalisation überlastet ist, dann bleibt für einen einigermaßen geordneten Abfluss in urbanen Räumen nur noch der oberflächliche Abfluss über die Straßen. Hochwasserschutzpläne für den Hochwassertyp Sturzflut sind in den meisten Fällen noch nicht vorhanden. Für eine detaillierte Abfluss- und Risikoanalyse sind Informationen über Fließgeschwindigkeiten und Wassertiefen notwendig; allerdings gibt es bisher nur wenige Ansätze zur hydrodynamischen Simulation von Sturzflutereignissen im urbanen Raum. Schwierigkeiten liegen zum Einen in der Erstellung von Berechnungsnetzen mit hoher Auflösung, und zum anderen in der eigentlichen Simulation von instationären Regenereignissen. Am Lehr- und Forschungsgebiet Wasserwirtschaft und Wasserbau der Bergischen Universität Wuppertal wird eine Methode zur angepassten Netzerstellung und hydrodynamischen Sturzflutsimulation entwickelt. Für die hydrodynamische Simulation wird eine allgemein verfügbare, kommerzielle Software verwendet (HYDRO_AS-2D). Der Fokus dieses Beitrags liegt in der Plausibilitätsprüfung der entwickelten Methode und der Tools. Die Anwendbarkeit für die Problematik der Sturzflutsimulation wird anhand von einfachen Testberechnungen und einer Anwendung auf ein Fallbeispiel in Wuppertal untersucht.

Stichworte: Starkniederschlag, Sturzflut, zweidimensionale hydrodynamische Simulation, Finite-Elemente-Berechnungsnetz

1 Einleitung

Starkregenereignisse sind in der Regel von kurzer Dauer und hoher Intensität. Sie dauern nur wenige Minuten bis wenige Stunden an, sind auf kleine Gebiete mit einer Größe von 10 bis 100 km² beschränkt und sind insbesondere in der

Lage kaum vorhersehbar, wodurch sie praktisch überall auftreten können und dort große Schäden generieren können. Bei einem oberflächlichen Abfluss des Wassers über die Straßen resultieren Gefahren bei steilem Gelände aus dem abfließenden Wasser mit hohen Fließgeschwindigkeiten und in ebenem Gelände aus überfluteten Flächen mit zum Teil hohen Wassertiefen. Folgen von Sturzfluten können neben der Gefährdung von Menschen insbesondere geflutete Keller und Unterführungen sowie Schäden an Häusern sein.

Um ein geeignetes Risikomanagement für den Überschwemmungstyp Sturzflut aufstellen zu können, muss bekannt sein, wo welche Gefahren durch Überschwemmungen bestehen. Neben GIS basierten Verfahren, die Ergebnisse über Fließwege, -richtungen und überflutete Flächen liefern, können zweidimensionale hydrodynamische Simulationen von Sturzflutereignissen durchgeführt werden. Dieses Verfahren liefert Erkenntnisse über flächendeckende Fließgeschwindigkeiten und Wassertiefen, die für eine detaillierte Analyse möglicher Gefahrenstellen notwendig sind. Grundlage der Simulationen sind FE-Berechnungsnetze, die anhand von digitalen Geländemodellen erstellt werden. Die Netze müssen hohen Qualitätsansprüchen genügen und alle wichtigen Oberflächenstrukturen (Bruchkanten), die Einfluss auf das Abflussverhalten in den gefährdeten Bereichen haben, möglichst genau abbilden. Da kommerzielle Programme zur Netzerstellung aus digitalen Geländemodellen in der Anschaffung sehr teuer sind und nach *Barbier (2012)* in vergangener Zeit wenig weiterentwickelt wurden, wird unter Verwendung der frei zugänglichen Programme BatTri und Triangle ein Tool zur Netzerstellung in MATLAB entwickelt und getestet. Für die zweidimensionale numerische, hydrodynamische Simulation wird das Rechenmodul HYDRO_AS-2D verwendet. Da die Berechnung von instationären Regenereignissen mit diesem Programm nicht direkt möglich ist, wird eine Methode entwickelt, welche eine hydrologisch/hydrodynamische Berechnung ermöglicht.

2 Numerische hydrodynamische Simulation

2.1 Netzgenerierung

Die Entwicklung eines Tools zur automatisierten Netzerstellung zur Abbildung eines urbanen Gebietes mit Gebäudeumrissen in einem numerischen Modell erfolgt auf Grundlage der Open-Source Programme BatTri und Triangle. Triangle wurde von Jonathan Richard Shewchuk an der University of California in der C Programmiersprache entwickelt und ist ein Tool, mit dem zweidimensionale Dreiecksnetze mit dem Verfahren der Delaunay Triangulation erstellt werden können. Eine Implementierung von Triangle in MATLAB erfolgt mit

Bat-Tri, welches am Dartmouth College, New Hampshire, USA entwickelt wurde (*Bilgili & Smith, 2001*).

In dem hier vorgestellten Tool wird die Conforming Delaunay Triangulation verwendet. Diese hat den Vorteil, dass zusätzliche Punkte eingefügt werden, um notwendige Qualitätsmerkmale bei der Netzerstellung (z. B. minimal zulässige Winkel oder maximal zulässige Elementgrößen) zu erreichen. Die Netzerstellung mit Qualitätsmerkmalen in Triangle basiert auf einem Algorithmus nach Jim Ruppert (*Shewchuk, 1996*).

Auf Grundlage einer *.poly-Datei, welche Informationen über Lücken im Netz (Gebäude), Zwangspunkte und Zwangslinien (Bordsteine) beinhaltet, erstellt Triangle ein ebenes Dreiecksnetz mit den geforderten Qualitätsmerkmalen. In BatTri werden letztendlich den in Triangle erzeugten Knoten Höhenwerte zugeordnet. Die Höhendaten der Berechnungsknoten werden dabei linear aus einem digitalen Geländemodell interpoliert.

Das in MATLAB entwickelte Tool bereitet die Daten (DGM, Gebäude-Shape, Bordsteinkanten) für die Triangulierung mit Triangle auf und erstellt aus den Ergebnisdaten von BatTri eine *.2dm-Datei, die zum Beispiel in SMS (Surface-Water Modeling System, V10) zur Analyse der Ergebnisse eingelesen werden kann. Eine detaillierte Beschreibung der zugrunde liegenden Methode der Netzerstellung ist in *Peterseim (2012)* gegeben.

2.2 Sturzflutsimulation

Als externes Berechnungsprogramm für die numerische hydrodynamische Strömungssimulation wird das Rechenmodul HYDRO-AS-2D in der Programmversion 2.2 benutzt. Die zweidimensionale numerische Strömungsberechnung basiert dabei auf den tiefengemittelten Flachwassergleichungen, die durch Integration der dreidimensionalen Kontinuitätsgleichung und der Reynoldsgleichungen über die Wassertiefe hergeleitet werden. Die für numerische Berechnungsverfahren erforderliche Diskretisierung wird in HYDRO_AS-2D mit der Finite-Volumen-Methode realisiert (*Nujic, 2003*). Die Software ist in Deutschland mittlerweile weit verbreitet und wird daher hier verwendet. Es handelt sich nicht um einen Open-Source Code, sondern um ein kommerzielles Produkt, welches intern nicht angepasst werden kann und daher von Außen gesteuert werden soll.

Für die Simulation von definierten instationären Regenereignissen wird eine Methode entwickelt, welche die Simulation mit HYDRO_AS-2D ermöglicht. Das entwickelte Programm ist in vier Teile gegliedert: (1) Bereitstellen der Eingangsdaten, (2) Berechnungsschleife für das Regenereignis, (3) Berechnungsschleife für das weitere Abfließen des Wassers und (4) Zusammenführen der Er-

gebnisdateien. Das Regenereignis wird abhängig von der Dauer des Ereignisses und dem gewählten Zeitintervall in mehrere Simulationsschritte unterteilt. Aus der gesamten Regenmenge für das Regenereignis wird die entsprechende Niederschlagshöhe für jeden Simulationsschritt berechnet. Nach jedem Berechnungsschritt werden die Ausgabedateien, welche die Wassertiefen und Geschwindigkeiten des vorangegangenen Berechnungsschrittes beinhalten, eingelesen. Die Wassertiefe jeden Knotens wird mit der berechneten Regenmenge für das Zeitintervall beaufschlagt und dient nachfolgend als Initialwassertiefe für den nächsten Berechnungsschritt. Dieses Vorgehen wird solange wiederholt, bis das gesamte Regenereignis durchlaufen ist (vgl. Abbildung 1).

Nach Beendigung des Regenereignisses folgt eine Phase, in der kein weiteres Wasser dem System hinzugefügt wird und das vorhandene Wasser nur noch „abläuft“.

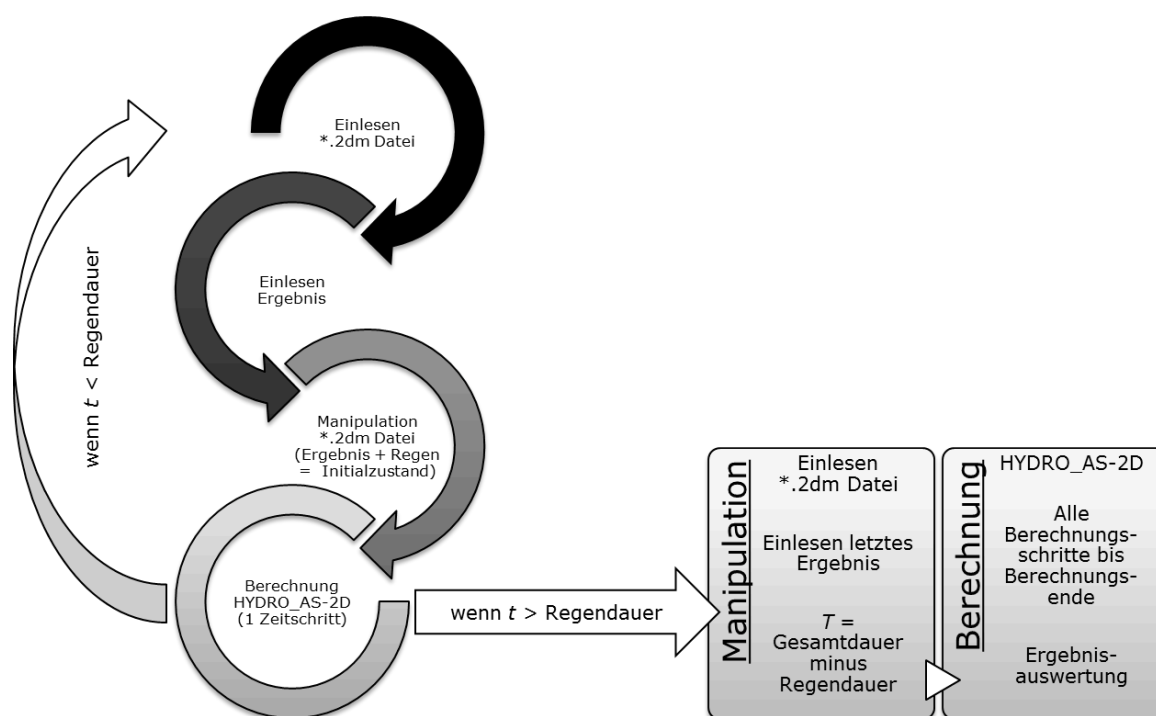


Abbildung 1: Vorgehensweise der entwickelten Methode

3 Untersuchungsprogramm

Das entwickelte Simulationstool wird einer Plausibilitätsprüfung unterzogen, um die Anwendbarkeit für Sturzflutsimulationen zu testen. Nach diesen grundlegenden

genden Evaluierungen werden die entwickelten Tools auf ein Einzugsgebiet von weniger als 10 km², den Wuppertaler Leimbach, angewendet.

Während des Regenereignisses werden die Berechnungsknoten des Netzes nach jedem Zeitschritt mit einer bestimmten Regenmenge beaufschlagt. Je kleiner der Zeitschritt dabei gewählt wird, desto geringer ist die Regenmenge pro Zeitschritt. Die beaufschlagte Regenmenge kann je nach Regenereignis bei deutlich weniger als 1 mm liegen. Bei dieser Anwendung ist zunächst nicht sicher, ob das Rechenmodul HYDRO_AS-2D mit diesen sehr geringen Wasserständen korrekt rechnen kann oder ob dem System aufgrund der Rechenungenauigkeiten Wasser entzogen oder hinzugefügt wird (Bilanzierung in den Zellen, Rundungsergebnisse). Zur Plausibilitätsprüfung wird ein fiktives quadratisches Einzugsgebiet ohne und mit Gefälle ($I_S = 0,1 \%$) in SMS erstellt. Das Einzugsgebiet besitzt eine Größe von $B \times L = 100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$. Es werden Regensimulationen mit variierenden Zeitschritten durchgeführt und die Ergebnisse verglichen. Dabei wird ein Regenereignis von fünf Minuten Dauer mit einer Gesamtregenmenge von 8 mm untersucht. Die Berechnungen werden mit den in Tabelle 1 aufgeführten Zeitschritten durchgeführt.

Tabelle 1 Untersuchte Zeitschritte

Zeitschritt [s]	5	10	20	50
Regenmenge pro Zeitschritt [mm]	0,13	0,27	0,53	1,33

Nach den grundlegenden Untersuchungen wird das Einzugsgebiet des Wuppertaler Leimbachs mit einer Größe von 6 km² (2 km x 3 km) mit zwei ausgewählten Regenereignissen (Tabelle 2) simuliert. Folgende Parameter werden dabei festgesetzt: maximale Elementgröße: 2 m², minimaler Winkel: 15°.

Tabelle 2 Untersuchungsprogramm des Fallbeispiels

Regenereignis	$D = 15 \text{ min},$ $h_N = 29,0 \text{ mm}$	$D = 60 \text{ min},$ $h_N = 48,0 \text{ mm}$
Gesamte Simulationsdauer [min]	35	80
Zeitschritt [s]	60	60

4 Ergebnisse

Erste Berechnungen haben gezeigt, dass bei sehr kleinen Zeitschritten und somit sehr geringen Niederschlagshöhen je Zeitschritt, keine Abflussberechnung stattfindet. Der Grund liegt in der von HYDRO_AS-2D voreingestellten minimalen Wassertiefe von $H_{min} = 1 \text{ cm}$, ab der die Punkte für die Berechnung aktiviert werden (Nujic, 2003). Bei einem Regenereignis von 8 mm erreichen die

Wassertiefen den Schwellenwert von $H_{min} = 1$ cm nicht, sodass die entsprechenden Knoten keine Berücksichtigung bei der Abflussberechnung finden. Folglich wird die minimale Wassertiefe auf $H_{min} = 0,01$ mm herabgesetzt.

Die Plausibilitätsprüfung hat weiterhin ergeben, dass abhängig von der gewählten Zeitschrittlänge Fehler in den Berechnungsergebnissen auftreten. In Abbildung 1 sind Ergebnisse einer Sturzflutsimulation für ein ebenes Einzugsgebiet dargestellt. Da das Einzugsgebiet kein Gefälle aufweist und somit kein Wasser fließt, müssen die Wassertiefen an jedem Knoten linear bis zu dem erwarteten Wert von $h_N = 8$ mm ansteigen und dann diesen Wert konstant halten. Wie zu erkennen ist, weichen die Ergebnisse von dem Erwartungswert ab. Die Ergebnisdateien mit den Wassertiefen dienen nach jedem Simulationsschritt als Initialwassertiefe für den nächsten Schritt. Diese Werte werden bei der Ausgabe auf vier Nachkommastellen in Metern gerundet. Um den vermuteten Rundungsfehler zu umgehen, wird ein Multiplikationsfaktor in der Berechnung eingefügt. Die Niederschlagshöhe wird vor Beginn der Simulation mit einem Faktor multipliziert, um die Höhe zu vergrößern. Damit liegt diese bei einem Faktor von 1000 nicht mehr in dem Bereich von wenigen Millimetern sondern bei mehr als einem Meter.

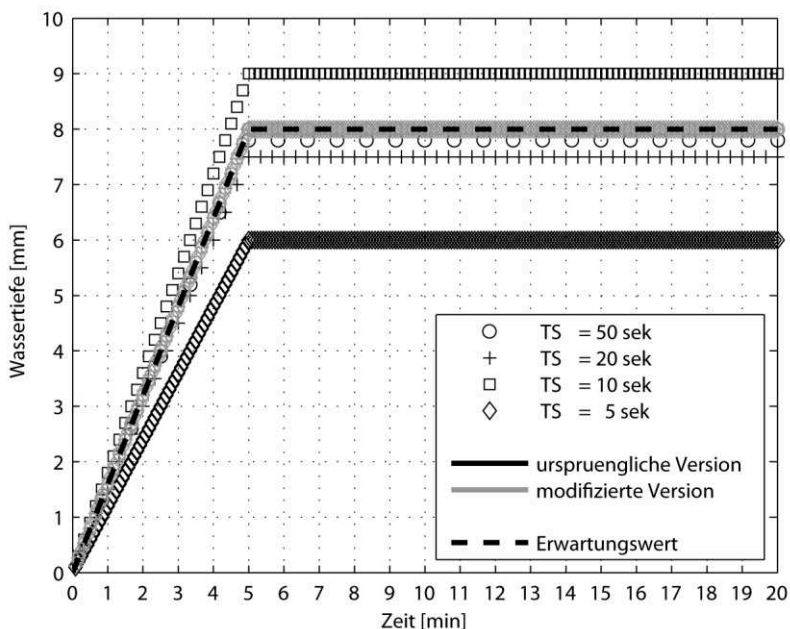


Abbildung 2: Wassertiefen auf ebener Platte

Nach Beendigung der Simulation werden die Ergebnisdateien wieder durch den Multiplikator dividiert, um die ursprüngliche Größenordnung zu erreichen. Durch dieses Verfahren werden maßgebliche Rundungsfehler in der vierten Nachkommastelle vermieden. Die Ergebnisse der modifizierten Simulation sind

in grau dargestellt und zeigen, dass bei einer Vermeidung der Rundung die Ergebniswerte exakt den Erwartungswerten entsprechen.

Die Abweichungen der Wassertiefen von den exakten Werten treten somit durch Rundungsfehler auf. Außerdem haben die gewählten Zeitschritte einen deutlichen Einfluss auf die Ergebnisse. Je größer die Zeitschrittlänge gewählt wird, desto weniger Simulationsschritte werden durchgeführt und desto geringer sind die Rundungsfehler. Mit abnehmender Anzahl an Simulationsschritten nimmt auch die Anzahl an Unterbrechungen zur Manipulation der Wassertiefen ab, wodurch die Rundungsfehler entstehen. Mit jedem weiteren Simulationsschritt setzt sich der Fehler fort, da immer wieder gerundete Ausgabewerte manipuliert und als Eingangsdaten für den nächsten Schritt dienen. Bei Regenereignissen langer Dauerstufen ist es daher sinnvoll, große Zeitschrittlängen zu wählen, um die entstehenden Fehler so gering wie möglich zu halten.

Die Methodik der künstlichen Erhöhung der Werte durch Multiplizieren mit einem definierten Faktor und anschließendem Dividieren durch den Faktor ist für die Problematik der Sturzflutsimulation in urbanen Gebieten nicht geeignet. Dieses Verfahren dient ausschließlich zum Auffinden der Ursache der Fehler in den Testläufen. Eine Erhöhung der Initialwassertiefen und -fließgeschwindigkeiten würde zu einer deutlichen Änderung des Abflussverhaltens und damit ebenfalls zu verfälschten Ergebnissen führen.

In einem weiteren Untersuchungsschritt werden Berechnungen für ein fiktives Einzugsgebiet mit einem Gefälle von $I_S = 0,1 \%$ mit einer Wasserbilanzierung durchgeführt. Das abgeflossene Wasservolumen V_{Aus} wird für alle Berechnungen ermittelt und mit dem Wasservolumen V_{Ein} , das dem System hinzugefügt wird, verglichen (Tabelle 3).

Tabelle 3 Wasserbilanz Plausibilitätsprüfung

Zeitschritt [s]	10	20	50
V_{Ein} [m ³]	80,00	80,00	80,00
V_{Aus} [m ³]	83,27	74,76	78,60
Differenz $V_{Aus} - V_{Ein}$ [m ³]	+3,27	-5,24	-1,40
Abweichung vom Erwartungswert V_{Ein} [%]	+4,09	-6,55	-1,75

Die Wasserbilanzierung zeigt, dass die Abweichung bei etwa 1 bis 7 % liegt, was als akzeptabel angesehen wird. Somit ist insgesamt eine gute Näherung an den Erwartungswert gegeben. Die Abweichung der Menge des abfließenden Wassers im Vergleich zum einlaufenden Wasser ergibt sich aus den bereits beschriebenen Rundungsfehlern.

Im nächsten Schritt wird ein Ausschnitt des Einzugsgebietes des Wuppertaler Leimbachs betrachtet. In Abbildung 2 ist ein Ausschnitt des Berechnungsnetzes im Bereich des Alten Marktes in Wuppertal Barmen dargestellt. Durch die feine Diskretisierung werden relevante topografische Gegebenheiten gut abgebildet. Außerdem weist das Netz eine sehr homogene Elementstruktur auf, was ein wichtiges Qualitätsmerkmal eines Berechnungsnetzes darstellt.

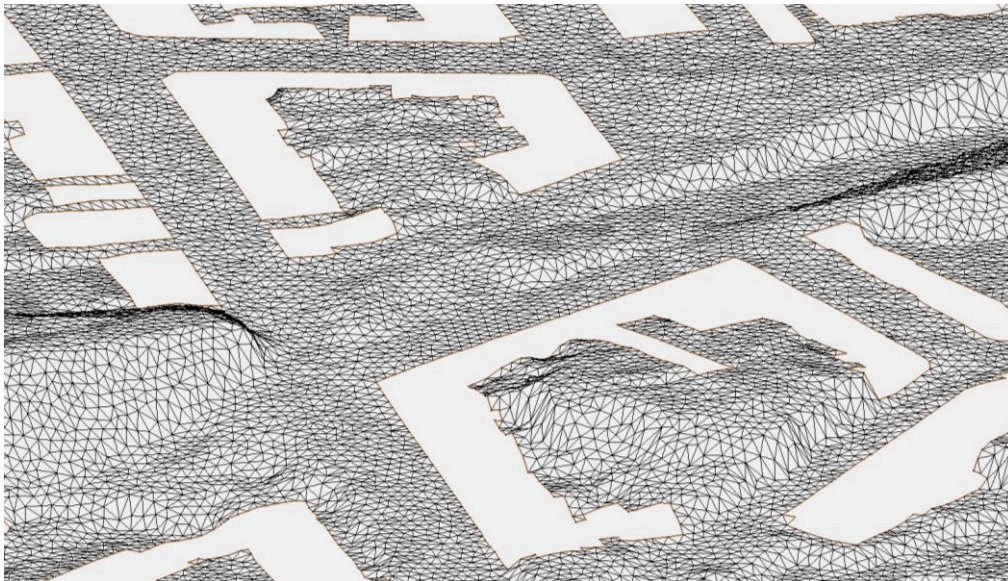


Abbildung 3: Ausschnitt des Berechnungsnetzes im Bereich Wuppertal Barmen

Um die Plausibilität der Ergebnisse zu überprüfen, wird eine Wasserbilanzierung für zwei Beispielberechnungen durchgeführt. Die Ergebnisse sind Tabelle 4 zu entnehmen.

Tabelle 4 Wasserbilanz Fallbeispiel Wuppertal

Dauerstufe D [min]	15	60
V_{Ein} [m ³]	$0,799 \cdot 10^5$	$1,392 \cdot 10^5$
V_{End} [m ³]	$0,795 \cdot 10^5$	$1,379 \cdot 10^5$
Differenz $V_{End} - V_{Ein}$ [m ³]	$-0,004 \cdot 10^5$	$-0,013 \cdot 10^5$
Abweichung vom Erwartungswert V_{Ein} [%]	-0,501	-0,934

Die prozentualen Abweichungen für das Fallbeispiel Wuppertal sind kleiner als die Abweichungen bei der Plausibilitätsprüfung (Tabelle 3), so dass für die Simulation von Sturzflutereignissen im urbanen Raum (am Beispiel Wuppertal Barmen) gute Ergebnisse mit der beschriebenen Methode erzielt werden können.

5 Fazit

Die entwickelte Methode und die dafür entwickelten Tools sind grundsätzlich für die Simulation von Sturzflutereignissen im urbanen Raum anwendbar. Die Wasserbilanzierungen für die einzelnen Berechnungen des Fallbeispiels haben gezeigt, dass Fehler durch interne Rundung in den Berechnungsergebnissen auftreten. Diese liegen aber in einer annehmbaren Größenordnung und können bei der Analyse berücksichtigt werden. Für Starkregenereignisse großer Dauerstufen ist es sinnvoll, die Zeitschrittlänge nicht zu klein zu wählen, damit die Rundungsfehler minimiert werden.

6 Literatur

- Barbier, J. (2012): Netzerstellung und –bearbeitung mit Open-Source Werkzeugen, Beiträge zum JuWi-Treffen am 25. und 26. Juni 2012, Berichte des Lehrstuhls und der Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Nr. 125, Hrsg. P. Rutschmann, Technische Universität München.
- Bilgili, A.; Smith, K. (2001): BatTri 2D FE Grid Generator – Version 7.2.01, Benutzerhandbuch.
- Nujic, M. (2003): HYDRO_AS-2D: Ein zweidimensionales Strömungsmodell für die wasserwirtschaftliche Praxis – Benutzerhandbuch.
- Peterseim, S. (2012): Numerische Hydrodynamische Simulation von Sturzflutereignissen in urbanen Gebieten, Masterthesis, Bergische Universität Wuppertal.
- Shewchuk, J.R. (1996): Triangle: Engineering a 2D Quality Mesh Generator and Delaunay Triangulator, applied Computational Geometry: Towards Geometric Engineering (Ming C. Lin & Dinesh Manocha, Hrsg.), Vol. 1148 of Lecture Notes in Computer Science, pp. 203 – 222, Springer Verlag, Berlin.

Autoren:

B. Sc. Svenja Peterseim
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Andreas Schlenkhoff

LuFG Wasserwirtschaft und Wasserbau
Bergische Universität Wuppertal
Pauluskirchstr. 7
42285 Wuppertal

Tel.: +49 202 439 4133
Fax: +49 202 439 4196
E-Mail: s.peterseim@uni-wuppertal.de
Web: www.hydro.uni-wuppertal.de

Prof. PD Dr.-Ing. habil. Mario Oertel

LuFG Wasserbau
Fachhochschule Lübeck
Mönkhofer Weg 239
23562 Lübeck

Tel.: +49 451 300 5154
E-Mail: mario.oertel@fh-luebeck.de
Web: www.wasserbau.fh-luebeck.de