

Strukturierte Netze in der hydraulischen Modellierung mit Grafikkarten

Moderne Grafikkarten ermöglichen hydraulische 2-D-Modellierungen mit sehr hohen räumlichen Auflösungen. Modelle mit strukturierten Netzen lassen sich dabei besonders effizient auf Grafikkarten parallelisieren. Bisherige Defizite strukturierter Netze entfallen durch die hohen räumlichen Auflösungen, die auch kleinste Geländestrukturen präzise abbilden. Strukturierte Netze sind dank ihrem einfachen Pre- und Postprocessing für die Praxis sehr attraktiv. Mit der Software flox-GPU wird die Modellierung auf strukturierten Netzen mit Grafikkarten aufgezeigt.

Ben Loretz und Christian Volz

Die Bedeutung von numerischen Modellierungen in der Hydraulik hat in den letzten Jahren stetig zugenommen. Die Anwendungsgebiete sind vielfältig – von ökologischen Fragestellungen über wasserbauliche Studien hin zum Hochwasserschutz. Die Wassergefahren sind sowohl flächenmäßig als auch im monetären Schadensausmaß in der Schweiz wie in den meisten Ländern die gravierendste Naturgefahr, weshalb der Einsatz von effizienter und genauer hydraulischer Simulationssoftware bedeutend ist.

Variantenstudien, z. B. für Brücken-Verkläuerungen, Auflandungen oder Dammbürche, sowie Sensitivitätsanalysen benötigen auch für einzelne Gewässer eine Vielzahl an Rechenläufen. Neben der Genauigkeit ist daher auch die Rechengeschwindigkeit in der Praxis entscheidend. Dies gilt insbesondere für Echtzeitrechnungen, wie sie beispielsweise für Alarmierungssysteme notwendig sind. Im Folgenden wird auf aktuelle Fortschritte bei der hydraulischen 2-D-Modellierung eingegangen, die dank der Rechenleistung von modernen Grafikkarten (GPU) möglich wurden. Es werden Eigenschaften von Modellen mit strukturierten und unstrukturierten Rechenetzen auf diesen Aspekt hin näher beleuchtet.

1 Herausforderungen der Hochwassermodellierung

Grundgleichungen

Für Hochwassermodellierungen werden häufig 2-D-Modelle verwendet, welche die Flachwassergleichungen (FWG) lösen. Hingegen sind 3-D-Modelle aufgrund hoher Rechenzeiten sowie fehlender Datengrundlagen zumeist (noch) nicht praktikabel. Numerische 1-D-Modelle sind andererseits nicht in der Lage, flächige Überflutungen und komplexere Fließwege abzubilden. Die FWG ergeben sich aus der Tiefenmittlung der 3-D-Navier-Stokes-Gleichungen und ermöglichen die genaue Abbildung von Fließvorgängen in Gerinnen, wo die Wassertiefen gegenüber den Wellenlängen klein sind. Neben dieser Klasse der physikalisch-basierten Modelle gibt es auch vereinfachte Modelle, die auf anderen Prinzipien basieren oder einzelne Terme aus den FWG vernachlässigen, wie z. B. quasi-stationäre Modelle oder Flood-Routing. Für Anwendungsgebiete, wie die Hochwassermodellie-

rungen, die z. B. instationäre Wellenausbreitungen und Retentionseffekte beinhalten, sind solche Vereinfachungen jedoch häufig unzureichend.

Abbildung des Geländes

Eine weitere Herausforderung für die Überflutungsmodellierung ist die präzise Abbildung des Geländes im numerischen Modell. Dies gilt vor allem für topografische Leitstrukturen, wie z. B. Böschungskanten oder Dämme. Deren Abbildung im Rechenetz ist für eine genaue Beurteilung notwendig, erfordert aber zumeist kleine Rechenzellen, häufig im Bereich von Dezimetern bis wenigen Metern. Dies steht jedoch im Konflikt mit der Anforderung, kilometerlange Gewässerläufe und ausge dehnte Ausuferungen zu modellieren. Dieser Unterschied in der Längenskala von vielen Größenordnungen verhinderte in der Vergangenheit den effizienten Einsatz von 2-D-Modellen mit strukturierten Netzen, da die Rechenzeiten nicht praktikabel waren bzw. die Anzahl an Rechenzellen zu groß wurde.

Numerische Aspekte

Aus numerischer Sicht sind Hochwassermodellierungen anspruchsvoll. Bei der Überflutung verändern sich die Modellgrenzen dynamisch, d. h. es finden Übergänge von trockenen und benetzten Gebieten statt. Weiterhin ist oftmals ein robuster Umgang mit wechselnden Fließzuständen, mit instationären Wellenausbreitungen und hohen Geschwindigkeiten nötig. Auch die Abbildung von statischen und dynamischen Retentionswirkungen sowie die vollständige Massenerhaltung sind wichtig. In

Kompakt

- Hydraulische Modelle mit strukturierten Netzen werden wieder attraktiv, da sie gut auf Grafikkarten parallelisierbar sind.
- Die Rechenleistung erlaubt hinreichend hohe räumliche Auflösungen, um kleinste Geländestrukturen abzubilden.
- Strukturierte Netze bieten Vorteile beim Pre- und Postprocessing.

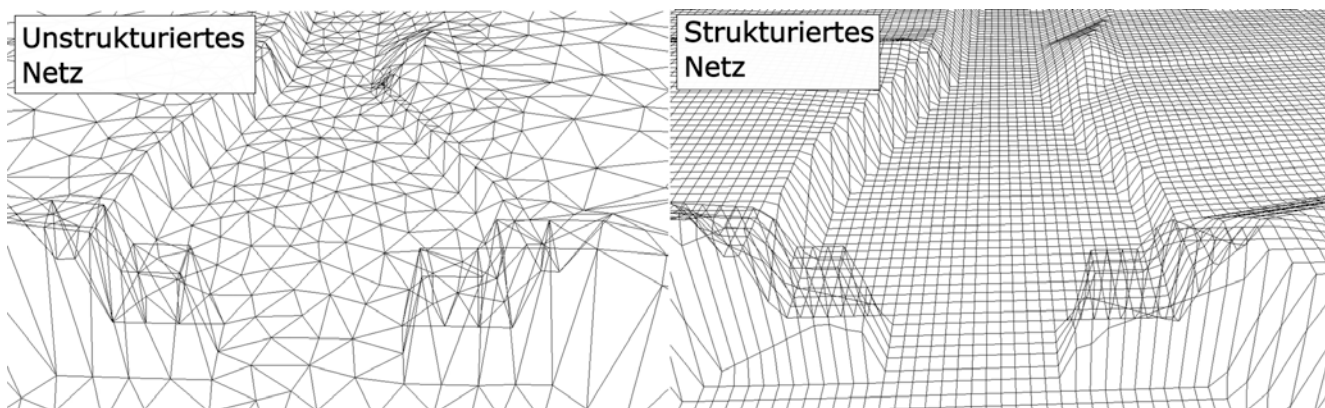


Bild 1: Unstrukturiertes (links) und strukturiertes (rechts) Rechenetz in perspektivischer Ansicht (Quelle: Ingenieure Bart AG)

den letzten Jahrzehnten haben sich vor allem Finite-Volumen-Methoden (FVM) mit sogenannten Upwind-Verfahren etabliert. Diese besitzen u. a. die Eigenschaft Schockwellen, wie z. B. Dammbrechwellen, abbilden zu können (shock-capturing). Daneben haben FVM die Vorteile der Massenerhaltung und Robustheit in Hinblick auf schwierige numerische Probleme, sie sind jedoch rechnerisch anspruchsvoll und zeitintensiv.

Die Rechengeschwindigkeit der Modelle ist wesentlich durch zwei Aspekte limitiert: Die Zeitschrittlänge sowie die Anzahl Zellen, welche in jedem Zeitschritt berechnet werden. Für instationäre Hochwassermodellierungen mit den FWG werden dabei zumeist explizite numerische Methoden angewandt. Diese besitzen den Nachteil, dass sie aus Stabilitätsgründen nur kleine Zeitschritte erlauben. Der Zeitschritt hängt vom modellweiten Minimum des Quotienten aus dem Zellabstand d und der Geschwindigkeit v in jeder Zelle ab:

$$\Delta t = \text{CFL} \times d/v \quad (1)$$

Dieses CFL-Kriterium führt jedoch dazu, dass häufig die kleinsten Zellen im Modellgebiet für den Zeitschritt limitierend sind und zu unerwünscht kleinen Zeitschritten sowie langen Rechenzeiten führen.

2 Strukturierte und unstrukturierte Netze

Viele derzeit in der Praxis eingesetzte 2-D-Modelle basieren auf unstrukturierten Netzen, die aus Dreiecken aufgebaut sind. Dem gegenüber stehen die strukturierten Netze, bei denen das Modellgebiet mit regelmäßigen Zellen, zumeist Quadrate oder Rechtecke, diskretisiert wird (**Bild 1**). In Hinblick auf die beschriebenen Herausforderungen an die Hochwassermodellierung bieten strukturierte und unstrukturierte Netze verschiedene Vor- und Nachteile, die nachfolgend erläutert sind:

- **Lokale Verdichtungen:** Unstrukturierte Netze ermöglichen es, interessierende Bereiche mit kleinen Zellen detaillierter abzubilden. Andere Bereiche werden dagegen mit größeren Zellen vereinfacht abgebildet. Dadurch reduziert sich die Gesamtzahl der berechneten Zellen und somit die Rechenzeit. Bei strukturierten Netzen hat das Modellgebiet dagegen eine einheitliche Auflösung. Es hängt vom konkreten Modell

ab, wie viele Zellen mit unstrukturierten Gittern eingespart werden können – oft werden bebaute Gebiete mit nur wenig Einsparungspotenzial untersucht (**Bild 2 links**). Nachteilig bei den Verdichtungen ist, neben dem großen Aufwand, dass bereits vorgängig bekannt sein muss, wo in welchem Umfang feiner/gröber aufgelöst werden kann.

- **Zeitschritt:** Dieser korreliert häufig mit den kleinsten benetzten Zellen des Modells (Gl. (1)). Die Verwendung von unstrukturierten Netzen bringt für diese Problematik der kleinen Zeitschritte gegenüber den strukturierten Netzen nur geringe Vorteile. Die Größenordnung der kleinsten Rechenzellen wird vielmehr in beiden Fällen von der Ausdehnung der kleinsten Geländestruktur bestimmt (in der Praxis resultieren bei strukturierten Netzen zumeist leicht höhere Auflösungen und kleinere Zeitschritte).
- **Abbildung kleinster geometrischer Elemente:** Mit unstrukturierten Netzen können Leitstrukturen, wie Dämme, flexibel abgebildet werden, indem man die Zellkanten entlang der Bruchkanten ausrichtet. Die strukturierten Netze sind dagegen starr und benötigen ausreichend hohe räumliche Auflösungen für die genaue Abbildung der Leitstrukturen.
- **Preprocessing:** Die Erstellung hochwertiger und glatter unstrukturierter Netze erfordert in der Praxis einen maßgebenden Anteil der gesamten Bearbeitungszeit der Modellierung. Die Güte der Resultate hängt dabei enorm von der Qualität des Netzes ab – die Dreieckszellen müssen Qualitätskriterien einhalten, wie die Vermeidung von spitzen Winkeln oder abrupte Größenänderungen. Insbesondere entstehen bei der Vermaschung von spitz zusammenlaufenden Bruchkanten, unsauberen Knoten oder zu dichten Vermessungspunkten sehr kleine Dreieckszellen (**Bild 2 rechts**). Diese Datenmängel müssen zumeist händisch bereinigt werden, was bei großen Modellen sehr zeitintensiv ist. Bei der Erstellung strukturierter Netze entfällt dieser Aufwand dagegen fast gänzlich.
- **Postprocessing:** Die Auswertung der Resultate auf unstrukturierten Netzen ist wegen der komplexen Datenstruktur aufwändig und benötigt meist Spezialsoftware. Resultate werden häufig in einem zusätzlichen Arbeitsschritt auf Raster interpoliert, was jedoch Zusatzaufwand erfordert und zu Genauigkeitsverlusten führt (**Bild 3**). Dieser zusätzliche Arbeitsschritt ist bei strukturierten Netzen nicht erforderlich. Hier

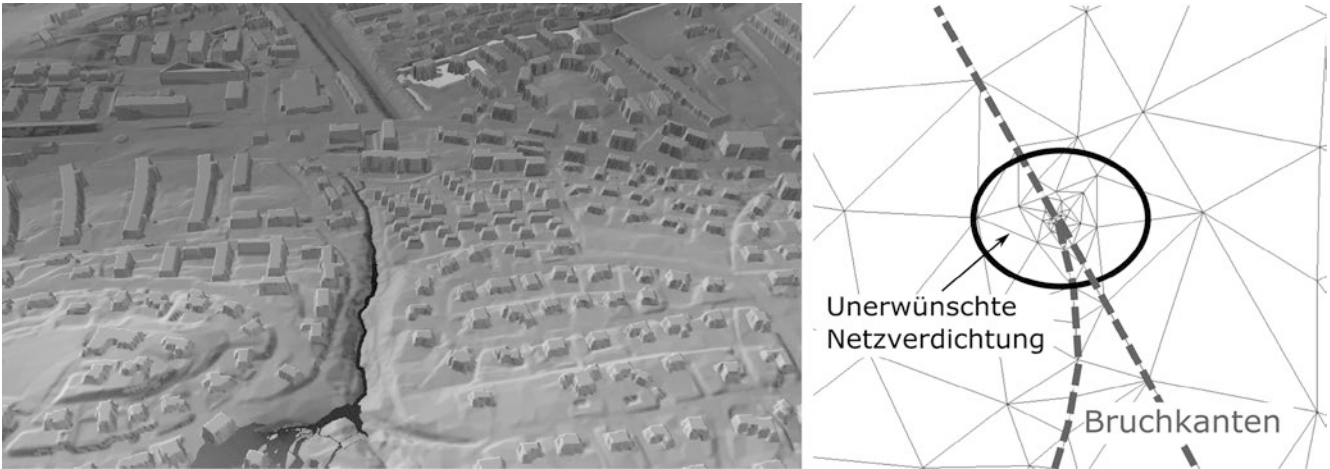


Bild 2: Links: Überflutungsbereich mit Infrastruktur und dichtem Netz aus Leitstrukturen; rechts: unerwünschte Netzverdichtung im Bereich zusammenlaufender Bruchkanten (gestrichelt) (Quelle: Ingenieure Bart AG)

liegen die Resultate bereits als einfach handhabbare Raster vor, deren Weiterverarbeitung, z. B. mit GIS-Programmen, komfortabel und verlustfrei ist.

- **Effizienz:** Rechenaufwand und Speicherbedarf sind bei Modellen mit strukturierten Netzen pro Zelle deutlich kleiner als bei Verfahren mit unstrukturierten Netzen.
- **Parallelisierbarkeit:** Explizite Modelle der FWG lassen sich grundsätzlich gut parallelisieren. Strukturierte Netze ermöglichen dabei eine besonders effiziente parallele Verarbeitung (Abschnitt 4).

3 Leistungssteigerung durch GPU mit strukturierten Netzen

Leistungssteigerung durch GPU

Erst die Steigerung der Rechenleistung der letzten Jahrzehnte ermöglichte den Einsatz von hydraulischen 2-D-Modellen. Zuletzt konnten sich Modelle mit strukturierten Netzen für Hochwassermodellierungen kaum in der Praxis durchsetzen. Die strukturierten Gitterzellen waren zu groß, um schmale Gerinne, Dämme oder ähnliche Strukturen präzise abzubilden. Bei der Interpolation dieser Strukturen aus dem Geländemodell auf zu große Zellen gingen relevante Informationen verloren.

Eine höhere räumliche Auflösung führte aber zum Anstieg der Zellzahlen und somit zu erhöhtem Bedarf an Arbeitsspeicher sowie Rechenleistung. Diese Hardware-Anforderungen waren schwer zu bewältigen, weshalb vor allem auf unstrukturierten Netzen modelliert wurde.

Die jüngste Zunahme der Rechenleistung wurde vor allem durch den Paradigmenwechsel zur parallelen Verarbeitung erreicht. Sowohl bei herkömmlichen Prozessoren (CPU) als auch bei GPU werden die Leistungssteigerungen v. a. durch die Erhöhung der Anzahl an parallelen Berechnungen erreicht. GPU stellen hierbei einen Extremfall dar, da ihre Architektur auf massiv parallele Verarbeitung optimiert ist. Dies zeigt sich eindrucksvoll im Vergleich der Entwicklung der Rechenleistung von CPU und GPU (**Bild 4**). Die heute erreichbare Rechenleistung einer GPU liegt im Bereich von mehreren Tera-FLOPS (Floating-Point Operations per Second), welche bis vor kurzem nur in Rechenzentren erreichbar waren. Die Parallelschaltung mehrerer GPU in einer Workstation bietet zudem die Möglichkeit den Grad der Parallelität weiter zu steigern.

Diese hohe Rechenleistung macht GPU für viele Anwendungen in der Praxis, wie auch die hydraulische Modellierung, interessant. Grafikkarten bieten zudem den Vorteil von niedrigen Anschaffungskosten, bezogen auf die Rechenleistung, gegenüber den CPU. Dies gilt besonders für Software, die gängige

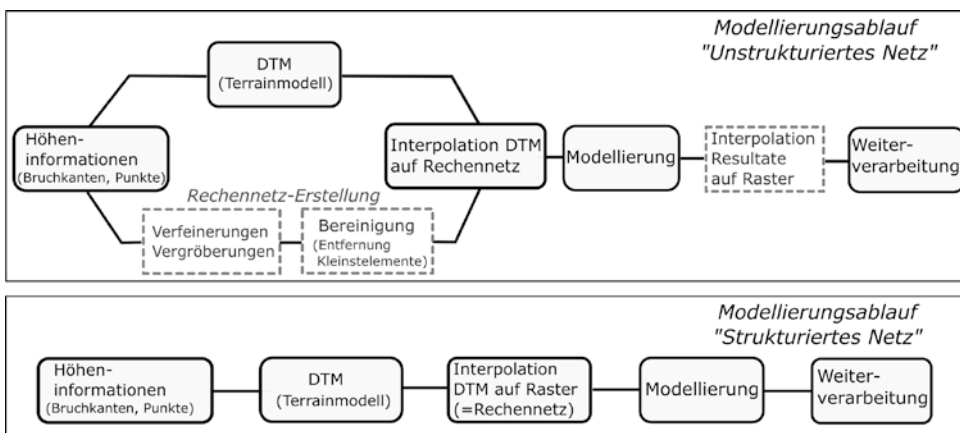


Bild 3: Modellierungsablauf mit unstrukturiertem (oben) und strukturiertem Rechennetz (unten); die gestrichelten, zeitintensiven Arbeitsschritte entfallen beim strukturierten Netz (Quelle: Ingenieure Bart AG)

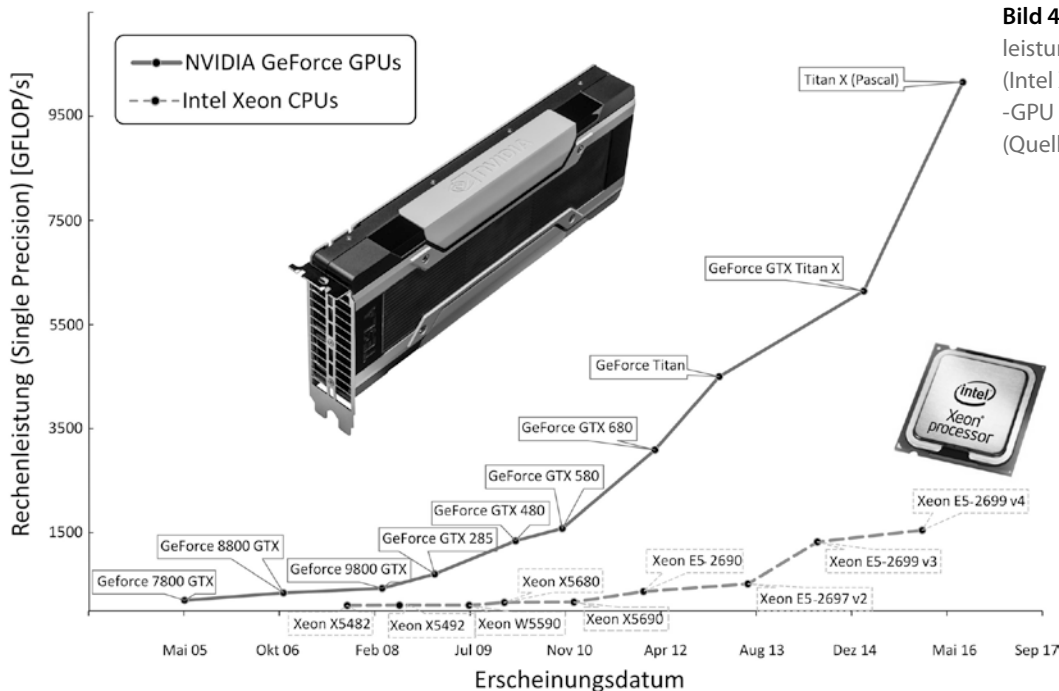


Bild 4: Entwicklung der Rechenleistung von Workstation-CPU (Intel Xeon, gestrichelt) und -GPU (NVIDIA, durchgezogen) (Quelle: [7])

(single-precision) GPU verwenden kann, wie sie z. B. in der Spielebranche eingesetzt werden. Nur wenig hydraulische Modelle haben jedoch diesen Paradigmenwechsel bisher vollzogen, da die Umsetzung auf die Architektur der GPU aufwändig ist und neue Softwareansätze benötigt.

Parallelisierung von Modellen mit strukturierten Netzen

Ein entscheidender Vorteil der strukturierten Netze ist die Einfachheit der Berechnungsschemas und der Datenhaltung. Diese führen zu geringerem Speicherbedarf, zu einer größeren Anzahl an möglichen Zellen und einer effizienten Berechnung. Die Verknüpfung von Zellen mit ihren Nachbarn ist im strukturierten Netz fest vorgegeben und simpel. Die Ausrichtung der modellinternen Koordinaten erfolgt einfach entlang der Gitterrichtungen. Diese Einfachheit ermöglicht u. a. eine effiziente Aufteilung des Berechnungsgebiets in kleine, überlappende Teilgebiete, wie sie für die massiv parallele Bearbeitung auf der GPU nötig ist. Die FWG können daher mit strukturierten Netzen besonders effizient auf GPU umgesetzt werden [1]. Dies trifft vor allem auf numerische Ansätze zu, die für die Parallelisierung optimiert sind, indem sie die Abhängigkeiten zwischen benachbarten Zellen geringhalten.

Dank der nun möglichen hohen räumlichen Auflösung und großen Anzahl an Rechenzellen können Zellgrößen kleiner gewählt werden als die charakteristischen Größen der abzubildenden topografischen Elemente. So bleiben Geländekanten und Höheninformationen bei der Diskretisierung erhalten. Sehr feine Strukturen, deren Ausdehnung weiterhin unter der Zellgröße liegen (z. B. schmale Mauerkronen), können zudem mit speziellen Methoden im Gitter erzwungen werden. Dadurch wird das ehemals größte Defizit der strukturierten Gitter weitgehend behoben bei gleichzeitiger Erhaltung ihrer Einfachheit und Geschwindigkeitsvorteile.

4 Anwendungsbeispiele mit flox-GPU

Die 2-D-Modellierungs-Software flox-GPU [7] ist eine Eigenentwicklung der Ingenieure Bart AG, welche für den Einsatz auf GPU entworfen wurde. Das numerische Verfahren (basierend auf [2], [3], [4]) löst die vollen FWG mit einer zellzentrierten FVM auf strukturierten Netzen (**Tabelle 1**). Die Software läuft auf handelsüblichen NVIDIA-GPU, zielt vor allem auf Anwendungen im Bereich der Hochwassermodellierungen und enthält Module für hydraulische Strukturen wie Durchlässe oder Brücken.

Für die Untersuchung der Rechenleistung der GPU-optimierten Software werden Vergleichssimulationen durchgeführt. Verglichen wird die flox-GPU-Modellierung mit der Software Basement [5] als Beispiel einer gängigen hydraulischen 2-D-Software auf unstrukturierten Netzen. Vergleichbare Resultate ergeben sich mit anderen Programmen. Simuliert wird die Ausbreitung einer zirkulären Dammbrechwelle, wobei sich eine Wassersäule in alle Raumrichtungen ausbreitet (**Bild 5**). Als praxisrelevantes Beispiel wird zudem der historische Malpasset-Dammbbruch

Tabelle 1: Kenndaten der Software flox-GPU (Quelle: [7])

Modell	2-D-Flachwassergleichungen
Schema	Zentrales Upwind-Verfahren mit minmod Slope-Limiter
Genauigkeit	2. Ordnung in Raum und Zeit
Zeitintegration	Explizites Runge-Kutta-Verfahren
Reibung	Semi-implizite Reibung, Strickler
Rechnetz	Strukturiertes Netz, quadratische Zellen
GPU	Single-Precision NVIDIA-GPU

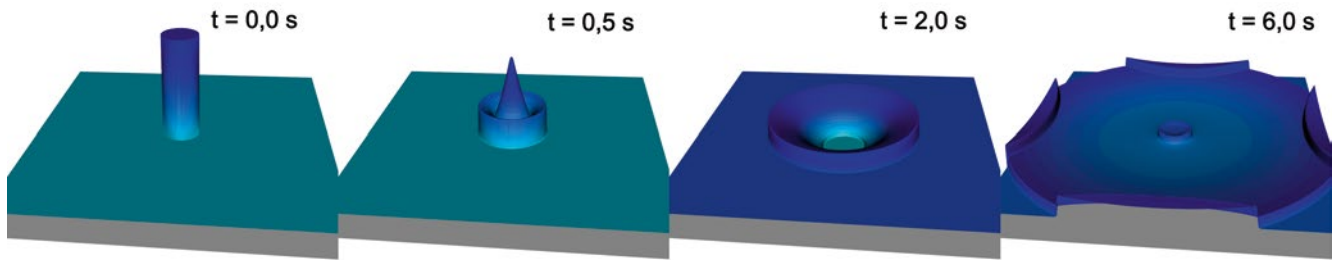


Bild 5: Momentaufnahmen der Ausbreitung einer zirkulären Dammbrechwelle modelliert mit flox-GPU (Quelle: [7])

modelliert (**Bild 6**). Beim Dammbbruch 1959 in Südfrankreich kam es zum plötzlichen Versagen der Bogenstaumauer und der Ausbildung einer verheerenden Flutwelle [6]. Es zeigen sich folgende Merkmale:

- Die Ausbreitung der zirkulären Dammbrechwelle wird von beiden Modellen richtig wiedergegeben. Das flox-GPU-Modell verwendet ungefähr die gleiche Anzahl an Zellen und in etwa einen halb so großen durchschnittlichen Zeitschritt. Die gesamte Rechenzeit im Vergleich mit BASEMENT ist jedoch um Größenordnungen geringer (**Tabelle 2 links**). Nur das GPU-Modell erreicht eine Laufzeit kürzer als die Echtzeit.
- Beide Modelle geben die Feldmessungen der Dammbrechwelle des Malpasset-Dammbrechts erfolgreich wieder (Bild 6, oben). Die modellierten Überflutungsflächen weisen zudem eine gute Übereinstimmung zwischen den Modellen auf

(Bild 6, unten). Trotz der um Faktor 30 höheren Anzahl an Zellen rechnet flox-GPU dabei mindestens eine Größenordnung schneller (**Tabelle 2 rechts**). Das GPU-Modell erzielt somit eine insgesamt verbesserte räumliche Auflösung bei gleichzeitig erheblich verkürzter Rechenzeit.

Aussagekräftige Vergleiche zwischen strukturierten und unstrukturierten Modellen sind grundsätzlich schwierig und vom konkreten Fall abhängig. Aus der Erfahrung im Praxiseinsatz mit flox-GPU lässt sich für die hier betrachteten Fragestellungen festhalten, dass die GPU-Modellierung auf strukturiertem Netz in typischen Fällen eine Geschwindigkeitssteigerung um den Faktor 10 oder mehr gegenüber CPU-Lösungen ermöglicht. Neben der erheblichen Verkürzung der Laufzeit werden auch hochaufgelöste Echtzeit-Modelle mit Zellgrößen im unteren Dezimeterbereich oder räumlich sehr ausgedehnte Modelle (mit mehr als 10 Mio. benetzten Zellen) praktikabel.

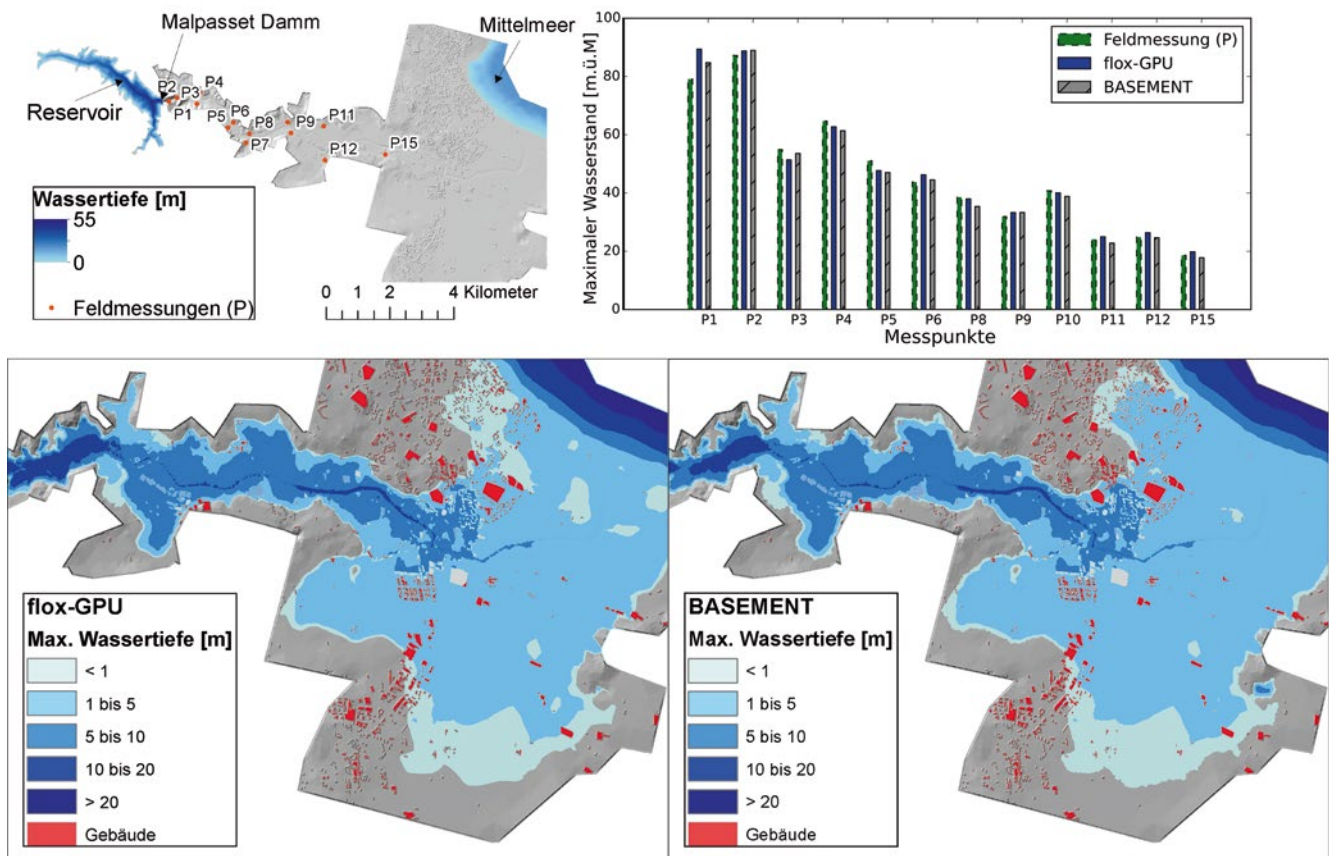


Bild 6: Modellaufbau Malpasset-Dammbrech und Lage der Messstellen (oben links), Vergleich modellierter und gemessener maximaler Wasserstände (oben rechts), Vergleich der modellierten Überflutungsflächen (unten) (Quelle: Ingenieure Bart AG)

Tabelle 2: Vergleich von flox-GPU mit Basement für den zirkulären und den Malpasset-Dammbruch (verwendete Hardware: NVIDIA GeForce GTX 1080 für flox-GPU, Intel i7-4770 für Basement) (Quelle: Ingenieure Bart AG)

Software	flox-GPU			Basement		
Anwendung	Zirkulärer Dammbruch			Malpasset Dammbruch		
Parallelität	GPU	1 core	4 cores	GPU	1 core	4 cores
Anzahl Zellen [-]	498 436	498 912		9 884 565	323 892	
Zeitschritt [s]	0,002-0,004		0,003-0,008	0,004-0,06		0,06-0,1
Rechenzeit [s]	4	637	324	592	10 925	6534
Echtzeit-Faktor	2,4	0,016	0,03	8,1	0,4	0,7

5 Zusammenfassung

Durch die steigende Rechenleistung von modernen Grafikkarten sind die bisherigen Defizite von hydraulischen 2-D-Modellen mit strukturierten Netzen weitgehend obsolet geworden. Dank der neuerdings möglichen hohen räumlichen Auflösung werden Bruchkanten und Geländestrukturen auch bei der Diskretisierung im strukturierten Netz präzise repräsentiert. Damit und durch die besonders effiziente Umsetzung auf Grafikkarten stellt die Verwendung von Modellen mit strukturierten Netzen bei Hochwassermodellen eine attraktive Alternative dar. Die Vorteile dieser Modellklasse liegen vor allem in der Einfachheit – sowohl was die Berechnung und den Speicherbedarf betrifft als auch in Hinblick auf das komfortable Pre- und Postprocessing der Eingangsdaten und Resultate mit gängigen Rasterformaten. Dies gilt vor allem für die Netzerstellung, die mit strukturierten Netzen erheblich einfacher ist. Wir sehen daher eine Wiederkehr der Verfahren mit strukturierten Netzen, die in der Vergangenheit durch solche mit unstrukturierten Netzen abgelöst wurden.

GPU-beschleunigte Systeme, welche sich moderne numerische Verfahren zur Lösung der vollständigen FWG zu Nutze machen, haben das Potenzial, die Qualität und Bearbeitungstiefe in der Modellierung zu verbessern. Sie genügen den Herausforderungen der Hochwassermodellierungen und erfüllen folgende Merkmale:

- genaue und stabile numerische Verfahren,
- präzise Abbildung der topografischen Strukturen im Rechenetz,
- Vergrößerung der Untersuchungsgebiete und
- kurze Rechenzeiten.

Neben den neuen Möglichkeiten kommen auch neue Herausforderungen hinzu. Ein effektiver Gewinn in Form von detaillier-

teren Ergebnissen durch die hohen Netzauflösungen erfordert entsprechend hochaufgelöste Geländemodelle. Die Untersuchung vieler Szenarien und Sensitivitätsanalysen benötigt zudem vermehrt automatisierte Verarbeitungen.

Autoren

Dipl.-Forsting. ETH Ben Loretz

Dr. Christian Volz
 Ingenieure Bart AG
 Waisenhausstrasse 15
 9000 St. Gallen, Schweiz
 loretz@bart.ch
 volz@bart.ch

Literatur

- [1] Brodtkorb, A. R.; Sætra, M. L.; Altinakar, M.: Efficient shallow water simulations on GPUs: Implementation, visualization, verification and validation. In: Computers & Fluids (2012), Nr. 55, S. 1-12.
- [2] Kurganov, A.; Petrova, G.: A second-order well-balanced positivity preserving central-upwind scheme for the Saint-Venant system. In: Communications in Mathematical Sciences 5 (2007), Nr. 1, S. 133-160.
- [3] Brodtkorb, A. R.; Hage, T. R.; Lie, K.: Simulation and visualization of the Saint-Venant system using GPUs. In: Computing and Visualization in Science (2010), Nr. 13, S. 341-353.
- [4] Horvath, Z.; Waser, J.; Perdigo, R. A. P.; Konev, A.; Blöschl, G.: A two-dimensional numerical scheme of dry/wet fronts for the Saint-Venant system of shallow water equations. In: International Journal for numerical Methods in Fluids (2014), 00, S. 1-26.
- [5] VAW ETH Zürich (Hrsg.): Basement – Basic Simulation Environment for Computation of Environmental Flow and Natural Hazard Simulation. Version 2.6. Zürich, 2016.
- [6] Londe, P.: The Malpasset Dam failure. In: Engineering Geology 24 (1987), S. 295-329.
- [7] Ingenieure Bart AG (Hrsg.): flox-GPU, Modellierungssoftware. Version 1.0. St. Gallen, 2016 (www.flox-gpu.ch).

Ben Loretz and Christian Volz

Hydraulic modelling on structured grids using graphic cards

Modern graphic cards allow for hydraulic 2D modelling with very high spatial resolutions. Parallelization of models based on structured meshes is highly efficient on graphic cards. Former deficits of structured meshes are removed by the high spatial resolutions, which are able to resolve even smallest topographical structures. The usage of structured meshes is particular attractive in engineering practice due to the simple pre- and postprocessing. The software flox-GPU is used to illustrate modelling on structured grids with graphic cards.



Weitere Empfehlungen aus www.springerprofessional.de:

Geländemodell

- Kuczora, V.: Digitales Geländemodell. In: Straßenentwurf mit CARD/1. 3. Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015. www.springerprofessional.de/link/6951550
- Wessels, M.; et al.: Tiefenschärfe — die hochauflösende Vermessung des Bodensees. In: WasserWirtschaft, Ausgabe 04/2017. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2017. www.springerprofessional.de/link/12185782