

Renaissance strukturierter Netze in der hydraulischen Modellierung dank leistungsstarker Grafikkarten

Christian Volz (Ingenieure Bart AG, St. Gallen, volz@bart.ch)
Ben Loretz (Ingenieure Bart AG, St. Gallen, loretz@bart.ch)

Résumé

L'augmentation de la puissance de calcul des stations de travail par des cartes graphiques performantes permet des modélisations hydrauliques 2D avec une très haute résolution spatiale. Ceci s'applique particulièrement aux modèles utilisant des maillages structurés, qui travaillent de manière efficace sur des cartes graphiques parallèles. Il est en grande partie remédié aux anciennes faiblesses de ces modèles par la haute résolution, vu que des structures de terrain à petite échelle sont représentées avec précision. Les modèles utilisant des maillages structurés sont spécialement intéressants pour ces hautes résolutions et grandes quantités de données, grâce à la simplicité et à l'efficacité de leurs pré- et post-traitements basés sur des formats raster. Ils permettent des résolutions plus élevées et des études plus approfondies ainsi que la modélisation de plus de scénarii, ce qui est important pour la gestion des dangers naturels. L'efficacité des modélisations basées sur les maillages structurés avec des cartes graphiques est démontrée à l'exemple du programme *flox-GPU*.

Zusammenfassung

Der Fortschritt in der Rechenleistung auf Workstations durch leistungsstarke Grafikkarten ermöglicht hydraulische 2D-Modellierungen mit sehr hohen räumlichen Auflösungen. Dies gilt besonders für Modelle mit strukturierten Netzen, die sich effizient auf Grafikkarten parallelisieren lassen. Die bisherigen Defizite dieser Modelle werden durch die hohe Auflösung

weitgehend behoben, da auch kleinräumige Geländestrukturen präzise abgebildet werden. Gerade bei diesen hohen Auflösungen und Datenmengen sind Modelle mit strukturierten Netzen dank ihrem einfachen und effizienten Pre- und Postprocessing basierend auf Raster-Formaten sehr attraktiv. Sie ermöglichen höhere Auflösungen und Abklärungstiefen sowie mehr Szenarien-Modellierungen, die fürs Naturgefahrenmanagement wichtig sind. Am Beispiel des Programmes *flox-GPU* wird die Effizienz der Modellierung auf strukturierten Netzen mit Grafikkarten aufgezeigt.

1. Einleitung

Die Bedeutung von numerischen Modellierungen in der Hydraulik hat in den letzten Jahren stark zugenommen. Die Anwendungsgebiete sind dabei vielfältig – von immer genaueren

Modellen und besseren Daten profitieren ökologische Fragestellungen zu Fischhabitaten gleichermassen wie Geschiebetransportstudien von Kraftwerksbesitzern oder Dimensionierungsprojekte von Hochwasserschutzmassnahmen. Speziell im Bereich des Naturgefahrenmanagements zeugen von diesem Trend die immer höheren Abklärungstiefen von Gefahrentgutachten und auch die wachsende Zahl an Simulations-Programmen mit dem Fokus auf Naturgefahren. Die Wassergefahren sind sowohl flächenmässig als auch im monetären Schadensausmass in der Schweiz die gravierendste Hauptprozessart (Hausmann et al. 2012), weshalb der Einsatz von effizienter und genauer hydraulischer Simulations-Software von grosser Bedeutung ist.

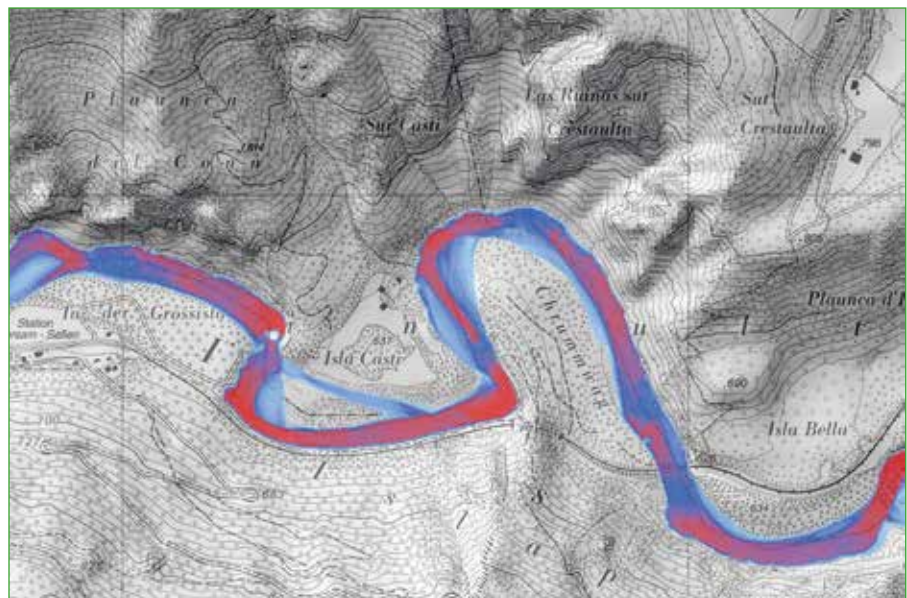


Abbildung 1: 2D-Modellierung des Vorderrheins mit der Software *flox-GPU*. Dargestellt sind die Fliesstiefen in einem Abschnitt des Gesamtmodells von Sedrun bis Sargans (ca. 100 km Länge, 1.75 Mio. benetzte Zellen)

Aufwändige Variantenstudien oder Analysen mit verschachtelten Szenarien verlangen auch für einzelne Gerinne eine Vielzahl an Rechenläufen. Dabei handelt es sich je nach Fragestellung um verschiedene Jährlichkeiten des Abflusses, Verklausungen von einzelnen Durchlässen oder Brücken, Auflandungen von Fließabschnitten, Dammbüche oder anderweitig relevante Subprozesse. Neben der Genauigkeit ist daher auch die Effizienz bzw. Rechengeschwindigkeit in der Praxis entscheidend. Obwohl Echtzeitrechnungen nur einen geringen Teil der Anwendungen ausmachen und Genauigkeit und Transparenz höher gewichtet werden als reine Rechengeschwindigkeit, ermöglichen erst schnelle Programme einen vernünftigen Umgang mit vielen Varianten oder Sensitivitätsanalysen. In manchen Fällen können Limitierungen bei Soft- oder Hardware, wie z.B. eine Beschränkung der maximalen Anzahl an Zellen, den Einsatz eines Programmes für eine bestimmte Untersuchung sogar ganz verhindern.

Im Folgenden wird auf den Fortschritt bei den hydraulischen 2D-Modellierungen eingegangen, die dank der Rechenleistung von modernen, leistungsstarken Grafikkarten (GPUs) zu erzielen sind. Zudem werden Charakteristiken von Modellen mit strukturierten und unstrukturierten Rechnernetzen näher beleuchtet. Dank der Rechenleistung und der speziellen Architektur der GPUs stellen Modelle mit strukturierten Netzen wieder eine Alternative zu den derzeit verbreiteten Modellen mit unstrukturierten Netzen dar.

2. Herausforderungen bei der Überflutungsmodellierung

Grundgleichungen

Im Naturgefahrenbereich und der Überflutungsmodellierung werden typischerweise hydraulische 2D-Modelle verwendet, welche die Flachwassergleichungen (FWG) lösen. Nu-

merische 3D-Modelle sind für grösserskalige Anwendungen aufgrund hoher Rechenzeiten sowie fehlender Datengrundlagen, beispielsweise ganzer Gerinneverläufe, (noch) nicht praktikabel. Numerische 1D-Modelle sind andererseits nicht in der Lage, flächige Überflutungen und komplexere Fließwege hinreichend abzubilden. Daher sind 2D-Modelle für diese Anwendungsgebiete in den meisten Fällen vorzuziehen. Bei den 2D-Modellen wird der Modellperimeter mit einer Vielzahl an Zellen diskretisiert und für jede benetzte Rechenzelle werden die FWG pro Zeitschritt gelöst und die resultierenden Flüsse über die Zellkanten berechnet und bilanziert.

Die 2D-FWG ergeben sich aus der Tiefenmittlung der 3D-Navier-Stokes-Gleichungen und ermöglichen die akkurate Abbildung von Fließvorgängen in Gerinnen, wo die Wassertiefen im Vergleich zu den Wellenlängen der Strömung 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 einfaches «Flood-Routing». Für viele Anwendungsgebiete, insbesondere bei Überflutungsmodellierungen, die üblicherweise instationäre Wellenausbreitungen beinhalten, sind solche Vereinfachungen jedoch unzureichend und es ist wünschenswert die vollen 2D-FWG anzuwenden.

Abbildung des Geländes

Eine weitere Herausforderung für die Überflutungsmodellierung ist die präzise Abbildung des Geländes im numerischen Modell. Dies gilt vor allem für wichtige topografische Leitstrukturen, wie z.B. Böschungskanten, Mauern oder Dämme. Die Abbildung solcher Strukturen im Rechnernetz ist für eine genaue Beurteilung der Fließprozesse notwendig, erfordert aber zumeist sehr kleine Rechenzellen, häufig im Bereich von Dezimetern bis wenigen

Metern. Dies steht jedoch im Konflikt mit der Anforderung, kilometerlange Gewässerrläufe und ausgedehnte Ausuferungen zu modellieren. Dieser Unterschied in der Längenskala von vielen Grössenordnungen verhinderte in der Vergangenheit den effizienten Einsatz von 2D-Modellen auf strukturierten Netzen, da die Rechenzeiten nicht praktikabel waren bzw. die Anzahl an Rechenzellen zu gross wurde.

Numerische Aspekte

Aus numerischer Sicht sind flächige 2D-Überflutungsmodellierungen grundsätzlich eine anspruchsvolle Aufgabe. Bei der Überflutung verändern sich die Modellgrenzen dynamisch, d.h. es finden Übergänge von trockenen und benetzten Gebieten statt. Weiterhin benötigen viele Modelle, insbesondere in Gebieten mit hohem Gefälle, den robusten Umgang mit wechselnden Fließzuständen (Fließwechsel), mit Wellenausbreitungen und mit hohen Geschwindigkeiten sowie abrupten Gefällsänderungen. Auch die Abbildung von Retentionswirkungen sowie die vollständige Massenerhaltung des Wassers sind für die Bestimmung der Ausmasse von Ausuferungen und deren Intensitäten wichtig. In den letzten Jahrzehnten haben sich vor allem Finite-Volumen-Methoden mit sog. Upwind-Verfahren als geeignete numerische Verfahren etabliert. Diese besitzen u.a. die Eigenschaft Schockwellen, wie z.B. Dammbuchwellen, abbilden zu können («shock-capturing»). Daneben haben die Finite-Volumen-Methoden die Vorteile der Massenerhaltung der Abflüsse sowie der Robustheit in Hinblick auf numerisch schwierige Probleme. Im Gegenzug sind diese modernen und stabilen numerischen Verfahren jedoch rechnerisch anspruchsvoll und zeitintensiv.

Die Rechengeschwindigkeit der Modelle ist im Wesentlichen durch zwei Aspekte limitiert: Den Zeitschritt Δt sowie die Anzahl Zellen N , welche in jedem Zeitschritt berechnet werden

müssen. Die benötigte Zeit T ist dabei direkt proportional zur Anzahl benetzter Zellen und indirekt zum Zeitschritt:

$$T \sim N \cdot 1/\Delta t \quad (1)$$

Für instationäre Überflutungsmodellierungen mit den FWG werden zumeist explizite numerische Methoden angewandt. Diese besitzen den Nachteil, dass sie aus Stabilitätsgründen nur kleine Zeitschritte erlauben. Implizite Methoden ermöglichen dagegen theoretisch längere Zeitschritte, und somit weniger Berechnungsschritte, sind jedoch rechnerisch aufwändiger und i.A. weniger geeignet für stark instationäre Strömungsvorgänge und Überflutungen mit dynamischem Nass-/bzw. Trockenfallen von Rechenzellen (Beffa 1994). Weiter können explizite Rechenschemata einfacher und effizienter parallelisiert werden.

Der Zeitschritt hängt bei solchen expliziten Verfahren vom modellweiten Minimum des Quotienten aus dem Zellabstand d und der Geschwindigkeit v (= Fließgeschwindigkeit + Wellengeschwindigkeit) in jeder Zelle ab:

$$\Delta t = CFL \cdot d/v \quad (2)$$

Gleichung (2) wird auch das CFL-Kriterium (nach Courant, Friedrichs, Lewy, 1928) genannt und stellt die numerische Stabilität sicher. Es sorgt dafür, dass bei geeigneter Wahl der CFL-Konstante Information während eines Zeitschritts nicht weiter als bis zur nächsten Zelle wandern kann. Dieses Kriterium führt jedoch häufig dazu, dass die kleinsten Zellen im Modellgebiet für den Zeitschritt limitierend sind und somit zu unerwünscht kleinen Zeitschritten und entsprechend grossen Rechenzeiten gemäss Gleichung (1) führen.

3. Strukturierte und unstrukturierte Netze: Vor- und Nachteile

Viele derzeit in der Praxis eingesetzte hydraulische Modelle basieren auf unstrukturierten Rechennetzen, die zumeist aus Dreiecken aufgebaut sind. Dem gegenüber stehen die strukturierten Netze, bei denen das Modellgebiet mit regelmässigen Zellen, zumeist Quadrate oder Rechtecke, diskretisiert wird. Abbildung 2 stellt Ausschnitte aus einem strukturierten und unstrukturierten Rechennetz in perspektivischer Sicht gegenüber.

In Hinblick auf die in Abschnitt 2 beschriebenen Herausforderungen an die Überflutungsmodellierung bieten strukturierte und unstrukturierte Netze jeweils verschiedene Vor- und Nachteile. Die wichtigsten Merkmale sind in Tabelle 1 aufgeführt und nachfolgend näher erläutert.

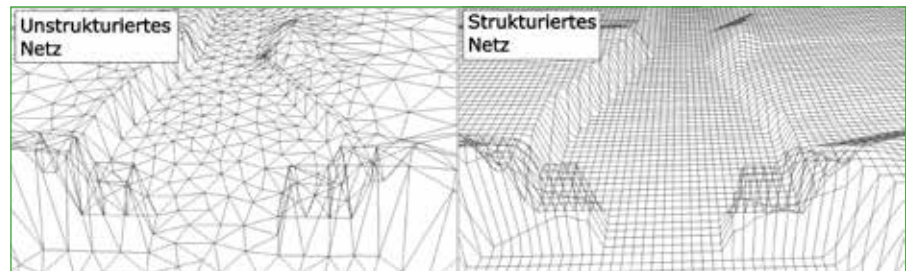


Abbildung 2: Unstrukturiertes (links) und strukturiertes (rechts) 2D-Rechennetz in perspektivischer Ansicht

Tabelle 1: Vergleich der Vor- und Nachteile bei strukturierten und unstrukturierten Netzen

	Unstrukturiert	Strukturiert
Lokale Verdichtungen	detaillierte und grobe Bereiche im gleichen Netz	ganzes Netz in gleicher Auflösung
Zeitschrittgrösse	limitiert durch kleinste räumliche Strukturen	limitiert durch kleinste räumliche Strukturen
Abbildung kleinster geometrischer Elemente	möglich dank flexiblem Netz	möglich mit hoher Auflösung
Aufwand Preprocessing	hoher Aufwand (glatte Netze nötig, Bereinigung Kleinstelemente)	geringer Aufwand (Rechennetz als Raster)
Aufwand Postprocessing	mittlerer Aufwand wegen komplexer Datenstruktur	geringer Aufwand dank Resultaten in Rasterformaten
Effizienz (Rechenaufwand pro Zelle)	eher gering wegen komplexer Datenstruktur	hoch wegen Einfachheit des Schemas
Parallelisierbarkeit	gut	sehr gut wegen Einfachheit des Schemas

- Lokale Verdichtungen: Unstrukturierte Netze ermöglichen es, Bereiche von grossem Interesse mit kleinen Zellen detaillierter abzubilden. Andere Bereiche, beispielsweise uninteressantes Umland und Überflutungsflächen mit geringerer Bedeutung, werden dagegen vereinfacht, mit grösseren Zellen abgebildet. Insgesamt kann sich dadurch die Gesamtzahl der berechneten Zellen und somit die Rechenzeit nach Gleichung (1) reduzieren. Bei strukturierten Netzen weist die Modellierungsdomäne überall die gleiche Auflösung auf. Es hängt vom Modell ab, ob die Differenzen der Zellzahlen zwischen strukturiertem/unstrukturiertem Netz gross sind. Nachteilig ist, dass für die Verdichtungen bereits vorgängig bekannt sein muss, welche Gebiete feiner/gröber aufgelöst werden sollen.
- Zeitschritt: Dieser korreliert weitgehend mit den kleinsten benetzten Zellen des Modells (Gleichung 2). Die Verwendung von unstrukturierten Netzen bringt in Bezug auf 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 abzubildenden Geländestruktur bestimmt. In der Praxis resultieren dennoch leicht höhere Auflösungen und kleinere Zeitschritte bei strukturierten Netzen (siehe nächster Punkt).
- Abbildung kleinster geometrischer Elemente: Mit unstrukturierten Netzen können leitende Strukturen, wie Böschungskanten oder Dämme, flexibel abgebildet werden, indem man die Zellkanten entlang dieser Bruchkanten ausrichtet. Die strukturierten Netze sind dagegen starr und benötigen ausreichend hohe räumliche Auflösungen für die genaue Abbildung der Leitstrukturen.
- Preprocessing: Die Erstellung hochwertiger, glatter Netze beim Preprocessing erfordert einen massgeblichen Anteil der gesamten Bearbeitungszeit bei der Überflutungsmodellierung mit unstrukturierten Netzen. Grundsätzlich hängt die Güte der Resultate stark von der Qualität des Netzes ab – die Dreieckszellen müssen dabei Qualitätskriterien einhalten, wie die Vermeidung von sehr spitzen Winkeln oder abrupten Grössenänderungen von Zellen in direkter Nachbarschaft. Insbesondere bilden sich bei spitzwinklig zusammenlaufenden Bruchkanten, unsauberen Knoten oder hoher Dichte der Messpunkte sehr kleine Dreiecke (Abbildung 3 rechts). Diese Datenmängel müssen zumeist händisch bereinigt werden. Bei der Erstellung strukturierter Netze fällt dieser Aufwand fast gänzlich weg.
- Postprocessing: Die Auswertung der Resultate beim Postprocessing ist bei Modellen mit unstrukturierten Netzen aufgrund der komplexen Datenstruktur aufwändiger (Abbildung 4). Resultate werden daher häufig in einem zusätzlichen Arbeitsschritt auf Raster interpoliert, was jedoch Zusatzaufwand erfordert und zu Genauigkeitsverlusten führt. Dieser zusätzliche Arbeitsschritt ist bei Modellen mit strukturierten Netzen nicht erforderlich. Hier liegen die Resultate bereits in strukturierter Form als einfach handhabbare Raster vor, deren Weiterverarbeitung komfortabel und verlustfrei möglich ist.
- Effizienz: Der Rechenaufwand und Speicherbedarf sind bei Modellen mit strukturierten Netzen pro Zelle grund-

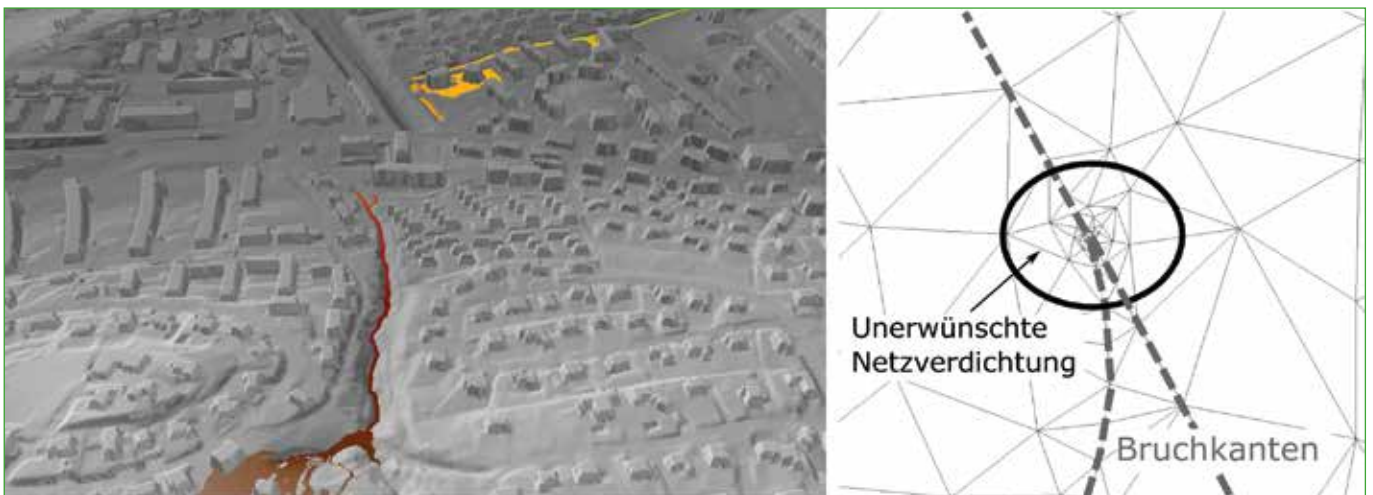


Abbildung 3: Links: Überflutungsbereich mit Infrastruktur und dichtem Netz aus Leitstrukturen. Rechts: unerwünschte Netzverdichtung mit winzigen Rechenzellen im Bereich zusammenlaufender Bruchkanten (grau gestrichelt)

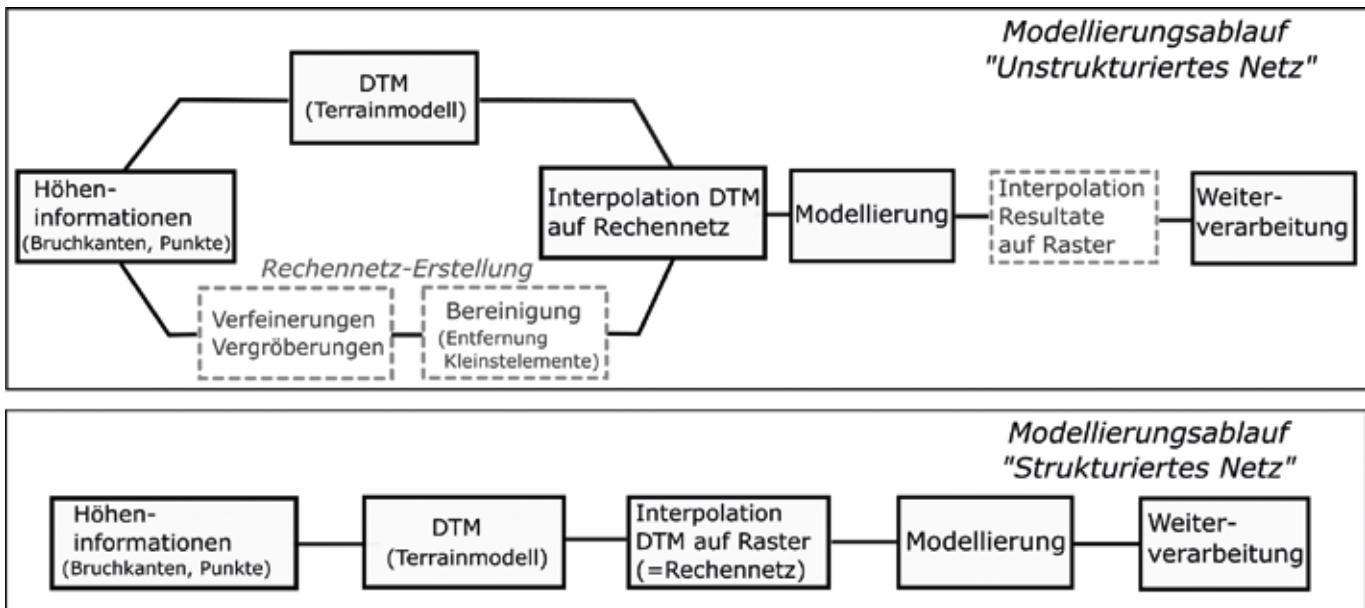


Abbildung 4: Modellierungsablauf mit unstrukturiertem Rechenetz (oben) und strukturiertem Rechenetz (unten). Die gestrichelten, zeitintensiven Arbeitsschritte entfallen beim Modellierungsablauf mit strukturiertem Netz.

sätzlich kleiner als bei Verfahren mit unstrukturierten Netzen.

- Parallelisierbarkeit: Explizite Modelle lassen sich grundsätzlich gut parallelisieren. Modelle basierend auf strukturierten Netzen allerdings noch deutlich einfacher als jene aus unstrukturierten (siehe Abschnitt 4).

4. Leistungssteigerung durch GPUs mit strukturierten Netzen

Leistungssteigerung durch GPUs

Erst die rasante Entwicklung der Rechenleistung von Prozessoren der letzten Jahrzehnte liess die numerische Berechnung von hydraulischen 2D-Modellen überhaupt zu. In der jüngeren Vergangenheit haben sich hierbei die Modelle mit strukturierten Netzen für die Überflutungsmodellierungen nicht durchsetzen können. Die verwendeten strukturierten Gitterzellen waren häufig zu gross, um schmale Gerinne oder andere kleinräumige topografische Strukturen hinreichend präzise abzubilden. Bei der Interpolation dieser Strukturen aus dem Geländemodell auf zu grosse Zellen gingen relevante Informationen verloren. Eine genauere

Abbildung mit höherer räumlicher Auflösung führte jedoch zu grösseren Zellzahlen und somit erhöhtem Bedarf an Arbeitsspeicher und Rechenleistung. Diese hohen Hardware-Anforderungen waren schwer zu bewältigen, weshalb vor allem auf unstrukturierten Netzen modelliert wurde.

Eine erhebliche Zunahme der Rechenleistung von Computern der letzten Jahre wurde durch

den Paradigmenwechsel zur Parallelisierung erreicht. Sowohl bei herkömmlichen Workstation-Prozessoren (CPUs) als auch bei GPUs wird ein Grossteil der gesamten Leistungssteigerungen pro Generation durch die Erhöhung der Anzahl Berechnungen erreicht, welche gleichzeitig (parallel) ablaufen können. GPUs stellen hier einen Extremfall dar, da sie eine Architektur verwenden, die für massiv parallele Prozesse optimiert ist. Abbildung 5 stellt

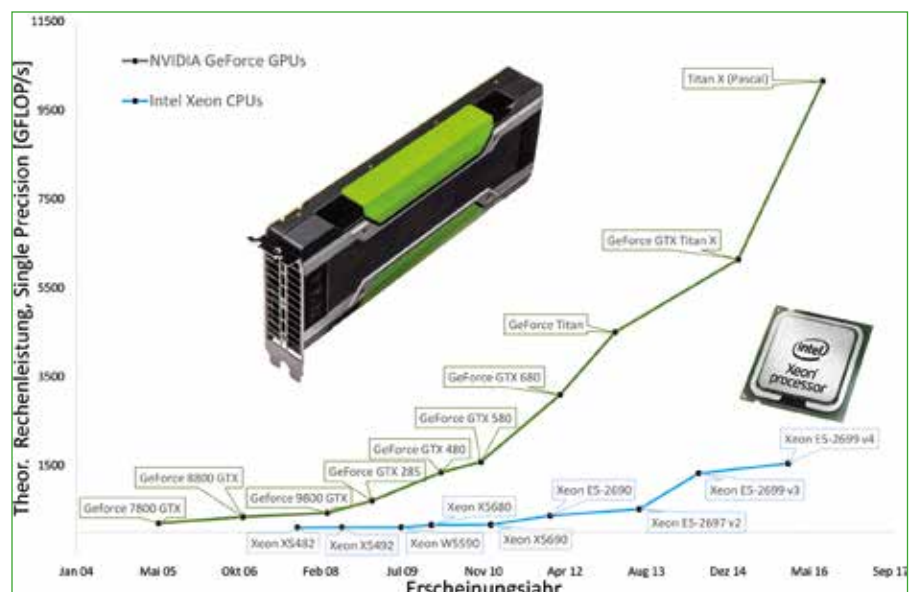


Abbildung 5: Entwicklung der Rechenleistung von Workstation CPUs (Intel Xeon, blau) und GPUs (NVIDIA, grün) in den letzten 11 Jahren

die Entwicklung der Rechenleistung von GPUs derjenigen von CPUs über die Zeit gegenüber. Die heute theoretisch erreichbare Rechenleistung einer einzelnen Grafikkarte liegt im Bereich von mehreren Tera-FLOPS (FLOPS = Floating-Point Operations per Second). Dies sind Werte, wie sie vor wenigen Jahren nur in grossen Rechenzentren erreichbar waren. Die Parallelschaltung mehrerer GPUs in einer Workstation bietet zudem die Möglichkeit, den Grad der Parallelität weiter zu steigern.

Diese hohe verfügbare Rechenleistung von GPUs, bei vergleichbar niedrigen Anschaffungskosten, macht sie für viele Anwendungen interessant. Die Lösung der FWG lässt sich grundsätzlich hochgradig parallelisieren, insbesondere für Verfahren mit strukturierten Netzen. Allerdings erfordert die spezielle Architektur der GPUs auch spezielle Software, welche deren Stärken nutzt. Viele Simulationsprogramme für die Überflutungsmodellierungen haben den Paradigmenwechsel von der sequentiellen zur parallelen Ausführung nicht vollzogen oder beschränken sich auf mehrkernige CPUs. Dies hat vor allem damit zu tun, dass bestehende Software oft nur schwer nachträglich parallelisiert werden kann und besonders die Umstellung auf die spezielle Architektur der GPU mit grossem Aufwand verbunden ist.

Parallelisierung von Modellen mit strukturierten Netzen

Ein entscheidender Vorteil der strukturierten Netze sind die Einfachheit der Berechnungsschemas und der Datenhaltung, welche zu geringerem Speicherbedarf, zu einer grösseren Anzahl an möglichen Zellen und einer effizienten Berechnung führen. Die Verknüpfung von Zellen mit ihren Nachbarzellen ist im strukturierten Netz fest vorgegeben und einfach. 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. Explizite numerische Verfahren für die FWG auf strukturierten Netzen können daher besonders effizient auf GPUs umgesetzt werden (Brodtkorb et al. 2012). Dies gilt insbesondere für solche Verfahren, die für die Parallelisierung optimiert sind, indem sie die Abhängigkeiten zwischen benachbarten Zellen möglichst geringhalten.

Dank der hohen räumlichen Auflösung und grossen Anzahl an Rechenzellen können Zellgrössen kleiner gewählt werden als die charakteristischen Längenmasse der abzubildenden topografischen Elemente. Somit bleiben Bruchkanten und Höheninformationen bei der Diskretisierung praktisch erhalten. Sehr feine Strukturen, deren Ausdehnung weiterhin unter der Zellgrösse liegen (z.B. schmale Mauerkronen), können mit speziellen Methoden im Gitter erzwungen werden. Dadurch wird das ehemals grösste Defizit der strukturierten Gitter weitgehend behoben und sequentielle Programme auf unstrukturierten Netzen lassen sich sowohl in Geschwindigkeit als auch Auflösung übertreffen.

5. Beispiel: flox-GPU

Die 2D-Modellierungs-Software *flox-GPU* (www.flox-GPU.ch) ist eine Eigenentwicklung der Ingenieure Bart AG, welche für den Einsatz auf GPUs entworfen wurde. Das numerische Verfahren basiert auf den Arbeiten von Kurganov und Petrova (2007), Brodtkorb et al. (2010, 2012) und Horvath et al. (2014). Die Software löst die vollen 2D-FWG mit einem zellzentrierten Finiten-Volumen Verfahren auf strukturierten Netzen, bestehend aus quadratischen Zellen. Weitere Charakteristiken des numerischen Lösungsverfahrens sind in Tabelle 2 aufgelistet. Die Software läuft auf handelsüblichen NVIDIA GPUs und zielt vor allem auf die Anwendungen im Bereich der Überflutungsmodellierungen. Sie beinhaltet auch Module für hydraulische Strukturen wie Durchlässe, die im Naturgefahrenmanagement von besonderer Bedeutung sind.

Für die Beurteilung und Veranschaulichung der Rechenleistung dieser GPU-optimierten Software wurde eine Vergleichssimulation eines numerischen Standard-Testfalls betrachtet. Simuliert wird die Ausbreitung einer zirkulären Dammbrechwelle, wobei sich eine Wassersäule in alle Raumrichtungen vom

Tabelle 2: Kenndaten 2D-Modellierungs-Software *flox-GPU*

Modell	2D-Flachwassergleichungen (Erhaltungsgrössen h, hu, hv)
Schema	Zentrales Upwind-Verfahren («shock-capturing») mit minmod Slope-Limiter
Genauigkeit	2. Ordnung in Raum und Zeit
Zeitintegration	Explizites Runge-Kutta Verfahren
Reibung	Semi-Implizite Reibung, Strickler-Koeffizient
Rechenetz	Strukturiertes Netz, quadratische Zellen
GPU	Single-Precision NVIDIA GPU

Zeitpunkt $t = 0.0$ s ausgehend bis $t = 10.0$ s ausbreitet (Abbildung 6). Verglichen wird die *flox-GPU* Modellierung mit dem 2D-Modul der Software BASEMENT der ETH Zürich (BASEMENT 2016), als Beispiel einer gängigen Modellierungs-Software auf unstrukturierten Netzen. Vergleichbare Resultate ergeben sich mit anderen Programmen.

Beide Modelle geben die Ausbreitung der zirkulären Dammbuchwelle richtig wieder. Kleinere Differenzen ergeben sich aus der etwas höheren numerischen Diffusion des unstrukturierten Netzes und den verschiedenen numerischen Verfahren mit unterschiedlicher Genauigkeit in Raum und Zeit. Das strukturierte Netz des *flox-GPU* Modells verwendet ungefähr die gleiche Anzahl an Zellen und in etwa einen halb so grossen durchschnittlichen Zeitschritt. Die gesamte Rechenzeit im Vergleich mit BASEMENT unterscheidet sich um Grössenordnungen (Tabelle 3). Nur das GPU-optimierte Modell erreicht eine Laufzeit kürzer als die Echtzeit.

Faire Vergleiche zwischen strukturierten und unstrukturierten Modellen sind grundsätzlich schwierig und ihr Ausgang hängt immer von der genauen Versuchsanordnung ab. Aus der Erfahrung im Praxiseinsatz mit *flox-GPU* lässt sich für die hier betrachteten Fragestellungen der Überflutungsmodellierungen festhalten, dass die GPU-Modellierung auf strukturier-

Tabelle 3: Kenndaten des zirkulären Dammbuchwelle modelliert mit *flox-GPU* und BASEMENT

	flox-GPU	BASEMENT	BASEMENT 4 cores
Anzahl Zellen [-]	498'436	498'912	
Zeitschrittgrösse [s]	0.002 - 0.004	0.003 - 0.008	
Anzahl Zeitschritte [-]	2885	1604	
Rechenzeit [s]	4.2	637	324
Echtzeit-Faktor (simulierte Zeitspanne / Simulationsdauer)	2.4	0.016	0.03
Hardware (Hardware nicht identisch - Resultate sind daher nur Anhaltspunkt)	NVIDIA GeForce GTX 1080	Intel i7-4770 (sequentiell)	Intel i7-4770 (parallel 4-cores)

tem Netz in typischen Fällen eine Geschwindigkeitssteigerung von mindestens einer Grössenordnung gegenüber CPU-Lösungen ermöglicht. Neben der Verkürzung der Laufzeit von Stunden auf Minuten oder hochauflösten Echtzeit-Modellen mit Zellgrössen im unteren Dezimeterbereich, zeigen sich die Vorteile der GPU-optimierten Modellierung auch in der Möglichkeit sehr grosse Netze (mehr als 10 Millionen benetzte Zellen) zu verwenden.

Fazit

Durch den Fortschritt in der Rechenleistung, vor allem aufgrund der Verfügbarkeit von leistungsstarken Grafikkarten, sind die bisherigen Defizite von hydraulischen 2D-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 erfasst. Damit, und durch die besonders effiziente Umsetzung auf Grafikkarten, stellt die

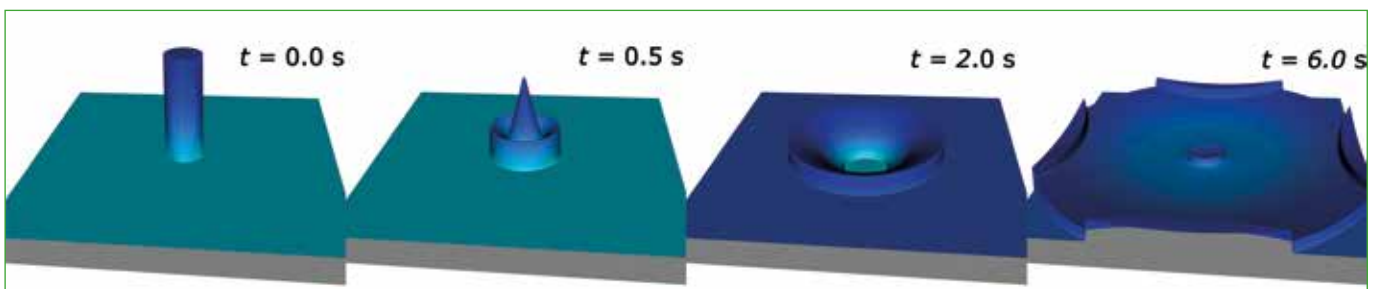


Abbildung 6: Momentaufnahmen der Ausbreitung einer zirkulären Dammbuchwelle modelliert mit *flox-GPU*

Verwendung von Modellen mit strukturierten Netzen bei Überflutungsmodellierungen 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 einfache und effiziente Pre- und Post-processing der Eingangsdaten und Resultate mit gängigen Rasterformaten. Wir sehen daher eine Renaissance der Verfahren mit strukturierten Netzen, die in der Vergangenheit für die Überflutungsmodellierung durch solche mit unstrukturierten Netzen abgelöst wurden. GPU beschleunigte Systeme, welche sich moderne numerischen Verfahren zur Lösung der vollständigen Flachwassergleichungen zu Nutze machen, haben das Potenzial, die Qualität und Bearbeitungstiefe im Naturgefahrenmanagement zu verbessern. Sie erfüllen sämtliche Voraussetzungen, um den Herausforderungen der Überflutungsmodellierung zu bestehen:

- genaue und stabile numerische Verfahren
- präzise Abbildung der topografischen Strukturen im Rechnernetz ist möglich
- Vergrößerung der Untersuchungsgebiete gegenüber herkömmlichen Verfahren
- kurze Rechenzeiten, welche für die Bearbeitung vieler Szenarien und Sensitivitätsanalysen nötig sind

Dies führt zu robusteren Beurteilungen und bereitet den Weg für weiterführende Wahrscheinlichkeits- und Risikobetrachtungen.

Neben den neuen Möglichkeiten, welche die Nutzung von leistungsstarken Grafikkarten mit sich bringt, kommen jedoch auch neue Probleme und Herausforderungen auf den Modellierer zu. Ein effektiver Gewinn in Form von detaillierteren hydraulischen Ergebnissen durch die hohen Netzauflösungen erfordert entsprechend hochaufgelöste Geländemodelle als Eingangsdaten. Die Berücksichtigung einer Vielzahl an Szenarien und der Umgang mit den grossen Datenmengen benötigt zudem vermehrt automatisierte Verarbeitungen.

Literatur

BASEMENT – Basic Simulation Environment for Computation of Environmental Flow and Natural Hazard Simulation. Version 2.6. © ETH Zurich, VAW, Vetsch D., Siviglia A., Ehrbar D., Facchini M., Gerber M., Kammerer S., Peter S., Vanzo D., Vonwiler L., Volz C., Farshi D., Mueller R., Rousselot P., Veprek R., Faeh R., 2006-2016.

Beffa, C. 1994. Praktische Lösung der tiefen-gemittelten Flachwassergleichungen, Mitteilung 133, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH, Zürich.

Brodtkorb A.R., Hage, T.R., Lie, K., 2010. Simulation and visualization of the Saint-Venant system using GPUs, *Computing and Visualization in Science* (2010), 13, pp. 341-353.

Brodtkorb A.R., Sætra M.L., Altinakar M., 2012. Efficient shallow water simulations on GPUs: Implementation, visualization, verification and validation, *Computers & Fluids*, 55, pp. 1-12.

Courant R., Friedrichs K., Lewy H., 1928. Über die partiellen Differenzgleichungen der mathematischen Physik, *Mathematische Annalen*, 100(1), pp. 32-74.

Hausmann P., Kurz C., Rebuffon G., 2012. Überschwemmungen in der Schweiz – ein unterschätztes Risiko, *Swiss Re*.

Horvath Z., Waser J., Perdigo R.A.P., Konev A., Blöschl G., 2014. A two-dimensional numerical scheme of dry/wet fronts for the Saint-Venant system of shallow water equations. *International Journal for numerical Methods in Fluids*, 00, pp. 1-26.

Kurganov A., Petrova G., 2007. A second-order well-balanced positivity preserving central-upwind scheme for the Saint-Venant system, *Communications in Mathematical Sciences*, 5(1), pp. 133-160.



Buchhinweis

Die Natur kennt keine Katastrophen

ISBN: 978-3-906016-62-7

Herausgeber: Gianni Paravicini und Claudio Wiesmann,
Projektleiter Naturgefahren, Kanton Luzern

Das Buch «Die Natur kennt keine Katastrophen» beinhaltet Beiträge von 22 Autorinnen und Autoren, welche sich dem Thema Naturgefahren aus unterschiedlichen Perspektiven widmen – sei dies aus philosophischer, politischer, künstlerischer oder naturwissenschaftlicher Sicht.

