

---

# Kopplung von GIS und Hydraulik am Beispiel der Dornbirnerach

Michaela JUD, Florian SCHWERTFIRM, Ulrich SCHÄFFLER, Christoph RAPP,  
Dennis BIERHANCE, Özgür ERTAC und Matthäus SCHILCHER

## Zusammenfassung

Im Rahmen eines gemeinsamen Forschungsprojektes zwischen dem Fachgebiet Geoinformationssysteme und dem Fachgebiet Hydromechanik der Technischen Universität München wurde eine Schnittstelle zwischen einem Flachwasser-Gleichungslöser auf OpenFOAM-Basis und ArcGIS entwickelt. OpenFOAM steht für Open Source Field Operation and Manipulation und ist eine C++ Bibliothek, welche ein numerisches Simulationssoftwarepaket für kontinuumsmechanische Probleme beinhaltet. Das Hauptaugenmerk des Einsatzes von OpenFOAM in diesem Projekt liegt auf dem Lösen von Strömungsproblemen.

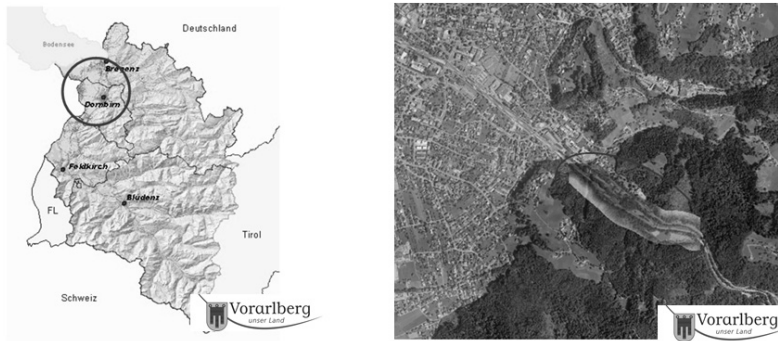
Der Kopplungsansatz wurde anhand eines realen Beispiels in der Testregion Dornbirnerach in Vorarlberg verifiziert. Dies wurde durch eine Kooperation des Fachgebietes für Geoinformationssysteme mit der Vorarlberger Wasserwirtschaft und dem Vorarlberger Landesvermessungsamt ermöglicht.

## Zielsetzung und Motivation

Numerische hydrodynamische Modelle bilden die Grundlage für die Ausweisung von Hochwassergefahrenzonen, die gemäß der Hochwasserrisikomanagement-Richtlinie erfasst werden müssen. Die Kopplung von Geographischen Informationssystemen (GIS) und solchen hydrodynamischen Modellen bildet die Grundlage zur effizienten Vorhersage des Abflussgeschehens in einem natürlichen Gerinne sowie damit auch zum durchgängigen Geodatenmanagement für die Hochwassergefahrenzonen ausweisung (SCHÄFFLER et al. 2011). Ein besonderes Augenmerk gilt den Starkregenereignissen, welche im alpinen Gelände eine besondere Herausforderung darstellen. Vor allem die Vorhersagen des Abflussverhaltens kleiner Gebirgsbäche mit sehr steil ansteigender Ganglinie sind problematisch, da das Zeitintervall zwischen Beginn des Anstiegs und dem Peak sehr klein ist. Die besondere Anforderung des Kooperationspartners in Vorarlberg an die Simulationsergebnisse ist die Zeit: Die Simulation muss schneller sein als das Ansteigen der Ganglinie, um eine Vorhersage treffen zu können und bei Gefahr Maßnahmen ergreifen zu können.

## Testregion Dornbirnerach

Für die konkrete Durchführung der Kopplung und Simulation wurde als Testregion ein Bereich des Einzugsgebiets der Dornbirnerach in Vorarlberg, Österreich gewählt. Das Geländemodell wurde aus Laserscandaten mit einer Genauigkeit von einem Meter horizontaler Auflösung erstellt. Das Untersuchungsgebiet besteht aus ca. 25.000 Zellen und befindet sich im Stadtgebiet von Dornbirn.



**Abb. 1:** Lage des Testgebietes (Quelle: Land Vorarlberg)

Die Dornbirnerach ist der drittgrößte Fluss im Bundesland Vorarlberg (Österreich) hinter der Ill und der Bregenzerach. Sie entspringt am Fuß des Hohen Freschen und mündet in den Bodensee. Ihr Einzugsgebiet beträgt 218 km<sup>2</sup> und ist 60 km lang. Ihre größte Breite beträgt 30 m. Der mittlere jährliche Abfluss beträgt 6,9 m<sup>3</sup>/s bei einer Fließgeschwindigkeit von 0,5 – 6 m/s. Bei einem hundertjährigen Abfluss führt der Fluss 300 m<sup>3</sup>/s.

Die Dornbirnerach weist alle Charakteristika eines Flusses im alpinen Einzugsgebiet auf mit Starkregenfällen, steilen Hängen im Oberlauf und flacher Ebene im Mündungsgebiet [JUD 2009].

## 1 Theoretische Grundlagen

### 1.1 Hydrodynamisches Modell shallowFOAM

Im Rahmen des Projektes werden die Flachwassergleichungen zur Untersuchung des Abflussverhaltens eines Flusses betrachtet. Die zweidimensionalen Flachwassergleichungen stellen einen Sonderfall der Navier-Stokes-Gleichungen dar. Unter den, für Fließgewässer im allgemeinen Fall gültigen, Bedingungen eines vernachlässigbaren Impulstransportes in vertikaler Richtung, was in die hydrostatischen Druckverteilung übergeht, können die Navier-Stokes-Gleichungen tiefengemittelt werden. Unter Einsetzen von kinematischen Bedingungen für die Wasseroberfläche und die Sohlage erhält man dadurch die zweidimensionalen Flachwassergleichungen, für die am Fachgebiet Hydromechanik ein Löser auf OpenFOAM-Basis (shallowFOAM) entwickelt wurde.

Mit OpenFOAM können diese Differenzialgleichungen über Finite Volumen (FV) diskretisiert und auf unstrukturierten Gittern gelöst werden (Finite Volumen-Gitter). Als kleinste Einheit gilt die Zelle, die durch ihre begrenzenden Flächen definiert ist; die Variablen sind in ihrem Mittelpunkt abgespeichert. Eine Zelle wird definiert durch die Flächen, die sie begrenzen. Die Flächen wiederum sind Polygone. Somit spricht man von Polyederzellen. Die Lösung der Flachwassergleichungen geschieht dementsprechend auf einem dreidimensionalen Gitter mit nur einer Zelle in vertikaler Richtung, die die Einheitshöhe von eins besitzt. Die Informationen über die Sohlage und Bodenbeschaffenheit (Reibungsbeiwerte) müssen daher als Skalarfelder für dieses Gitter vorliegen.

## 1.2 Geografisches Informationssystem – Software ESRI ArcGIS

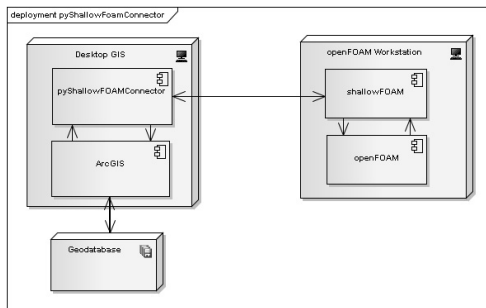
In dieser Arbeit wurde als Geoinformationssystem die Software ArcGIS 10 der Firma ESRI verwendet, da die zur Verfügung gestellten Tools für viele Standardgeoprozessierungen vorliegen und leicht verwendet werden können. ArcGIS ist eine aufeinander abgestimmte Produktfamilie, innerhalb derer zwischen Clientenanwendungen, Desktop-GIS-Programmen und Server-Diensten unterschieden wird. In ArcMap, dem zentralen Visualisierungs- und Bearbeitungsmodul von ArcGIS Desktop, können Daten bearbeitet und modifiziert werden. Dies geschieht mithilfe der ArcToolbox, einer Sammlung von Geoverarbeitungsprogrammen (ESRI 2011).

## 2 Kopplung von ArcGIS mit OpenFOAM – shallowFOAM

### 2.1 Netzgenerierung

Für die Lösung der Flachwassergleichungen sind Gitter, welche auf einer Dreiecksgrundfläche basieren, hinreichend gut geeignet. Da das digitale Geländemodell als Triangular Irregular Network (TIN) in ArcGIS auch in Dreiecken dargestellt ist, ist es sinnvoll, dieses Modell für das CFD-Netz zu übernehmen. Die Grundflächen aller Zellen sind Dreiecke, welche über ihre Begrenzungslinien und Begrenzungspunkte mit den jeweiligen Lagekoordinaten  $X$  und  $Y$  dargestellt werden. Die  $Z$ -Koordinate der Grundfläche wird auf null gesetzt. Die Deckfläche des Gitters wird über eine Parallelverschiebung mit dem Verschiebevektor  $(0,0,1)$  aus der Grundfläche erzeugt. Die senkrechten Begrenzungsflächen erhält man aufgrund der Verbindung zwischen der Dreiecksgrundfläche ( $Z$ -Koordinate = 0) und der Deckfläche ( $Z$ -Koordinate = 1). Die für die CFD-Berechnung benötigten Sohllagen und Reibungsbeiwerte des Geländes entsprechen den Höheninformationen bzw. den Landnutzungsinformationen des digitalen Geländemodells und werden in ein Skalarfeld für das Volumengitter übertragen.

### 2.2 Kopplungskonzept



**Abb. 2:**  
UML-Deployment-Diagramm zur Darstellung des Systemkonzepts der Kopplung (SCHÄFFLER et al. 2011, S. 5)

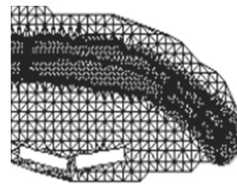
Die bilaterale Kopplung zwischen einem externen Simulationsmodell mit GIS vereint die Vorteile von GIS-Datenstruktur und effizientem Gleichungslöser. Hierfür ist die direkte Konvertierung von In- und Outputdaten des Modells in GIS-Datenformate notwendig (SCHÄFFLER 2009). Abbildung 2 verdeutlicht anhand eines UML Deployment-Diagramms,

dass im Rahmen des Projekts eine lose Kopplung über die In- und Outputdaten von OpenFOAM zwischen ArcGIS und OpenFOAM vorgenommen wurde.

Ausgangspunkt für die Kopplung ist ein Digitales Geländemodell – DGM (siehe Abbildung 3), welches in ArcGIS als Terrain Datensatz dargestellt wird und hinsichtlich Bruchkanten und Zellauflösung über Standardtools aus der ArcGIS Toolbox aufbereitet werden kann. Das Simulationsnetz wird aus dem DGM generiert und kann in Abhängigkeit vom Gebiet (in Flussnähe oder weiter entfernt) und in Abhängigkeit des Gefälles des Geländes verschieden grob bzw. fein strukturiert werden. Durch die variable Gestaltung der Netzdichte wird gewährleistet, dass keine wesentlichen Informationen verloren gehen, dass aber dass die Simulation recheneffizient durchgeführt werden kann. Datensätze wie das Gewässernetz, Querprofile und Bauwerke dienen ebenso der genauen Abbildung der Oberfläche. In der Netzgenerierung werden weiterhin Gebäudedaten berücksichtigt, welche aus der Katastergrundkarte der Stadt Dornbirn entstammen. Landnutzungsdaten zur Bereitstellung von Rauheitsbeiwerten werden aus der Landnutzungskartierung des Landes Vorarlbergs abgeleitet. Dabei ist eine variable Wertzuweisung der Rauheitsbeiwerte für die Landnutzungsart „Ackerfläche“ nach Monaten möglich. Dies ist deshalb von Bedeutung, da Ackerflächen je nach Reifestadiums des angebauten Getreides unterschiedliche Rauheitsbeiwerte aufweisen können. Da *shallowFOAM* ebenfalls mit Polyederzellen auf Dreiecksbasis arbeiten kann, wird das Terrain in ein TIN-Geländemodell überführt und für die Berechnung in *shallowFOAM* konvertiert. Hierfür muss es zunächst in die einzelnen Stützpunkte umgewandelt werden.



**Abb. 3:** Digitales Geländemodell des Testgebietes (Quelle: Land Vorarlberg)



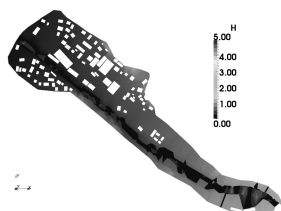
**Abb. 4:** Teilauszug des Simulationsnetzes des Testgebietes

Dabei werden zunächst Dreieckspolygonfeatures aus dem TIN erstellt. Diese dienen zur Überprüfung der Topologie des Berechnungsnetzes. Vor allem die topologische Überprüfung des aus einem DGM automatisch generierten Berechnungsnetzes ist wichtig. Diese Überprüfung gewährleistet, dass bei einer Veränderung einzelner Zellen im Polygonfeaturerelayer die Topologie, die in einem TIN zunächst automatisch gewährleistet wird, auch weiterhin zwischen den einzelnen Polygonfeatures erhalten bleibt. Nach dieser topologischen Überprüfung und dem Splitting der Polygone in die Stützpunkte kann der Punktfeaturerelayer über *GISToOpenFOAM* in das Berechnungsnetz im openFOAM-Format überführt werden (siehe Abbildung 4). Randbedingungen wie Zufluss- und Ausflussrandbedingungen können selbstständig und flexibel vom jeweiligen Nutzer gesetzt werden. Ist dies geschehen, kann eine Simulation gestartet werden und die Berechnungsergebnisse wie Fließgeschwindigkeit, Fließrichtung, Sohlschubspannung und vor allem die Fließtiefe über *OpenFOAMtoGIS* zurück nach ArcGIS übertragen werden

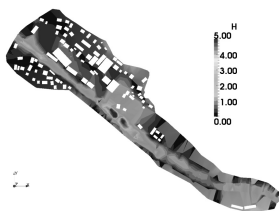
## 3 Ergebnisse

### 3.1 Exemplarische Simulation

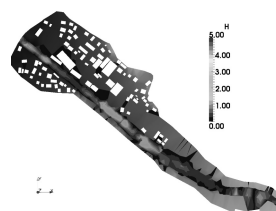
Als Eingangsdatensatz für die Netzgenerierung wurde das DGM des Testgebietes der Dornbirnerach zusammen mit den Gebäudegrundrissen und den Flussprofilen herangezogen. Zwei Bereiche der äußeren Umrandung wurden als logische Einström- und Ausströmfläche sowie die Gebäudeseiten und die restliche äußere Umrandung als weitere logische Randbedingungsflächen gesetzt. Für die Einströmrandbedingung liegt die Messung des zeitlich variablen Durchflusses eines realen Ereignisses aus dem August 2010 zugrunde. Die Pegelmessstelle entspricht dabei dem Ort der Eintrittsrandbedingung. Für die Ausströmrandbedingung wurde eine Abflusswasserstandsbeziehung gesetzt. Aufgrund des Einreichertermins kann in diesem Paper noch nicht das feinmaschige Netz, wie eingangs beschrieben, präsentiert werden, sondern nur Simulationen auf einem sehr groben Gitter mit uniformen Stricklerbeiwert  $k_{st}=30$  und mit ca. 4.000 Zellen. In den Abbildungen 5-7 ist die Entwicklung des Ereignisses bei  $t = 1$  h,  $t = 2$  h,  $t = 4$  h und  $t = 7$  h grafisch dargestellt. Die Dynamik des Hochwassers mit einem schnellen Anstieg auf  $Q = 217 \text{ m}^3/\text{s}$  nach 2 h und einem allmählichen Abklingen auf  $21 \text{ m}^3/\text{s}$  nach 7 h und die damit verbundene Hysterese des Wasserstandes ist bereits in dieser vorläufigen Simulation auf grobem Gitter deutlich zu erkennen.



**Abb. 5:**  
Simulationsergebnis des Hochwasserereignisses August 2010;  $t = 1$  h,  
 $Q(\text{Inflow}) = 4.35 \text{ m}^3/\text{s}$



**Abb. 6:**  
Simulationsergebnis des Hochwasserereignisses August 2010;  $t = 2$  h,  
 $Q(\text{Inflow}) = 217.55 \text{ m}^3/\text{s}$



**Abb. 7:**  
Simulationsergebnis des Hochwasserereignisses August 2010;  $t = 7$  h,  
 $Q(\text{Inflow}) = 21.41 \text{ m}^3/\text{s}$

### 3.2 Performance

Die OpenFOAM Bibliotheken stellen eine komplette MPI-Parallelisierung bereit, die vom Löser shallowFOAM genutzt werden (FOAMCFD 2008). Über einen Preprocessing Schritt kann das durch die ArcGIS-Schnittstelle bereitgestellte Gitter für eine beliebige Anzahl an Prozessoren aufgeteilt werden. Durch die Parallelisierung eignet sich der Löser ShallowFOAM sehr gut für den Einsatz auf High-Performance-Computing (HPC) Clustern. Der Parallelisierungsgrad ist dabei durch das Verhältnis zwischen Kommunikationsaufwand und Problemgröße (und damit Rechenaufwand) pro Prozess limitiert. Für das hier gezeigte Testbeispiel waren bei acht Prozessoren auf einer 4-fach Dual-Core AMD Opteron(tm) 8216 Workstation mit 2.4 GHz 0.20125 s Rechenzeit für eine Sekunde physikalische Zeit nötig (KREUZINGER & SCHWERTFIRM 2010). Die in Kapitel 3.1 beschriebene Simulation benötigte auf 8 Prozessoren auf einem 4-fach Dual-Core AMD Opteron(tm) 8216 Workstation mit

2.4 GHz für eine Stunde physikalische Zeit ca. 6 min Rechenzeit. Das bedeutet, dass die Anforderung, eine Rechenzeit von einer Stunde zu unterschreiten eindeutig eingehalten werden konnte. Allerdings handelt es sich hierbei lediglich um ein vorläufiges Ergebnis, da für die endgültige Simulation ein feinmaschigeres Netz verwendet wird.

## 4 Zusammenfassung und Ausblick

Die in diesem Beitrag vorgestellten Ergebnisse des kollaborativen Projekts zwischen dem Fachgebiet für Geoinformationssysteme und dem Fachgebiet für Hydromechanik haben gezeigt, dass eine Kopplung von ArcGIS mit shallowFOAM möglich ist und Ergebnisse gemäß den gestellten Anforderungen erzielt werden können. Der auf OpenFOAM basierende Flachwasser-Gleichungslöser ist für die effiziente und parallelisierte Berechnung komplexer und großer Überschwemmungsgebiete optimiert. Das bedeutet im konkreten Fall, dass eine Vorhersage eines Hochwasserereignisses in Echtzeit möglich ist. Bisher ist noch keine Kopplung von CFD-Software mit GIS bekannt, die eine Hochwassersimulation ermöglicht, das Forschungs- und Entwicklungspotenzial dieser Thematik ist somit besonders groß. Durch die Kooperation mit Vorarlberg konnte die Kopplung anhand eines realen Beispiels und gemäß den gestellten Anforderungen durchexerziert werden. „Die Vorhersage von Hochwasserereignissen von kleinen Gebirgsbächen stellt eine große Herausforderung der heutigen Zeit dar. Dank des Kopplungsansatz zwischen GIS und Hydraulik und weiterführender Forschungstätigkeit, können wir der Herausforderung Herr werden“, so Klaus Koch, Leiter der Abteilung für Informationswirtschaft und Hydrographie der Vorarlberger Wasserwirtschaft.

## Danksagung

Ein besonderer Dank geht an das Vorarlberger Landesvermessungsamt, besonders an Herrn Seebacher und Herrn Kanonier, für die Unterstützung und Bereitstellung der Basisdaten und an das Vorarlberger Wasserwirtschaftsamt, insbesondere an Herrn Klaus Koch, ebenso für die Unterstützung und die Bereitstellung der Ereignisdaten und fachspezifischen Daten.

## Literatur

- ESRI (2011): ArcGIS Desktop Help. <http://www.arcgis.com> (Stand 11.04.2011).
- FOAMCFD (2008): Open Foam Projects and Collaboration. Online im Internet. <http://www.foamcfd.org/resources/theses.html> (Stand 17.04.2011).
- JUD, M. (2009): Hydrologisches Modell Dornbirnerach: Grundlagen und Konzeption einer prototypischen Implementierung mit GIS. Bachelorarbeit.
- KREUZINGER, J. & SCHWERTFIRM, F. (2010): Skriptum zu „Numerical River Hydraulics“. Unveröffentlichtes Vorlesungsskript.
- SCHÄFFLER, U. (2009): Serviceorientierte Kopplung eines hydrodynamischen Modells mit GIS zur Ausweisung von Hochwassergefährdungsbereichen. Diplomarbeit.
- SCHÄFFLER, U., JUD, M., BIERHANCE, D., SCHILCHER, M., SCHWERTFIRM, F. & RAPP, C. (2011): GIS-gestütztes Preprocessing zur Generierung der Inputdaten für ein hydrodynamisches Modell. DWA-Tagung „GIS & GDI in der Wasserwirtschaft, Januar 2011.