

# HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

---

Conference Paper, Published Version

**Ruf, W.; Perona, P.; Molnar, P.; Burlando, P.**

## **Kopplung eines hydrodynamischen Strömungsmodells und eines Grundwassermodells**

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/20.500.11970/103825>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Ruf, W.; Perona, P.; Molnar, P.; Burlando, P. (2006): Kopplung eines hydrodynamischen Strömungsmodells und eines Grundwassermodells. In: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik (Hg.): Strömungssimulation im Wasserbau (Flow Simulation in Hydraulic Engineering). Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen 32. Dresden: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik. S. 261-276.

### **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.



## **Kopplung eines hydrodynamischen Strömungsmodells und eines Grundwassermodells**

Wolfgang Ruf,

Paolo Perona, Peter Molnar, Paolo Burlando

### Summary:

Numerical models are at present widely used for the simulation of water flow in rivers and aquifers. In most cases, interaction takes place between the two subsystems. This requires a coupling of the two models in order to include feedback mechanisms. Here, the 2D hydrodynamic flow model 2dMb for the river system, developed at ETH Zurich, and the 2D groundwater model MODFLOW-2000 are coupled. The 2D approach for the surface water is adopted to account for the morphological structure of braided river systems. In floodplains of alpine river systems steep slopes, a wide range of occurring streamflow rates and drying and wetting areas are special constraints for the capability of the river flow model. The proposed coupling strategy consists of the comparison of the heads both in the surface and ground water in a distributed way and in the calculation of the mass exchange fluxes between the two subsystems in each simulation time step. These variables are then treated as new boundary conditions for the two models for the following time step. This modeling system provides a space-time variable description of hydrological and hydraulic variables of ecological relevance.

key words: model coupling, groundwater – river interaction, 2dMb, MODFLOW

### Kurzfassung:

Numerische Modelle für die Strömungsberechnung in Flüssen und Aquiferen sind heutzutage in großem Maße im Einsatz. Oft besteht ein intensiver Austausch zwischen Fluß und Grundwasser mit Rückkopplungseffekten, was eine modelltechnische Kopplung dieser beiden Modelle erforderlich macht. Ein morphologisch weitgehend natürliches verzweigtes Flußsystem in einem alpinen Tal macht eine 2D-Strömungsmodellierung für das Oberflächengewässer notwendig, wobei hier das an der ETH Zürich entwickelte Modell 2dMb zur Anwendung kommt. Mit MODFLOW-2000 werden die Grundwasserströme modelliert. Ausgehend von den Piezometerhöhen in Fluß und Grundwasser werden für jeden Simulationszeitschritt die Austauschraten in jeder einzelnen Zelle berechnet und als Randbedingung für den nächsten Zeitschritt in beide Modelle eingegeben. Die Modellergebnisse erlauben eine Beurteilung über die zeitliche und räumliche Variabilität von hydrologischen und hydraulischen Größen, wie sie für ökologische Fragestellungen von Bedeutung sind.

Stichworte: Modellkopplung, Infiltration, Exfiltration, 2dMb, MODFLOW

## 1 Einleitung

Viele alpine Täler weisen durch die glaziale Überprägung mächtige Grundwasserkörper auf, die wegen ihrer hohen Durchlässigkeit und oft geringer Kolmation des Flußbettes in eine ausgeprägte und schnelle Interaktion mit dem Flußsystem treten. Außerdem ist ihre Hydrologie oft sehr stark durch die Wasserkraftnutzung beeinflusst. Restwassermengenbewirtschaftung, verändertes In- und Exfiltrationsverhalten, Auenschutz und Flußrevitalisierungsmaßnahmen sind vielfältige sich daraus ergebende wasserwirtschaftliche und flußbauliche Fragestellungen, für welche numerische Modelle zum Einsatz kommen.

In unserem Untersuchungsgebiet, dem Maggiatal (Tessin, Schweiz), trifft eine ausgeprägte Wasserkraftnutzung auf ein morphologisch noch relativ unbeeinflusstes Auenschutzgebiet mit einem verzweigten Flußsystem, wobei die Stromerzeugung und der Naturschutz in einem gewissen Konkurrenzverhältnis stehen. In diesem Zusammenhang stehen zweierlei Fragestellungen im Vordergrund: 1. Verständnis des Austauschverhaltens von Grund- und Flußwasser (Infiltration und Exfiltration) in Abhängigkeit von Raum und Zeit; 2. Langfristige Auswirkung des durch Wasserkraftnutzung beeinflussten hydrologischen Regimes auf die Vegetationsentwicklung in der Auelandschaft und damit die Schaffung der Grundlagen für eine ökologisch und wirtschaftlich optimale Restwassermengenbewirtschaftung.

Aus diesem Grund wurde ein gekoppeltes System aus einem zweidimensionalen hydraulischen Strömungsmodell für das Flußsystem und das entsprechende Überflutungsgebiet – im folgenden kurz auch als Flußmodell bezeichnet - und einem zweidimensionalen Grundwassermodell entwickelt. Die einzelnen Modelle mußten den speziellen dort vorkommenden topographischen und hydrologischen Anforderungen genügen, welche vor allem sind: Große Abflußbereiche zwischen unter  $1 \text{ m}^3/\text{s}$  und etwa  $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ , Fließgefälle zwischen 0.5 und 2 %, schnell reagierendes Einzugsgebiet, schneller und ausgeprägter Austausch zwischen Fluß und Grundwasser, verzweigtes Flußsystem mit räumlich und zeitlich stark variierenden Querschnitten. Vor allem an das Flußmodell wurden aus numerischer Sicht erhöhte Ansprüche gestellt. Die Modellkopplung ist erforderlich, um Rückkopplungseffekte in dem durch die räumlich und zeitlich variierende Interaktion Fluß-Grundwasser stark beeinflussten Gebiet berücksichtigen zu können. Insgesamt soll hierbei ein Werkzeug geschaffen werden, das aber nicht nur im Maggiatal die anstehenden Fragen beantworten kann, sondern das auch übertragbar auf andere Gebiete ist, in denen ebenfalls die Interaktion Fluß-Grundwasser und deren Auswirkungen auf die aquatischen Ökosysteme eine dominierende Rolle spielen.

In der Literatur finden sich einige Ansätze zur Interaktion Fluß-Grundwasser, von denen hier nur einige beispielhaft erwähnt werden sollen. Analytische Ansätze (z. B. *Anderson*, 2003) bleiben auf Spezialfälle beschränkt und lassen sich nicht auf ein großes Gebiet mit komplexer Struktur anwenden. Konzeptionelle hydrologische Einzugsgebietsmodelle (z. B. WaSi-ETH; *Schulla*, 1997) haben teilweise einen Grundwasserteil integriert, der auch im Austausch mit dem Oberflächenwasser steht, sind aber in der Behandlung der Grundwasserdynamik oder der Beschreibung des Wellenablaufs vereinfachend und in ihrer Anwendung auf weniger stark dynamische Systeme limitiert. Physikalisch basierte hydrologische Modelle wie MIKE-SHE (*Abbott et al.*, 1986) oder wie beispielsweise bei *Pandey et Huyakorn* (2004) beschrieben berücksichtigen auf jeder Gitterzelle nahezu alle hydrologischen und hydraulischen Prozesse, haben aber den Nachteil, daß sie sehr viele Eingangsdaten benötigen, die in größeren Gebieten i. a. nicht zur Verfügung stehen. Als Beispiel für Kopplungen von Grundwassermodellen mit hydraulischen Strömungsmodellen für das Flußsystem sei MODBRANCH (*Swain et Wexler*, 1996) genannt, nämlich eine Kopplung von MODFLOW mit dem 1D-instationären Flußmodell BRANCH (*Schaffranek et al.*, 1981). Weitere Beispiele in diese Richtung sind zwei mittlerweile direkt in MODFLOW implementierte Ergänzungen, nämlich das River Package (vgl. *Harbaugh et al.*, 2000), welches nur stationäre Strömungen zuläßt, und das Streamflow Routing Package (*Prudic et al.*, 2004), welches nur eindimensionale Strömungssimulationen ermöglicht. Die Notwendigkeit der detaillierten instationären 2D-Strömungsmodellierung für Oberflächengewässer unter erschwerten Bedingungen machten eine eigene Modellkopplung erforderlich, um die gestellten Fragen beantworten zu können.

## 2 Untersuchungsgebiet

*Hydrologie:* Im Einzugsgebiet des Maggiatals wird wegen der Wasserkraftnutzung etwa 75 % des jährlichen Abflusses aus dem Einzugsgebiet abgeleitet, so daß im unteren Haupttal (Länge ca. 22 km, Breite ca. 500 m, sehr steile Talflanken) der Abfluß substantiell reduziert ist. Dies führte in der Vergangenheit zu einer deutlichen Grundwasserabsenkung im Haupttal. Große Hochwässer sind weitgehend unbeeinflusst, die größten Veränderungen im hydrologischen Regime sind eine deutliche Abnahme der Variationen im Mittelwasser- und kleineren Hochwasserbereich. Heute besteht dadurch die meiste Zeit des Jahres ein konstanter Restwassermengenabfluß in Bignasco (am oberen Rand des Haupttales) von  $1.8 \text{ m}^3/\text{s}$  im Sommer und  $1.2 \text{ m}^3/\text{s}$  im Winter, welcher durch einzelne Hochwasserspitzen unterbrochen wird. Die größte dort beobachtete Hochwasserspitze wurde 1978 auf etwa  $1000 \text{ m}^3/\text{s}$  rekonstruiert. Im longitudina-

len Verlauf nimmt der Abfluß durch Infiltration in den Grundwasserkörper deutlich ab (in langanhaltenden Trockenwetterperioden im Winterhalbjahr in Riveo bis auf ca.  $0.7 \text{ m}^3/\text{s}$ ) und steigt in Avegno am unteren Talende wieder auf  $3.1 \text{ m}^3/\text{s}$  an (eigene Feldmessungen). Die Differenz in der Wasserbilanz ist durch seitliche Hangzuflüsse und Seitenbäche im Haupttal zu erklären.

*Aquifer:* Die Durchlässigkeit der Gewässersohle und des Aquifers ist sehr hoch. Es konnte auch an keiner Stelle ein Hinweis auf eine Kolmatierung der Sohle gefunden werden. Die Mächtigkeit des Aquifers beträgt etwa 150 m. Die Reaktion der Grundwasserstände auf veränderte Flußwasserstände oder Hangzuflüsse ist sehr stark und schnell. Die Grundwasserneubildung durch Niederschlag kann hingegen praktisch vernachlässigt werden.

*Flußmorphologie:* Morphologisch handelt es sich um ein auf weite Strecken wenig oder nicht anthropogen beeinflusstes Flußbett mit einer Auenlandschaft von nationaler Bedeutung (vgl. Abbildung 1). Die Gewässersohle ist mobil, so daß es bei größeren Hochwässern immer wieder zu Umlagerungen der Flußarme kommt, wie es klar aus Luftbildern seit 1933 zum Ausdruck kommt (Bayard et Schweingruber, 1991). Es handelt sich um grobe Schotter mit einem mittleren Korngrößendurchmesser in der Größenordnung von 10 cm (Ergebnisse aus Linienproben), wobei talabwärts eine Tendenz zu feineren Schottern zu beobachten ist (Sturzenegger, 2005).



**Abbildung 1:** Luftaufnahme (26.7.1999) über das Gebiet mit verzweigtem Flußsystem im Maggiatal (Quelle: Cantone Ticino, Sez. Bonifiche e Catasto, Bellinzona).

Je nach Abflußverhältnissen ist ein Übergang von einzelnen Flußarmen über verzweigte Flußarme bis hin zu zusammenhängenden Überflutungsflächen in der Aue zu verzeichnen. Aus Luftbildern konnte auch eine Verteilung der

Vegetationsbedeckung erstellt werden, was für eine räumlich in Klassen differenzierte Parametrisierung der Rauigkeitsparameter verwendet wurde.

### **3 Modellstruktur**

#### **3.1 Anforderungen**

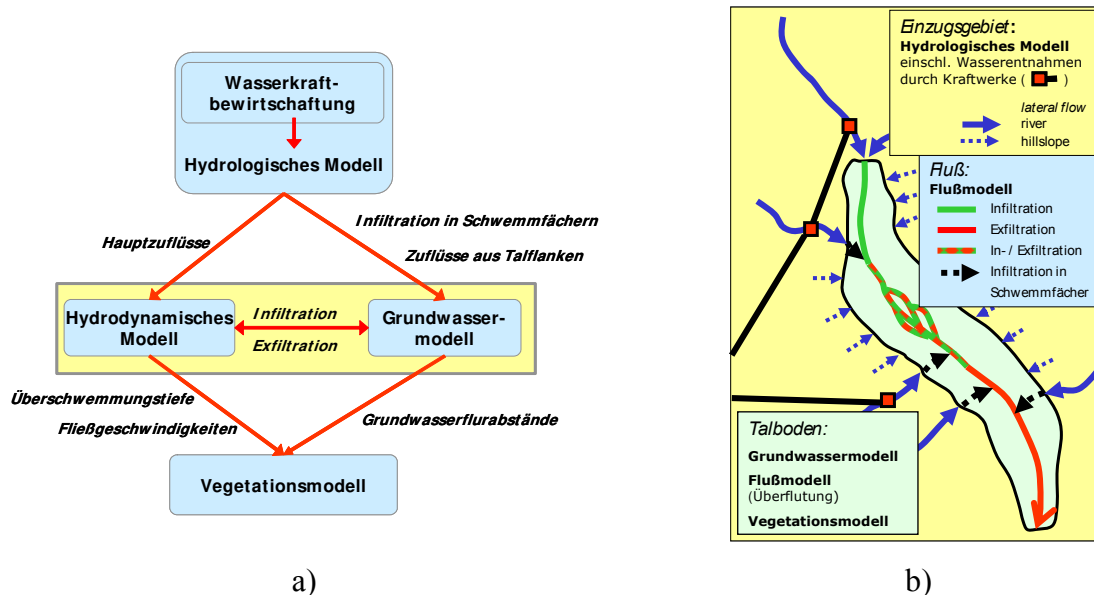
Räumlich verteilte und zeitlich variable Muster der Infiltration und Exfiltration sind nicht nur wichtig für die Beschaffung von verschiedenen aquatischen Habitaten oder zur Beurteilung von möglichen Stoffeintrags- und Verschmutzungsquellen im Oberflächen- oder Grundwasser, sondern stellen auch die Randbedingung für die Modellierung sowohl für den Wellenablauf im Fluß als auch im Grundwasser dar. Wegen der zeitlichen und räumlichen Variabilität der Austauschraten können diese nicht als unabhängige Randbedingungen behandelt, sondern nur durch eine gemeinsame Betrachtung der beiden Systeme Fluß und Grundwasser bestimmt werden. Nur so können die existierenden Rückkopplungseffekte und –mechanismen berücksichtigt werden. Dieser Punkt ist entscheidend dafür, daß eine modelltechnische Kopplung des Fluß- und des Grundwassermodells vonnöten ist.

Die räumliche und zeitliche Skale, die betrachtet werden soll, ergibt sich aus der Problemstellung und den physikalischen Prozessen. Das eigentlich interessierende Gebiet umfaßt die Gewässerabschnitte mit verzweigtem Flußsystem und der damit verbundenen Aueschutzgebiete, wegen der Systemabgrenzung ist aber die Modellierung des gesamten Haupttales nötig. Die Verteilung der Vegetationsmuster legte eine räumliche Diskretisierung auf 25 m nahe, was auch für die Diskretisierung der Zellen des Grundwassermodells geeignet ist. Die räumliche Diskretisierung für das Flußmodell wird durch die räumliche Ausdehnung der benetzten Fläche bei den extremen Niedrigwasserabflüssen bestimmt. Diese führte, zusammen mit den damit verbundenen numerischen Anforderungen, zur Wahl der Auflösung von 6.25 m. Die Interpretation der Resultate geschieht aber auf der räumlichen Skale der Fragestellung, welche sich auf die Ausdehnung der verschiedenen Pflanzengesellschaften bezieht.

#### **3.2 Modellkomplex**

Für die Modellierung des Wasserhaushalts wurde ein Modellsystem entwickelt (Abbildung 2), das im Wesentlichen aus drei Komponenten (Modellen) besteht: 1. hydrologisches Einzugsgebietsmodell, 2. Flussmodell, 3. Grundwassermodell. Geplant für die Zukunft ist vorgeschaltet der Einbezug der Steuerung des Kraftwerksbetriebs und nachgeschaltet ein Modell, welches die Vegetations-

entwicklung in Abhängigkeit des zeitlich und räumlich variablen Wasserhaushalts simuliert.



**Abbildung 2:** Modellkomplex

- a) Schematische Darstellung des Modellkomplexes und der Verbindung der einzelnen Modelle untereinander (links)  
 b) Räumliche Verknüpfung und Anordnung der einzelnen Modelle im Modellkomplex (rechts)

Wasserentnahmen und Umleitungen sind im hydrologischen Einzugsgebietsmodell bereits berücksichtigt. Die Ergebnisse bilden unabhängige Randbedingungen (d. h. Rückkopplungseffekte sind nicht vorhanden und müssen daher auch nicht berücksichtigt werden) sowohl für das Fluß- als auch für das Grundwassermodell. Die Schnittstelle für das Flußmodell sind die oberirdischen Zuflüsse, sowohl am oberen Rand in Bignasco, also auch die seitlichen Zuflüsse aus den Seitentälern (wobei hier nur bei sehr großen Abflüssen der Hauptfluß erreicht wird, andernfalls gelangt das Wasser in den Schwemmfächern direkt in den Grundwasserkörper). Die räumlich kontinuierlichen Hangzuflüsse von den Talflanken (Oberflächenabfluß und unterirdische Zuflüsse) werden ebenfalls vom hydrologischen Modell geliefert und gelangen an der Schnittstelle zum Talboden (gleichzeitig Grenze des Grundwassermodells) gesamthaft in den Aquifer und stellen eine Randbedingung für das Grundwassermodell dar.

Der Kern der hier vorgestellten Modellierung bezieht sich auf den Talboden des Haupttales. Hier kommt oberflächlich das hydrodynamische Flußmodell, unterirdisch das Grundwassermodell zur Anwendung. Durch die Schnittstelle der Infiltration und Exfiltration stehen diese miteinander in Verbindung. Der Austausch von Wasser ist hierbei nicht linienhaft begrenzt, sondern geschieht flächenhaft auf allen Zellen, welche im Flußmodell benetzt sind oder wo der Grundwasserspiegel die Geländeoberfläche erreicht. Somit sind diese Flächen

im Verlauf der Simulation zeitlich variabel. Der Wasserfluß kann je nach den Piezometerhöhen im Grundwasser und im Fluß nach oben oder nach unten erfolgen.

### 3.3 Hydrologisches Einzugsgebietsmodell

Für die Modellierung der Zuflüsse zum Haupttal und der diffusen Zuflüsse von den Talflanken kommt das kontinuierliche Niederschlag-Abfluß-Modell TOPKAPI (*Ciarapica et Todini, 2002*) zur Anwendung. Es basiert auf einem Raster von 100 m auf 100 m und berücksichtigt alle hydrologisch relevanten Prozesse, die im Einzugsgebiet auftreten. Wesentliche Eingangsdaten sind ein digitales Terrainmodell, Boden- und Landnutzungskarten sowie hydroklimatologische Daten, die aus Bodenstationen gewonnen werden. Die Berechnungen erfolgen mit stündlicher Auflösung.

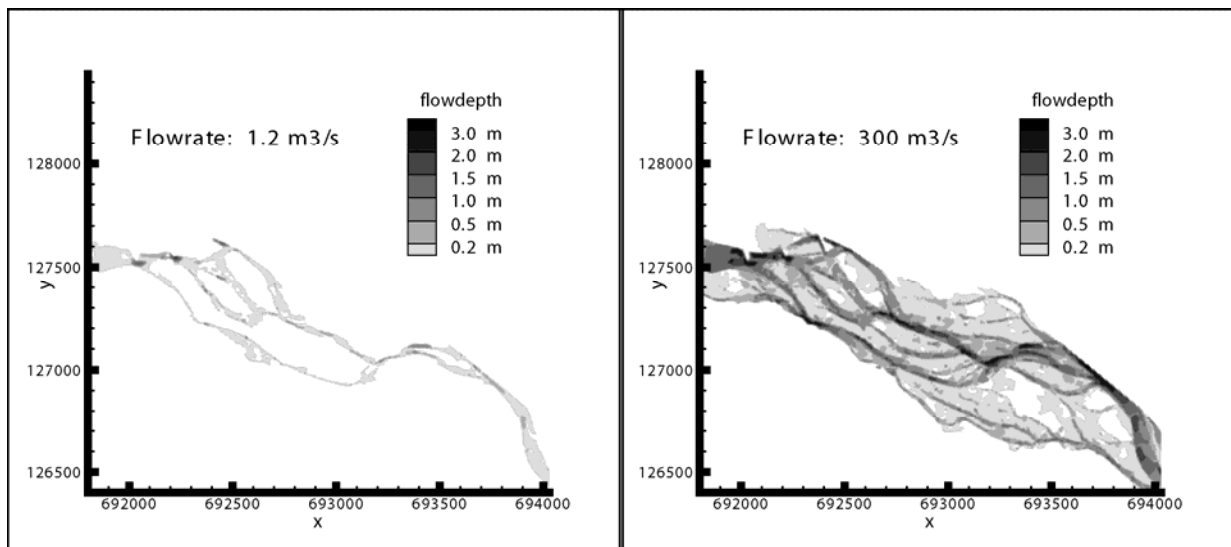
### 3.4 Flußmodell

Die oberflächlichen Abflüsse im Haupttal werden mit dem zweidimensionalen an der ETH Zürich entwickelten hydrodynamischen Strömungsmodell 2dMb (*Faeh, 1996*) berechnet. Das Modellgebiet bezieht sich damit auf den gesamten Talboden des Haupttales und ist damit mit demjenigen des Grundwassermodells identisch. Das Modell läuft instationär, kann aber bei gleichbleibenden Randbedingungen auch quasi-stationär betrieben werden. Es löst die tiefen-gemittelten Flachwassergleichungen, wobei im Reibungsterm verschiedene Fließgesetze gewählt werden können. Es wird ein strukturiertes Gitter verwendet. Trockenfallen und Wiederbenetzen von Zellen ist durch die spezielle Behandlung von inneren Rändern möglich, ebenso das Einfügen von Quellen- und Senkentermen in jeder einzelnen Zelle. Als numerisches Schema werden Finite Volumen in expliziter Form verwendet. Zusammen mit der kleinen Gitterweite führt dies, um dem CFL-Kriterium gerecht zu werden, zu extrem kleinen Zeitschritten von bis zu unter einer Sekunde, obwohl vom physikalischen Prozeß her Zeitschritte von etwa 10 min ausreichend wären. Das Modell hat sich als unter den schwierigen hydraulischen Verhältnissen mit hohen Froude-Zahlen und häufigen Fließwechseln als robust, aber sehr rechenintensiv erwiesen. Abbildung 3 zeigt Simulationsergebnisse der Abflusstiefen und Überflutungsbereiche im Gebiet mit verzweigtem Flußsystem für unterschiedliche Abflüsse. Dem Modell liegt ein detailliertes digitales Terrainmodell zugrunde.

Das Simulationsergebnis wird im Wesentlichen von der Topographie, also hier vom DTM, bestimmt. Räumlich differenzierte Rauigkeitswerte der Sohle können als Kalibrierparameter verwendet werden. Sie subsumieren neben der Sohlreibung auch weitere Energiedissipationen, die im Modell nicht explizit



berücksichtigt werden. Unter Niedrigwasserbedingungen wurden Wasserspiegellagen und Ausdehnung des Wasserspiegels im Fluss vermessen, um sie mit den simulierten Werten vergleichen zu können. Die Kalibrierung erfolgte Flussabschnittsweise. Die betrachteten Rauigkeitswerte liegen in der Größenordnung der im Feld durch Linienproben gemessenen. Einzelne Abschnitte zeigen grössere Abweichungen auf, die aber vermutlich auf Instabilitäten der Sohle zurückzuführen sind. Das Modell 2dMb kann für unsere Zwecke als geeignet gelten.



**Abbildung 3** Abfließtiefen und überflutete Bereiche im Gebiet mit verzweigtem Flußsystem für die Abflüsse  $1.2$  und  $300 \text{ m}^3/\text{s}$  als Ergebnis von Simulationsrechnungen.

### 3.5 Grundwassermodell

MODFLOW-2000 (Harbaugh et al., 2000; Hill et al., 2000), welches weltweit unter verschiedensten Bedingungen angewendet wird und als Open-Source-Code vorliegt, wurde für die Grundwassermodellierung verwendet. Es erlaubt die Etablierung von verschiedenem Layers mit der Tiefe, wobei momentan 2 Layers verwendet werden. Räumlich wurden aufgrund von Bohrprofilen und geoelektrischen Messungen 5 Zonen ausgeschieden, innerhalb derer jeweils dieselbe hydraulische Leitfähigkeit zugewiesen wurde. Es wird auch hier ein strukturiertes Gitter verwendet, welches eine Gitterweite von 25 m aufweist, das sowohl den physikalischen Prozessen als auch den numerischen Anforderungen genügt. Es wird ein implizites Finite-Differenzen-Schema verwendet, welches Simulationszeitschritte von einer Stunde und mehr erlaubt.

Die Kalibrierung und Validierung der hydraulischen Parameter erfolgte im stationären Fall unter langanhaltenden Trocken- bzw.- Feuchteperioden getrennt unter Zuhilfenahme von im MODFLOW-2000 integrierten River Package and Streamflow Routing Package und brachte zufriedenstellende Ergebnisse (Foglia

et al., 2004). Somit konnte die grundsätzliche Eignung des Modells für die gegebenen Verhältnisse gezeigt werden.

## **4 Kopplung von Oberflächen- und Grundwassermodell**

### **4.1 Gitter und Zeitschritte**

Sowohl das Fluß- als auch das Grundwassermodell decken dasselbe Gebiet ab. Unterschiedlich sind aber die räumliche Auflösung und Ausrichtung der Gitter sowie die erforderlichen Simulationszeitschritte von etwa 1 Sekunde für das Flußmodell und 1 Stunde für das Grundwassermodell. Die Austauschraten sollen räumlich verteilt berechnet werden, was eine Überlagerung der beiden Gitter erforderlich macht. Für diesen Zweck wurde folgendes Vorgehen gewählt: Einmalig wird eine Transformationsmatrix berechnet, in welcher für jede Zelle (ID-Nummer) des (groben) Grundwassergitters die Zellennummern (ID-Nummer) der entsprechenden Zellen aus dem Oberflächengitter zugewiesen werden. Das Zuordnungskriterium besteht darin, ob die Zellenmitte der Oberflächenzellen innerhalb der Grundwasserzellen zu liegen kommt oder nicht. Aus dieser Matrix läßt sich eine weitere Matrix erstellen, in welcher zu jeder Oberflächenzelle eindeutig die entsprechende Grundwasserzelle zugeordnet wird. Diese beiden Matrizen bleiben über die gesamte Simulation hinweg konstant, da sie nur von der Geometrie der Zellen abhängig sind.

Im Laufe der Berechnungen werden diejenigen Oberflächenzellen bestimmt, die gerade benetzt sind. Dann werden die Wasserstandshöhen all derjenigen Zellen gemittelt, die derselben Grundwasserzelle zugeordnet sind; außerdem wird die Anzahl der benetzten Zellen je Grundwasserzelle bestimmt. Aus dem Vergleich dieser Wasserstandshöhe und dem Grundwasserspiegel sowie dem benetzten Flächenanteil, der sich aus der Anzahl der Zellen ergibt, wird die Austauschrate bestimmt (Gleichungen 1 und 2).

Für die Zeitschritte ergibt sich folgendes: Da MODFLOW-2000 mit wesentlich größeren Zeitschritten als 2dMb rechnen kann, ist es aus Gründen der Rechenzeiten sinnvoll, in dem gekoppelten System die unterschiedlichen Zeitschritte beizubehalten. Jeweils nach jedem Zeitschritt des Grundwassermodells werden die Austauschraten bestimmt und als neue Randbedingung räumlich verteilt an beide Modelle weitergegeben und für die nächste Zeitperiode verwendet.

## 4.2 Gleichung für Austauschraten

Die Austauschraten zwischen Fluß und Grundwasser werden nach jedem Zeitschritt des Grundwassermodells zellenweise räumlich verteilt berechnet. Hierbei kommt folgende Formel zur Anwendung, wie sie u. a. auch im River Package von MODFLOW-2000 verwendet wird:

$$q_{\text{ex}} = \begin{cases} C_{\text{Fluss}} (h_{\text{Fluss}} - h_{\text{GW}}); & \text{für } h_{\text{GW}} > z_{\text{Sohle}} \text{ [Fluss und Grundwasser verbunden]} \\ C_{\text{Fluss}} (h_{\text{Fluss}} - z_{\text{Sohle}}); & \text{für } h_{\text{GW}} \leq z_{\text{Sohle}} \text{ [Fluss und Grundwasser nicht verbunden]} \end{cases} \quad (1)$$

$$\text{mit } C_{\text{Fluss}} = \frac{K \cdot A}{M} \quad (2)$$

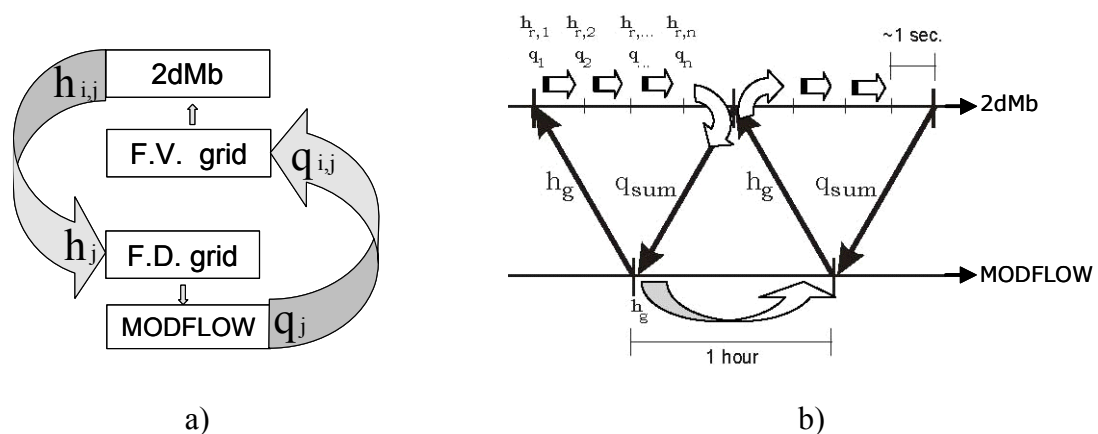
und  $q_{\text{ex}}$ : Austauschrate (positiv bei Infiltration, d. h. Fluß→Aquifer; negativ bei Exfiltration, d. h. Aquifer→Fluß),  $C_{\text{Fluss}}$ : „streambed conductance“;  $h$ : Druckhöhe; GW: Grundwasser;  $z_{\text{Sohle}}$ : geodätische Höhe der Flußsohle;  $K$ : hydraulische Leitfähigkeit des Sohlenmaterials;  $A$ : benetzte Fläche innerhalb der Gitterzelle;  $M$ : Mächtigkeit der Flußsohle.

## 4.3 Kopplungsstrategie

Aufgrund des großen Rechenaufwands für die Simulationen als auch für die Erkenntnisgewinnung für die zugrunde liegenden Prozesse wurde ein schrittweises Vorgehen zur Kopplung vom Fluß- und Grundwassermodell gewählt: 1. iterative Kopplung der separaten Modelle, 2. kontinuierliche Kopplung von instationärem Fluß- und stationärem Grundwassermodell, 3. kontinuierliche Kopplung von instationärem Fluß- und instationärem Grundwassermodell. Für den ersten Schritt liegen die Resultate bereits vor, der zweite ist bereits implementiert und befindet sich derzeit in der Testphase und der dritte wird in Kürze realisiert werden.

Die Schritte 1. und 2. liefern bereits interessante Ergebnisse über die räumliche Verteilung und Muster der Infiltration und Exfiltration. Während lang anhaltender gleichbleibender Bedingungen für den Abfluß in Trockenperioden spiegeln diese Ergebnisse auch die Realität gut wider. Die Ergebnisse aus Schritt 2. müssen für einen gegebenen Abflußwert mit denen aus Schritt 1. identisch sein, man erhält jedoch bei sich ändernden Abflußbedingungen eine Abfolge von stationären Lösungen. Der 2. Schritt wurde dazwischengeschaltet, um durch den Vergleich mit den Resultaten aus Schritt 1. eine Verifikation für die Richtigkeit und Tauglichkeit des neu entwickelten kontinuierlichen Modells zu erhalten. Schritt 3. wird die komplette Lösung im instationären Fall ergeben und die tatsächliche Simulation von Hochwasserganglinien oder einer Serie davon ermöglichen.

Im ersten Schritt werden die Modelle für stationäre Bedingungen separat gerechnet. Hierbei wird iterativ vorgegangen (vgl. Abbildung 4 a): Zunächst wird für beide Modelle der Gleichgewichtszustand berechnet. Dann werden die Wasserstände in Fluß und Grundwasser zellenweise miteinander verglichen und die Austauschraten bestimmt. Diese gehen als neuer Quellen- und Senkenterm ins Flußmodell ein und erlauben so eine neue Berechnung der Wasseroberfläche im Fluß. Diese wird neu wieder mit den Piezometerhöhen im Grundwasser verglichen, dann werden wiederum die Austauschraten bestimmt und so fort. Es hat sich gezeigt, daß nach etwa 3 Iterationen ein Endzustand erreicht war. Abbildung 5 zeigt ein Beispiel für die räumliche Verteilung der Infiltration und Exfiltration unter stationären Bedingungen.



**Abbildung 4:** Schematische Darstellung, wie die hydrologischen Informationen zwischen dem Fluß- und dem Grundwassermodell ausgetauscht werden

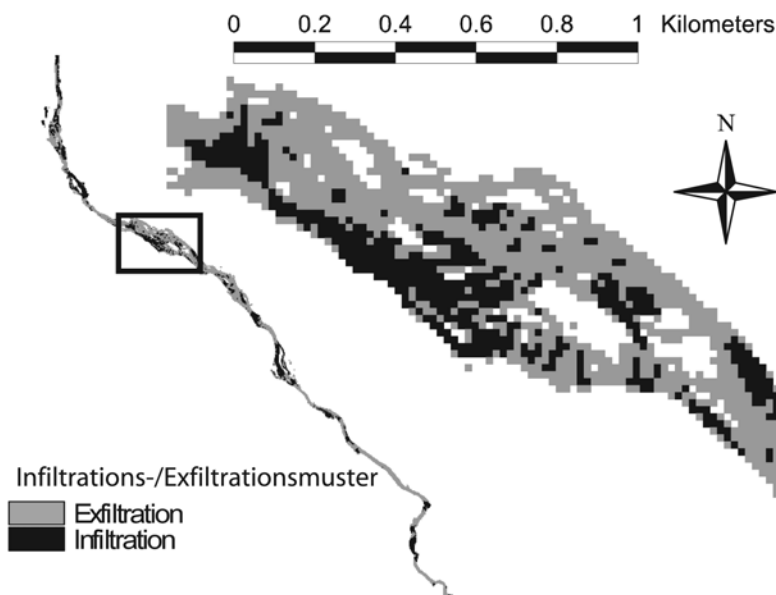
- a) im Fall der iterativen Kopplung  
b) im Fall der kontinuierlichen Kopplung.

$h_g$  = Grundwasserspiegel zum aktuellen Zeitschritt von MODFLOW;  
 $h_{r,i}$  = Wasserspiegellage im Fluß zum aktuellen Zeitschritt  $i$  von 2dMb;  
 $q_i$  = zu jedem 2dMb-Zeitschritt in 2dMb berechnete Austauschrate;  
 $q_{sum}$  = Summe der Austauschraten über ein MODFLOW Zeitintervall.

Schritt 2. und 3. beinhalten die kontinuierliche Kopplung von 2dMb und MODFLOW-2000. Das Vorgehen ist identisch bis auf den kleinen Unterschied, daß bei Schritt 3. MODFLOW im instationären Modus anstatt im stationären Modus läuft, was modelltechnisch aber praktisch keine Unterschiede macht. Es wird hier im Folgenden bei der Beschreibung der Implementierung der kontinuierlichen Kopplung (siehe Schema in Abbildung 4b) keine weitere Unterscheidung mehr zwischen Schritt 2. und 3. gemacht.

Hier geschieht der Austausch der Variablen auf andere Weise als bei der oben beschriebenen iterativen Kopplung, welche das River Package in MODFLOW-2000 verwendet. Dies erfolgt aus numerischen Überlegungen, da sich die

Wasserstände im Fluß und die daraus resultierenden Austauschraten i. a. schneller ändern als die Grundwasserstände. Zu jedem Zeitpunkt des Austausches von Information zwischen den Modellen wird der Grundwasserspiegel in jeder Zelle (berechnet in MODFLOW-2000) dem 2dMb übergeben. Dann wird 2dMb aufgerufen und rechnet in Zeitschritten von etwa 1 Sekunde so lange, bis  $\Delta t = 1$  Stunde ist, was dem Zeitschritt von MODFLOW-2000 und damit auch dem nächsten Übergabezeitpunkt entspricht. In dieser Zeit werden die Grundwasserspiegellagen als konstant angenommen, was auch dem natürlichen Verhalten entspricht, daß sich die Verhältnisse im Grundwasser wesentlich langsamer verändern als im Fließgewässer. Zu jedem Zeitschritt von 2dMb werden dann die Austauschraten zellenweise berechnet. Sie werden dann so lange aufsummiert, bis der Übergabezeitpunkt erreicht ist. Die aufsummierten Austauschraten je Zelle werden dann als Randbedingung an MODFLOW-2000 übertragen. Da es sich in beiden Modellen um dieselben Raten, aber nur mit entgegengesetztem Vorzeichen handelt, ist die Massenerhaltung gewährleistet. Dann wird MODFLOW-2000 mit den neuen Austauschraten als Randbedingung aufgerufen und über einen Zeitschritt von 1 Stunde laufen gelassen. Anschließend werden wieder die Grundwasserspiegelhöhen evaluiert und das ganze Vorgehen wiederholt sich von neuem.



**Abbildung 5:**

Räumliche Verteilung der Austauschraten bei einem Abfluß von  $300 \text{ m}^3/\text{s}$  für das gesamte Haupttal und einem Ausschnitt mit dem am weitesten verzweigten Flußsystem (Der Maßstab betrifft den Ausschnitt)

## 5 Diskussion

In Schritt 1. konnte bereits mit der iterativen Kopplung unter stationären Bedingungen (langanhaltende Trockenwetter- und Feuchteperiode) gezeigt werden, dass die Verhältnisse sowohl im Grundwasser wie auch im Fluß wegen der

Rückkopplungsmechanismen nur durch die Modellkopplung zufriedenstellend simuliert werden können. Für die Austauschraten ergibt sich ein großräumiges Muster zwischen Infiltration und Exfiltration, in welches kleinräumige Muster eingebettet sind. Das großräumige Muster deckt sich mit unseren Feldbeobachtungen. Die Abflüsse im Längsprofil, aber auch die Grundwasserspiegellagen zeigen im prinzipiellen Verlauf eine Übereinstimmung mit den gemessenen Werten, gewisse Abweichungen haben vermutlich ihren Ursprung in der Kalibrierung der Sohldurchlässigkeiten. Die kleinräumigen Muster, wie sie hier beobachtet werden können, sind aufgrund eines ungleichmäßigen Neigungsverlaufs der Geländeoberfläche und eines unterschiedlichen Unterströmungswinkels des Grundwassers unter dem Fluß hindurch zu erwarten, bedürfen aber noch einer detaillierteren Untersuchung.

Im Schritt 2. konnte das grundsätzliche Funktionieren des gekoppelten Modells für das Anlaufen einer Hochwasserwelle gezeigt werden. Allerdings sind die Plausibilitätsuntersuchungen noch im Gang. Es wird zu zeigen sein, dass sich unter stationären Randbedingungen dieselben Ergebnisse einstellen wie bei der iterativen Kopplung. Die Implementation im Schritt 3. wird eine völlig instationäre Simulation des Gesamtsystems ermöglichen.

## **6 Schlußbemerkungen**

Mit dem gekoppeltem Modellsystem aus hydrologischem Einzugsgebietsmodell (TOPKAPI), dem hydrodynamischen Strömungsmodell für Fließgewässer (2dMb) und dem Grundwassermodell (MODFLOW-2000) steht ein wertvolles Werkzeug zur Verfügung, um Systeme mit einer hohen und dominanten Interaktion Fluß-Grundwasser (wie dies insbesondere in schmalen Tälern mit hohen Durchlässigkeiten im Untergrund der Fall ist) zu simulieren. Erste Ergebnisse unter stationären Bedingungen sind hierbei vielversprechend. Die endgültige Version mit einer kontinuierlichen instationären Simulation auch in MODFLOW-2000 wird zeigen, wie stark der Einfluß von ablaufenden Hochwasserwellen auf das Austauschverhalten und den Grundwasserhaushalt ist.

Durch die Modellkopplung ist es möglich, räumlich verteilt und in Abhängigkeit der Zeit folgende hydrologische, aber ökologisch relevante Daten bereitzustellen, die für die zeitliche und räumliche Entwicklung von Pflanzengesellschaften in der Aue von Bedeutung sind: Wasserstand/Abflußtiefe, Überflutungsgebiete, Fließgeschwindigkeiten im Fluß und im Überschwemmungsgebiet und Grundwasserflurabstände. Die Erkenntnisse aus den Simulationsrechnungen können daher überall dort wichtige Bewertungsgrundlagen dar-

stellen, wo eine Neubeurteilung der Restwassermengen vorgenommen werden soll. Für eine ausführlichere Diskussion hierzu siehe *Ruf et al. (2006)*.

Eine Herausforderung stellen derzeit noch die langen Rechenzeiten dar, welche sich für das ganze Haupttal noch in der Größenordnung von Echt-Zeit belaufen, bei nur kleinen Änderungen der Randbedingungen allerdings etwa fünfmal schneller. Um das Ziel von Langzeitsimulationen erreichen zu können, werden in Zukunft noch einige Optimierungen am Programmcode für das hydraulische Strömungsmodell im Fluß und Vereinfachungen im Modellsystem nötig sein. Hierbei kommen u. a. in Frage: Parallelisierung des Codes; longitudinale Aufteilung des Gebietes in Bereiche mit 2D-Modellierung (verzweigtes Flußsystem) und 1D-Modellierung (klar definierte Einzelflußabschnitte) und Kopplung dieser Modelle; transversale Kopplung von 1D- und 2D-Modellierung (d. h. 1D in den Flußläufen über die ganze Länge des Haupttales, 2D in den Überflutungsgebieten), was vorteilhaft aber mit unstrukturierten Netzen zu bewerkstelligen ist; geschachtelte Modelle, in denen das Modell im Gesamtgebiet die Randbedingungen für interessierende Teilgebiete liefert; oder Übergang zu größeren Netzen bei veränderten Abflußbedingungen. Bei allen Varianten werden noch verschiedene numerische Probleme zu lösen sein, wobei das Benetzen und Trockenfallen der Zellen und das damit verbundene Problem der internen Ränder immer eine besondere Herausforderung darstellen wird.

## Literatur

- Abott, M.B.; J.C. Bathurst; J.A. Cunge; P.E. O'Connell; J. Rasmussen (1986): An introduction to the European Hydrologic System – Système Hydrologique Européen (SHE): 2. Structure of a physically-based, distributed modelling system; *Journal of Hydrology*, 87, 61-77.
- Anderson, E. I. (2003): An analytical solution representing groundwater-surface water interaction; *Water Resources Research*, 39 (3), 1071, doi:10.1029/2002WR001536.
- Bayard, M.; F.H. Schweingruber (1991): Ein Baumgrenzstandort: Das Wildbachbett der Maggia im Tessin, Schweiz. Eine dendrokökologische Studie; *Botanica Helvetica*, 101 (1), 9-28.
- Ciarapica, L.; E. Todini (2002): TOPKAPI: a model for the representation of the rainfall-runoff process at different scales; *Hydrological Processes*, 16 (2), 207-229.
- Faeh, R. (1996): Erosion-based dambreak simulation; *Proc. Second Int. Conference on Hydroinformatics '96*, Zurich, 2: 681-688.
- Foglia, L.; M.-V. Birsan; P. Burlando; M.C. Hill; S.W. Mehl (2004): Calibration strategies for a groundwater model in a highly dynamic alpine floodplain; FEM\_MODFLOW; Proceedings of International Conference on Finite-Element Models, MODFLOW, and More 2004, Solving Groundwater Problems, Karlovy Vary, Czech Republic, 13-16 September 2004.
- Harbaugh, A.W.; E.R. Banta; M.C. Hill; M.G. McDonald (2000): MODFLOW-2000, The U.S. Geological Survey modular ground-water model – users guide to modularization concepts and the ground-water flow process; *U.S. Geological Survey Open-File Report 00-92*, 121 p.
- Hill, M.C.; E.R. Banta; A.W. Harbaugh; E.R. Anderman (2000): MODFLOW-2000, The U.S. Geological Survey modular ground-water model, User's guide to the observation, sensitivity, and parameter-estimation processes; *U.S. Geological Survey Open-File Report 00-184*, 209 p.
- Pandey S.; P.S. Huyakorn (2004): A fully coupled physically-based spatially-distributed model for evaluating surface/subsurface flow; *Advances in Water Resources*, 27, 361-382.
- Prudic, D.E.; L.F. Konikow; E.R. Banta (2004): A new streamflow-routing (SFR1) package to simulate stream-aquifer interaction with MODFLOW-2000; *U.S. Geological Survey Open-file Report 2004-1042*, 95 p.
- Ruf, W.; L. Foglia; P. Perona; P. Molnar; R. Faeh; P. Burlando (2006): Modelling the Interaction between Groundwater and River Flow in an Active Alpine Floodplain Ecosystem. Proc. of International Symposium Floodplains: Hydrology, Soils, Fauna, 11.-16. September 2005, St. Marienthal bei Görlitz; *Abhandlungen und Berichte des Naturkundemuseums Görlitz* (submitted).



- Scheffranek, R.W.; R.A. Baltzer; D.E. Goldberg (1981): A model for simulation of flow in singular and interconnected channels; *Techniques of Water-Resources Investigations on the U.S. Geological Survey*, book 7, chap. C3, 110 p.
- Schulla, J. (1997): Hydrologische Modellierung von Flussgebieten zur Abschätzung der Folgen von Klimaänderungen; *Zürcher geographische Schriften*, Heft 69, Geographisches Institut ETH, Zürich.
- Sturzenegger, M. (2005): Changes in river morphology caused by streamflow regulation: A case study in the Maggia Valley, TI, Switzerland, ETH Zürich, Diplomarbeit, 39 p.
- Swain, E.D.; E.J. Wexler (1996): A coupled surface-water and ground-water flow model (MODBRANCH) for simulation of stream-aquifer interaction; *Techniques of Water-Resources Investigations of the U.S. Geological Survey*, book 6, chap. A6, 125 p.

### **Danksagung:**

Unser Dank gilt in erster Linie Roland Faeh (ETH Zürich) für die Bereitstellung des Modells 2dMb und seine Hilfe bei der ersten Implementierung, an Laura Foglia für die gute Zusammenarbeit im Projekt und die Modellierung der Grundwasserverhältnisse sowie Steffen Mehl für die wertvollen Hinweise in Bezug auf technische Details von MODFLOW.

### **Autoren:**

Dipl.-Hyd. Wolfgang Ruf,  
Dr. Paolo Perona,  
Dr. Peter Molnár,  
Prof. Paolo Burlando  
Institut für Umweltingenieurwissenschaften  
ETH Zürich  
Wolfgang-Pauli-Str. 15  
CH-8093 Zürich

Tel.: ++41 - 44 - 633 38 13  
Fax: ++41 - 44 - 633 10 61  
ruf@ifu.baug.ethz.ch  
perona@ifu.baug.ethz.ch  
molnar@ifu.baug.ethz.ch  
burlando@ifu.baug.ethz.ch