ETH zürich

ETH Library

# Hochwassermodellierungen
## Einfluss des Sedimenttransports

**Educational Material**

**Author(s):**
Fäh, Roland

**Publication date:**
2011

**Permanent link:**
https://doi.org/10.3929/ethz-a-006750752

**Rights / license:**
In Copyright - Non-Commercial Use Permitted

This page was generated automatically upon download from the ETH Zurich Research Collection.
For more information, please consult the Terms of use.

ETH Zertifikat in Angewandte Erdwissenschaften (CAS)
37. Blockkurs, 14. -19. Februar 2011

ZLG ETH

# Objektschutz und andere Schutzmassnahmen bei Naturgefahren

Organisation und Leitung: Dr. B. Oddsson

## Kursunterlagen zum Thema

Hochwassermodellierungen: Einfluss des Sedimenttransports

Dr. Roland Fäh

Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW)

# Inhalt

1. Hochwassermodellierung: Einfluss des Sedimenttransports ..... 3
1.1 Einleitung ..... 3
1.2 Modellbildung ..... 5
1.3 Physikalische Prozesse ..... 6
1.4 Mathematische Beschreibung ..... 7
1.4.1 Die gesuchten Grössen ..... 8
1.4.2 Die Bilanzgleichungen ..... 9
1.5 Numerische Lösung der Gleichungen ..... 12
1.6 Kalibrierung und Validierung ..... 12
1.7 Schlussbemerkungen ..... 13
1.8 Literatur ..... 14

# 1. Hochwassermodellierung: Einfluss des Sedimenttransports

## 1.1 Einleitung

Die Hochwasser der letzten 20 Jahre haben gezeigt, dass in gebirgigen Gegenden der Feststofftransport massgeblich für die Grösse der Schäden verantwortlich ist. So beliefen sich die Schäden im Kanton Uri beim Hochwasser von 1987 auf 800 Mio. Fr., in Brig waren es 1993 650 Mio. Fr. und im Industriegebiet am unteren Schächen entstanden beim Hochwasser 2005 Schäden von 300 Mio. Fr. Allen diesen Ereignissen ist gemeinsam, dass kaum Schäden entstanden wären, wenn nur Reinwasser abgelaufen wäre. Erst durch die Interaktion von Strömung und Feststofftransport nahmen die Hochwasserereignisse ihren katastrophalen Verlauf.

Der Feststofftransport hat zum einen einen direkten Impakt durch Übersaarung des Terrains, durch Verschlammung der Häuser und durch Unterspülungen von Böschung. Zum anderen gibt es aber auch eine indirekte Wirkung, wenn das Wasser durch Ablagerungen von Geschiebe das vorgesehene Gerinne verlässt und sich einen neuen Lauf sucht. Dies war beispielsweise beim Hochwasser 1993 in Brig der Fall, als die Saltina eingeschottert wurde und in der Folge über die Ufer trat und durch die Stadt abfloss (vgl. Abb. 1).

Abb. 1: Feststoffablagerungen in Brig, nachdem die Saltina während des Hochwassers von 1993 über die Ufer trat.

Obwohl beim Hochwasser von 2000 in der Saltina noch mehr Wasser abfloss, entstanden keine Schäden, weil die Auswirkungen des Geschiebes bei den realisierten Hochwasserschutzmassnahmen berücksichtigt worden waren.

Unter Risikoabschätzung versteht man gemeinhin den Versuch, die Wahrscheinlichkeit und das Ausmaß eines Schadens (bzw. einer Schadensverteilung) quantitativ auf der Ba-

sis von wissenschaftlichen Ansätzen zu bestimmen. In der Schweiz wurden aufgrund der Ursachenanalyse des Hochwassers von 1987 die Grundsätze des Hochwasserschutze neu überdacht. Die entsprechenden Erkenntnisse haben sich in verschiedenen Gesetzen, Verordnungen und Wegleitungen niedergeschlagen (siehe z.B. [1]). Vereinfachend lässt sich die neue Strategie so zusammenfassen, dass nun der Hochwasserschutz abgestuft nach differenzierten Schutzgraden vorgenommen wird. Grundlage für die Umsetzung dieses Konzeptes sind die Gefahrenzonenpläne. Daraus wird letztendlich parzellenscharf festgelegt ob Nutzungsbeschränkungen oder gar Bauverbote auszusprechen sind. Dies hat rechtliche Implikationen und es versteht sich, dass dadurch der Genauigkeitsanspruch an die Gefahrenzonenpläne hoch ist.

In den hochwasserbezogenen Gefahrenkarten basiert die Zoneneinteilung auf der Intensität der Strömung und deren Eintretenswahrscheinlichkeit. Die Intensität wird bestimmt aufgrund des grösseren Wertes der Wassertiefe [m] resp. des Produktes aus Wassertiefe und Fliessgeschwindigkeit [$m^2/s$], welches auch als spezifischer Abfluss bezeichnet wird. Es werden drei Gefahrenstufen unterschieden, die durch einfache Kriterien abgegrenzt werden. So spricht man beispielsweise von einer erheblichen Gefährdung (rote Zone in der Gefahrenkarte, vgl. Abb. 2) wenn entweder die Wassertiefe > 2m ist oder der spezifische Abfluss > 2 $m^2/s$.

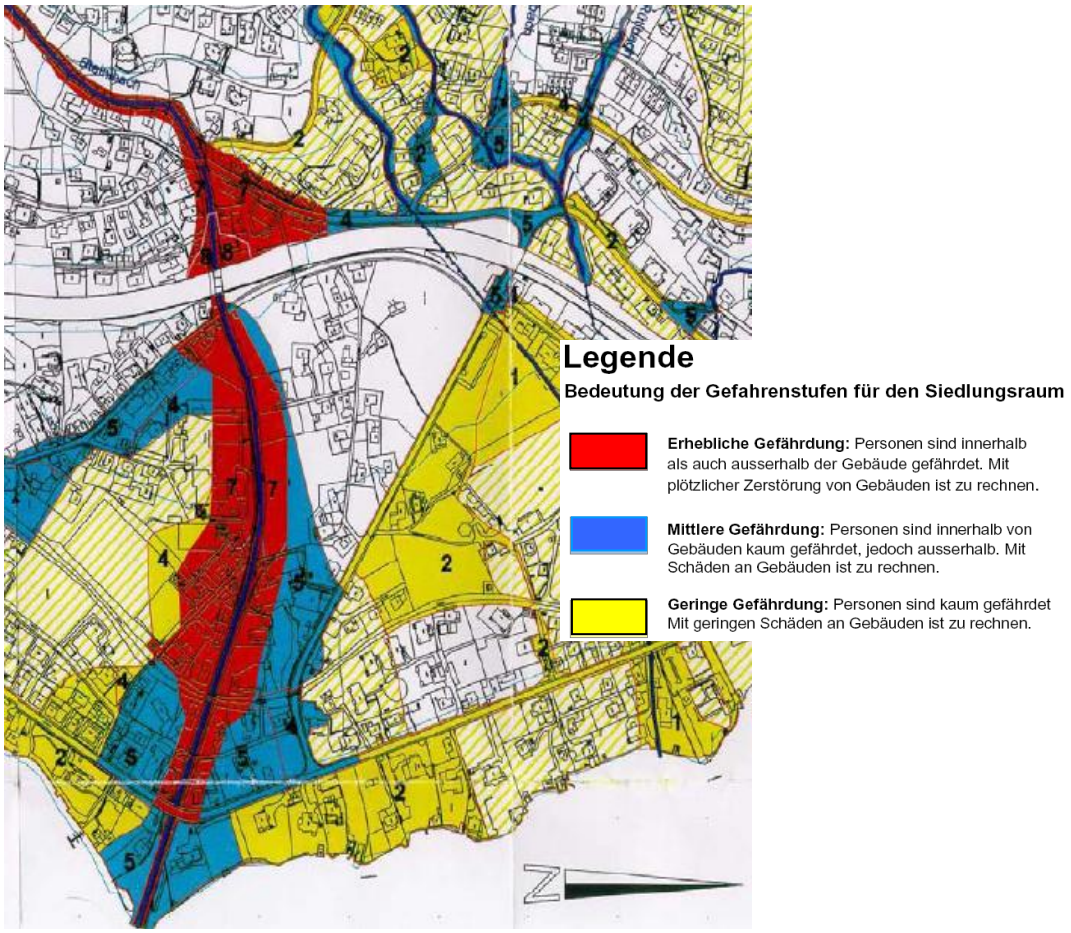



Abb. 2: Beispiel einer Gefahrenkarte

Wassertiefen und Fliessgeschwindigkeiten werden normalerweise auf der Basis von ein- oder zweidimensionalen Strömungsberechnungen bestimmt. Das heisst, man nimmt an, dass das Gerinne in dem das Wasser abläuft fixiert ist und kein Feststoff transportiert wird.

Die Wirkung des Feststofftransportes wird oft vernachlässigt oder nur rudimentär abgeschätzt. Im Folgenden wird ein Simulationsmodell vorgestellt, mit dem die Strömung, der Feststofftransport und deren Interaktion nachgebildet werden kann. Anhand eines Beispiels werden im Vortrag die praktischen Konsequenzen aufgezeigt.

## 1.2 Modellbildung

Wie bereits erwähnt wird für die Risikoabschätzung bei Hochwassern die dreidimensionale Strömung vereinfacht, indem die Fliessgeschwindigkeit über die Wassertiefe gemittelt wird. Wir haben dann eine horizontal zweidimensionale Strömung (2d). Falls das Wasser in einem prismatischen Gerinne abläuft, kann angenommen werden das die Geschwindigkeit quer zur Hauptfliessrichtung vernachlässig bar ist. Man erhält dann eine eindimensionale Strömung (1d), die sich durch die Geschwindigkeit in der Hauptfliessrichtung charakterisieren lässt.

Im 1d-Fall wird die Topographie des Gerinnes resp. des umliegenden Geländes in Form von Querprofilen beschrieben. Bei einem 2d-Ansatz wird die Geometrie des betrachteten Gebietes als digitales Höhenmodell (DHM) dargestellt. Im Folgenden beschränken wir un-

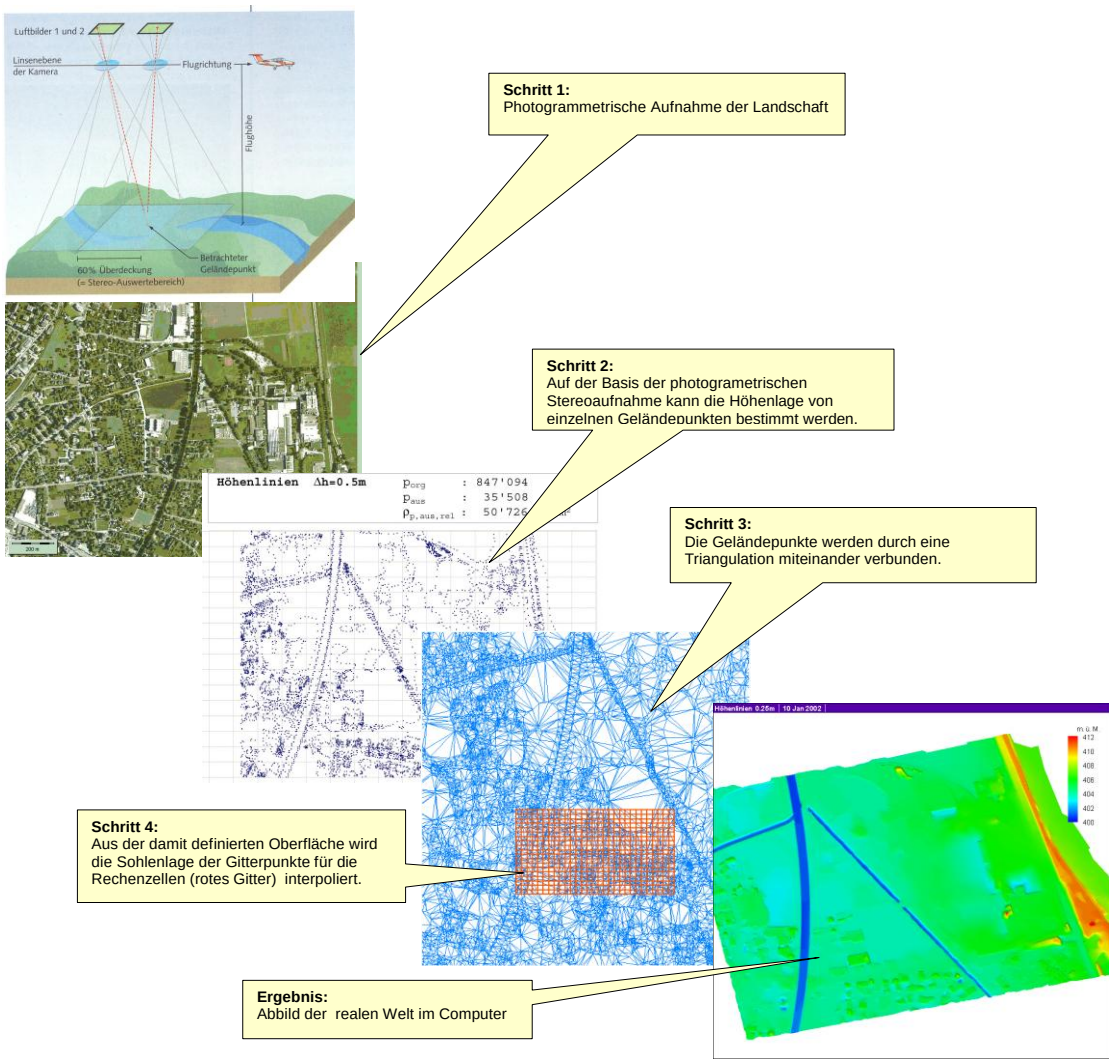
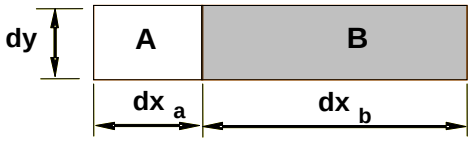



Abb. 3: Erstellung des Geländemodells

sere Betrachtung auf 2d-Modelle. In Abb. 3 wird schematisch gezeigt, wie ein Berechnungsgebiet im Computer abgebildet wird.

In Schritt 4 wird über die Geländeoberfläche ein Gitter gelegt. Die einzelnen Maschen entsprechen den Rechenzellen, für die die gesuchten Grössen nämlich die Wassertiefe und die Fliessgeschwindigkeiten in x- und y-Richtung (kartesisches Koordinatensystem) bestimmt werden. Das Rechengitter kann aus einer strukturierten Rechteckvermaschung bestehen, wie es in Abb. 3 dargestellt ist, oder aus einer unstrukturierten Vermaschung von dreieckigen und rechteckigen Zellen. Das unstrukturierte Rechengitter kann der Geländeform besser angepasst werden. Dabei ist zu beachten, dass die Form der einzelnen Zellen gewissen Kriterien bezüglich des Verhältnisses von Länge zu Breite (aspect ratio, expansion ratio) zu genügen hat. Des Weiteren dürfen die Winkel zwischen den Gitterlinien nicht zu klein sein (Orthogonalität).

aspect ratio: $dx_b/dy<2$
expansion ratio: $dx_b/dx_a<1.2$




Orthogonalität: $45^o < \alpha < 135^o$

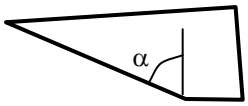



Abb. 4: Gitterqualität: Die Form der Rechenzellen muss den angegeben Kriterien genügen.

Die Genauigkeit und Konvergenz einer Simulation hängen stark von der Gitterqualität ab. Der Aufbau des Gitters muss deshalb mit grösster Sorgfalt vorgenommen werden. Oft ist die Generierung des Rechengitters der aufwendigste Teil einer Simulation.

Im Folgenden wird gezeigt welche physikalischen Grössen und Prozesse für die Erstellung einer Gefahrenkarte zu berücksichtigen sind.

## 1.3 Physikalische Prozesse

In Abb. 5 sind alle physikalischen Prozesse, die in einem tiefengemittelten Überschwemmungsmodell potentiell zur Auslegung einer Gefahrenkarte beitragen können, aufgelistet. In der schematischen Darstellung werden drei Schichten unterschieden. In der Oberschicht wird das Wasser und mit ihm die suspendierten Feststoffe transportiert. Die Austauschschicht dient zur Beschreibung der geschiebebezogenen Prozesse. Dabei spielt neben dem eigentlichen Geschiebetransport (Punkt 5) auch eine rein gravitationsinduzierte Bodenbewegung (z.B. Böschungsrutschung Punkt 6) und ein so genannter lateraler Transport (Punkt 7), der sich senkrecht zur Strömungsrichtung aufgrund einer Kombination von Quergefälle (gravitativer Transport) und Geschiebetransport (Strömung) ergibt, eine Rolle.

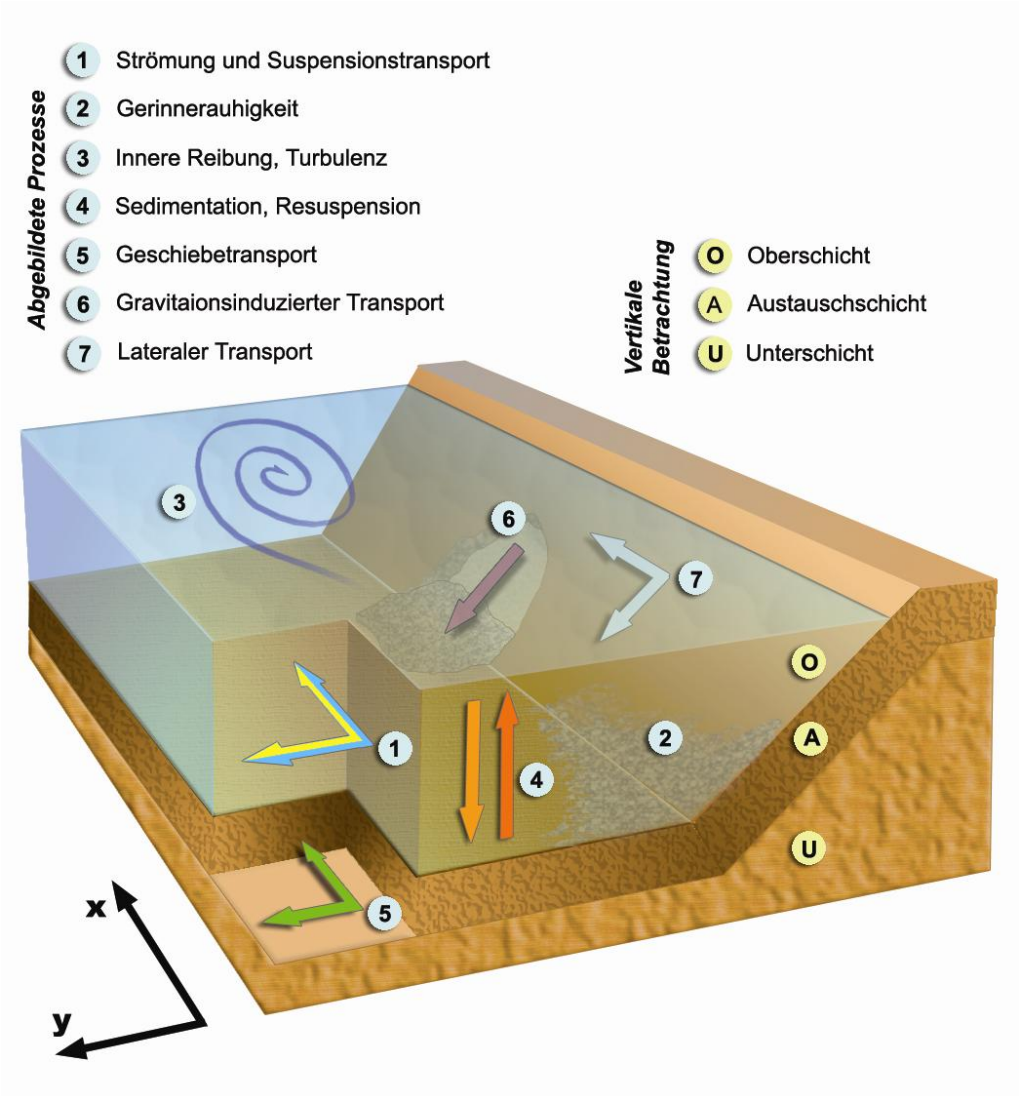



Abb. 5: Physikalische Prozesse, die in einem tiefengemittelten Modell berücksichtigt werden.

Je nach Situation werden einzelne Prozesse weggelassen, weil sie die Bestimmung der Gefahrenzonen nicht massgeblich beeinflussen. So fallen zum Beispiel bei einer Reinwasserbetrachtung alle Feststoffbezogenen Prozesse weg. Das heisst, es werden nur die Strömung (Punkt 1 ohne Suspension) und allenfalls noch die innere Reibung (Punkt 2) berücksichtigt. Wird mit einer beweglichen Sohle gerechnet, dann kann bei schweizerischen Verhältnissen meistens auf die Beschreibung des Suspensionstransportes (Punkt 1) verzichtet werden. Die Reduktion auf die absolut notwendigen Prozesse drängt sich auf, weil dadurch die Rechenzeit verkürzt werden kann.

## 1.4 Mathematische Beschreibung

Für die mathematische Beschreibung der physikalischen Prozesse, die hier als kontinuierlich verteilt betrachtet werden, muss das Rechgebiet in eine Anzahl diskreter Rechenzellen unterteilt werden. Da sich die Prozesse auch mit der Zeit verändern, d.h. instationär sind, muss auch der Zeitraum in einzelne Zeitschritte unterteilt werden. Die mathematische Beschreibung besteht nun darin, dass - ausgehend von einem vordefinierten Ausgangszu-

stand (*Anfangsbedingungen*) - für jede Rechenzelle und jeden Zeitschritt die Bilanzgleichungen für Masse und Impuls der gesuchten Grössen (*Unbekannte*) formuliert werden. Am Rand des Rechengebiets müssen die Unbekannten in Form von Randbedingungen vorgegeben werden. Das mathematische Modell umfasst demnach sowohl die Gleichungen wie auch die Rand- und Anfangsbedingungen.

### 1.4.1 Die gesuchten Grössen

Für die Formulierung der Bilanzgleichungen werden die einzelnen Rechenzellen gedanklich in der vertikalen in drei Schichten unterteilt (Abb. 6). In der obersten Schicht wird die

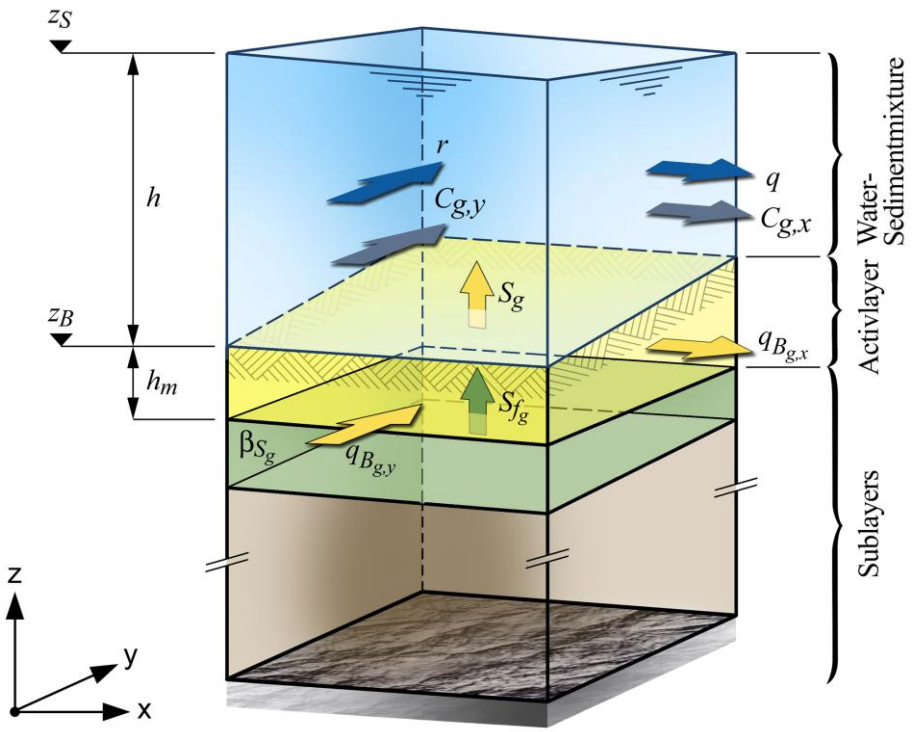



Abb. 6: Vertikale Unterteilung einer einzelnen Rechenzelle und Definition der gesuchten Grössen (Unbekannten).

Massen- und Impulsbilanz für das Wasser sowie die Massenbilanz für die suspendierten Stoffe aufgestellt. Daraus lassen sich die hydraulischen Grössen - nämlich die Wassertiefe ($h$) und die beiden spezifischen Abflüsse in x- ($q$) resp. y-Richtung (r) und die Konzentration der suspendierten Stoffe ($C_g$) errechnen. Der tief gestellte Index $g$ in $C_g$ steht für die Kornklasse $g$. Die Kornverteilung wird nämlich auch durch diskrete Klassen repräsentiert. Die einzelnen Kornklassen werden durch ihren mittleren Korndurchmesser $d_m$ charakterisiert.

Die mittlere Schicht wird auch als *Activlayer, Mixinglayer* oder *Austauschschicht* bezeichnet und besteht aus der obersten Schicht der Sohle. Hier findet die Ablagerung resp. der Eintrag der suspendierten Stoffe statt ($S_g$). Auch der Geschiebetrieb und dessen Wirkung auf die Veränderung der Sohlenkote ($z_B$) und der granulometrischen Zusammensetzung der Sohlenoberfläche ($\beta_k$) wird durch Bilanzierung über diese Austauschschicht beschrieben. Die unterste Schicht umfasst alle Bodenschichten. Die Summe der Massenbilanzen

von Austauschschicht und den restlichen Bodenschichten führt zur so genannten Exnergleichung, welche die Evolution des Bodens beschreibt.

Bei der Formulierung der Bilanzgleichungen (Erhaltungsgleichungen), die zur Lösung der gesuchten Grössen (primäre Unbekannte) aufgestellt werden, müssen Schliessbedingungen eingeführt werden. Dabei erhält man zusätzliche (sekundäre) Unbekannte und muss natürlich eine entsprechende Anzahl zusätzlicher Gleichungen einführen. Das ist zum Beispiel eine Geschiebetransportformel mit der der Geschiebefluss bestimmt wird. Die zusätzlichen Gleichungen sind empirische Beziehungen, die als Funktion der primären Unbekannten formuliert werden können.

Im Folgenden werden die gesuchten Grössen nochmals zusammengefasst:

***Primäre Unbekannte:***

- Wasser: $h$ Wassertiefe
  $q$ Spezifischer Abfluss in x-Richtung
  $r$ Spezifischer Abfluss in y-Richtung
- Feststoffe: $z_B$ Sohlenkote
  $C_g$ Konzentration der Kornklasse $g$
  $\beta_g$ Volumetrischer Anteil der Kornklasse $g$ in der Austauschschicht

***Sekundäre Unbekannte:***

$q_{B,x}$ Spezifischer Geschiebefluss in x-Richtung
$q_{B,y}$ Spezifischer Geschiebefluss in y-Richtung
$hm$ Dicke der Austauschschicht
$S_g$ Quellterm für den Suspensionstransport
$Sf_g$ Quellterm zur Beschreibung des Flusses über die Sohle der Austauschschicht

Mit $g$-Kornklassen erhält man also 4+2$g$ gesuchte Grössen, die über die gleiche Anzahl Erhaltungsgleichungen gelöst werden müssen.

### 1.4.2 Die Bilanzgleichungen

Die Formulierung der Erhaltung von Masse und Impuls führt zu folgenden Bilanzgleichungen:

***Strömung***

Die Strömung wird mit den so genannten Flachwassergleichungen beschrieben. In der Vektorschreibweise lauten sie:

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial y} + \mathbf{s} = 0 \qquad \text{1-1}$$

Werden in den Impulsgleichungen noch die Anteile der inneren Reibung berücksichtigt ergeben sich die Vektoren wie folgt:

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} h \\ q \\ r \end{bmatrix} \quad \mathbf{f} = \begin{bmatrix} q \\ qu + \frac{g}{2}h^2 - \frac{h}{\rho}\tau_{xx} \\ qv - \frac{h}{\rho}\tau_{xy} \end{bmatrix} \quad \mathbf{g} = \begin{bmatrix} r \\ ru + \frac{h}{\rho}\tau_{xy} \\ rv + \frac{g}{2}h^2 - \frac{h}{\rho}\tau_{yy} \end{bmatrix} \quad \mathbf{s} = \begin{bmatrix} 0 \\ gh\partial_x zb + \frac{\tau_{bx}}{\rho} \\ gh\partial_y zb + \frac{\tau_{by}}{\rho} \end{bmatrix}$$

In einem stark fliessenden Gewässer sind die Schubspannungen als Folge der inneren Reibung ($\tau_{xx}$, $\tau_{xy}$ etc.) viel kleiner als die Wandschubspannungen ($\tau_{bx}$ , $\tau_{by}$) und werden deshalb oft vernachlässigt. Zirkulationen in beinahe horizontalen Strömungen, wie sie zum Beispiel bei der Mündung eines Flusses in einen See auftreten, können jedoch nur dann physikalisch korrekt modelliert werden, wenn die innere Reibung berücksichtigt wird. Für deren Bestimmung wird die molekulare Viskosität vernachlässigt und die turbulenten Anteile (Reynoldsspannungen) werden proportional zur Verformungsrate angesetzt. Damit erhält man

$$\frac{\tau_{xx}}{\rho} = 2\nu_t \frac{\partial u}{\partial x} \qquad \frac{\tau_{yy}}{\rho} = 2\nu_t \frac{\partial v}{\partial y} \qquad \frac{\tau_{xy}}{\rho} = \nu_t \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \qquad \text{1-2}$$

Die turbulente Viskosität (Wirbelviskosität) $\nu_t$ wird nun mit Hilfe eines Turbulenzmodells in Abhängigkeit der strömungsrelevanten Grössen ausgedrückt. Als einfachster Ansatz kann hiezu folgende Gleichung verwendet werden.

$$\overline{\nu}_t = \frac{\kappa}{6} u_* h$$

Die kartesischen Komponenten der Sohlschubspannung schreiben sich

$$\frac{\tau_{bx}}{\rho} = \frac{u|v|}{c_f^2} \qquad und \qquad \frac{\tau_{by}}{\rho} = \frac{v|v|}{c_f^2} \qquad \text{1-3}$$

wobei der Betrag der Geschwindigkeit $\boldsymbol{v}$ aufgrund der tiefengemittelten Geschwindigkeiten in x- und y-Richtung, $|\boldsymbol{v}|=\sqrt{u^2+v^2}$ , und der Widerstandskoeffizient $c_f$ nach einer der üblichen Formeln (z.B. mit Strickler: $c_f = 7.66g\left(\frac{h}{k_s}\right)^{1/6}$) ermittelt werden kann.

## *Sedimenttransport*

Die Transportrechnung für die Feststoffe erfolgt auf dem zuvor berechneten Fliessfeld. Eine Beeinflussung des Fliessfeldes durch den Feststofftransport wird nur über die Verän-

derung der Sohle und deren granulometrischen Zusammensetzung, welche via Reibungsterm in die Impulsgleichung einfliesst, berücksichtigt.

Da das Geschiebe in ständigem Bodenkontakt bewegt wird, besteht ein direkter Zusammenhang zwischen dem Geschiebetransport und der Morphologie der Gerinnesohle. Der sohlbildende Einfluss der Schwebstoffe hängt dagegen stark vom Strömungszustand und von der Art und der Verfügbarkeit des suspendierten Materials ab. In kiesführenden Flüssen geht man im Allgemeinen davon aus, dass die Schwebstoffe nur im Bereich von Stauhaltungen eine bettbildende Wirkung entfalten. Dieser Umstand widerspiegelt sich in der mathematischen Beschreibung des physikalischen Modells, indem einerseits die Erhaltungsgleichungen für Suspension und Geschiebe getrennt formuliert werden und andererseits die Sohlenkote nur in der Kontinuitätsbedingung für das Geschiebe explizite aufscheint, das heisst direkt gekoppelt ist. Der Eintrag (resp. die Ablagerung) von suspendiertem Material in die Strömung wird in den Erhaltungsgleichungen über die Quellterme berücksichtigt und ist somit schwächer mit der Gerinneform gekoppelt.

Die Konzentration *Cg* der suspendierten Stoffe ergibt sich durch Lösen der folgenden Gleichung:

$$\frac{\partial(hC_g)}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}\left(qC_g-h\Gamma\frac{\partial C_g}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(rC_g-h\Gamma\frac{\partial C_g}{\partial y}\right)-S_g=0 \qquad (1\text{-}4)$$

Der Dispersionskoeffizient $\Gamma$ ist proportional zur Schubspannungsgeschwindigkeit.

Die Formulierung der Massenerhaltung in der Austauschschicht ergibt die zeitliche Änderung der volumetrischen Anteile der einzelnen Kornklassen und damit die zeitliche Veränderung der Oberflächenreibung. Summiert man die Nettoflüsse des Geschiebes über die Seitenflächen des Kontrolvolumens sowie die Feststoffflüsse über dessen Deck- resp. Grundfläche ergibt sich folgende Gleichung:

$$(1-p)\frac{\partial(\beta_k hm)}{\partial t}+\frac{\partial qbx_k}{\partial x}+\frac{\partial qby_k}{\partial y}+S_k-Sf_k-Sl_k=0 \qquad (1\text{-}5)$$

Mit der konstanten Porosität *p* repräsentiert der Ausdruck *(1-p)hm* das Volumen pro Einheitsfläche aller Sediment Partikel in der Austauschschicht. Die Kornverteilung wird durch die Variable $\beta$ beschrieben. $\beta_g$ bezeichnet das Verhältnis des Sedimentvolumens der Fraktion *g* zum Gesamtvolumen aller Feststoffe und widerspiegelt somit die Veränderung der Sohlenoberfläche bezüglich der Anteile der verschiedenen Korngrössen. Gleichung (1-5) wird deshalb in der englischen Literatur oft auch als "bed-material sorting equation" bezeichnet. Mit dem Quellterm $Sl_k$ kann eine lokale Zugabe (z.B. Seitenbach) oder Entnahme (z.B. Baggerung) von Material spezifiziert werden.

Die Partikel einer gewissen Fraktion können sowohl als Geschiebe wie auch in Suspension transportiert werden. Der Austausch zwischen den beiden Transportarten ist ein kontinuierlicher Prozess, bei dem ständig Geschiebepartikel in die Strömung eingetragen und gleichzeitig auch suspendierte Partikel abgelagert werden. Der Quellterm $S_k$ beschreibt den Nettofluss von Sedimentpartikeln (Strömungseintrag minus Ablagerung) pro Einheitsfläche. Auf der linken Seite der Gleichung (1-5) wird der Term mit positivem Vorzeichen einge-

führt. Falls der Strömungseintrag überwiegt, ist $S_k>0$; in Bezug auf die Austauschschicht stellt dies eine Senke dar. In der Erhaltungsgleichung für die suspendierten Stoffe (1-6), erscheint der gleiche Term mit negativem Vorzeichen.

Die Kote der Grundfläche der Austauschschicht verschiebt sich mit jeder Änderung der Sohlenoberfläche. Verlagert sich die Grundfläche nach unten, wird das Material der Unterschicht, das im Allgemeinen aus einer anderen Kornverteilung besteht, Teil der Austauschschicht. Dieser "Materialfluss" wird mit dem Quellterm $Sf_k$ beschrieben.

Die zeitliche Veränderung der Sohlenkote ergibt sich aus der Formulierung der Massenerhaltung aller Bodenschichten. Die oft auch als Exnergleichung bezeichnete Beziehung schreibt sich wie folgt:

$$(1-p)\frac{\partial zb}{\partial t}+\sum_{k=1}^{nk}\left(\frac{\partial qbx_k}{\partial x}+\frac{\partial qby_k}{\partial y}+S_k+Sl_k\right)=0 \qquad (1\text{-}7)$$

Für die Herleitung der dargestellten Gleichungen sowie die Formulierung der oben erwähnten Schliessbedingungen sei hier auf das Vorlesungsscript [2] oder die VAW-Mitteilung Nr. 153 verwiesen.

## 1.5 Numerische Lösung der Gleichungen

Die ein- und zweidimensionale Form der in Abschnitt 1.4.2 beschriebenen Gleichungen wurden in verschiedenen Computerprogrammen implementiert. An der VAW im 1d-Programm FLORIS, das unter dem Namen Floris2000 von der Firma SCIETEC kommerzialisiert wurde und dem 2d-Programm 2dMb. Mit dem Softwaresystem BASEMENT, das in den letzten sechs Jahren an der VAW entwickelt worden ist, sollen diese beiden Programme abgelöst werden. BASEMENT umfasst das 1d-Programm BASEchain und das 2d-Programm BASEplane. Die erste Version dieser Programme wurden im Oktober 2006 der Öffentlichkeit vorgestellt. Die Software ist Freeware und kann inklusive der umfassenden Dokumentation [3] von www.basement.ethz.ch runter geladen werden.

## 1.6 Kalibrierung und Validierung

Jedes Modell stellt immer nur einen Ausschnitt der Wirklichkeit dar. Dies gilt zum einen in Bezug auf die räumliche resp. zeitliche Ausdehnung des Modells und zum anderen auf die Vereinfachungen, mit denen die physikalischen Prozesse beschrieben werden. Am räumlichen Rand des Berechnungsgebiets muss die zeitliche Entwicklung von allen unbekannten Grössen als Randbedingung vorgegeben werden. Da diese Daten im Allgemeinen nur lückenhaft zur Verfügung stehen müssen bei allen praktischen Anwendungen fehlende Inputgrössen aufgrund von plausiblen Annahmen geschätzt werden. Diese Annahmen sind zu validieren d.h. bezüglich ihrer Gebrauchstauglichkeit zu überprüfen. Dies ist natürlich nur möglich, wenn für gewisse Situationen Messungen vorliegen, mit denen das numerische Modell verglichen werden kann.

Die Validierung der Randbedingungen ist normalerweise nur bei Berechnungen mit beweglicher Sohle von Bedeutung. Im Gegensatz zum Zufluss der Wassermenge, die meist als bekannt vorausgesetzt werden kann, wird der Zufluss an Feststoffen kaum je gemessen und ist deshalb eine Kalibrierungsgrösse.

Bei den Randbedingungen für die Hydraulik ist das Problem, dass man zwar den Abfluss kennt, meist aber nicht die Fliessgeschwindigkeit. Falls am Rand Normalabfluss vorherrscht, kann die entsprechende Geschwindigkeit durch Vorgabe eines Gefälles angenähert bestimmt werden. Ist dies nicht möglich, muss das Berechnungsgebiet flussaufwärts so weit erweitert werden, dass sich die falschen Randbedingungen im interessierenden Bereich nicht mehr bemerkbar machen. Die für die Schliessbedingungen verwendeten empirischen Beziehungen enthalten Parameter, die je nach Situation kalibriert werden müssen. So werden beispielsweise mit dem Reibungsgesetz nicht nur die eigentlichen Reibungsverluste sondern auch Energiedissipationen durch Ablösungen bei Erweiterungen des Gerinnes beschrieben. Bei Reinwassersimulationen wird im Allgemeinen nur der Reibungsbeiwert kalibriert, indem dieser solange variiert wird, bis gemessene und gerechnete Wasserspiegel übereinstimmen. Der Einfluss der Reibung auf die berechnete Wasserspiegellage ist meist nur bei 1d-Rechungen massgeblich. Bei 2d-Rechnungen wirken sich Änderungen am Reibungsbeiwert nicht so stark aus, weil die damit zu kompensierenden Modellfehler a priori kleiner sind.

Um das Modell zu validieren, muss es mit den zuvor kalibrierten Grössen in einem zweiten Schritt nochmals mit Messungen eines anderen Ereignisses verglichen werden. Weicht dieses zweite Vergleichsereignis von dem für die Kalibrierung verwendeten genügend stark ab und werden die Vergleichsgrössen mit genügender Genauigkeit wiedergegeben, kann das Modell als validiert betrachtet werden. Eine Verifikation (veritas: lat. Wahrheit) ist nicht möglich, da nie alle gesuchten Grössen für die Dauer eines ganzen Ereignisses verglichen werden können.

Bei der Validierung der Strömungsgrössen stehen oft die Messung einer Wasserspiegellage oder zumindest von Hochwasserspuren zur Verfügung. Entsprechende Vergleichsmessungen für den Feststofftransport (z.B. Entwicklung der Sohlenlage) sind nicht erhältlich. Im besten Fall existiert eine Messung der Sohlenlage vor und nach einem massgebenden Ereignis. Was dazwischen passiert kann kaum gemessen werden. Als zusätzliches Erschwernis kommt hinzu, dass auch der Zufluss an Feststoffen (d.h. die Randbedingung) kaum je gemessen wird. Bei dieser Datenlage ist deshalb eine Validierung nicht möglich. Die Prognosefähigkeit ist entsprechend eingeengt und man kommt nicht umhin, den Einfluss der wichtigsten Parameter (Zuflussmenge, Korndurchmesser) im Sinne einer Sensitivitätsanalyse zu bestimmen und das Antwortspektrum der Resultate sorgfältig zu interpretieren.

## 1.7 Schlussbemerkungen

Die Hochwasser der letzten Jahre haben gezeigt, dass das Ausmass der Schäden in alpinen Gegenden massgeblich vom Zusammenspiel zwischen Strömung und Feststofftransport determiniert wird. Um dieser Tatsache Rechnung zu tragen, ist in den Modellen auf denen die Ausscheidung der Gefahrenzonen beruhen, die Interaktion von Strömung, Feststofftransport und der Veränderung des Gerinnes zu berücksichtigen. Entsprechende Computerprogramme sind entwickelt worden und deren Gebrauchstauglichkeit lässt sich

nachweisen. Trotzdem ist eine exakte Vorhersage nicht möglich, sodass auch bei der aufwändigsten Bestimmung der Gefahrenzonen immer ein Restrisiko bleibt, das sich nicht abschätzen lässt. Dies liegt vor allem an der Ungewissheit bezüglich der Randbedingungen und weniger an der Ungenauigkeit der Modelle.

## 1.8 Literatur

[1] Bundesamt für Wasser und Geologie, „Hochwasserschutz an Fliessgewässern“, Wegleitungen des BWG, Bern 2001.

[2] Fäh, Roland, “Numerische Modellierung von Fliessgewässern“, VAW, 2006.

[3] Faeh, R., Mueller, R., Rousselot, P., Vetsch, D., Volz, C., Vonwiller, L., Veprek, R., Farshi, D.: System Manuals of BASEMENT, Version 2.2, Laboratory of Hydraulics, Glaciology and Hydrology (VAW), ETH Zurich.
Available from http://www.basement.ethz.ch., 2011.