

**Zeitschrift:** Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria  
**Herausgeber:** Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband  
**Band:** 99 (2007)  
**Heft:** 2

**Artikel:** Massstabseffekte im hydraulischen Modell  
**Autor:** Heller, Valentin  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-940127>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 14.03.2025

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# Masstabeffekte im hydraulischen Modell

Valentin Heller

## Zusammenfassung

Masstabeffekte entsprechen einer Verzerrung der Messwerte im Modell gegenüber dem Prototypen. Jedes hydraulische Modell eines Prototypen mit Modellmasstab ungleich eins weist solche Masstabeffekte auf. Wird aber das Modell genügend gross gebaut, so sind diese Effekte vernachlässigbar klein, und die Messresultate können mittels Modellgesetz auf den Prototypen übertragen werden. Nachfolgend wird in die Problematik der Masstabeffekte eingeführt unter Berücksichtigung der weiterführenden Literatur. Einige grundlegende Schwierigkeiten beim Modellieren von Naturzuständen im hydraulischen Modell werden zudem aufgezeigt. Am Beispiel rutscherzeugter Impulswellen wird die Modellähnlichkeit zwischen Modell und Prototyp verdeutlicht, und weitere Erfahrungswerte zur Vermeidung von grossen Masstabeffekten werden für verschiedene Prozesse aufgeführt.

## Summary

Scale effects correspond to a distortion of the model results in comparison to its prototype. Every hydraulic scale model is influenced by scale effects if the scale factor is not identical to unity. However, if the scale factor is large enough, scale effects are negligibly small and the measurements can be up-scaled to its prototype with the adequate similitude ratio. This article offers insight into the problem of scale effects, for processes where the fluid water is involved, and introduces the relevant literature. Furthermore, it shows some difficulties in modelling natural phenomena by a hydraulic model. The example landslide generated impulse waves is an application of hydraulic similitude between a model and its prototype. Experiences are also provided to avoid considerable scale effects for typical phenomena of fluid flow.

## 1. Einleitung

Ein hydraulisches Modell entspricht der Nachbildung eines Prototypen, um technische, wissenschaftliche und ökonomische Lösungen für hydraulische Ingenieurprobleme zu ermitteln (Novak 1984). Masstabeffekte sind eine Verzerrung der Messwerte im hydraulischen Modell gegenüber dem Prototypen als Folge von Prototyp-Eigenschaften, welche im Modell nicht korrekt modelliert werden können. Sie verfälschen die Resultate im Extremfall völlig.

Nach Martin und Pohl (2000) wird der Masstabsfaktor  $\lambda$  definiert zu  $\lambda = l_N/l_M$  = Längeneinheit in Natur/Längeneinheit im Modell. Der Modellmasstab ist der Kehrwert vom Masstabsfaktor, also  $1:\lambda$ . Die Masstabeffekte sind umso kleiner, je grösser der Modellmasstab gewählt wird. Dem gegenüber braucht ein kleineres Modell weniger Platz und ein Versuch dauert weniger lange. Zusätzlich steigen die

Kosten für eine Modelluntersuchung nach Le Méhauté (1976) mit  $\lambda^3$ . Die Wahl des Modellmasstabs stellt folglich eine wirtschaftliche und technische Optimierung dar.

Das Bild 1a zeigt die Hochwasserentlastungsanlage der Gebidem-Staumauer im hydraulischen Modell an der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW). Das Modell weist einen Modellmasstab von 1:30 auf und basiert auf dem Modellgesetz nach Froude. Das Bild 1b zeigt den 1967 fertig gestellten Prototypen im Wallis. Im Gegensatz zum Prototypen führt der Strahl im Modell praktisch keine Luft mit. Dieser Unterschied ist die Folge von Masstabeffekten, da die Weberzahl im Modell und Prototypen stark unterschiedlich ist.

Hier wird nun der Frage nachgegangen, ob die Messwerte im hydraulischen Modell wirklich exakt auf den Prototypen übertragbar sind, d.h., nicht von Zusatz-

effekten deformiert werden. Die korrekte Antwort lautet nein, denn das ist streng genommen unmöglich. Wie nachfolgend erläutert wird, können diese einen Prozess verfälschenden Masstabeffekte mit der Berücksichtigung einiger Kriterien vernachlässigbar klein gehalten werden, und die Messresultate vom hydraulischen Modell dürfen mit genügender Genauigkeit auf den Prototypen übertragen werden.

Dieser Artikel befasst sich mit Prozessen, bei welchen Wasser beteiligt ist. Im anschliessenden Abschnitt soll aufgezeigt werden, welche Bedingungen für eine Modellierung ohne grosse Masstabeffekte erfüllt sein müssen. Dabei wird speziell auf die Modellähnlichkeit nach Froude eingegangen. Als Nächstes wird besprochen, wie diese theoretischen Bedingungen umgesetzt werden. Unter Praxisrelevanz werden weitere Schwierigkeiten und Kompensationsmöglichkeiten von Masstabeffekten angeschnitten und einige Erfahrungswerte zu deren Minimierung vorgestellt. Das abschliessende Beispiel soll das Besprochene verdeutlichen, und die Schlussfolgerungen fassen die wichtigsten Aussagen zusammen.

## 2. Exakte Modellähnlichkeit

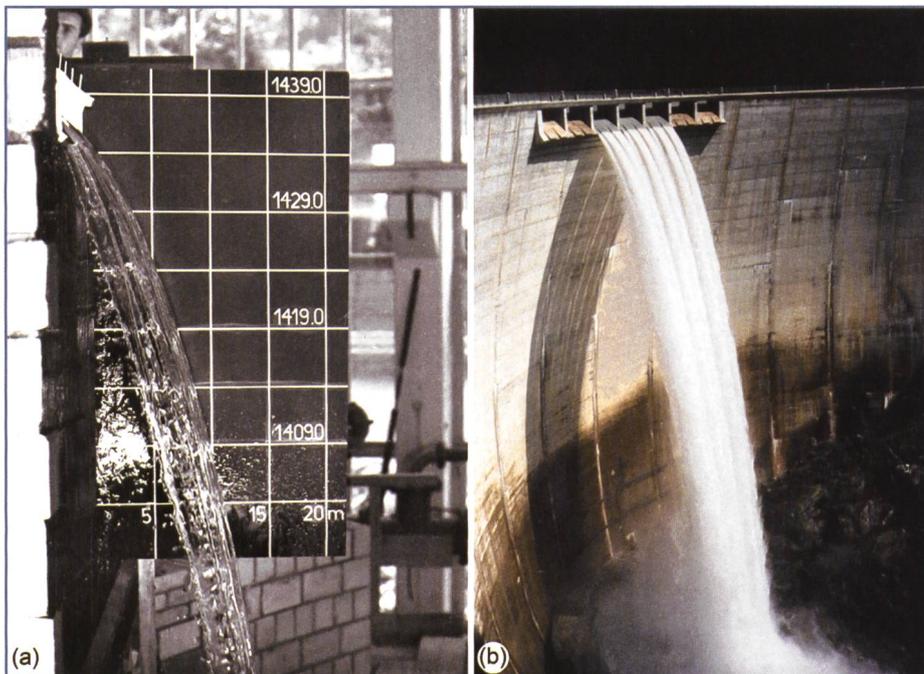
### 2.1 Mechanische Modellähnlichkeit

Liegt die so genannte mechanische Modellähnlichkeit zwischen Modell und Prototyp vor, so treten keine Masstabeffekte auf. Diese Ähnlichkeit setzt folgende drei Ähnlichkeitsbedingungen voraus (Yalin 1971; Kobus 1980; Novak und Cabelka 1981; Novak 1984; Hughes 1993; Martin und Pohl 2000):

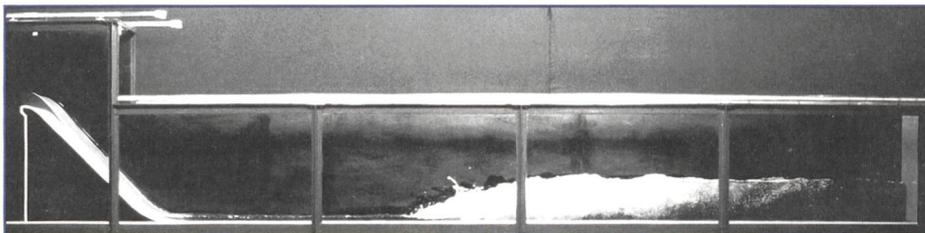
- (a) Geometrische Ähnlichkeit
- (b) Kinematische Ähnlichkeit
- (c) Dynamische Ähnlichkeit

Um die geometrische Ähnlichkeit zu erreichen, müssen alle geometrischen Dimensionen vom Prototypen einheitlich durch den Masstabsfaktor  $\lambda$  teilbar sein. Flächen und Volumen werden durch diese Bedingung entsprechend um  $\lambda^2$  bzw.  $\lambda^3$  kleiner. Das Modell hat somit exakt die





**Bild 1. Hochwasserentlastung der Stauanlage Gebidem VS im (a) hydraulischen Modell mit Modellmassstab 1:30 (Bild VAW Foto 03-21-20) und (b) im 1967 fertig gestellten Prototyp (Bild VAW Dia 8870); die Luftaufnahme vom Wasserstrahl zwischen Prototyp und Modell ist unterschiedlich, da die Weberzahl nicht identisch ist.**



**Bild 2. Modell eines Wechselsprungs nach einem Flusswehr mit Zufluss-Froudezahl  $F_1 = 5$  an der ETH Lausanne (Bild W.H. Hager); das räumlich kompakte turbulente Phänomen gehorcht dem Modellgesetz nach Froude.**

gleiche Form wie der Prototyp, aber ist um den Massstabsfaktor  $\lambda$  verkleinert.

Zusätzlich zur geometrischen Ähnlichkeit muss bei der kinematischen Ähnlichkeit übereinstimmende Bewegung aller Partikel zwischen Modell und Prototyp zu allen Zeitpunkten vorliegen. Die kinematische Ähnlichkeit verlangt deshalb konstante Verhältnisse von Zeit, Geschwindigkeit und Beschleunigung in Natur und Modell.

Die volle dynamische Ähnlichkeit kann nur auftreten, falls die kinematische und somit die geometrische Ähnlichkeit bereits erfüllt sind. Sie verlangt zudem die gleichen Verhältnisse zwischen den vektoriellen Kräften in den zwei Systemen. Die wichtigsten Kräfte bezüglich dem Fluid Wasser sind die:

- Trägheitskraft = Masse·Beschleunigung =  $(\rho L^3)(V^2/L) = \rho L^2 V^2$
- Schwerkraft = Masse·Erdbeschleunigung =  $\rho L^3 g$
- Reibungskraft = Viskosität·(Geschwindigkeit/Distanz)·Fläche =  $\mu(V/L)L^2 = \mu VL$

- Oberflächenspannungskraft = Einheitsoberflächenspannung·Länge =  $\sigma L$
- Kompressibilitätskraft = Elastizitätsmodul·Fläche =  $EL^2$
- Druckkraft = Einheitsdruck·Fläche =  $pL^2$

Dabei bezeichnet  $\rho$  die Dichte,  $\mu$  die dynamische Viskosität,  $\sigma$  die Oberflächenspannung und  $E$  den Elastizitätsmodul des untersuchten Fluids. Die Grösse  $L$  ist eine charakteristische Länge im Modell, beispielsweise die Wassertiefe, und  $V$  eine charakteristische Geschwindigkeit, beispielsweise die Fliessgeschwindigkeit. Schliesslich bezeichnet  $p$  den Druck und  $g$  die Erdbeschleunigung. Die Trägheitskraft ist in den meisten Untersuchungen relevant, weshalb sie in jedem Kräfteverhältnis auftritt. Somit ergeben sich folgende relevanten Kräfteverhältnisse, die für eine volle dynamische Ähnlichkeit zwischen Modell und Prototyp identisch sein müssen:

- Froudezahl =  $[\text{Trägheitskraft}/\text{Schwerkraft}]^{1/2} = V/(gL)^{1/2}$
- Reynoldszahl =  $\text{Trägheitskraft}/\text{Reibungskraft} = \rho LV/\mu = LV/\nu$

- Weberzahl =  $\text{Trägheitskraft}/\text{Oberflächenspannungskraft} = \rho V^2 L/\sigma$
- Cauchyzahl =  $\text{Trägheitskraft}/\text{Kompressibilitätskraft} = \rho V^2/E$
- Eulerzahl =  $\text{Druckkraft}/\text{Trägheitskraft} = p/(\rho V^2)$

Dabei wurde in der Reynoldszahl die kinematische Viskosität  $\nu = \mu/\rho$  verwendet. Im hydraulischen Modell kann nur das dominante Kräfteverhältnis richtig modelliert werden, womit eine volle dynamische Ähnlichkeit unmöglich zu erfüllen ist (Le Méhauté 1976; Hughes 1993; Martin und Pohl 2000). Die nicht berücksichtigten Kräfteverhältnisse führen zu Massstabeffekten. Diese Kräfteverhältnisse müssen demnach so gewählt werden, dass ihre verfälschenden Einflüsse möglichst klein bleiben. Weil in diesem Sinne eine volle dynamische Ähnlichkeit unmöglich ist, spricht man von einer angenäherten dynamischen Ähnlichkeit, falls der Einfluss der im Modell inkorrekt modellierten Kräfteverhältnisse auf die Resultate genügend klein ist. Das Modell eines Naturzustands mit einem Massstabsfaktor ungleich 1 weist folglich immer Massstabeffekte auf.

Welches dominante Kräfteverhältnis nun berücksichtigt werden soll, hängt vom untersuchten Prozess ab. So ist die Schwerkraft für alle Freispiegelabflüsse wichtig, womit die richtige Modellierung nach Froude sinnvoll ist. Für Druckabflüsse kann die Druckkraft wichtig werden und somit bietet sich die Eulerzahl an. Mit der Wahl des dominanten Kräfteverhältnisses wird auch das so genannte Modellgesetz festgelegt. Das Modellgesetz braucht man zur Umrechnung der Modell- in die entsprechenden Prototypresultate. Dies wird anschliessend mit der Modellähnlichkeit nach Froude verdeutlicht.

## 2.2 Modellähnlichkeit nach Froude

Für Freispiegelabflüsse sind die Trägheits- und die Schwerkraft wichtig, womit die Froudezahl massgebend wird. Insbesondere für Probleme mit vernachlässigbarer Reibung oder für kurze, turbulente Phänomene ist die Beschreibung nach Froude nahezu ideal (Le Méhauté 1976; 1990). Bild 2 zeigt den Wechselsprung als ein solch turbulentes Phänomen. Das Froudegesetz wird bei fast allen untersuchten Problemen im hydraulischen Versuchswesen angewendet. Die Froudezahl als massgebendes Kräfteverhältnis bedingt nun die Vernachlässigung aller übrigen Effekte, d.h., die Reynolds-, Weber- und Cauchyzahl müssen möglichst gross bzw. die Eulerzahl möglichst klein sein, damit ihr Einfluss gering bleibt. Als wichtige phy-

sikalische Grösse in der Hydraulik taucht die Froudezahl immer wieder auf. So ist sie nicht nur das oben definierte Kräfteverhältnis, sondern beschreibt auch den Fliesszustand und wird, ja muss, später auch wieder aus der Dimensionsanalyse resultieren. Das so genannte Ähnlichkeitsgesetz nach Froude besagt, dass die Froudezahl  $F$  der Strömung in Natur ( $N$ ) und im Modell ( $M$ ) gleich gross sein muss, entsprechend

$$F_N = V_N / (g_N L_N)^{1/2} = V_M / (g_M L_M)^{1/2} = F_M \quad (1)$$

Das Modell unterliegt der gleichen Erdbeschleunigung wie der Prototyp, womit  $g_N = g_M = g$  gilt. Die Gleichung (1) reduziert sich somit auf  $V_N / V_M = (L_N / L_M)^{1/2} = \lambda^{1/2}$ . Die Geschwindigkeit im Modell kann folglich mit Hilfe der Ähnlichkeit nach Froude in die Geschwindigkeit in Natur umgerechnet werden, wenn sie mit der Wurzel aus dem Massstabsfaktor  $\lambda^{1/2}$  multipliziert wird. In analoger Weise ergeben sich die Umrechnungsfaktoren für die Zeit  $t_N = \lambda^{1/2} t_M$ , für Kräfte  $K_N = \lambda^3 K_M$  und durch Kombination der Fläche und der Geschwindigkeit für Durchflüsse  $Q_N = \lambda^{5/2} Q_M$ . Diese Umrechnungsfaktoren werden als Modellgesetz bezeichnet, in diesem Fall als das Modellgesetz nach Froude. Für ein anderes dominantes Kräfteverhältnis würde sich entsprechend ein anderes Modellgesetz ergeben. So ergibt sich für das Modellgesetz nach Reynolds ein sehr ungünstiger Umrechnungsfaktor für die Geschwindigkeit  $V_N = \lambda^{-1} V_M$ . Ein nach Reynolds modelliertes Modell mit Massstabsfaktor  $\lambda = 10$  verlangt folglich eine zehnmal grössere Fliessgeschwindigkeit als der Prototyp. Das leicht anwendbare Modellgesetz nach Froude ist ein Grund für dessen häufige Anwendung. Die *Tabelle 1* fasst es zusammen.

### 3. Nachweis der Modellähnlichkeit

Vorhergehend wurde beschrieben, welche Kriterien erfüllt sein müssen, um Massstabseffekte klein zu halten. Nun wird

Grösse	Umrechnungsfaktor
Länge	$\lambda$
Fläche	$\lambda^2$
Volumen	$\lambda^3$
Zeit	$\lambda^{1/2}$
Geschwindigkeit	$\lambda^{1/2}$
Beschleunigung	1
Kraft	$\lambda^3$
Durchfluss	$\lambda^{5/2}$

**Tabelle 1. Modellgesetz nach Froude.**

gezeigt, wie man praktisch nachweisen kann, dass diese Kriterien tatsächlich zwischen Modell und Prototyp erfüllt sind und somit Modellähnlichkeit vorliegt. Die Modellähnlichkeit kann durch vier verschiedene Möglichkeiten erreicht werden (Le Méhauté 1976; Le Méhauté 1990; Hughes 1993; Martin und Pohl 2000), nämlich Ähnlichkeit durch

- Kalibrierung
- Differentialgleichungen
- Dimensionsanalyse
- Modellfamilie

Bei der Ähnlichkeit durch Kalibrierung wird das Modell mit Messwerten eines Prototypen verglichen. Bei guter Übereinstimmung der Resultate sind die Massstabseffekte entsprechend klein und es liegt Modellähnlichkeit vor. Die Voraussetzung für diese Methode sind verlässliche Prototypdaten, die infolge Beschaffungsschwierigkeiten oft fehlen. Liegen Abweichungen trotz kinematischer Ähnlichkeit vor, können die Massstabseffekte direkt quantifiziert werden. Bei einem anderen Versuchszustand lassen sich die Messwerte mit Vorsicht entsprechend korrigieren.

Die Ermittlung der Ähnlichkeit durch Differentialgleichungen basiert auf den zugrunde liegenden Gleichungen, welche einen hydraulischen Prozess beschreiben. Diese Gleichungen müssen bei Ähnlichkeit zwischen Modell und Prototyp identisch sein. Durch die Verhältnisse der einzelnen Terme in den Gleichungen zwischen Modell und Prototyp ergeben sich somit die Ähnlichkeitsbedingungen für die hydraulische Modellierung. Die Methode setzt voraus, dass die entsprechenden Gleichungen tatsächlich bekannt sind. Sie erlaubt die Bestimmung der relativen Wichtigkeit der Terme auf einen Prozess und Kriterien zur Verminderung grosser Massstabseffekte lassen sich formulieren. Zudem erlangt man einen physikalischen Einblick in ein Problem bei Anwendung dieser Methode (Le Méhauté 1990).

Die Dimensionsanalyse basiert auf dem  $\pi$ -Theorem von Buckingham (1914). Beinhaltet ein physikalisches Problem  $n$  unabhängige Variablen, dann lassen sich diese auf ein Produkt von  $n-r$  unabhängige, dimensionslose Variablen  $\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_{n-r}$  reduzieren. Dabei ist  $r$  die minimale Anzahl von Referenzdimensionen, die nötig sind, um die unabhängigen Variablen zu beschreiben. Mit anderen Worten können also alle physikalischen Grössen  $n$ , welche einen Einfluss auf ein Phänomen haben, mit einem Rechnungsverfahren in  $n-r$  dimensionslose Grössen  $\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_{n-r}$  umgewandelt werden, ohne dass physikalische

Information verloren geht. Um Modellähnlichkeit zu erreichen müssen diese dimensionslosen Verhältnisse  $\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_{n-r}$  im Modell gleich gross sein wie im Prototyp. Wie zu erwarten ist, resultieren daraus die Froude-, Reynolds-, Weber-, Cauchy- und Eulerzahl. Mit dieser Methode kann nicht auf die Grösse der Massstabseffekte geschlossen werden. Weiter hat zwar jede einzelne dieser dimensionslosen Grössen einen Einfluss auf den Prozess, aber man weiss nicht, wie wichtig er im Einzelnen ist. Dafür lassen sich die Resultate allgemeingültig darstellen. Durch die dimensionslosen Bemessungsdiagramme kürzen sich die Faktoren des Modellgesetzes (*Tabelle 1*), womit bei der Anwendung keine Kenntnisse über das Modellgesetz nötig sind, und der Versuchsaufwand wird durch die Reduktion der unabhängigen Variablen in  $n-r$  dimensionslose Variablen kleiner.

Bei der Ähnlichkeit durch Modellfamilie handelt es sich um einen Spezialfall der ersten Methode. Hier werden mindestens drei Modelle mit verschiedenen Massstabsfaktoren  $\lambda$  gebaut und die Resultate untereinander verglichen. Das Modell mit dem kleinsten Massstabsfaktor  $\lambda$  wird als Referenz verwendet und nimmt somit die Rolle des Prototypen ein. Weichen nun die entsprechend umgerechneten Resultate beim kleinsten Modell vom Referenzmodell ab, so sind dafür Massstabseffekte verantwortlich. Die Unsicherheit dieser Methode ist, ob das grösste Modell wirklich den Prototyp repräsentiert oder ob es selbst schon Massstabseffekten unterliegt. Zudem ist der Aufwand für diese Methode gross. Dafür kann der Bereich bestimmt werden, bei welchem inkorrekt modellierte Kräfteverhältnisse einen vernachlässigbaren Einfluss auf den Prozess haben. Und schliesslich sind die Massstabseffekte zwischen den verschiedenen Modellen direkt quantifizierbar.

### 4. Praxisrelevanz

Das korrekte Vorgehen zur Vermeidung von bedeutenden Massstabseffekten wäre der Nachweis, dass die nicht exakt modellierten Kräfteverhältnisse wie Reynolds-, Weber- oder Cauchyzahl genügend gross bzw. die Eulerzahl genügend klein sind, damit ihr Einfluss auf das untersuchte Phänomen vernachlässigbar bleibt. Es wäre für eine einzelne Untersuchung eines Prototyp unverhältnismässig, eine Modellfamilie zu bauen. Auf Prototypdaten zwecks Kalibrierung kann oft nicht zurückgegriffen werden. Eine Dimensionsanalyse ist in diesem Fall auch nicht sinnvoll, da keine allgemeingültige Lösung gesucht wird. Deshalb



stützt man sich auf Erfahrungswerte, beispielsweise eines Grenzmodellmassstabs  $1:\lambda_G$  oder eine minimale Wassertiefe. *Tabelle 2* gibt eine Auswahl typischer Erfahrungswerte mit Mindestabmessungen und zugehörige Literaturangaben an.

Ein Grenzmodellmassstab alleine ist aber keine ausreichende Bedingung, um Zustände mit vernachlässigbaren Massstabseffekten zu beschreiben. Es muss bei einem Grenzmodellmassstab immer auch angegeben werden, auf welchen Prototyp er sich bezieht. Ein Wechselsprung im Anschluss an ein Flusswehr oder im kleinen Gerinne sind beides Prototypen, sie verhalten sich aber unterschiedlich. Ein Grenzmodellmassstab ermittelt relativ zum Wechselsprung im Anschluss an ein Flusswehr wird nicht auf ein kleines Gerinne anwendbar sein. Dem wurde mit der Spalte Prototyp in *Tabelle 2* versucht

Rechnung zu tragen. Natürlich kann man trotz Einhaltung dieser Richtwerte noch Zustände mit grossen Massstabseffekten erreichen. Bei einem Hafenmodell werden Wellen mit einer Wassertiefe  $h < 0,02$  m oder einer Wellenperiode  $T < 0,35$  s trotz Massstab 1:50 von der Oberflächenspannung beeinflusst (Le Méhauté 1976).

Eine Herausforderung ist die Modellierung von Prozessen mit Wasser-Luft-Gemischen. Die Luftblasen lassen sich nicht dem Massstab entsprechend verkleinern (Chanson 1996). Sie werden daher meist ähnliche Abmessungen haben wie im Naturzustand. Dies muss aber noch nicht zwangsläufig heissen, dass deshalb beträchtliche Massstabseffekte auftreten. Der Lufteintrag im Modell wird zwar unterschätzt und die Luft entweicht auch wieder schneller, doch z.B. die Energieumwandlung infolge Lufteintrag im *Bild 2* kann

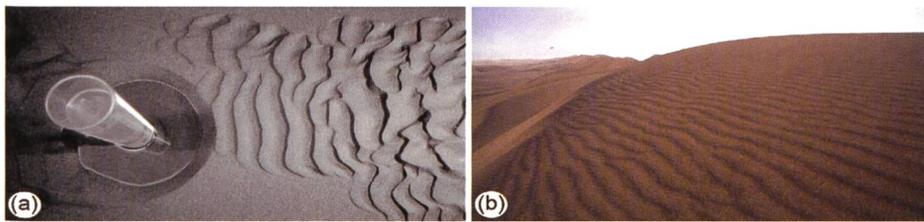
trotz unterschiedlichem Erscheinungsbild annähernd richtig modelliert werden, da sie ebenfalls dem Froudegesetz gehorcht und dadurch unverzerrt bleibt (Le Méhauté 1976; 1990). Die Massstabseffekte können folglich für verschiedene Teilaspekte eines Prozesses unterschiedlich gross sein. In *Bild 1a* kann der Durchfluss gut modelliert werden, wogegen das Modell eher ungeeignet wäre, um die Luftkonzentration im Strahl zu untersuchen.

Im Folgenden wird aufgezeigt, wie sich bedeutende Massstabseffekte kompensieren lassen:

- Im offenen Gerinne werden die Massstabseffekte infolge Wandrauheit oft mit glatterer Berandung kompensiert, als es die geometrische Ähnlichkeit verlangt. Dadurch wird im Moody-Diagramm trotz unterschiedlicher Reynoldszahl zwischen Modell und Prototyp ein möglichst identischer Reibungskoeffizient erreicht. Da bei kleinerer Reynoldszahl der Reibungskoeffizient zunimmt, kann als Gegenmassnahme die relative Wandrauheit im Modell abgemindert werden (Kobus 1980). Dies ist aber nur in einem gewissen Bereich vom Moody-Diagramm möglich (Martin und Pohl 2000).
- Beim Geschiebetransport kann das in Natur nur einige Millimeter grosse Korn nicht dem Massstab entsprechend im Modell skaliert werden, da Korndurchmesser  $d_g < 0,22$  mm im Modell anderen Gesetzmässigkeiten folgen (Zarn 1992). Dadurch ist die geometrische Ähnlichkeit verletzt (Ivicsics 1978). Zudem können sich infolge von Massstabseffekten andere Sohlenformen und auch ein anderer Geschiebetransport einstellen (Shields Effekt). Um diese Effekte zu kompensieren, wird bei kleinen Modellen eine Kornverteilungsumrechnung durchgeführt (Zarn 1992). Zudem wird im Modell oft die Sedimentdichte verkleinert. Damit sich das Korn strömungstechnisch gleich verhält, darf als Ausgleich der Korndurchmesser vergrössert werden.
- Manchmal werden Flussmodelle überhöht gebaut, um grossen Massstabseffekten entgegenzuwirken, d.h., der Höhenmassstabsfaktor wird im Verhältnis zum Breiten- und Längenmassstabsfaktor kleiner gewählt. Dies kann erforderlich werden bei einer sonst zu kleinen Wassertiefe, bei welcher die Oberflächenspannung dominant würde. Dabei wird die geometrische Ähnlichkeit bewusst zugunsten verbesserter Bewegungsabläufe auf-

Objekt	Prozess	Modelleigenschaften	Prototyp	Literatur
Breitkroniger Überfall	Durchflussmessung	Überfallhöhe $\geq 0,05$ bis $0,07$ m	Wehrlänge $0,15$ bis $5$ m, Wehrbreite $4,88$ m	Hager (1994)
Dammbruchwelle	Sprödversagen, Talsperre im prismatischen Rechteckskanal	Ruhewassertiefe $\geq 0,30$ m	Keine Angaben	Lauber und Hager (1998)
Damm mit Skisprung	Seitliches Überfallwehr, Schussrinne und Skisprung	Massstab 1:30	Obere Siebertalsperre, Dammhöhe $90$ m, $Q_{Dim} = 140$ m <sup>3</sup> /s	Bretschneider (1980)
Lockale Gerinneaufweitung	Geschiebetransport	Massstab 1:55, $d_g > 0,22$ mm und Anpassung Kornverteilung	$d_m = 0,043$ m, $d_{90} = 0,096$ m	Zarn (1992)
Scharfkantiges Überfallwehr	Strahlverlauf	Überfallhöhe $\geq 0,045$ m	Kein Prototypvergleich (Modellfamilie)	Ghetti und D'Alpaos (1977)
Schussrinne	Geschwindigkeitsverteilung	Massstab $\geq 1:25$	Kein Prototypvergleich (Modellfamilie)	Vischer et al. (1982)
Schussrinne	Lufteintrag von der Wasseroberfläche	Massstab $\geq 1:4$	Keine Angaben	Vischer et al. (1982)
Schussrinne	Sohlenbelüftung	Massstab $\geq 1:8$ bis $1:15$	Keine Angaben	Pinto (1984)
Skisprung	Strahlwurfverlauf	Zuflusswassertiefe $\geq 0,04$ m	Ohne Prototypvergleich (Modellfamilie)	Heller et al. (2005)
Treppenschussrinne	Fliessgeschwindigkeit Wasser-Luft-Gemisch	Massstab $\geq 1:10$ bis $1:15$	Stufenhöhe $0,6$ m, spez. Abfluss max. $20$ m <sup>2</sup> /s	Boes (2000)
Wasserwelle	Hafenmodell	Typischer Massstab 1:50 bis 1:150	Keine Angaben	Hughes (1993)
Wasserwelle	Kräfte auf Festkörper	Typischer Massstab 1:10 bis 1:50	Keine Angaben	Hughes (1993)
Wasserwelle	Krafteinwirkung auf Untergrund beim Brechvorgang	Wellenhöhe $\geq 0,50$ m	Kein Prototypvergleich (Modellfamilie)	Skladnev und Popov (1969)
Wasserwelle	Rutscherzeugte Impulsquelle	Ruhewassertiefe $\geq 0,200$ m	Lituya Bay und Modellfamilie	Heller et al. (2007a)
Wasserwelle	Schiffsbewegung	Typischer Massstab 1:80 bis 1:120	Keine Angaben	Hughes (1993)
Wechselsprung	Verhältnis konjugierte Wassertiefen $h_2/h_1$	$Q/b > 0,1$ m <sup>2</sup> /s; für $F_1 < 10$ , $h_1/b < 0,1$	Kein Prototypvergleich (Modellfamilie)	Hager und Bremen (1989)
Wehr	Kolkabildung im Tosbecken	Massstab 1:27,5	Lechstaustufe 2, $Q_{Dim} = 1250$ m <sup>3</sup> /s	Bretschneider (1980)
Wildbach	Sohlenmorphologie	Massstab 1:10 bis 1:20	Steinibach, $d_m = 20$ cm, $d_{90} = 0,52$ m, $d_{max} = 0,90$ m, Gefälle 3-13%	Weichert (2006)
Wirbel mit Luftaufnahme	Fliessbedingungen	Bemessungsdiagramme	Kein Prototypvergleich (Modellfamilie)	Anwar et al. (1978)

**Tabelle 2. Auswahl typischer Modelleigenschaften, um Massstabseffekte zu minimieren mit  $b$  = Kanalbreite,  $d_m$  = Korndurchmesser bei 50 Gewichtsprozent,  $d_{90}$  = Korndurchmesser bei 90 Gewichtsprozent,  $d_{max}$  = maximaler Korndurchmesser,  $d_g$  = Korndurchmesser,  $F_1$  = Froudezahl vor dem Wechselsprung,  $h_1, h_2$  = konjugierte Wassertiefen vor bzw. nach dem Wechselsprung,  $Q$  = Durchfluss,  $Q_{Dim}$  = Dimensionierungsdurchfluss.**



**Bild 3. Ähnliche Strukturen im Sand entstehen durch das Fluid (a) Wasser: Riffel im hydraulischen Modell zur Kolkuntersuchung an Brückenpfeilern an der VAW (Bild W.H. Hager), und (b) Luft: Riffel auf Sanddünen in Swakopmund, Namibia (Bild <http://www.kapstadt.org>).**

gegeben. Die Vorteile sind eine höhere Fließgeschwindigkeit, eine höhere Reynoldszahl und somit bessere Ähnlichkeit, eine Verbesserung der relativen Messgenauigkeit und eine Verringerung der Versuchszeit. Die Modellräuigkeit muss dann aber durch Kalibrierung ermittelt werden (Martin und Pohl 2000).

- Anstelle von Wasser kann ein anderes Fluid verwendet werden, um beispielsweise andere Messverfahren anzuwenden oder um Reibungseffekte zu schmälern. Als Folge ändert sich die kinematische Viskosität beispielsweise in der Reynoldszahl. Manchmal wird Luft anstelle von Wasser eingesetzt. Dabei muss beachtet werden, dass die gegenüber Wasser kompressible Luft nicht komprimiert wird und somit zusätzliche Massstabeffekte auftreten. Deshalb darf die Luftgeschwindigkeit etwa im Falle eines Wechselsprungs nach Bild 2 nicht höher als 60–90 m/s betragen (Rouse et al. 1959). Zwei verschiedene Fluide erzeugen nach Bild 3 ähnliche Oberflächenstrukturen. Das Bild 3a zeigt einen Kolk um einen Brückenpfeiler und die anschliessenden Riffel geformt durch Wasser im hydraulischen Modell an der VAW. Im Bild 3b sind ähnliche Riffel auf einer Sanddüne unter Windeinfluss in Namibia entstanden. Ähnliche Strukturen lassen sich auch auf Schnee durch Windbelastung erkennen. Das Fluid kann aber auch verändert werden, indem dem Wasser z.B. Seife beigemischt wird. Die Oberflächenspannung wird dadurch verringert, womit die Weberzahl entsprechend grösser wird.
- Manchmal wird aus wirtschaftlichen oder Platzgründen bewusst ein Modellmassstab mit nicht vernachlässigbaren Massstabeffekten gebaut. Die Resultate werden dann entsprechend korrigiert, so z.B. bei Modellen von grossen Hafenanlagen.

Zu den beschriebenen Massstabs-

effekten muss in jedem Fall noch zusätzlich hinterfragt werden, ob irgendwelche weiteren Modellunzulänglichkeiten zu Abweichungen zwischen Modell und Prototyp führen. Beispielsweise der Einfluss erhöhten Luftwiderstands in Natur für einen Wasserstrahl (Heller et al. 2007b) oder die Verwendung von Süsswasser anstelle von Salzwasser (Le Méhauté 1976).

### 5. Beispiel rutscherzeugte Impulswellen

Anhand eines hydraulischen Modells zur Untersuchung von rutscherzeugten Impulswellen wird gezeigt, wie Modellähnlichkeit erreicht wird und Massstabeffekte vernachlässigbar klein gehalten werden. Impulswellen entstehen durch in einen Wasserkörper eintauchende Fels-, Erd-, Schnee- oder Eisrutschungen. Dieses Phänomen beinhaltet drei Phasen, nämlich Feststoff, Wasser und Luft und wird an der VAW schon während Jahren experimentell untersucht. Das hydraulische Modell basiert auf dem Modellgesetz nach Froude und erlaubt, die Entstehung von Impulswellen und ihre Ausbreitung im Wellenkanal zu erforschen. Der Kanal ist 11 m lang, 0,5 m breit und 1 m tief. Die granulare Rutschmasse wird pneumatisch in den Wasserkörper beschleunigt. Mit kapazitiven Wellenmesspegeln werden die Wellenprofile an verschiedenen Positionen entlang der Wellenkanalachse aufgezeichnet. Eine detaillierte Beschreibung der Versuchsanlage findet sich in Fritz (2002). Um Modellähnlichkeit zu erreichen, wurden mehrere der oben vorgestellten Methoden angewendet. Dank Freispiegelabfluss hat die Druckkraft einen vernachlässigbaren Einfluss. Die Cauchyzahl ist irrelevant, da der Wasserkörper für die untersuchten Rutscheintauchgeschwindigkeiten als inkompressibel angenähert werden kann.

(a) Ähnlichkeit durch Kalibrierung  
Für rutscherzeugte Impulswellen im Eintauchbereich liegen keine angemessenen Naturdaten wie beispielsweise Wellenhöhen vor. Jedoch lässt sich die Auflaufhöhe der Wasserwelle am Gegenufer nach

einem Ereignis oft an der Vegetation ablesen. So entwurzelte eine 1958 durch einen Rutsch erzeugte Impulsquelle in der Lituya Bay, Alaska, am Gegenufer Bäume bis auf eine Höhe von 524 m über der Ruhewasserslage direkt gegenüber der Rutschachse. Diese Auflaufhöhe konnten Fritz et al. (2001) mit dem angepassten Modell und einem Modellmassstab 1:675, bzw. einer Ruhewassertiefe von  $h = 0,18$  m befriedigend nachbilden.

(b) Ähnlichkeit durch Differentialgleichungen

Diese Methode wurde nicht angewendet, da die Gleichungen für dieses 3-Phasen-Phänomen nicht vollständig bekannt sind.

(c) Ähnlichkeit durch Dimensionsanalyse  
Eine Herleitung der massgebenden dimensionslosen Grössen mit Hilfe der Dimensionsanalyse ist hier sinnvoll, da die Resultate allgemeingültig und nicht nur für einen Prototypen dargestellt werden sollen. Für das Vorgehen wird auf Buckingham (1914), Yalin (1971), Novak und Cabelka (1981) oder Spurk (1992) verwiesen; hier werden lediglich die wichtigsten Schritte aufgezeigt. Das Entscheidende dieser Methode ist die Berücksichtigung aller physikalischen Grössen, die einen Einfluss auf die Impulswellenerzeugung haben. Das Bild 4 zeigt schematisch eine Rutschmasse, welche die Impulsquelle im Wasserkörper rechts zur Folge hat.

Sieben Einflussparameter auf die Impulswellengenerierung können im Modell weitestgehend unabhängig voneinander variiert werden: die Ruhewassertiefe  $h$  [m], die Rutscheintauchgeschwindigkeit  $V_s$  [m/s], die Rutschmächtigkeit  $s$  [m], das Rutschvolumen  $V_s$  [m<sup>3</sup>], die Rutschdichte  $\rho_s$  [kg/m<sup>3</sup>], der Korndurchmesser  $d_g$  [m] und der Hangwinkel  $\alpha$  [°]. Neben diesen sieben Einflussgrössen haben ebenfalls die Wasserdichte  $\rho_w$  [kg/m<sup>3</sup>], die Erdbeschleunigung  $g$  [m/s<sup>2</sup>], der Abstand  $x$  [m] vom Ursprung sowie die Zeit  $t$  [s] einen Einfluss auf die gesuchten Grössen wie die Wasserauslenkung  $\eta$  oder die Maximalamplitude  $a_M$ . Sie wurden deshalb ebenfalls in die Analyse aufgenommen. Nicht berücksichtigt wurde die vertikale Koordinate  $z$  sowie die Rutschmasse  $m_s$ , da sich letztere aus dem Produkt  $\rho_s \cdot V_s$  ergibt und somit keine unabhängige Variable ist. Die insgesamt  $n = 11$  unabhängigen Variablen weisen  $r = 3$  unterschiedliche Referenzdimensionen auf, nämlich Länge [m], Masse [kg] und Zeit [s], woraus  $j = n - r = 11 - 3 = 8$  dimensionslose Variablen resultieren. Nun müssen insgesamt  $r$  der  $n$  unabhängigen Variablen ausgewählt werden, die alle drei

Referenzdimensionen, aber verschiedene Kombinationen daraus beinhalten. Hier wurden die Grössen  $h$ ,  $g$  und  $\rho_w$  ausgewählt. Die gesuchten dimensionslosen Variablen  $\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_8$  ergeben sich nun aus der Gegenüberstellung der Referenzdimensionen. Das Vorgehen wird am Beispiel der Rutscheintauchgeschwindigkeit  $V_s$  veranschaulicht:

$$\pi_1 = V_s h^\alpha g^\beta \rho_w^\gamma$$

$$[-] = [m/s][m]^\alpha [m/s^2]^\beta [kg/m^3]^\gamma \quad (2)$$

Aus der Gleichsetzung der Referenzdimensionen ergibt sich das Gleichungssystem

$$[m]: 0 = +1 + 1\alpha + 1\beta - 3\gamma$$

$$[s]: 0 = -1 + 0\alpha - 2\beta + 0\gamma$$

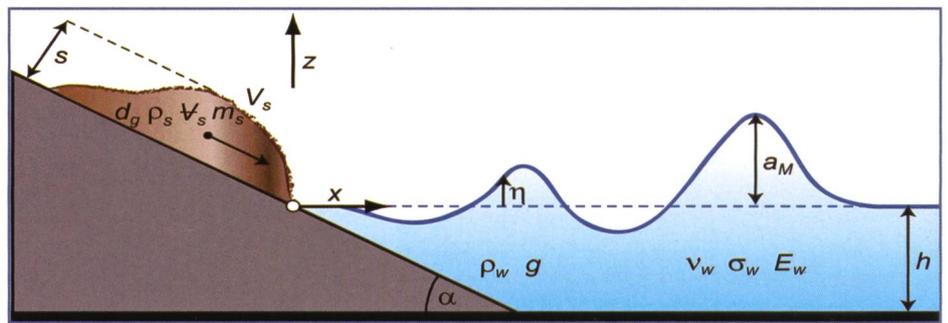
$$[kg]: 0 = +0 + 0\alpha + 0\beta + 1\gamma$$

womit sich die gesuchten Exponenten zu  $\alpha = -1/2$ ,  $\beta = -1/2$  und  $\gamma = 0$  ergeben. Natürlich resultiert somit aus Gleichung (2) die Rutsch-Froudezahl  $\pi_1 = V_s/(gh)^{1/2}$ , also das Verhältnis der Rutschgeschwindigkeit zur Wellenausbreitungsgeschwindigkeit. Die übrigen dimensionslosen Variablen ergeben sich analog aus einer anderen Kombination von  $h$ ,  $g$  und  $\rho_w$ . Dies sind die relative Rutschmächtigkeit  $\pi_2 = S = s/h$ , das relative Rutschvolumen  $\pi_3 = V = V_s/(bh^2)$ , die relative Rutschdichte  $\pi_4 = D = \rho_s/\rho_w$ , die Relativedistanz  $\pi_5 = X = x/h$ , der relative Korndurchmesser  $\pi_6 = D_g = d_g/h$ , die relative Zeit  $\pi_7 = T_r = t/(gh)^{1/2}$  sowie der Hangwinkel  $\pi_8 = \alpha$ , welcher bereits dimensionslos ist. Im Nenner vom relativen Rutschvolumen  $V$  wurde ein  $h$  durch die Kanalbreite  $b$  ersetzt, um die nicht variierte Kanalbreite zu berücksichtigen.

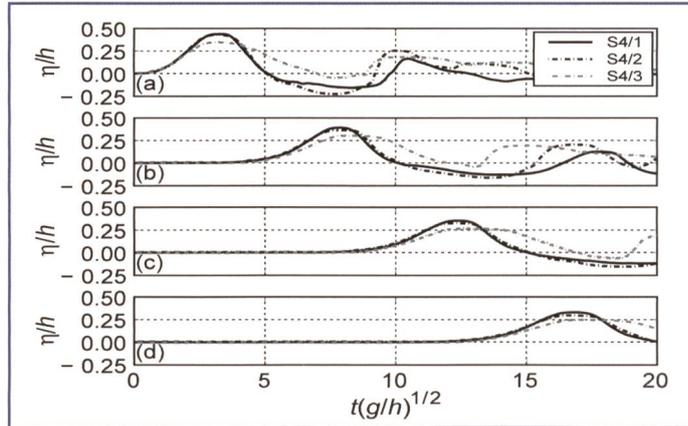
Würde die kinematische Viskosität  $\nu_w$ , die Oberflächenspannung  $\sigma_w$  und der Elastizitätsmodul  $E_w$  vom Wasser in die Analyse einbezogen, so resultiert die Reynolds-, die Weber- sowie die Cauchyzahl.

Um Modellähnlichkeit zwischen hydraulischem Modell und Prototyp zu erreichen, müssen für einen analogen Zustand die acht dimensionslosen Grössen jeweils den gleichen Wert im Modell und in der Natur annehmen. Um die Massstabeffekte zu quantifizieren, wurde die vierte Methode angewendet.

(d) Ähnlichkeit durch Modellfamilie  
Aussagen von Massstabeffekten mit Hilfe von Modellfamilien lassen sich mit mindestens drei verschiedenen grossen Modellen, welche geometrisch ähnlich sind, machen. Dies war durch verschiedene Umbauten der VAW-Versuchsanlage möglich. Insgesamt 18 Versuche bzw. sieben verschiedene Modellfamilien wurden untersucht, wobei innerhalb einer Modellfamilie die unter (c)



**Bild 4. Definitionsskizze zur Impulswellengenerierung mit den geometrischen Grössen sowie den Rutsch- und Wassereigenschaften (nach Heller et al. 2007a).**



**Bild 5. Normierte Wellenprofile  $\eta/h$  in Funktion der relativen Zeit  $t/(gh)^{1/2}$  bei drei verschiedenen Modellmassstäben der Versuchsfamilie mit S4/1:  $h = 0,400$  m, S4/2:  $h = 0,200$  m und S4/3:  $h = 0,100$  m (Heller et al. 2007a).**

ermittelten dimensionslosen Grössen praktisch konstant gehalten wurden. Damit war die Ähnlichkeit innerhalb einer Modellfamilie gewährleistet. So reduzierte sich der ursprüngliche Abstand 1,00 m zwischen den einzelnen Wellenmesspegel zu 0,50 m bzw. zu 0,25 m bei Verzwei- bzw. Vervielfachung des Massstabsfaktors  $\lambda$ . Weiter musste beispielsweise gemäss dem Modellgesetz nach Froude in Tabelle 1 das Rutschvolumen bei halbem Modellmassstab um den Faktor 1/8 verkleinert werden.

Das Ziel dieser Untersuchung war die Ermittlung einer Grenz-Reynolds-, bzw. Grenz-Weberzahl, bei welcher die Massstabeffekte bezüglich der Maximalamplitude  $a_M$  vernachlässigbar sind. Das Bild 5 zeigt die normierten Wellenprofile  $\eta/h$  in Funktion der relativen Zeit  $T_r = t/(gh)^{1/2}$  der Versuchsserie S4 bei drei verschiedenen Modellmassstäben. Die Wellenprofile (a) bis (d) wurden an verschiedenen Positionen im Wellenkanal aufgenommen, wobei (a) am nächsten beim Rutscheintauchbereich lag. Dabei ist S4/1 der Referenzversuch mit einer Ruhewassertiefe  $h = 0,400$  m, S4/2 weist entsprechend einen halben Modellmassstab  $\lambda = 1:2$  bzw.  $h = 0,200$  m und S4/3 einen viertel Modellmassstab  $\lambda = 1:4$  bzw.  $h = 0,100$  m auf. Das Profil der massgebenden ersten Wellenauslenkung von S4/2 folgt dem Referenzversuch S4/1, wogegen S4/3 als Folge von Massstabeffekten einen dazu gedämpften Verlauf aufweist.

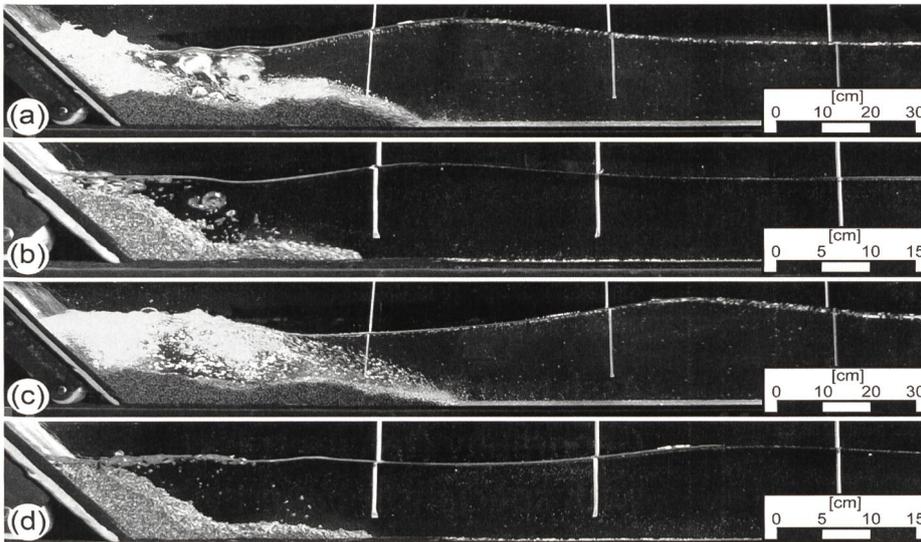
Als charakteristische Geschwin-

digkeit wurde die Flachwasser-Wellengeschwindigkeit  $(gh)^{1/2}$  und als charakteristische Länge die Ruhewassertiefe  $h$  in die Reynolds- und Weberzahl eingesetzt. Die Reynoldszahl ist somit durch  $R_i = g^{1/2} h^{3/2} / \nu_w$  und die Weberzahl durch  $W_i = \rho_w g h^2 / \sigma_w$  definiert. Massstabeffekte sind vernachlässigbar klein ( $< 2\%$ ) bezogen auf die Maximalamplitude  $a_M$ , falls  $R_i \geq 300\,000$  und gleichzeitig  $W_i \geq 5000$  gilt, was einer Wassertiefe  $h \geq 0,200$  m entspricht (Heller et al. 2007a).

In Bild 6 sind Momentaufnahmen von zwei Versuchen mit  $h = 0,200$  m bzw.  $h = 0,100$  m bei ungefähr gleicher relativen Zeit  $T_r$  zwischen (a) und (b), bzw. (c) und (d) dargestellt. Dabei wurden Bild 6b und Bild 6d um den Faktor zwei vergrössert. Die Rutschmasse ist bereits eingetaucht und hat eine Impulswelle erzeugt. Als Folge der Oberflächenspannung ist der Luftpfeil- und Luftausstrag unterschiedlich zwischen Bild 6a und Bild 6b bzw. Bild 6c und Bild 6d.

## 6. Schlussfolgerungen

Massstabeffekte treten im hydraulischen Modell immer auf, da gleichzeitig nur ein Kräfteverhältnis dem Prototyp entsprechend richtig modelliert werden kann. Die restlichen Kräfteverhältnisse führen zu Massstabeffekten, einer Verzerrung der Resultate gegenüber dem Prototyp. Diese Effekte werden jedoch vernachlässigbar, falls die Einflüsse der inkorrekt modellierten Kräfteverhältnisse klein gehalten werden. Mithilfe eines Modellgesetzes können die Modellmesswerte auf



**Bild 6. Unterschiedlicher Luftein- und Luftaustrag bei zwei verschiedenen Modellmassstäben mit Froudezahl  $F = 2,5$  und näherungsweise gleicher relativer Zeit  $T_r$  zwischen (a) Reynoldszahl  $R_{11} = 289329$ , Weberzahl  $W_{11} = 5345$  und (b)  $R_{12} = 103415$ ,  $W_{12} = 1336$  bzw. (c) und (d) (Heller et al. 2007a).**

den Prototyp umgerechnet werden. In den meisten Fällen und insbesondere für Freispiegelabfluss ist das Modellgesetz nach Froude relevant. Zur Ermittlung der Modellähnlichkeit ist oft eine Kombination von vier vorgestellten Verfahren nötig. Am Beispiel rutscherzeugter Impulswellen wurde die Ähnlichkeit durch eine Kalibrierung, Dimensionsanalyse und durch Modellfamilien nachgewiesen.

Dieses aufwändige Verfahren muss aber dank Erfahrungswerten nur selten angewendet werden. Anstelle einer Grenzgrösse für jedes inkorrekt modellierte Kräfteverhältnis wird in der Praxis vereinfacht meist ein minimaler Modellmassstab bzw. eine Grenz wassertiefe gefordert. Der Tabelle 2 können solche Erfahrungswerte entnommen werden. Oft wird die geometrische Modellähnlichkeit bewusst aufgegeben, um grosse Massstabseffekte zu kompensieren. Die Modellierung von Geschiebetransport oder Mehrphasenströmungen im hydraulischen Modell ist nur mit Einschränkungen möglich.

#### Danksagung

Der Autor möchte sich bei Prof. Dr. W.H. Hager für die Durchsicht des Manuskripts und die vielen Anregungen bedanken, die zur Verbesserung des Artikels beigetragen haben.

#### Literatur

Anwar, H.O., Weller, J.A., Amphlett, M.B. (1978): Similarity of free-vortex at horizontal intake. *Journal of Hydraulic Research*, 16(2), 95–105.  
 Boes, R.M. (2000): Scale effects in modelling two-phase stepped spillway flow. In *Hydraulics of stepped spillways*, 53–60, Minor, H.-E., Hager, W.H., eds. Balkema, Rotterdam.

Bretschneider, H. (1980): Models of hydraulic structures: discharge conditions, energy dissipation, erosion. In *Hydraulic Modelling*, Bulletin 7, 18–204, Kobus, H., ed. Paul Parey, Hamburg.

Buckingham, E. (1914): On physically similar systems – Illustrations of the use of dimensional equations. *Physical Review*, 4, 345–376.

Chanson, H. (1996): Air bubble entrainment in free-surface turbulent shear flows. Academic Press, San Diego.

Fritz, H.M., Hager, W.H., Minor, H.-E. (2001): Lituya bay case: rockslide impact and wave run-up. *Science of Tsunami Hazards*, 19(1), 3–22.

Fritz, H.M. (2002): Initial phase of landslide generated impulse waves. VAW Mitteilung 178, Minor, H.-E., ed. ETH Zürich, Zürich.

Ghetti, A., D'Alpaos, L. (1977): Effets des forces de capillarité et de viscosité dans les écoulements permanents examinées en modèle physique. 17th IAHR Congress, Baden-Baden, 389–396.

Hager, W.H. (1994): Breitkroniger Überfall. *Wasser, Energie, Luft*, 86(11/12), 363–369.

Hager, W.H., Bremen, R. (1989): Classical hydraulic jump: sequent depths. *Journal of Hydraulic Research*, 27(5), 565–585.

Heller, V., Hager, W.H., Minor, H.-E. (2005): Ski jump hydraulics. *Journal of Hydraulic Engineering*, 131(5), 347–355.

Heller, V., Hager, W.H., Minor, H.-E. (2007a): Scale effects in subaerial landslide generated impulse waves. Experiments in Fluids (provisorsch akzeptiert).

Heller, V., Hager, W.H., Minor, H.-E. (2007b): Hydraulics of ski jumps. 32nd IAHR Congress, Venedig (akzeptiert).

Hughes, S.A. (1993): Physical models and laboratory techniques in coastal engineering. *Advanced Series on Ocean Engineering* 7. World

Scientific, London.

Ivicsics, L. (1978): *Hydraulic models*. Vzdok, Budapest.

Kobus, H. (1980): Fundamentals. In *Hydraulic modelling*, Bulletin 7, 1–23, Kobus, H., ed. Paul Parey, Hamburg.

Lauber, G., Hager, W.H. (1998): Experiments to dambreak wave: horizontal channel. *Journal of Hydraulic Research*, 36(3), 291–307.

Le Méhauté, B. (1976): *An introduction to hydrodynamics and water waves*. Springer, New York.

Le Méhauté, B. (1990): Similitude. In *Ocean engineering science, the sea*, 955–980, Le Méhauté, B., Hanes, D.M., eds. Wiley, New York.

Martin, H., Pohl, R. (2000): *Technische Hydro-mechanik* 4. Verlag für Bauwesen, Berlin.

Novak, P. (1984): Scaling factors and scale effects in modelling hydraulic structures. *Symposium on scale effects in modelling hydraulic structures*, Kobus, H., ed. Technische Akademie, Esslingen, 0(3), 1–5.

Novak, P., Cabelka, J. (1981): *Models in hydraulic engineering*. Pitman, Boston.

Pinto, N.L. de S. (1984): Model evaluation of aerators in shooting flow. *Symposium on scale effects in modelling hydraulic structures*, Kobus, H., ed. Technische Akademie, Esslingen, 4(2), 1–6.

Rouse, H., Siao, T.T., Nagaratnam, S. (1959): Turbulence characteristics of the hydraulic jump. *Trans. ASCE*, 124, 926–966.

Skladnev, M.F., Popov, I.Y. (1969): Studies of wave loads on concrete slope protections of earth dams. *Symposium Research on wave action*, Delft, The Netherlands, 2(7), 1–11.

Spurk, J.H. (1992): *Dimensionsanalyse in der Strömungslehre*. Springer, Berlin.

Vischer, D., Volkart, P., Sigenthaler, A. (1982): Hydraulic modelling of air slots in open chute spillways. *Proc. Conf. Hydraulic modelling of civil engineering structures*, Coventry, 239–252.

Weichert, R. (2006): Bed morphology and stability of steep open channels. VAW Mitteilung 192, Minor, H.-E., ed. ETH Zürich, Zürich.

Yalin, M.S. (1971): *Theory of hydraulic models*. Macmillan, London.

Zarn, B. (1992): Lokale Gerinneaufweitung – eine Massnahme zur Sohlenstabilisierung der Emme bei Utzenstorf. VAW Mitteilung 118, Vischer, D., ed. ETH Zürich, Zürich.

#### Anschrift des Verfassers:

Valentin Heller, Dipl. Bau-Ing. ETH, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich  
 CH-8092 Zürich, heller@vaw.baug.ethz.ch  
 Tel. +41 (0)44 632 78 14



Echolot

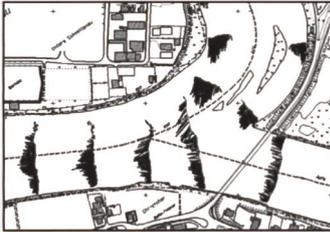


Georadar

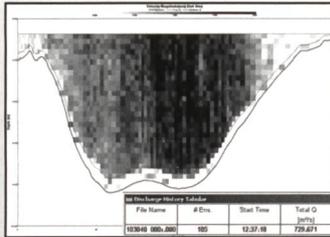


Messsysteme

... Strömungsmessungen



Strömungsvektoren



Geschwindigkeiten und Durchfluss

Ingenieurvermessung • GPS • Hydrographie • Georadar • autom. Messsysteme • Gleissmesswagen • Architekturvermessung • statisches und dynamisches Laserscanning • Archäologie

terra vermessungen ag, Obstgartenstr. 7, 8006 Zürich  
Tel. 043 255 20 30, Fax 043 255 20 31, terra@terra.ch

Fachinformationen auf [www.terra.ch](http://www.terra.ch)



Transport und Versetzen Erdgasleitung, Rohrgewicht 12 Tonnen

## Wir lösen Ihr Transportproblem

**Wir montieren und betreiben  
Materialeilbahnen  
bis 20 Tonnen Nutzlast**

**Zingrich**

**Cabletrans GmbH  
3714 Frutigen**

Telefon 033 671 32 48  
Fax 033 671 22 48  
Natel 079 208 90 54  
info@cabletrans.com  
www.cabletrans.com



## University of Zurich

The Faculty of Science of the University of Zurich invites applications for the position of

### Assistant Professor of Physical Geography (tenure track) with specialisation in the field of water/climate impact

The successful candidate will have scientific expertise in the field of climate impacts on the water cycle and the potential to build up corresponding transdisciplinary research as part of national and international programs. She or he will have the interest and ability to measure and numerically model reactions of complex systems (atmospheric, surface and subsurface water) under growing disequilibrium in nature and increasing human demands.

The newly appointed professor will contribute to building up a teaching program in climate-related hydrology at the undergraduate, graduate and postgraduate levels and will lead one of the divisions of the Department of Geography. Close collaboration within the Department as well as with the ETH Zurich is expected. The Department of Geography of the University of Zurich is the largest geography department in Switzerland. Its Physical Geography chairs are well established internationally and so far offer MSc and PhD specialisations in glaciology, geomorphology, soil science and biogeography. See also <http://www.geo.uzh.ch> and <http://www.geo.uzh.ch/phys>.

The position will commence in spring to autumn 2008. Applications received by the 31<sup>st</sup> July 2007 will be guaranteed full consideration, but the committee will be open to late applications of exceptional quality and will search until the position is filled. Applications, including a curriculum vitae, a list of publications and an outline of current and future research plans should be sent to the Dean of the Faculty of Science at the following address: Prof. D. Wyler, Dean, Faculty of Science, University of Zurich, Winterthurerstrasse 190, CH-8057 Zurich, Switzerland. The full application package should also be submitted in a single PDF file to [jobs@mnf.uzh.ch](mailto:jobs@mnf.uzh.ch).

All inquiries about this position should be directed to Prof. Wilfried Haeblerli, [haeblerli@geo.uzh.ch](mailto:haeblerli@geo.uzh.ch), Department of Geography, University of Zurich, Winterthurerstrasse 190, CH-8057 Zurich, Switzerland. The University of Zurich is an equal opportunity employer. Applications from women are particularly encouraged.