



# Large Eddy Simulation – Ein Beitrag zur Auflösung der turbulenten Strömungsstrukturen in technischen Fischaufstiegshilfen

Markus Grünzner, Peter Rutschmann

## Kurzfassung

Die Wiederherstellung der ökologischen Durchgängigkeit ist eine wahre Herausforderung an den Wasserbau-Ingenieur. Nicht nur das Fließgewässer im Allgemeinen ist entscheidend, sondern vor allem die „ökologischen Engstellen“ an technischen Querbauwerken stellen, technisch gesprochen, eine Drossel für die Natur dar. Mit Hilfe moderner numerischer Simulationstechniken, haben Wasserbauer heute die Möglichkeit die Strömungscharakteristika ihrer technischen Bypässe zu analysieren und auf die örtlichen Gegebenheiten anzupassen. Reynolds gemittelte Simulationsmethoden, welche heute als Stand der Technik angesehen werden, können aufgrund ihrer Mittelwerts Betrachtung nur Informationen über zeitliche Mittelwerte liefern. Ein deutlicher Sprung im Informationsgehalt zur Strömungsanalyse stellt die sogenannte „Large Eddy“ Simulationstechnik dar. Hier wird der zu untersuchende Strömungsbereich räumlich und zeitlich sehr hoch aufgelöst. Es können somit nicht nur Mittelwerte direkt errechnet werden, sondern auch turbulente Fluktuationen, welche für das Verhalten der Fische am Engpass entscheidend sein können. Der folgende Beitrag stellt die LES-Technik im Allgemeinen kurz dar und präsentiert anhand eines Beckenpasses die unterschiedlichen Strömungscharakteristika. Durch die Ergebnisse werden eindeutige Belastungsspitzen und Ruhe zonen für die aquatischen Lebewesen identifizierbar.

## 1 Allgemeine Informationen

Normalerweise basiert die Dimensionierung von technischen Fischpässen auf eindimensionalen Mittelwertbetrachtungen, wie z. B. die der mittleren Energiedissipation in Watt pro Kubikmeter.

$$E = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot \Delta h}{b \cdot h_m \cdot (l_b - d)} \quad [1]$$

Worin, die Dichte, Erdbeschleunigung, Abfluss und Höhendifferenz in Relation zur Beckenbreite, mittleren Höhe und der Differenz aus Länge der Becken und der Beckentrennwand enthalten sind. Die mittlere Energiedissipation sollte im Bereich zwischen 150 und 200 Watt pro Kubikmeter liegen, um „*die Turbulenzen in den einzelnen Becken zu beschränken*“ (Haselbauer 2008).

Diese Formel zeigt, dass hier nur grob die Dissipation über das gesamte Beckenvolumen gemittelt betrachtet wird und einzelne Beckentypen sich hier lediglich durch ihre volumenbestimmenden Parameter wie die Beckenbreite, mittlere Tiefe und Beckenlänge unterscheiden. Ob ein Beckentyp nun 5, 10 oder gar 15% Turbulenzgrad aufweist, geht aus dieser Betrachtung nicht hervor. Um nun unterschiedliche Beckentypen hinsichtlich ihrer Verteilung der turbulenten Größen zu untersuchen, können Messungen an einem Prototyp oder an einem Modell durchgeführt werden. Aber auch numerische Modell kommen hierfür als kostengünstige Alternative in Frage. Die sogenannten Reynolds gemittelten Navier-Stokes-Gleichungen können umgesetzt in dreidimensionalen Strömungsmodellen als Stand der Technik angesehen werden. Möchte man turbulente Schwankungen direkt simulieren, kann man sich der Large-Eddy-Simulationstechnik (LES) bedienen, welche im folgenden Kapitel näher beschrieben wird.

## **2 Simulationstechnik „Large Eddy Simulation“ (LES)**

### **2.1 Die Idee dieser Simulationstechnik**

Mit den Navier-Stokes-Gleichungen lassen sich Strömungsprozesse von Fluiden vollkommen beschreiben, wenn die Lösung des Problems so fein ist, dass auch die kleinsten, auf molekularer Ebene dissipierenden Wirbelstrukturen der Strömung dargestellt bzw. aufgelöst sind. Es wird dann von einer „direkten numerischen Simulation“ (DNS) gesprochen. Analysiert man eine Strömung hinsichtlich ihres turbulenten Spektrums, so kann festgestellt werden, dass der Energiegehalt der turbulenten Wirbel (eddies) in Relation zu ihrer geometrischen Größe steht. Seit den Arbeiten von Kolmogorov zur Turbulenzforschung (1941) spricht man auch von einer sogenannten Wirbelkaskade, auf der die großen, energietragenden Wirbelstrukturen, zu immer kleineren und schließlich dissipierenden Strukturen umgeformt werden bzw. zerfallen.

Kombiniert man die Kennzahlen von Kolmogorov mit der Reynoldszahl, ergibt sich für das Verhältnis der charakteristischen Länge zur kolmogorovschen Länge (Dissipationsmaß) die folgende Relation.

$$\frac{l}{\eta} \sim \text{Re}^{\frac{3}{4}} \quad [2]$$

Um diese Kennzahlenrelation etwas plastischer darzustellen, soll das folgende Beispiel dienen:

Eine Strömung in einem natürlichen Gerinne mit der globalen, die Hauptströmung beschreibenden Reynoldszahl von einer Million besitzt einen Turbulenzgrad von 10% und eine Fließtiefe von einem Meter. Dann müsste die Fließtiefe von einem Meter mit  $(0,1 \cdot 1\,000\,000)^{0,75} = 5623$  Zellen aufgelöst sein, um die ganze Bandbreite der Wirbel voll zu erfassen. Wird dieser eine Meter Fließtiefe nun dreidimensional äquidistant aufgelöst, hat dies eine Zellenanzahl von  $5623^3 = 177\,827\,941\,003$  Zellen für die Auflösung eines Kubikmeters zur Folge.

## 2.2 Subgrid Scale – Der Ansatz nach Smagorinsky

Der wohl berühmteste Ansatz für ein sogenanntes Sub-Grid-Scale (SGS) Modell ist der nach Joseph Smagorinsky (1963) benannte. Sub-Grid-Scale bedeutet dabei, Ansatz zur Beschreibung der Strömung unterhalb der Berechnungsnetzauflösung, also dass was in der Zelle passiert und nicht durch das Lösen der Navier-Stokes Gleichung auf dem Berechnungsgitter direkt numerisch berechnet wird. Diese auf kleiner als die Zellgröße stattfindende Dissipation wird im Smagorinsky Ansatz analog dem Wirbelviskositätsansatz durch eine Erhöhung der Gesamtviskosität erreicht.

$$\mu = \rho(\nu + \nu_T) \quad [3]$$

Das heißt, dass die turbulente Viskosität  $\nu_T$  zu der molekularen Viskosität  $\nu$  addiert wird und sich eine gesamt kinematische Viskosität ergibt. Mit Berücksichtigung der Dichte  $\rho$  ergibt sich die dynamische Viskosität  $\mu$ .

Der kleinste bei einer LES noch direkt aufgelöste bzw. direkt berechnete Wirbel ist definiert über die Zellgröße des Berechnungsnetzes wie in folgender Abbildung dargestellt wird.

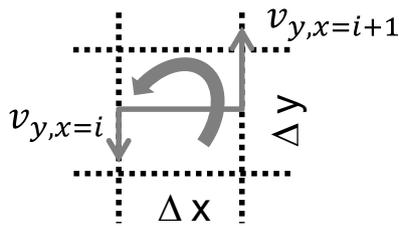


Abb. 1: Berechnungszelle mit einem noch darstellbaren Wirbel. Zur besseren Veranschaulichung in 2D dargestellt.

Alle Vorgänge innerhalb dieser Zelle müssen über ein Modell abgebildet werden. Da, wie bereits erwähnt, auf Grund der hohen Netzauflösung, nur dissipative Vorgänge innerhalb der Zelle stattfinden sollen, kann das Modell recht einfach sein. Das in dieser Arbeit verwendete Modell nach Smagorinsky ist ein einfacher algebraischer Ansatz zur Berechnung der turbulenten Wirbelviskosität.

$$\nu_T = (C_S L)^2 \cdot S_{ij} \quad [4]$$

$$L = (\Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z)^{\frac{1}{3}} \quad [5]$$

Als maßgebende Modelllänge bzw. Filterweite wird nach diesem Ansatz das geometrische Mittel der Zellen verwendet. Es wird hier auch von einer Filterweite gesprochen, da das Simulationsergebnis durch eine nicht physikalisch belegbare Grenzlänge in berechnet und modelliert aufgeteilt wird.

### 2.3 Die „goldene Regel“ einer LES

Für eine LES gilt grundsätzlich das gleiche wie für eine RANS bei der Vorgehensweise der numerischen Simulation, um verlässliche Simulationsergebnisse zu erhalten.

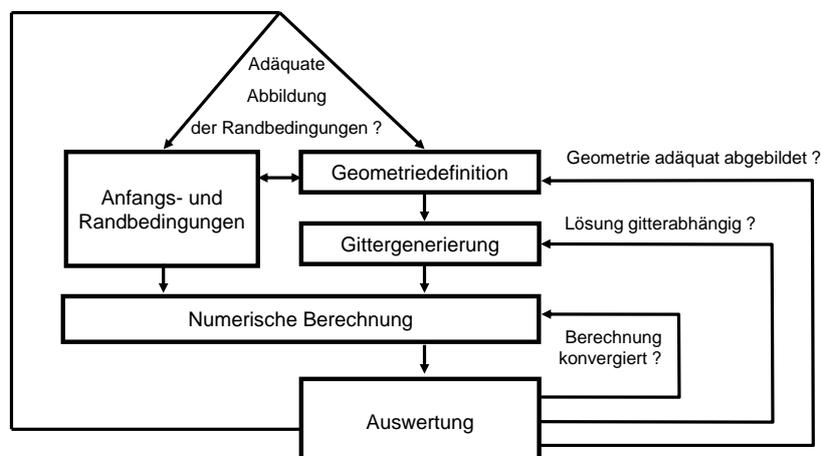


Abb. 2: Erweiterter Kernprozess der numerischen Modellierung (DVWK 1999), modifiziert nach Grünzner, Rutschmann (2008)

Zusätzlich muss bei einer LES noch sichergestellt werden, dass auch der Modellansatz gerechtfertigt ist und das Berechnungsgebiet ausreichend genau bezüglich der Turbulenzabbildung aufgelöst ist. Auf Grund der fast beliebig unterschiedlichen Strömungscharakteristika, lässt sich kein allgemeingültiges Kriterium hierfür ableiten. Es gilt dabei vielmehr eine Art 80% Pauschale. Diese besagt, dass 80% der turbulenten kinetischen Energie über das Berechnungsgitter direkt aufgelöst sein sollen, damit die LES das turbulente Spektrum ausreichend genau erfasst und das turbulente Strömungsverhalten richtig wiedergibt.

Um zur Veranschaulichung nochmals auf obiges Beispiel, der Strömung mit der Reynoldszahl von einer Million und den 10% Turbulenzgrad (Schwankungen um  $\pm 5\%$ ) zurückzukommen. Die gesamte kinetische Energie der mittleren Strömung beträgt  $1^2 = 1 [\text{m}^2/\text{s}^2]$ . Die turbulent kinetische Energie beträgt  $0,1^2 = 0,01 [\text{m}^2/\text{s}^2]$ . Von diesen  $0,01 [\text{m}^2/\text{s}^2]$  sollen dann 80%, also  $0,0092 [\text{m}^2/\text{s}^2]$  aufgelöst sein. Dies entspricht einer gesamtenergetischen Auflösung von 99,92%.

So ist im Allgemeinen von einer „guten Auflösung“ zu sprechen, wenn 80% der turbulenten kinetischen Energie aufgelöst sind.

### **3 Untersuchungen**

Wie bereits erwähnt kann mit einer LES das turbulente Strömungsverhalten direkt aufgelöst werden, welches ohne Modellansatz zur Modellierung der Turbulenz nur mit den Erhaltungsgleichungen (Impuls, Masse) errechnet wird. Tendenziell sollten aber auch die Modellansätze zur Beschreibung der sogenannten reynoldsgemittelten Turbulenz so gut sein, dass die Mittelwerte sich mit denen aus einer LES oder gar Direkten Numerischen Simulation (DNS) gut decken. Dies wurde in einem ersten Schritt überprüft, um eine grobe Einschätzung des Strömungsmodells zu erhalten (von Gosen 2008).

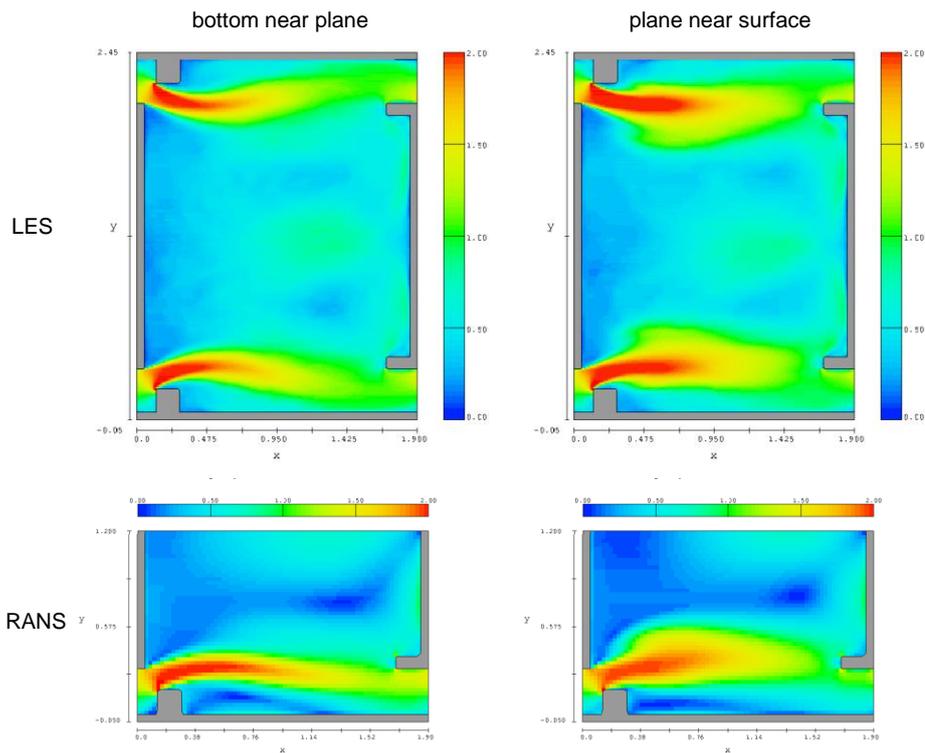


Abb. 3: Vergleich der gemittelten Geschwindigkeiten zwischen RANS (unten) und LES(oben) Simulationsmethode

Die obige Abbildung mit den aus der LES erhaltenen Größen deckt sich sehr gut mit den RANS Ergebnissen, wenn die LES Schwankungsgrößen gemittelt werden. An dieser Stelle sollte darauf aufmerksam gemacht werden, dass die Turbulenz ein dreidimensionales Phänomen ist. Aus diesem Grund wurde für die Large Eddy Simulation auch das gesamte Becken dreidimensional simuliert, da die Verwendung einer Symmetrieebene, wie es bei RANS-Modellen typisch ist, bei einer LES nicht sinnvoll wäre. Daher ist in obiger Abbildung das RANS Ergebnis von nur einer Seite dargestellt, da hier Symmetrie vorherrscht, welche keinen Einfluss auf das Turbulenzverhalten hat.

Der folgende Vergleich zwischen RANS (links) und LES (rechts) stellt zum einen sehr gut den grundsätzlichen Unterschied der beiden Simulationsmethoden dar (Abb. 4). Des Weiteren wird speziell im LES Ergebnis die turbulente Vermischung des einströmenden Wasser veranschaulicht. Das Wasser fließt in den folgenden Abbildungen immer von links nach rechts.

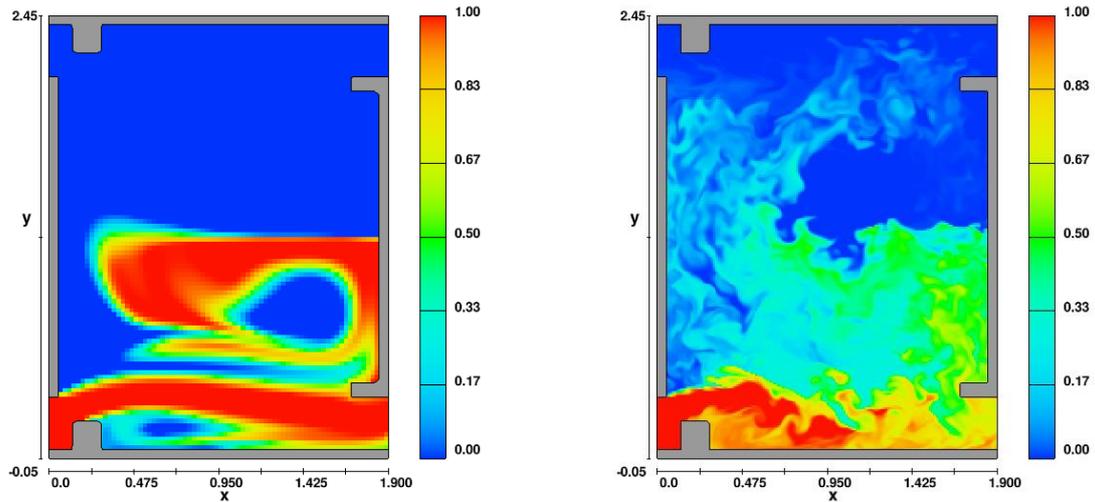


Abb. 4: Vergleich zwischen RANS (links) und LES(rechts) unter Verwendung eines Tracers im Vertikalen Schlitz

Nur im Ergebnis der LES ist der turbulente Einmischvorgang als solcher erkennbar. Bei der RANS ist selbst nach dem Rückprall der Strömung an der Beckentrennwand die Strömung noch relativ kompakt zu einem Strahl gebündelt. Des Weiteren ist im linken Bild, mit dem RANS Ergebnis zu sehen, dass eine leichte numerische Diffusion über die eigentliche Symmetriegrenze in der Beckenmitte auftritt. Um dies zu veranschaulichen wurde für die RANS Berechnung mit einem dreidimensionalen Vollmodell gerechnet und nicht wie oben bereits beschrieben auf die Vereinfachung mittels Symmetrieebene bzw. Randbedingung zurückgegriffen. Abbildung 4 vergleicht somit zwei dreidimensionale Vollmodelle. Einen Überblick über die Verteilung der Geschwindigkeiten und der turbulenten Fluktuationen bzw. des Turbulenzgrades der LES Simulation, gibt die folgende Abbildung.

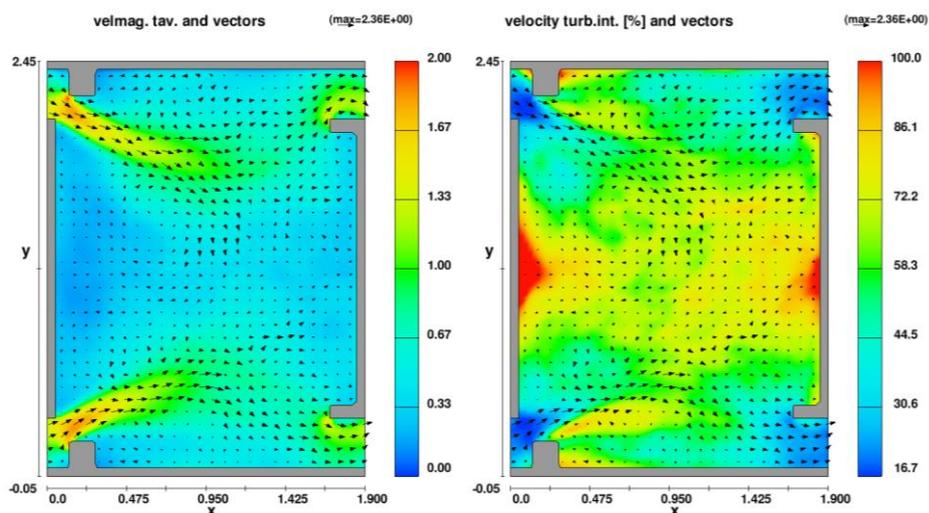


Abb. 5: Links: Zeitlich gemittelte Geschwindigkeit in m/s. Rechts: Turbulenzgrad in %

Es ist zu erkennen, dass im Bereich geringerer mittlerer Geschwindigkeiten höhere Schwankungen auftreten. Im Bereich der vertikalen Schlitze ist zwar die Strömungsgeschwindigkeit im Mittel sehr hoch, aber der Anteil der Turbulenz beträgt dort nur um die 20%. Für den Fisch bedeutet dies in diesem Becken im Bereich der Schlitze erhöhte Schwimmleistung zu bringen und sich dann bei einem Turbulenzgrad von  $\pm 50\%$  zu erholen, bevor er zum nächsten Aufstieg ansetzt. In diesem Beckentyp scheint sich der Fisch nur eine Frage stellen zu müssen: Hohe Geschwindigkeit oder hoher Turbulenzgrad. Der Turbulenzgrad an sich sagt nur aus um wieviel der Mittelwert schwankt, dies ist noch keine energetische Betrachtung. Eine Möglichkeit zur Stabilisationsbelastung des Fisches, also welchen Wirbeln findet sich der Fisch ausgesetzt und muss sich gegen diese stabilisieren, gibt die Auswertung der Wirbelstärke der Strömung. Die Wirbelstärke kann in alle drei Raumrichtungen betrachtet werden. Die folgende Abbildung zeigt die Wirbelstärke (engl. vorticity) in x,y,z.

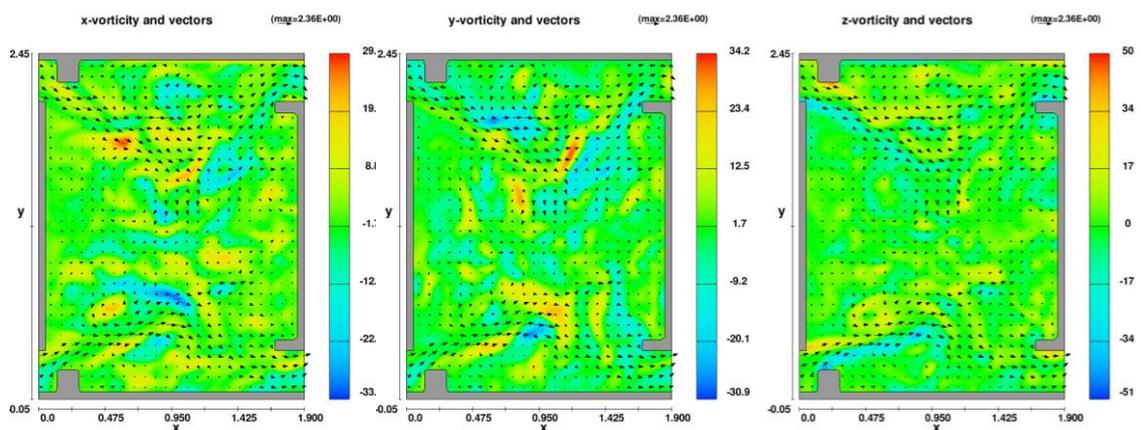


Abb. 6: Die Wirbelstärke von links nach rechts in den drei Raumrichtungen X,Y,Z

Auch anhand dieser Bilder ist erkenntlich, dass im Bereich der kleineren mittleren Geschwindigkeiten, die größten Wirbelstärken auftreten. Dies bedeutet für den Fisch wiederum erhöhten Stabilisierungsaufwand (Haselbauer 2008).

## 4 Zusammenfassung und Ausblick

Diese ersten und einfachen Untersuchungen zu diesem interessanten Themenfeld, zeigen den Vorteil von Simulationsuntersuchungen im Wasserbau. Die numerische Simulation hilft auch hier in Bereiche der Strömung zu blicken und diese auf eine Art und Weise zu analysieren, wie es bei physikalischen Modellen nur schwer zu messen ist. Auch die spezielle Simulationsmethode der LES zeigt hier den deutlichen Vorteil gegenüber RANS-Modellen. Nicht zuletzt

bedarf es auch der Erkenntnis des Verhaltens der Fische. Letztendlich entscheidet der Fisch, welchen Bypass er annimmt. Es kann hier nur hydraulisch aufgezeigt werden, unterschiedliche Beckentypen verschiedene Strömungsbilder erzeugen. Diese Art der Simulationen können somit ein hilfreiches Werkzeug zur Bemessung und Gestaltung neuer technischer Bypässe sein.

## Referenzen

DVWK (1999): Arbeitskreis „Mehrdimensionale numerische Modelle“ im DVWK-Fachausschuß „Experimentelle und numerische Hydraulik“ (1999) Numerische Modelle von Flüssen, Seen und Küstengewässern. DVWK Schriften 127.

FLOW 3D (2011): FLOW 3D, Flow Science Inc., Santa Fe, USA – online help Version 10.0

Haselbauer, M. (2008): Geräuscharme Fischaufstiegsrinne – experimentelle und numerische Analyse des Fischpasses vom Typ periodische Schütze. Dissertation am Fachgebiet für Hydromechanik, Mitteilungshefte aus der Lehrstuhlreihe, Band 73. Technische Universität München.

Kolmogorov, A. N. 1941 The local structure of turbulence in incompressible viscous fluid for very large Reynolds numbers. Dokl. Akad. Nauk SSSR 30 (4)

Smagorinsky, Joseph (1963): General circulation experiments with the primitive equations. Monthly Weather. Review, 91(3): 99-164

Von Gosen L (2011): „Hochaufgelöste Strömungssimulation technischer Fischaufstiegshilfen“, Master Thesis Technische Universität München – Lehrstuhl für Wasserbau (internes Dokument).

## Adressen der Autoren

Markus Grünzner

Flow Science Inc.

87505 Santa Fe, NM, USA

Email: [markus.gruenzner@flow3d.com](mailto:markus.gruenzner@flow3d.com)

Peter Rutschmann

Lehrstuhl und Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft

TU München (TUM)

80333 München, Deutschland