Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria

Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband

Band: 107 (2015)

Heft: 3

Artikel: Optimierung der Turbinenanströmung des Kraftwerks Ryburg-Schwörstadt mittels numerischer Modellierung

Autor: Lutz, Nicola / Vetsch, David

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-941849

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. 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. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

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. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

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. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 23.08.2025

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

Optimierung der Turbinenanströmung des Kraftwerks Ryburg-Schwörstadt mittels numerischer Modellierung

Nicola Lutz, David Vetsch

Zusammenfassung

Das Flusskraftwerk Ryburg-Schwörstadt liegt am Ende einer Rechtskurve des Hochrheins. Das Maschinenhaus wurde an der Kurveninnenseite gebaut und die Strömung wird durch einen markanten Trennpfeiler zu den Turbineneinläufen gelenkt. Aufgrund der Schräganströmung des Trennpfeilers entsteht eine ausgeprägte Ablösezone, die zu einer ungünstigen Anströmung und geringeren Fallhöhe vor dem angrenzenden Turbineneinlauf führt. Vor dem Trennpfeiler und den Turbineneinläufen liegen quer zur Flussachse Überreste eines alten Fangedamms mit einer Höhe von mehreren Metern. Zur Verbesserung der Turbinenanströmung wird die Trennpfeilerform optimiert und der Einfluss der Überreste des Fangedamms auf die Turbinenanströmung abgeklärt. Dazu werden ein grossräumiges tiefengemitteltes 2D-Modell und ein lokales 3D-Modell verwendet. Die Resultate der numerischen Simulationen zeigen, dass die Turbinenanströmung durch die teilweise Entfernung des Fangedamms in Kombination mit einer optimaleren Trennpfeilerform wesentlich verbessert werden kann, während die separate Anwendung der einzelnen Massnahmen nur eine geringe Verbesserung bewirkt.

1. Einleitung

Das am Hochrhein gelegene Kraftwerk Ryburg-Schwörstadt (KRS) befindet sich am Ende einer Rechtskurve, ungefähr 25 km flussaufwärts von Basel. Es wurde zwischen 1927 und 1931 gebaut und wird von der Kraftwerk Ryburg-Schwörstadt AG betrieben. Das Flusskraftwerk besteht aus einem an der Kurveninnenseite angeordneten Maschinenhaus mit vier Kaplanturbinen und einem links davon angeordneten Stauwehr mit vier Feldern *(Bild 1)*. Die Strömung wird durch einen markanten Trennpfeiler zum Maschinenhaus gelenkt. Durch die Anordnung des Kraftwerks auf der Kurveninnenseite entsteht eine Schräganströmung des Trennpfeilers, was zur Strömungsablösung und einer ausgeprägten Rückströmungszone und Wirbelbildung vor dem angrenzenden Turbineneinlauf (Maschine 1) führt *(Bild 2)*. Der Strömungsschatten bewirkt vor diesem Einlauf einen im Vergleich zu den anderen Turbinen geringeren Wasserspiegel, was einen entsprechenden Fallhöhenverlust und somit eine Produktionseinbusse zur Folge hat. Die Trennpfeilerumströmung und Anströmung der Kraftwerkseinläufe wird zusätzlich durch Überreste des alten Fangedamms aus der Bauzeit beeinflusst. Diese reichen bis zum Kopf des Trennpfeilers und weisen teilweise eine Höhe von über 3 m auf *(Bild 3)*.

1.1 Ausgangslage

Die Anströmungsverhältnisse des KRS wurden im Jahr 1987 genauer untersucht, wobei Wasserspiegelmessungen auf Höhe der Rechenebene für Rheinabflüsse zwischen 682 m^3/s und 3054 m^3/s durchgeführt wurden. Dabei wurde festgestellt, dass der Wasserspiegel vor dem an den Trennpfeiler angrenzenden Einlauf der Maschine 1 je nach Abfluss 6 bis 30 cm tiefer liegt als bei den anderen Maschineneinläufen. Zur Verbesserung der Turbinenanströmung wurden damals einerseits eine hydraulisch günstigere Form des Trennpfeilers und andererseits eine Verlängerung des Trennpfeilers mit einer Pfahlwand vorgeschlagen. Gut zwanzig Jahre später hat die Kraftwerk Ryburg-Schwörstadt AG die Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich (VAW) beauftragt, diese Varianten in einem numerischen Modell zu untersuchen, wobei auch der Einfluss der Überreste des Fangedamms auf die Turbinenanströmung abgeklärt werden sollte.

1.2 Vorgehensweise

Die Untersuchung wurde mit einem numerischen Kompositmodell durchgeführt. In der ersten Phase wurden die grossräumigen Strömungsverhältnisse im Oberwasser des Kraftwerks mit einem zweidimensionalen, tiefengemittelten Modell berechnet. Durch die Untersuchung eines grossen Spektrums unterschiedlicher Rheinabflüsse und Betriebszustände konnten die für die Trennpfeilerumströmung massgebenden Lastfälle ermittelt werden. Dabei wurden dieselben Rheinabflüsse wie bei der Naturmessung von 1987 berücksichtigt.

Die Strömungsverhältnisse im nä-

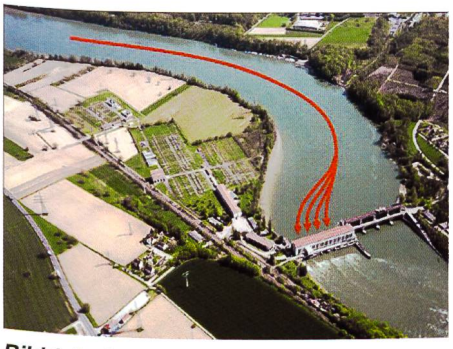


Bild 1. Luftbild zur grossräumigen Anströmung des Maschinenhauses KRS (Bild Kraftwerk Ryburg-Schwörstadt AG).

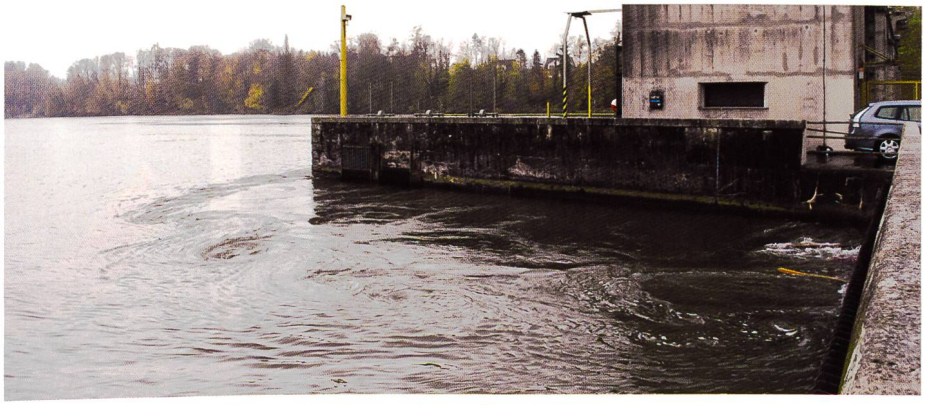


Bild 2. Strömungsablösung am Trennpfeiler (Bild VAW).

heren Zuströmungsbereich des Trennpfeilers und der Turbinen sind ausgeprägt dreidimensional. Daher wurde in der zweiten Phase für die Optimierung der Turbinenzuströmung ein dreidimensionales numerisches Detailmodell im Bereich des Wehrs und des Maschinenhauses eingesetzt. Die benötigten Randbedingungen oberstrom wurden aus den Resultaten der 2D-Berechnungen abgeleitet.

2. Grossräumige 2D-Modellierung

Für die hydraulischen 2D-Berechnungen wurde die an der VAW entwickelte Software BASEMENT verwendet, welche sich für die Simulation von instationären Strömungen in offenen Gerinnen oder Stauhaltungen eignet (BASEMENT 2014). Anhand der tiefengemittelten Flachwassergleichungen berechnet das Programm die Abflusstiefe und das horizontale Strömungsfeld im Modellgebiet.

2.1 Modellaufbau

Das numerische 2D-Modell umfasst eine 2.5 km lange Strecke im Oberwasser des Kraftwerks *(Bild 4)*. Die Geländetopographie basiert auf Querprofilen, die 2004 vermessen wurden, und flächendeckenden Höhendaten aus dem Jahr 2007, die im Nahbereich des Kraftwerks zur Verfügung stehen. Das Berechnungsgitter ist aus über 5000 Dreiecks- und Viereckszellen aufgebaut. Die Zellengrösse wurde im Nahbereich des Kraftwerks kleiner gewählt, da dieser Bereich für die Modellierung von grossem Interesse ist. Zudem stehen dort hochaufgelöste topografische Daten zur Verfügung. Am Zuflussrand, wo als Randbedingung der Rheinabfluss vorgegeben wird, wurde unter Annahme eines mittleren Gefälles die Manning-Strickler-Formel auf den Gerinnequerschnitt angewendet (Normalabflussrandbedingung). Daraus ergibt sich die Zuflussgeschwindigkeit für die verschiedenen Abflüsse. Die Turbinen des Kraftwerks wurden durch vier lokale Senken (lokale Entnahme einer vorgegebenen Wassermenge) modelliert und für die Modellierung der einzelnen Wehrfelder wurde je eine Wehrrandbedingung verwendet. Die Wehrhöhe wurde so eingestellt, dass pro Wehrfeld die gewünschte Abflussmenge abgeführt wird und dass der Wasserstand im Oberwasser mit dem gemessenen Pegel übereinstimmt.

2.2 Kalibrierung des 2D-Modells

Die massgebende Kalibrierungsgrösse ist die Gerinnerauheit, ausgedrückt durch den Stricklerbeiwert k_{str}. Durch Variation von k_{str} werden die kontinuierlichen Fliessverluste und somit das Energielinien- und Wasserspiegelgefälle verändert. Im Rahmen der Kalibrierung ist die Rauheit k_{str} so zu wählen, dass die Pegel-Abfluss-Beziehungen im gesamten Modellgebiet korrekt abgebildet werden. Jedoch liegt der untersuchte Gerinneabschnitt im Staubereich des Kraftwerks, womit die Fliessgeschwindigkeiten verhältnismässig klein sind. Entsprechend ist der Einfluss der Gerinnerauheit auf die Wasserspiegellagen gering. Im Modellgebiet stehen nur Pegeldaten unmittelbar vor dem Kraftwerk zur Verfügung, weshalb das Modell nur bedingt anhand der Wasserspiegellagen kalibriert werden konnte. Der Einfluss der Gerinnerauhigkeit und der Topografie wurde daher im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse für einzelne Lastfälle untersucht. Es zeigte sich, dass moderate Veränderungen der Gerinnerauhigkeit und der Topographie die Wasserspiegellagen im modellierten Staugebiet kaum beeinflussen. Im Nahbereich des Kraftwerks resultieren Wasserspiegeldifferenzen von maximal 0.5% der Abflusstiefe.

2.3 Resultate 2D-Modellierung

Das grossräumige 2D-Modell liefert die Wasserspiegellagen und tiefengemittelten Geschwindigkeiten im Modellgebiet, insbesondere im Querschnitt. in dem die obere Randbedingung für die lokale 3D-Modellierung angesetzt wird. In *Bild 5* sind beispielhaft die Fliessgeschwindigkeiten und Stromlinien für einen Rheinabfluss von 1390 m^3/s und 3054 m^3/s konsturiert dargestellt.

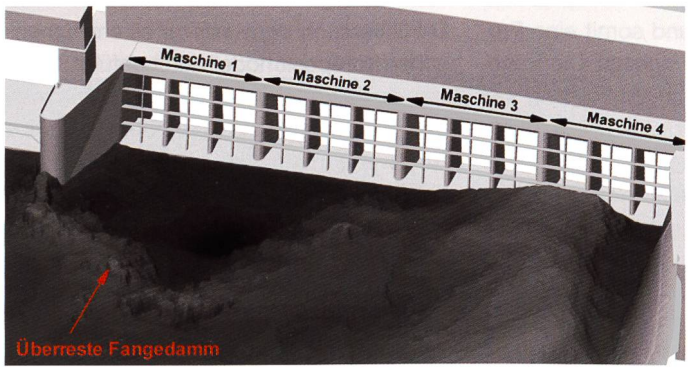


Bild 3. Einlaufbereich des KRS. Die Überreste des Fangedamms reichen vom Trennpfeiler bis vor die Maschine 2 und weisen eine Höhe von bis zu 3 m auf.

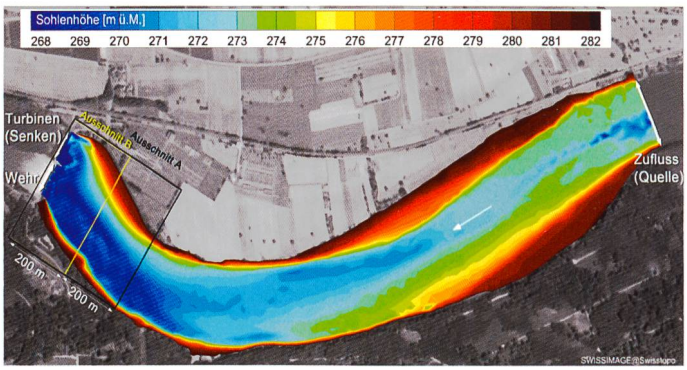
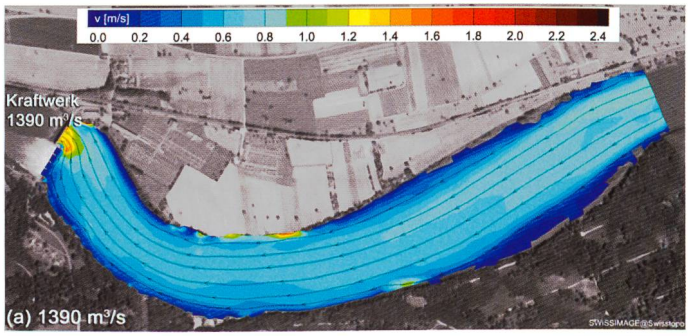


Bild 4. Modellgebiet und Randbedingungen (RB) im 2D-Modell. Die Anbindung des 3D-Modells erfolgt im Querprofil 400 m oberhalb des Kraftwerks (Ausschnitt A).



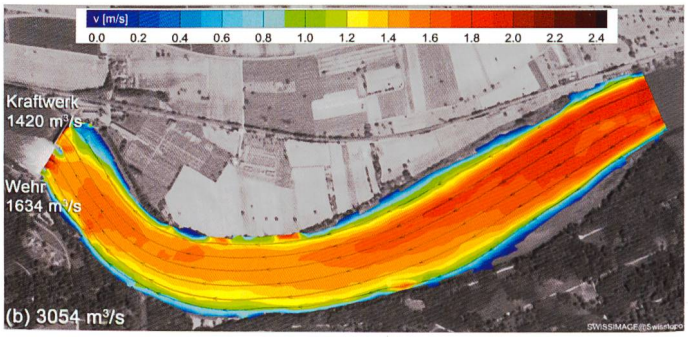


Bild 5. Tiefengemittelte Geschwindigkeiten des 2D-Modells für einen Rheinabfluss von a) 1390 m^3/s und geschlossenem Wehr und für b) 3054 m^3/s mit Wehrbetrieb.

Hinsichtlich der Trennpfeilerumströmung zeigen die Simulationsresulate, dass unter all den untersuchten Lastfällen mit und ohne Wehrbetrieb derjenige Lastfall der kritischste ist, der bei geschlossenem Wehr den grössten Turbinendurchfluss aufweist. Dies entspricht einem Rheinabfluss beim Kraftwerk von 1390 m^3/s mit einer Turbinierwassermenge von 347.5 m^3/s pro Maschine. Die Wasserspiegelsenke vor der Maschine 1 und somit der Fallhöhenverlust ist bei diesem Lastfall am grössten. Bei grösseren Rheinabflüssen wird das Wehr in Betrieb genommen, was sich positiv auf die Anströmung der Maschine 1 neben dem Trennpfeiler auswirkt. Einerseits wird nicht mehr die gesamte Strömung vor dem geschlossenen Wehr um den Trennpfeiler zum Kraftwerk geführt. Andererseits löst im Oberwasser die Strömung am Ende der Rechtskurve am rechten Ufer ab und konzentriert sich in Flussmitte und vor dem Wehr. Dadurch wird der Trennpfeiler weniger schräg angeströmt und die Wasserspiegelsenke im Strömungsschatten des Trennpfeilers ist schwächer ausgeprägt.

Die mit dem 2D-Modell ermittelte Strömungsablösung und Wasserspiegelsenke vor Maschine 1 ist für den kritischen Lastfall in *Bild 16* dargestellt. Da die Strömungsverhältnisse im Nahbereich des Kraftwerks ausgeprägt dreidimensional sind, können mit dem 2D-Modell in diesem Bereich nur qualitative Aussagen gemacht werden, die mit der 3D-Modellierung überprüft werden müssen (Abschnitt 6).

3. Lokale 3D-Modellierung

Für die 3D-Berechnungen wurde das Programm FLOW-3D verwendet. Das Modell basiert auf den Reynolds-gemittelten Navier-Stokes-Gleichungen und verwendet ein strukturiertes Rechengitter mit rechteckigen Zellen. Für diese Untersuchung wird das Rechengitter aus einzelnen Blöcken aufgebaut, womit lokal eine höhere Auflösung gewählt werden kann. Die Gerinnesohle und das Kraftwerk werden als Objekte in das Gitter eingefügt. Dabei kommt für teilweise durchströmte Zellen der Favor-Ansatz (Fractional Area-Volume Obstacle Representation) zur Anwendung.

Für die Simulationen wurde das «Renormalized Group Model» (RNG Modell, *Yakhot & Orszag* 1986) verwendet, welches eine Weiterentwicklung des k-ε-Modells ist, das sich in der Praxis bei vernünftigem Rechenaufwand gut bewährt hat. In FLOW-3D werden dabei die Koeffizienten gemäss *Yakhot & Smith* (1992) verwendet.

3.1 Aufbau des numerischen 3D-Modells

Im 3D-Modell wurde zusätzlich zur hochaufgelösten Gerinnetopographie das Bauwerk modelliert. Dabei wurden die Turbineneinläufe bis zum Dammbalkenquerschnitt hinter der Einlaufhaube abgebildet, wobei der Einlaufrechen vernachlässigt wurde. Im Anschluss daran wurde anstelle der Einlaufspirale ein Stollen angeordnet. Am Ende dieser Stollen wurde je eine Druckrandbedingung definiert, um bei einem bestimmten Turbinendurchfluss die Stauhaltung im Oberwasser zu simulieren. Der Wehrkörper und die Wehrpfeiler wurden komplett nachgebildet, während die Doppelhakenschützen als Tafelschützen modelliert wurden. Als untere Randbedingung folgte jeweils unmittelbar nach der Schütze eine der Schützenhöhe und dem Abfluss entsprechende Druckrandbedingung.

Am oberen Modellrand wurden die aus den Resultaten der 2D-Modellierung abgeleiteten Geschwindigkeiten und Wasserspiegellagen vorgegeben. Als Zuflussrandbedingung wurde die Geschwindigkeitsrandbedingung gegenüber der

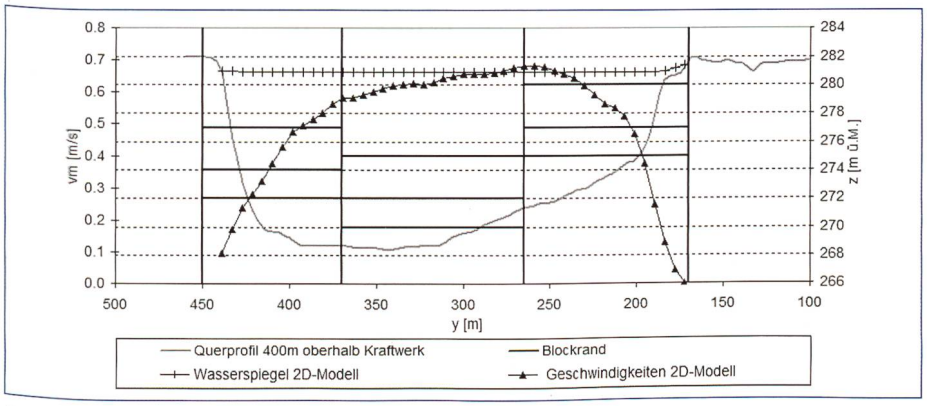


Bild 6. Querprofil am oberen Rand des 3D-Modells 400 m oberhalb des Kraftwerks. Die mit dem 2D-Modell ermittelten Geschwindigkeiten sowie die Unterteilung des Einlaufrandes in Gitterblöcke sind eingetragen.

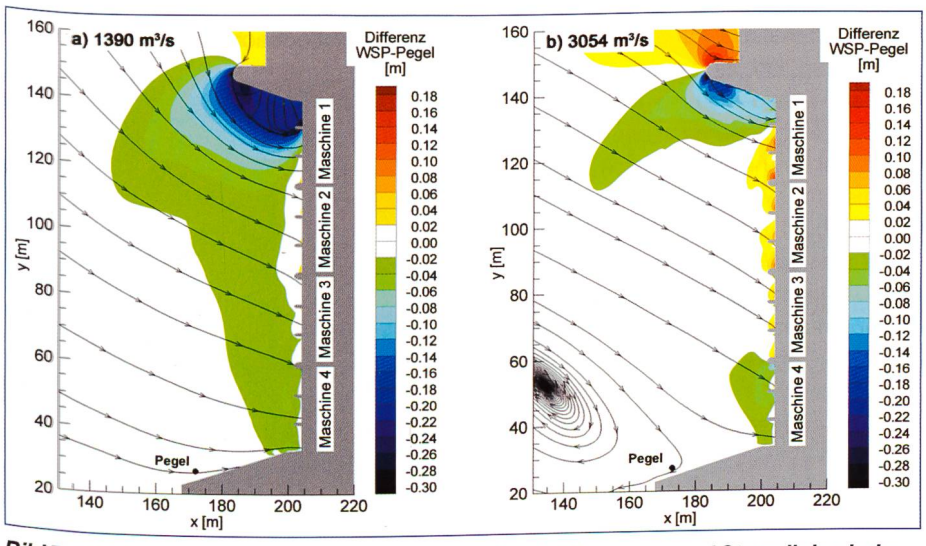


Bild 7. Mit dem 3D-Modell ermittelte Wasserspiegeldifferenzen und Stromlinien beim Ist-Zustand für a) 1390 m^3/s und für b) 3054 m^3/s mit Wehrbetrieb.

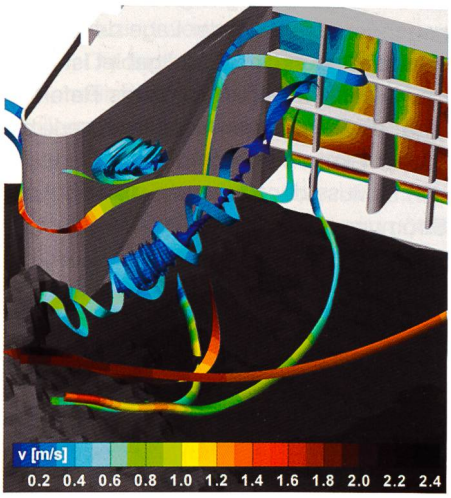


Bild 8. Ausgewählte Stromlinien in Trennpfeilernähe bei einem Rheinabfluss von 1390 m^3/s ohne Wehrbetrieb. Die Kolorierung kennzeichnet die lokale Fliessgeschwindigkeit. Erkennbar sind die Strömungsablösung am Trennpfeilerkopf sowie eine Spiralströmung, die von den Überresten des Fangedamms vor dem Trennpfeiler bis zum Kraftwerkseinlauf reicht.

Abflussrandbedingung bevorzugt, da zusätzlich die turbulente kinetische Energie k und deren Dissipation ε vorgegeben werden können.

Die Eignung der gewählten Diskretisierung und des Turbulenzmodells wird dadurch bekräftigt, dass die berechneten Wasserspiegellagen zufriedenstellend mit den Naturmessungen und der Ablösepunkt am Trennpfeiler sowie die anschliessende Scherschicht zwischen Hauptströmung und Strömungsschatten gut mit der Naturbeobachtung *(Bild 2)* übereinstimmen. Eine weitere Kalibrierung des 3D-Modells war anhand der Datengrundlage nur bedingt möglich. Deshalb wurde mit einer Sensitivitätsanalyse überprüft, dass die Kraftwerkszuströmung nicht von den oberen und unteren Randbedingungen beeinflusst wird.

3.2 Anbindung des 3D-Modells an das 2D-Modell

Um den Berechnungsaufwand zu minimieren, muss die Fliessstrecke im Oberwasser möglichst kurz gewählt werden. Daher wurde versucht, die Geschwindigkeitsverteilung schon am oberen Modellrand möglichst nahe an die Realität anzunähern, indem das Berechnungsgitter in diesem Bereich in mehrere Gitterblöcke über die Tiefe und Breite unterteilt wurde. Die Verteilung der mittleren Geschwindigkeit über die Flussbreite wurde den Ergebnissen der 2D-Modellierung entnommen. In der Vertikalen wurde von einer logarithmischen Geschwindigkeitsverteilung ausgegangen. Die Wahl der Lage der oberen Randbedingung im Modellgebiet ist nicht offensichtlich. Daher wurde als Referenz eine 3D-Berechnung vom Kraftwerk bis knapp 1 km oberstrom durchgeführt, um den Einfluss der Kurvenströmung auf die Strömungsverhältnisse im Bereich der gewählten Randbedingung und vor dem Kraftwerk abschätzen zu können.

Bei einer ersten Wahl des oberen Modellrands ca. 200 m oberhalb des Kraftwerks wurden drei verschiedene Varianten zur Unterteilung des Einlaufrandes in Gitterblöcke untersucht. Bei allen Varianten stellte sich nach etwa 120 m – d.h. ca. 80 m oberhalb des Kraftwerks – eine Geschwindigkeitsverteilung ein, die mit der Referenzberechnung vergleichbar ist. Jedoch wird bei dieser Lage der Randbedingung eine Strömungsablösung entlang des linken Ufers nahe der Randbedingung nicht detailliert simuliert. Um diese Ablösung abzubilden, wurde das Modellgebiet um weitere 200 m bis zum Querschnitt 400 m oberstrom des Kraftwerks verlängert (Ausschnitt A, *Bild 4*). Die Unterteilung des Einlaufrandes in Gitterblöcke erfolgte gemäss *Bild 6*. Pro Gitterblock wurden die Geschwindigkeiten senkrecht und quer zum Gitterrand sowie die turbulenten Grössen k und ε gemäss *Nezu & Nakagava* (1993) vorgegeben. Dadurch konnte im Oberwasser des Kraftwerks und des Wehrs eine Geschwindigkeitsverteilung erreicht werden, die gut mit den Referenzberechnungen übereinstimmt.

3.3 3D-Simulation des Ist-Zustandes

Die Turbinen wurden im verwendeten Modell nicht abgebildet. Als Ersatz wurden Druckrandbedingungen angesetzt, die kalibriert werden müssen. Um Zeit zu sparen, wurde dazu das Rechengitter (Ausschnitt A) mit knapp 2 Mio. Zellen mit einer Grösse von $\Delta x^*\Delta y^*\Delta z = (1–2)^*1^*(0.5–1)$ m verwendet. Anschliessend folgte ein Neustart mit einem um 200 m verkleinerten Rechengitter (Ausschnitt B), das um den Trennpfeiler verfeinert wurde. Die Zellgrösse beträgt dort 0.3*0.3*0.5 m statt 1*1*0.5 m und die Anzahl Gitterzellen kann durch die Verkleinerung des Berechnungsgebietes ebenfalls auf ca. 2 Mio. beschränkt werden. Als obere Randbedingung können in FLOW-3D in diesem Fall direkt die Strömungsverhältnisse der vorangegangenen Berechnung übernommen werden.

Es wurde generell festgestellt, dass die Strömungsverhältnisse im Modellgebiet sehr sensitiv auf die Definition der oberen Randbedingung reagieren. Jedoch unterscheidet sich die Strömung unmittelbar um den Trennpfeiler und vor den Kraftwerkseinläufen bei allen Varianten der oberen Randbedingung kaum voneinander. Deshalb wird davon ausgegangen, dass die Trennpfeilerumströmung und Anströmung der Kraftwerkseinläufe nicht vom oberen Modellrand beeinflusst wird und das Modell gut für die eigentlichen Untersuchungen hinsichtlich der Trennpfeileroptimierung verwendet werden kann.

Die mit dem 3D-Modell berechneten grossräumigen Strömungsverhältnisse sind tiefengemittelt vergleichbar mit denjenigen der 2D-Modellierung. Die Strömungsablösung am Trennpfeiler und die dadurch entstehende Wasserspiegelsenke in dessen Strömungsschatten sind analog zur 2D-Modellierung bei einem Rheinabfluss von 1390 m^3/s am deutlichsten ausgeprägt.

Bild 7 zeigt die Strömungsverhältnisse an der Wasseroberfläche im Zulaufbereich des Kraftwerks für den kritischen Lastfall mit Rheinabfluss 1390 m^3/s ohne Wehrbetrieb und den Lastfall mit 3054 m^3/s mit Wehrbetrieb. Anhand der lokalen Wasserspiegeldifferenzen zum Pegel und der Stromlinien im Horizontalschnitt knapp 0.5 m unter der Wasseroberfläche lässt sich die Strömungsablösung am Trennpfeiler erkennen. Bei kleinen Abflüssen (1390 m^3/s) wird eine Querströmung vor dem Einlauf der Maschine 1 beobachtet.

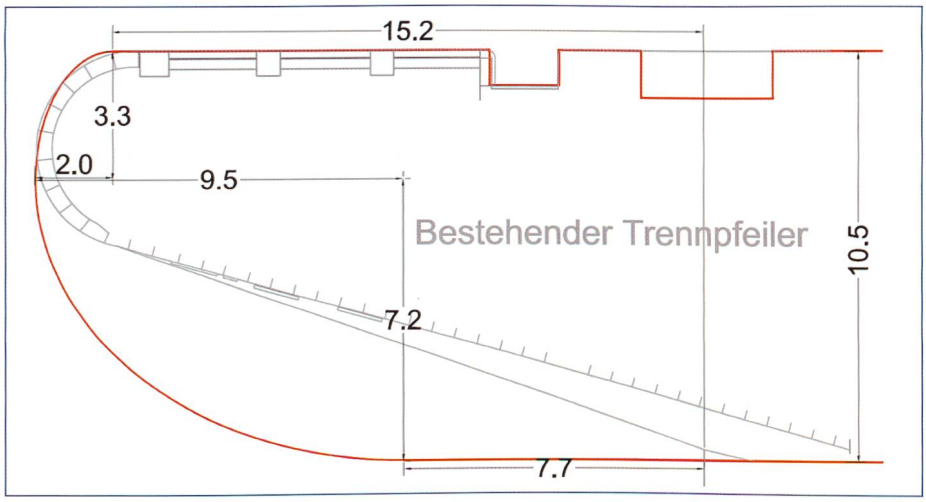


Bild 9. Optimierte Trennpfeilerform (rote Linie).

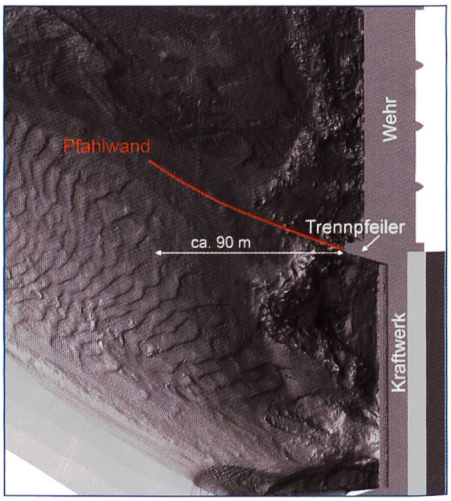


Bild 10. Verlängerung des Trennpfeilers mit einer Pfahlwand.

Unmittelbar vor dem Rechen verläuft der Wasserspiegel im Bereich der Maschine 4 bis zum linken Drittel des Einlaufs der Maschine 1 annähernd horizontal und fällt dort beim Lastfall mit 1390 m^3/s um ca. 20 cm ab. Mit zunehmendem Wehrabfluss wird diese Waserspiegelsenke kleiner und beträgt bei 3054 m^3/s ca. 10 cm. Die Wasserspiegeldifferenzen sind für fast alle untersuchten Lastfälle gut vergleichbar mit den in den Jahren 1987 und 2008 vor Ort durchgeführten Wasserspiegelmessungen.

Bei allen Lastfällen tritt das gleiche Strömungsmuster mehr oder weniger ausgeprägt auf. Beim Umströmen des Trennpfeilers löst sich die Strömung vom Trennpfeilerkopf ab. An der Sohle vor dem Trennpfeilerkopf, wo die Überreste des Fangedamms liegen, bildet sich eine Spiralströmung, die sich bis in den Kraftwerkseinlauf fortpflanzt (*Bild 8* für 1390 m^3/s).

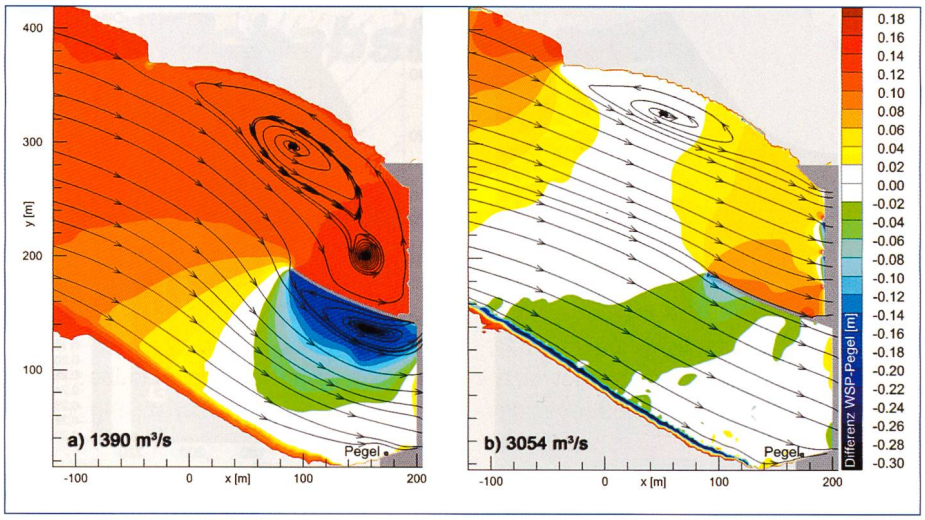


Bild 11. Wasserspiegeldifferenzen zum Wert des Pegels bei Verlängerung des Trennpfeilers mit Pfahlwand, a) 1390 m^3/s bei geschlossenem Wehr, b) 3054 m^3/s mit Wehrbetrieb.

4. Optimierungsmassnahmen

Zur Optimierung der Trennpfeilerumströmung und der Anströmung der Maschine 1 wurden einerseits strömungsgünstige Geometrien des Trennpfeilerkopfes sowie die Verlängerung des Trennpfeilers mit einer Pfahlwand und andererseits eine lokale Entfernung der Überreste des Fangedamms vor dem Trennpfeiler untersucht. Die Modellierung der Massnahmen erfolgte ausschliesslich im 3D-Modell, wobei die Randbedingungen am oberen Modellrand von den Simulationen des Ist-Zustandes übernommen wurden.

4.1 Trennpfeileroptimierung

Die optimierte Geometrie des Trennpfeilerkopfes nach *Rouvé* (1958) ist in *Bild 9* und die Pfahlwand zur Verlängerung des Trennpfeilers in *Bild 10* dargestellt. Bei der optimierten Trennpfeilerform löst sich die Strömung nicht mehr am Scheitelpunkt des Trennpfeilers ab, sondern folgt weitgehend der Trennpfeilerwand bis zum Kraftwerkseinlauf. Die Spiralströmung entlang des Trennpfeilers ist jedoch stärker ausgeprägt und reicht nahezu über die gesamte Abflusstiefe. Bezüglich der Wasserspiegelsenke vor der Maschine 1 wird die Situation nicht massgeblich verbessert. Durch die Optimierung der Trennpfeilerform allein kann der entsprechende Fallhöhenverlust kaum reduziert werden.

Die Verlängerung des Trennpfeilers mit einer Pfahlwand als weitere Optimierungsvariante sollte die Querströmung vor dem Trennpfeiler verhindern und somit auch die Strömungsablösung. Die Geometrie der Pfahlwand wurde so bestimmt, dass sie am unteren Ende ohne Knick in die Seitenwand des Trennpfeilers übergeht und am oberen Ende annähernd in Richtung der für den Ist-Zustand ermittelten Stromlinien liegt. Die Form entspricht einer Klothoide. Die Pfahlwand wurde im numerischen Modell als durchgehende Leitwand sowie als offene Pfahlwand untersucht. Letztere bedingt durch die kleinen Pfahlabstände (ca. 20 cm) sehr kleine Gitterzellen, um die Pfähle im numerischen Modell einzeln abbilden zu können. Die Simulationen mit Pfahlwand bestätigten die Annahme, dass auch mit einer strömungsgünstigen Ausrichtung und Geometrie der Pfahlwand keine Verbesserung der Anströmung der Maschine 1 bei allen untersuchten Lastfällen erreicht werden kann. Bei Betriebszuständen ohne oder mit geringem Wehrabfluss (Normalfall) entsteht durch die Umlenkung der Strömung vor dem geschlossenen Wehr eine Schräganströmung der Pfahlwand, was zu einer Strömungsablösung und einer Rückstömungszone im Strömungsschatten der Pfahlwand führt. Die entsprechende Wasserspiegelsenke ist bei geschlossener Pfahlwand deutlich breiter als beim Ist-Zustand und annähernd gleich tief, was insgesamt eine Vergrösserung des Fallhöhenverlustes bei Maschine 1 im Vergleich zum Ist-Zustand bedeutet (Bild 11). Bei offener Pfahlwand ist die Wasserspiegelsenke etwas weniger tief, jedoch wird auch in diesem Fall keine Verbesserung gegenüber dem Ist-Zustand erreicht.

4.2 Entfernung Überreste Fangedamm

Bei allen untersuchten Varianten des Trennpfeilers, einschliesslich des Bestehenden, bildet sich eine Spiralströmung, die von den Überresten des Fangedamms bis in den Einlauf der Maschine 1 reicht und eine Verdrängung der Hauptströmung weg vom Trennpfeiler unterstützt. Zudem ist davon auszugehen, dass die Spiralströmung zu erhöhten Rechenverlusten führt.

Der teilweise Abtrag der unmittelbar vor dem Trennpfeiler vorhandenen Überreste des Fangedamms bewirkt beim bestehenden Trennpfeiler eine weitgehende Unterdrückung der Spiralströmung. Dadurch kann sich eine ausgeprägte Rezirkulationszone im Strömungsschatten des Trennpfeilers ausbilden, die durch die Strömungsablösung am Trennpfeilerkopf verursacht wird. Die Wasserspiegelsenke vor der Maschine 1 unterscheidet sich kaum vom Ist-Zustand, der Fallhöhenverlust kann durch den Abtrag des Fangedamms allein nicht reduziert werden.

Die besten Resultate ergeben sich in Kombination mit der optimierten Trennpfeilergeometrie. Dabei führt der Abtrag der Überreste des Fangedamms ebenfalls zu einer Abschwächung der Spiralströmung. Jedoch wird diese nicht vollständig unterdrückt. Sie reicht nach wie vor bis in den Einlauf der Maschine 1 *(Bild 12)*. Die Reduktion der Spiralströmung bewirkt bei allen untersuchten Lastfällen eine Verringerung der Wasserspiegelsenke um ca. 50%, was einen entsprechend kleineren Fallhöhenverlust bedeutet *(Bild 13)*.

5. Vergleich 2D- und 3D-Modellierung

Die Strömung um den Trennpfeiler ist komplex und hat insbesondere durch die Spiralströmung einen dreidimensionsionalen Charakter. Es stellt sich nun die Frage, wie weit die Optimierung der Kraftwerkszuströmng mit einem hochaufgelösten 2D-Modell hätte durchgeführt werden können. Dazu wurde für den kritischen Lastfall mit

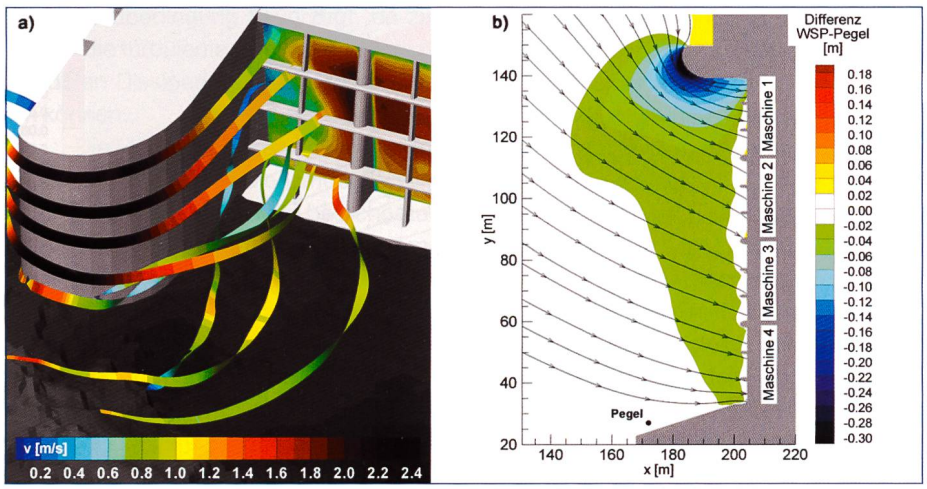


Bild 12. Trennpfeilerumströmung bei optimiertem Trennpfeiler und teilweise abgetragenem Fangedamm. a) ausgewählte Stromlinien, b) Stromlinien in Oberflächennähe und Wasserspiegeldifferenzen zum Wert des Pegels.

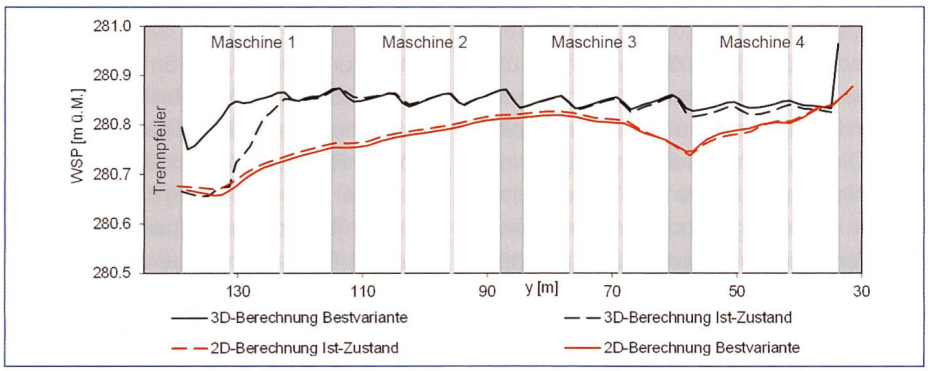


Bild 12. Querprofile der Wasserspiegellagen vor dem Rechen für den Ist-Zustand und die Bestvariante bei 1390 m³/s (Blick in Fliessrichtung). Die Wellen in den Wasserspiegellagen der 3D-Modellierung sind auf den Pfeilerstau zurückzuführen.

einem Abfluss von 1390 m^3/s zusätzlich eine 2D-Berechnung mit einem stark verfeinerten Gitter durchgeführt. Bei diesem weisen die Gitterzellen im Bereich des Trennpfeilers im Mittel eine Fläche von ca. 2 m^2 anstatt ca. 20 m^2 auf. Die Berechnung wurde sowohl für den Ist-Zustand als auch für die Variante mit optimiertem Trennpfeiler und teilweise abgetragenem Fangedamm ausgeführt. Die Wasserspiegellagen der beiden Gitterauflösungen unterscheiden sich kaum voneinander. Die Geschwindigkeitsvektoren lassen die Schräganströmung des Trennpfeilers erkennen. Ein Vergleich der Geschwindigkeitsvektoren und Wasserspiegellagen des tiefengemittelten 2D-Modells mit den Resultaten der 3D-Modellierung zeigt, dass das 2D-Modell mit einem verfeinerten Gitter die Ablösung der Strömung am Trennpfeilerkopf und die Rückströmungen entlang des Trennpfeilers wiedergibt. Der Einfluss der dreidimensionalen Spiralströmung kann jedoch nicht berücksichtigt werden. Die Wasserspiegellagen vor dem Rechen weisen deshalb einen anderen Verlauf auf *(Bild 13)*. Die Wasserspiegelsenke beschränkt sich nicht nur auf das linke Drittel der Maschine 1, sondern reicht bis über die Maschine 2 hinaus. Ebenfalls haben die Form des Trennpfeilers und der teilweise Abtrag der Überreste des Fangedamms im 2D-Modell kaum eine Wirkung auf die Wasserspiegelsenke neben dem Trennpfeiler. Die Rückströmungen entlang des Trennpfeilers werden durch diese Optimierung nur leicht abgeschwächt und der Winkel der Schräganströmung der Maschine 1 ist etwas kleiner.

6. Schlussfolgerungen

Durch die Lage des Kraftwerks Ryburg-Schwörstadt entsteht eine Schräganströmung des Trennpfeilers, was zur Strömungsablösung und einer entsprechenden Wasserspiegelsenke vor dem angrenzenden Turbineneinlauf führt. Zur Untersuchung und Optimierung der Trennpfeilerumströmung wurden an der VAW numerische Simulationen mit einem Kompositmodell, bestehend aus einem grossräumigen 2D-Modell und einem lokalen 3D-Modell, durchgeführt.

Die Simulationen des Ist-Zustands mit dem 3D-Modell zeigen bei allen untersuchten Lastfällen eine Strömungsablösung am Trennpfeiler sowie eine Spiralströmung, die ausgehend von den Überresten des Fangedamms an der Sohle vor dem Trennpfeilerkopf bis in den Einlauf der Maschine 1 reicht. Aufgrund dieser dreidimensionalen Strömungsverhältnisse kann der Verlauf der Wasserspiegelagen mit einem 2D-Modell nicht abgebildet werden, was durch eine zusätzliche 2D-Simulation mit einem stark verfeinerten Gitter bestätigt wurde.

Zur Optimierung der Zuströmung wurden eine strömungsgünstige Trennpfeilerform sowie die Verlängerung des Trennpfeilers mit einer geschlossenen Pfahlwand im 3D-Modell untersucht, wobei letztere zu einer negativen Beeinflussung der Kraftwerkszuströmung führte. Mit optimierter Trennpfeilerform kann die Ablösung am Trennpfeiler annähernd verhindert werden. Zudem bewirkt ein teilweiser Abtrag des Fangedamms unmittelbar vor dem Trennpfeilerkopf eine deutliche Reduktion der Spiralströmung. Bei der Kombination dieser beiden Massnahmen ergibt sich eine gegenüber dem heutigen Zustand günstigere Trennpfeilerumströmung und Anströmung der angrenzenden Maschine 1, was zu einer deutlich geringeren Wasserspiegelsenke vor der Maschine 1 führt.

Danksagung

Diese Untersuchung wurde im Auftrag der Ryburg-Schwörstadt AG durchgeführt.

Literatur

Vetsch D., Rousselot P., Volz C, Vonwiller L., Peter S., Ehrbar D., Gerber M., Faeh R., Farshi D., Mueller R., Veprek R. BASEMENT – Basic Simulation Environment for Computation of Environmental Flow and Natural Hazard Simulation. © VAW, ETH Zurich, 2006–2014.

Nezu, I., Nakagawa, H. «Turbulence in open-channel flows». Balkema, 1993.

Rouvé, G. «Der Krafthaustrennpfeiler – Strömungsverhältnisse an gekrümmten Wänden». Theodor-Rehbock-Flussbaulaboratorium, Technische Hochschule, Karlsruhe, 1958.

Yakhot, V., Orszag, S. A. «Renormalization-Group analysis of turbulence» Physical Review Letters, 57 (14), pp. 1722–1724, 1986.

Yakhot, V., Smith, L. M. «The Renormalization Group, the e-Expansion and Derivation of Turbulence Models», Journal of Scientific Computing, 7 (1), pp. 35–61, 1992.

Anschrift der Verfasser:

Nicola Lutz, lutz@vaw.baug.ethz.ch

Dr. *David Vetsch*, vetsch@vaw.baug.ethz.ch

ETH Zürich

Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), Hönggerbergring 26, CH-8093 Zurich