

Numerisches Kompositmodell zur Optimierung der Turbinenanstömung eines Flusskraftwerks

Nicola Mache, David Vetsch

Zusammenfassung

Das Flusskraftwerk Ryburg-Schwörstadt liegt am Hochrhein rund 4 km oberhalb von Rheinfeldern am Ende einer Rechtskurve. Die Strömung wird mit einem markanten Trennpfeiler zu dem an der Kurveninnenseite liegenden Maschinenhaus gelenkt. Durch die Schräganströmung des Trennpfeilers entsteht eine ausgeprägte Ablösezone, die zu einer ungünstigen Anströmung und geringeren Fallhöhe vor dem angrenzenden Turbineneinlauf führt. Auf dem Flussgrund, circa 14 m unter der Wasseroberfläche, liegen vor dem Trennpfeiler und den Turbineneinläufen quer zur Flussachse Überreste eines alten Fangedamms, teilweise mit einer Höhe von mehreren Metern. Zur Verbesserung der Turbinenanstömung wird mit Hilfe eines numerischen Kompositmodells, bestehend aus einem grossräumigen tiefengemittelten 2D-Modell und einem lokalen 3D-Modell, die Trennpfeilerform optimiert und der Einfluss der Überreste des Fangedamms auf die Turbinenanstömung abgeklärt. Die Resultate der numerischen Simulationen zeigen, dass die Turbinenanstömung durch eine lokale Entfernung des Fangedamms in Kombination mit einer optimaleren Trennpfeilerform wesentlich verbessert werden kann, während die separate Anwendung der Massnahmen nur eine geringe Verbesserung bewirkt.

1 Einleitung

Die am Hochrhein gelegene Staustufe Ryburg-Schwörstadt befindet sich am Ende einer Rechtskurve. Das Flusskraftwerk besteht aus einem an der Kurveninnenseite angeordneten Maschinenhaus mit vier Kaplan-turbinen und einem links davon liegenden Stauwehr mit vier Feldern. Zur Lenkung der Strömung zum Maschinenhaus dient ein markanter Trennpfeiler.

Durch die Lage des Kraftwerks im Rhein entsteht eine Schräganströmung des Trennpfeilers, was zu einer ausgeprägten Ablösezone und Wirbelbildung vor dem angrenzenden Turbineneinlauf führt. Der so entstehende Strömungsschatten bewirkt dort einen im Vergleich zu den anderen Turbinen geringeren Wasserspiegel vor dem Einlauf, 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 befinden sich im Oberwasser der Kraftwerkseinläufe und reichen bis zum Trennpfeilerkopf. Im Vergleich zur angrenzenden mittleren Flusssohle weisen die Überreste teilweise eine über 3 m höhere Kote auf.

Zur Verbesserung der Turbinenanstömung wird in einem numerischen Kompositmodell die Trennpfeilerform optimiert und der Einfluss der Überreste des Fangedamms auf die Turbinenanstömung abgeklärt.

2 Vorgehen

In einer ersten Phase werden die grossräumigen Strömungsverhältnisse im Oberwasser des Kraftwerks mit einem zweidimensionalen tiefengemittelten Modell berechnet. Es wird ein grosses Spektrum unterschiedlicher Rheinabflüsse und Betriebszustände berücksichtigt, wodurch die für die Trennpfeilerumströmung massgebenden Lastfälle ermittelt werden können.

Die Strömungsverhältnisse im näheren Zuströmungsbereich des Trennpfeilers und der Turbinen sind komplex und weisen einen räumlichen Charakter auf. Daher ist in der zweiten Phase für die Optimierung der Turbinenzuströmung ein dreidimensionales numerisches Detailmodell im Bereich des Wehrs und des Maschinenhauses vorgesehen. Die benötigten Randbedingungen werden aus den Resultaten der 2D-Berechnungen abgeleitet. Am oberen Rand des 3D-Modells sollen die Wasserspiegel und Fliessgeschwindigkeiten so vorgegeben werden, dass diese die lokalen Strömungsverhältnisse möglichst gut wiedergeben.

Im Vordergrund der Untersuchung steht die hydraulische Optimierung der Form des Trennpfeilers. Als weitere Massnahme wird der Einfluss der Überreste des Fangedamms im Zuströmbereich der Kraftwerkseinläufe untersucht.

3 2D-Modellierung

Für die hydraulischen 2D-Berechnungen wird die an der VAW entwickelte Software BASEMENT V1.5 [5] verwendet, welche zur Simulation von instationären Strömungen in offenen Gerinnen oder Stauhaltungen dient. Anhand der tiefengemittelten Flachwassergleichungen berechnet das Programm die Abflusstiefe und das horizontale Strömungsfeld im Modellgebiet.

3.1 Modellaufbau

Das numerische 2D-Modell umfasst eine knapp 2.5 km lange Strecke im Oberwasser des Kraftwerks. 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 besteht aus circa 5000 Dreiecks- und Viereckszellen. Die Zellengrösse wurde im Nahbereich des Kraftwerks kleiner gewählt, da dieser Bereich für die Modellierung von grösserem Interesse ist und dort zudem hoch aufgelöste topographische Daten zur Verfügung stehen.

Am Zuflussrand mit dem Rheinabfluss als Randbedingung wird unter Annahme eines mittleren Gefälles die Manning-Strickler-Formel auf den Zuflussquerschnitt angewendet (Normalabflussrandbedingung). Daraus ergeben sich die tiefengemittelten Zuflussgeschwindigkeiten für die Randzellen entsprechend dem jeweiligen Abfluss. Während die Turbinen des Kraftwerks durch vier lokale Senken (lokale Entnahme einer vorgegebenen Wassermenge) modelliert werden, wird für die Modellierung der Wehrfelder je eine Wehrrandbedingung verwendet. Die Wehrhöhe wird so eingestellt, dass pro Wehrfeld die gewünschte Abflussmenge abgeführt wird und der Pegel im Oberwasser auf der vorgegebenen Höhe liegt.

3.2 Kalibrierung des 2D-Modells

Grundsätzlich wird als Kalibrierungsgrösse die Gerinnerauheit, ausgedrückt durch den Stricklerbeiwert k_{str} , verwendet. Durch Variation von k_{str} werden die kontinuierlichen

Fliessverluste und somit das Energielinien- und Wasserspiegelgefälle verändert. Die Rauheit k_{str} wird so gewählt, dass die Pegel-Abfluss-Beziehungen im gesamten Modellgebiet korrekt abgebildet werden.

Der untersuchte Gerinneabschnitt liegt jedoch im Staubereich des Kraftwerks. Die Fliessgeschwindigkeiten sind verhältnismässig klein, weshalb ein geringer Einfluss der Gerinnerauheit auf die Wasserspiegellagen zu erwarten ist. Deshalb und auch aufgrund fehlender Kalibrierungsgrundlagen in Form von Wasserspiegelmessungen oberhalb des Staubereichs kann das Modell nur bedingt anhand der Wasserspiegellagen kalibriert werden. Der Einfluss der Gerinnerauheit wird daher im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse für ausgewählte Lastfälle untersucht. Es zeigt sich, dass moderate Veränderungen der Gerinnerauheit die Wasserspiegellagen im modellierten Stauegebiet kaum beeinflussen. Im Nahbereich des Kraftwerks betragen die Wasserspiegeldifferenzen bei einer Variation des Stricklerbeiwerts zwischen 30 und 50 $m^{1/3}/s$ maximal 0.5% der Abflusstiefe.

3.3 Resultate 2D-Modellierung

Die grossräumige 2D-Modellierung liefert die Wasserspiegellagen und tiefengemittelten Geschwindigkeiten im Modellgebiet, insbesondere im Querschnitt in dem die obere Randbedingung für die lokale 3D-Modellierung angesetzt wird. In Abb. 1 sind beispielhaft die Fliessgeschwindigkeiten für einen Rheinabfluss von $1390 \text{ m}^3/s$ konturiert dargestellt.

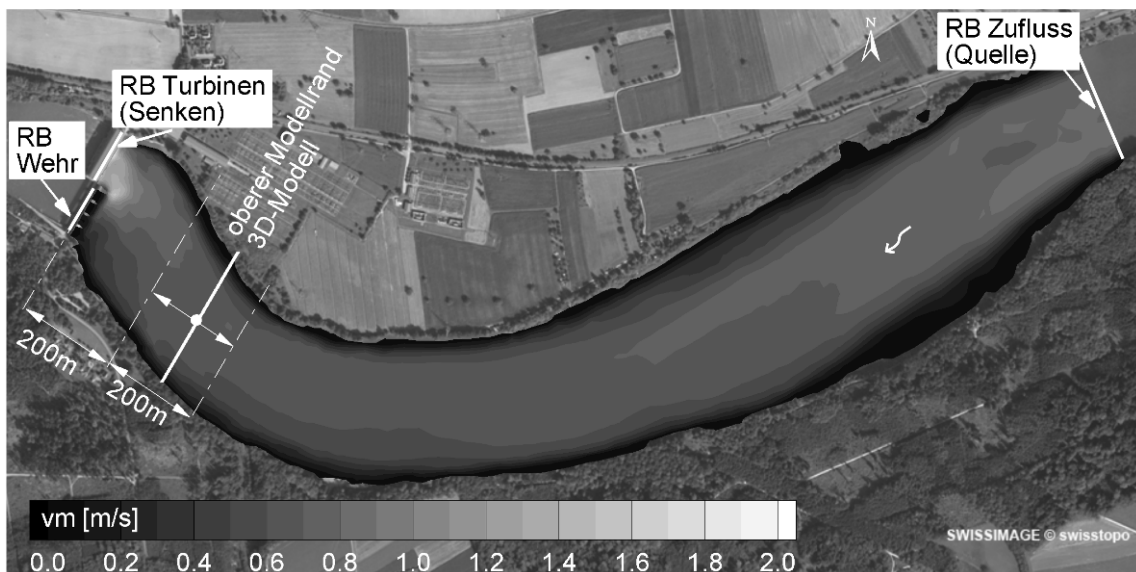


Abb. 1 Modellgebiet und Randbedingungen (RB) im 2D-Modell. Die tiefengemittelten Geschwindigkeiten für einen Rheinabfluss von $1390 \text{ m}^3/s$ sind konturiert dargestellt. Die Anbindung des 3D-Modells an die Resultate der 2D-Modellierung erfolgt in einem Querschnitt 200 bis 400 m oberhalb des Kraftwerks.

Da die Strömungsverhältnisse im Nahbereich des Kraftwerks einen räumlichen Charakter aufweisen, können mit dem 2D-Modell in diesem Bereich nur qualitative Aussagen gemacht werden, die mit der anschliessenden 3D-Modellierung verifiziert und präzisiert werden müssen (vgl. Abschnitt 4.5).

Die Resultate des 2D-Modells zeigen, dass von allen untersuchten Lastfällen mit und ohne Wehrbetrieb bezüglich der Trennpfeilerumströmung derjenige Lastfall (LF_{krit}) der kritische ist, bei dem das Wehr geschlossen und der Turbinendurchfluss am grössten ist. Dies entspricht

einem Rheinabfluss beim Kraftwerk von $1390 \text{ m}^3/\text{s}$ mit einer Turbinierwassermenge von $347.5 \text{ m}^3/\text{s}$ pro Maschine. Bei grösseren Rheinabflüssen wird das Wehr in Betrieb genommen, was sich positiv auf die Anströmung der Maschine neben dem Trennpfeiler (Maschine 1) auswirkt. Der Trennpfeiler wird weniger schräg angeströmt und die Wasserspiegelsenke im Strömungsschatten des Trennpfeilers ist schwächer ausgeprägt.

Für Lastfall LF_{krit} wurde zusätzlich eine 2D-Berechnung mit einem feineren Gitter durchgeführt. Bei diesem weisen die Gitterzellen im Bereich des Trennpfeilers im Mittel eine Fläche von ca. 2 m^2 anstatt wie bisher ca. 20 m^2 auf.

Abb. 2 zeigt die Ergebnisse der numerischen 2D-Modellierung für LF_{krit} anhand der Differenzen des Wasserspiegels zum Wert des Oberwasserpegels des Kraftwerks. Der Wasserspiegel vor der Maschine 1 liegt ca. 18 cm tiefer als vor der Maschine 4. Die Wasserspiegellagen der beiden Gitterauflösungen unterscheiden sich kaum voneinander. Die Geschwindigkeitsvektoren lassen die Schräganströmung des Trennpfeilers erkennen. Beim feineren Gitter werden zudem Rückströmungen entlang der kraftwerksseitigen Trennpfeilerwand abgebildet (Abb. 2 rechts).

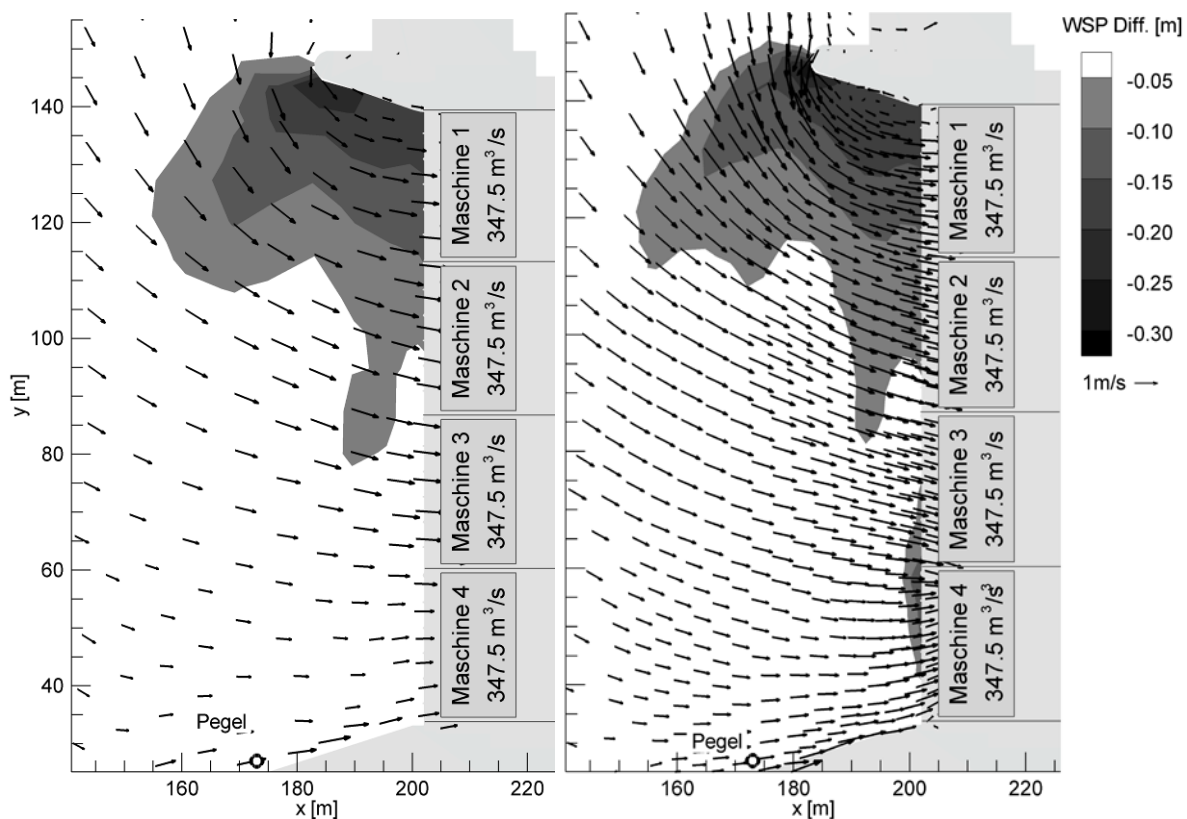


Abb. 2 Strömungsverhältnisse vor den Kraftwerkseinläufen für LF_{krit} bei grober (links) und feiner (rechts) Gitterauflösung. Konturiert dargestellt ist die Differenz des lokalen Wasserspiegels zum Wert des Pegels. Die Vektoren zeigen das Feld der tiefengemittelten Geschwindigkeiten. Entlang des Trennpfeilers sind bei feiner Gitterauflösung Rückströmungen zu erkennen.

4 3D-Modellierung

Für die 3D-Berechnungen wird das Programm FLOW-3D verwendet. Dieses verwendet zur Lösung der Reynolds gemittelten Navier-Stokes-Gleichungen eine Finite-Differenzen-Methode mit einem strukturierten Rechengitter. Zur flexibleren Diskretisierung der Geometrie lässt sich das Modellgebiet in einzelne Blöcke unterteilen (Multi-Block-Gitter). Je nach Konfiguration

werden die Randbedingungen bei solchen Blöcken automatisch interpoliert oder können explizit vorgegeben werden.

4.1 Modellaufbau

Im 3D-Modell wird zusätzlich zur hoch aufgelösten Gerinnetopographie das Bauwerk detailliert abgebildet. Dabei werden die Turbineneinläufe bis zum Dammbalkenquerschnitt hinter der Einlaufhaube berücksichtigt. Im Anschluss daran wird statt der Einlaufspirale zur Turbine ein Stollen angeordnet, indem der Dammbalkenquerschnitt ins Unterwasser verlängert wird. Am Ende dieser Einläufe werden die Randbedingungen definiert. Um bei einem bestimmten Turbinendurchfluss die Stauhaltung im Oberwasser zu ermöglichen, werden Druckrandbedingungen verwendet. Der Wehrkörper sowie die Wehrpfeiler werden komplett nachgebildet und das Wehr wird mit Tafelschützen modelliert. Als untere Randbedingung folgt jeweils unmittelbar nach der Schütze eine dem Abfluss entsprechende Druckrandbedingung.

Am oberen Modellrand werden die aus den Resultaten der 2D-Modellierung abgeleiteten Geschwindigkeiten und Wasserspiegellagen vorgegeben. Als Zuflussrandbedingung wird die Geschwindigkeitsrandbedingung gegenüber der Abflussrandbedingung bevorzugt, da zusätzlich die turbulenten Größen k und ε vorgegeben werden können.

Im Sinne einer Sensitivitätsanalyse wurde die Lage und Wahl der Randbedingungen überprüft um zu gewährleisten, dass die Anströmung des Kraftwerks nicht direkt von den oberen und unteren Randbedingungen beeinflusst wird.

4.2 Wand- und Turbulenzmodell

Die Gerinnerauheit wird in FLOW-3D über das Turbulenzmodell berücksichtigt. Dieses beinhaltet eine Wandfunktion, welche die turbulenten Größen k und ε im Nahbereich von festen Berandungen annähert. Dabei werden unter der Annahme eines logarithmischen Geschwindigkeitsprofils die Wandschubspannungen in Abhängigkeit der Rauheit berechnet. Über die Schubspannung werden k und ε in den Randzellen abgeleitet.

Für die Simulationen wurde das „Renormalized Group Model“ (RNG Modell, [2]) verwendet, welches eine Weiterentwicklung des weit verbreiteten k - ε Modells darstellt, das sich in der Praxis bei vernünftigem Rechenaufwand gut bewährt hat. In FLOW-3D werden dabei die Koeffizienten nach Yakhot and Smith [3] verwendet. Auf eine verfeinerte Kalibrierung des Turbulenzmodells wurde verzichtet, da die dazu notwendigen Erhebungen den Rahmen dieser Untersuchung sprengen würden. Jedoch wird die Eignung der gewählten Diskretisierung und des Turbulenzmodells dadurch bekräftigt, dass der Ablösepunkt am Trennpfeiler sowie die anschliessende Scherschicht zwischen Hauptströmung und Strömungsschatten gut mit der Naturbeobachtung und die berechneten Wasserspiegellagen zufriedenstellend mit den für einen Referenzfall durchgeführten Naturmessungen übereinstimmen.

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

Um die Anzahl der Gitterzellen und folglich den Rechenaufwand zu minimieren, soll der obere Modellrand möglichst nahe beim Kraftwerk liegen. Trotzdem muss gewährleistet werden, dass sich die Gerinneströmung oberhalb des Kraftwerks voll ausprägen kann. Zudem sollten am Ort der Anbindung an das 2D-Modell tiefengemittelte Verhältnisse auftreten (keine ausgeprägten Querschnittsänderungen oder Unebenheiten in der Sohle) und die Geschwindigkeitsvektoren

möglichst gleichgerichtet sein. Aufgrund dieser Überlegungen bietet sich für die Randbedingung ein Querprofil ca. 200 bis 400 m oberhalb des Kraftwerks an (vgl. Abb. 1).

Um einen Eindruck über den Einfluss der oberen Randbedingung zu erhalten, werden im Vorfeld Simulationen in einem geraden Testkanal durchgeführt. Bei Vorgabe einer homogenen Geschwindigkeit am oberen Modellrand stellt sich nach ca. 250 m eine realistische Kanalströmung mit Normalabflusstiefe und einem in Gerinnemitte logarithmischen Geschwindigkeitsprofil über Tiefe ein. Wird die Geschwindigkeitsverteilung am Einlaufrand mit 3 Gitterblöcken über die Tiefe dem theoretischen logarithmischen Geschwindigkeitsprofil nach Chézy angenähert und die turbulenten Grössen k und ε (gemäss [4]) vorgegeben, verkürzt sich diese Fliesstrecke um ca. 100 m auf ca. 150 m.

Aufgrund der Erfahrungen im Testkanal wird die obere Randbedingung vorerst 200 m oberhalb des Kraftwerks angesetzt. Die Geschwindigkeitsverteilung am Modellrand wird mit mehreren Gitterblöcken über die Tiefe und Breite diskretisiert. Die Verteilung der tiefengemittelten Geschwindigkeiten über die Flussbreite wird den Ergebnissen der 2D-Modellierung entnommen. Zusätzlich wird eine logarithmische Geschwindigkeitsverteilung über die Tiefe angenommen. Zur Kontrolle wird eine 3D-Berechnung mit einem verhältnismässig groben Rechengitter für einen Modellausschnitt vom Kraftwerk bis knapp 1 km oberstrom durchgeführt.

Es werden drei verschiedene Varianten zur Unterteilung des oberen Modellrands in Gitterblöcke untersucht. Bei allen Varianten stellt sich nach etwa 120 m – d.h. ca. 80 m oberhalb des Kraftwerks - ein Geschwindigkeitsprofil ein, das bis auf den linken Uferbereich mit der Kontrollrechnung im 1 km langen Modellgebiet vergleichbar ist. Die beste Übereinstimmung liefert diejenige Variante, bei welcher der Einlaufrand analog zu Abb. 3 in Blöcke unterteilt wird. Das Geschwindigkeitsfeld der Kontrollrechnung zeigt jedoch, dass die Strömung ca. 250 m oberhalb des Kraftwerks an einem Geländevorsprung am linken Ufer abgelenkt wird und einen Strömungsschatten verursacht, der sich entlang des linken Ufers bis vor das Wehr auswirkt. Dieser Einfluss ist bei der 2D-Modellierung weniger stark ausgeprägt und wird deshalb in der auf den Ergebnissen der 2D-Modellierung basierenden Geschwindigkeitsrandbedingung des 3D-Modells 200 m oberhalb des Kraftwerks kaum berücksichtigt. Um dem Einfluss dieses Geländevorsprungs Rechnung zu tragen, wird das Modellgebiet um 200 m stromaufwärts verlängert. Die Unterteilung des Einlaufrandes 400 m oberhalb des Kraftwerks in Gitterblöcke erfolgt gemäss Abb. 3. Pro Gitterblock werden die Geschwindigkeiten senkrecht und quer zum Gitterrand sowie die turbulenten Grössen vorgegeben. Dadurch kann im Oberwasser des Kraftwerks und Wehrs eine Geschwindigkeitsverteilung erreicht werden, die gut mit der Kontrollrechnung übereinstimmt. Für die Evaluierung der unteren Randbedingungen werden die Simulationen zuerst mit diesem Modell durchgeführt. Das Rechengitter weist knapp 2 Mio. Zellen mit einer Zellgrösse von 0.5 bis 2 m³ auf. Anschliessend folgt ein Neustart mit dem definitiven, wiederum um 200 m verkürzten Gitter, das um den Trennpfeiler verfeinert wurde. Die Zellgrösse beträgt dort 0.045 m³, die Anzahl Gitterzellen kann durch die Verkürzung des Rechengebietes ebenfalls auf ca. 2 Mio. beschränkt werden.

Fazit

Durch eine Annäherung der Geschwindigkeiten und Wasserspiegellagen am Zuflussrand basierend auf den Resultaten der 2D-Modellierung werden vor dem Kraftwerk die gewünschten Strömungsverhältnisse erreicht. Dazu muss jedoch gewährleistet sein, dass die 2D-Resultate im Bereich des Modellrandes des 3D-Modells korrekt wiedergegeben werden, was im vorliegenden Fall beim Querprofil 400 m oberhalb des Kraftwerks zutrifft.

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

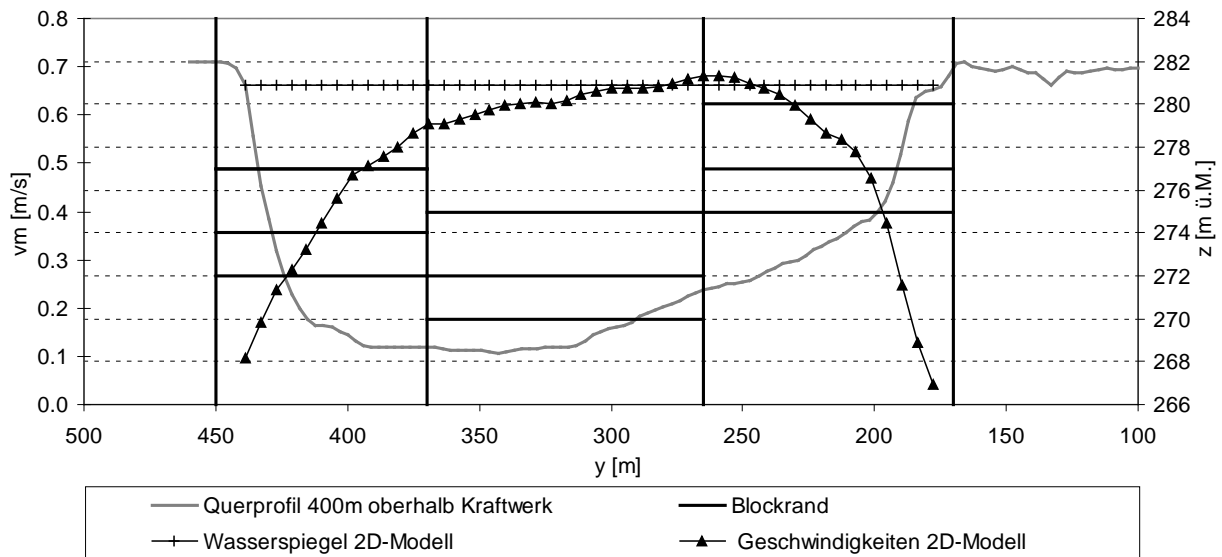


Abb. 3 Querprofil am Modellrand 400 m oberhalb des Kraftwerks (Blick in Fließrichtung). Eingetragen sind die mit dem 2D-Modell ermittelten Geschwindigkeiten und die Unterteilung des Querprofils in Blöcke.

4.4 Resultate 3D-Modellierung

Die Strömungsablösung und die dadurch entstehende Wasserspiegelsenke im Strömungsschatten des Trennpfeilers sind analog zur 2D-Modellierung bei LF_{krit} mit einem Rheinabfluss von $1390 \text{ m}^3/\text{s}$ am deutlichsten ausgeprägt.

Bestehende Situation

Bei allen Lastfällen tritt das gleiche Strömungsmuster auf: Beim Umströmen des Trennpfeilers entsteht eine Ablösezone am Trennpfeilerkopf, die zu Verwirbelungen führt. An der Sohle vor dem Trennpfeilerkopf, wo die Überreste des Fangedamms liegen, bildet sich eine Spiralströmung, die sich bis in den Kraftwerkseinlauf fortpflanzt (vgl. Abb. 4a für LF_{krit}). Abb. 5 (links) zeigt die Strömungsverhältnisse im Zulaufbereich des Kraftwerks für LF_{krit} . Anhand der Differenzen des Wasserspiegels zum Wert des Pegels und der Geschwindigkeitsvektoren knapp 0,5 m unter der Oberfläche lässt sich die Strömungsablösung am Trennpfeiler erkennen. Deutlich erkennbar ist die Scherschicht, die zwischen dem Strömungsschatten des Trennpfeilers und der am Trennpfeiler abgelösten Hauptströmung entsteht. Vor dem Rechen verläuft der Wasserspiegel von der Maschine 4 bis zum linken Drittel des Einlaufs der Maschine 1 annähernd horizontal und fällt dort um ca. 20 cm ab. Die Wasserspiegellagen sind für fast alle Lastfälle gut vergleichbar mit den in den Jahren 1987 und 2008 vor Ort durchgeführten Messungen.

Optimierte Trennpfeilerform und teilweise abgetragener Fangedamm

Die Optimierung der Trennpfeilerform führt unter Berücksichtigung von wirtschaftlichen Aspekten zu einem Trennpfeiler derselben Länge, dessen Form in Anlehnung an die Kriterien von Rouvé [1] aus Viertelellipsen zusammengesetzt ist. Durch die Verbreiterung des bestehenden Trennpfeilers kann eine Ablösung der Strömung am Trennpfeilerkopf annähernd verhindert werden (Abb. 4b). Jedoch führt die alleinige Optimierung der Trennpfeilerform nur zu einer marginalen Reduktion der Wasserspiegelsenke neben dem Trennpfeiler. Infolge der veränderten Strömungsverhältnisse prägt sich die Spiralströmung sogar stärker aus.

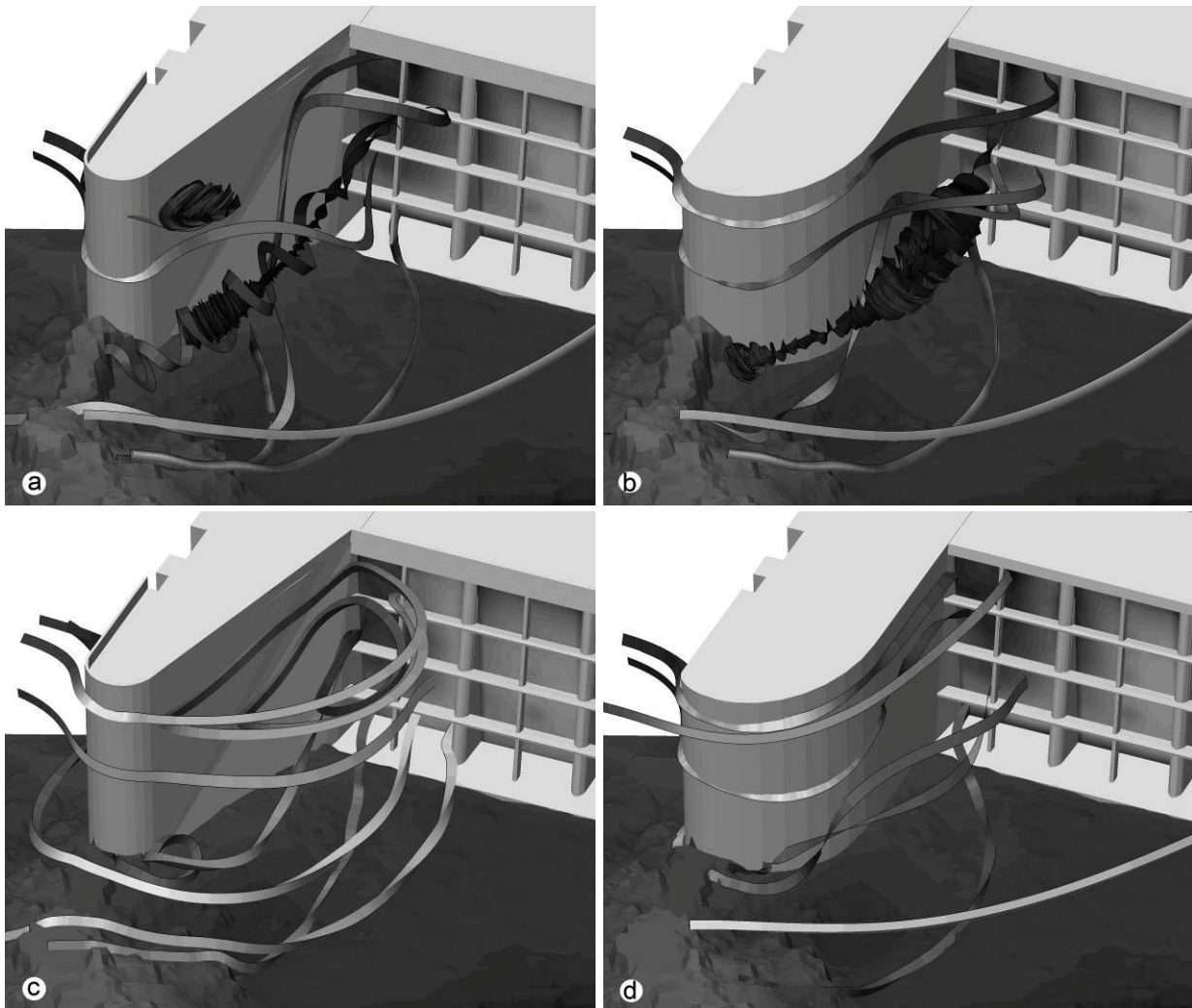


Abb. 4 Trennpfeilerumströmung visualisiert mit Stromlinien bei a) dem bestehenden und b) dem optimierten Trennpfeiler sowie c) dem teilweise abgetragenen Fangedamm und d) der Bestvariante bestehend aus optimiertem Trennpfeiler und teilweise abgetragenen Fangedamm.

Werden die Überreste des Fangedamms bei der Variante des bestehenden Trennpfeilers teilweise entfernt, kann die Spiralströmung stark reduziert werden, wodurch sich jedoch eine ausgeprägte Rezirkulationsströmung im Strömungsschatten des Trennpfeilers ausbilden kann (Abb. 4c).

Auch bei optimierter Trennpfeilerform kann die Spiralströmung durch den teilweisen Abtrag der Überreste des Fangedamms deutlich abgeschwächt werden (Abb. 4d). Damit kann die Differenz des Wasserspiegels vor dem Einlauf der Maschine 1 zum Wert des Pegels bei allen

Lastfällen um mindestens 50% verringert werden. Sie beträgt bei LF_{krit} noch 10 cm statt 20 cm. In Abb. 5 (rechts) sind die Strömungsverhältnisse im Zulaufbereich des Kraftwerks bei dieser Bestvariante für LF_{krit} dargestellt. Die Strömungsablösung am Trennpfeiler kann gegenüber der bestehenden Variante deutlich verringert werden und der angrenzende Turbineneinlauf wird nahezu frontal angeströmt.

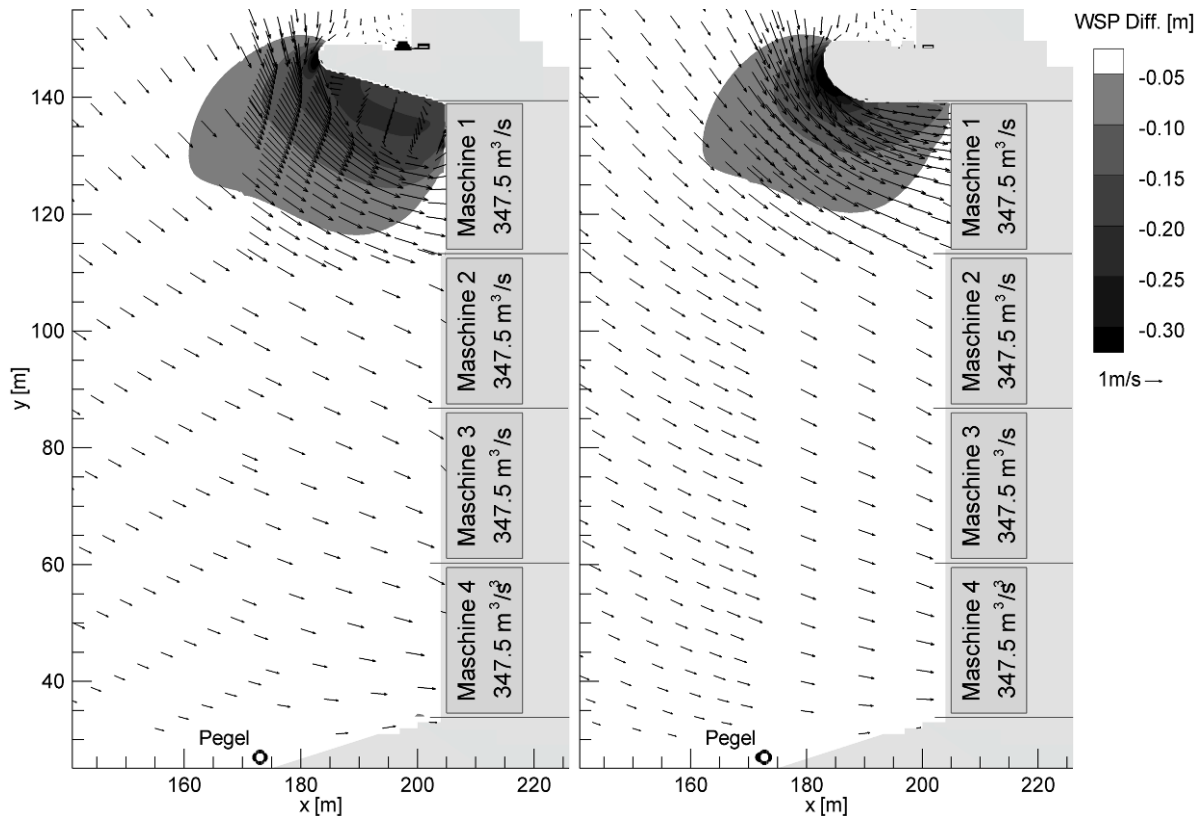


Abb. 5 Strömungsverhältnisse vor den Kraftwerkseinläufen bei bestehender Variante (links) und Bestvariante (rechts, optimierte Trennpfeilerform und teilweiser Abtrag des Fangedamms). Die Differenzen des lokalen Wasserspiegels zum Wert des Pegels sind konturiert dargestellt. Die Vektoren zeigen das horizontale Geschwindigkeitsfeld in Oberflächennähe.

4.5 Vergleich mit 2D-Modellierung

Ein Vergleich der Geschwindigkeitsvektoren und Wasserspiegellagen des tiefengemittelten 2D-Modells mit den Resultaten der 3D-Modellierung zeigt, dass das 2D-Modell 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 (Abb. 6). 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.

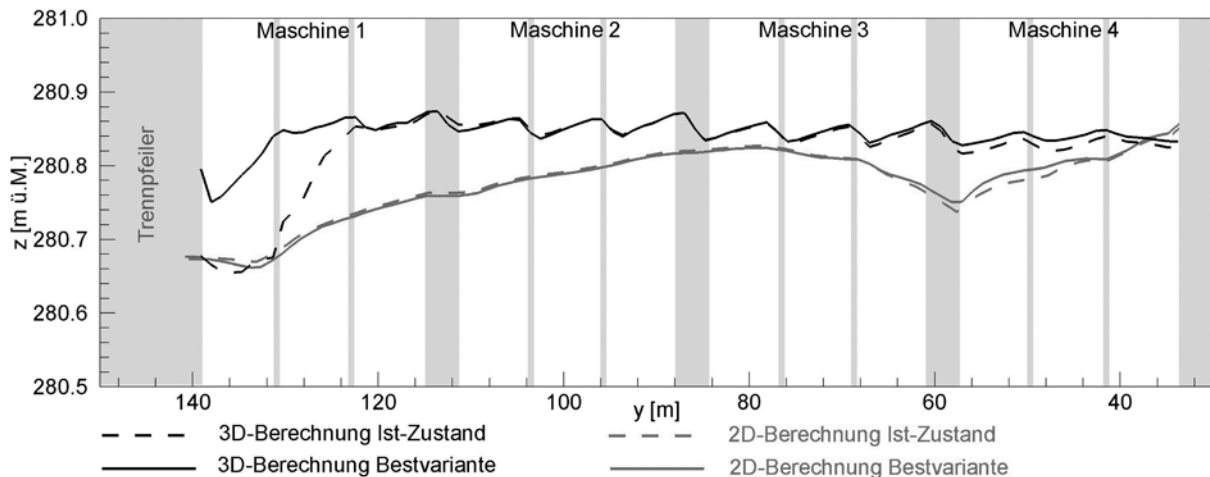


Abb. 6 Querprofile der Wasserspiegellagen vor dem Rechen der 2D- und 3D-Modellierung für den Ist-Zustand und die Bestvariante beim Lastfall LF_{krit} (Blick in Fließrichtung). Die Wellen in den Wasserspiegellagen der 3D-Modellierung sind auf den Pfeilerstau zurückzuführen.

Literatur

- [01] Rouvé G: „Der Krafthaustrennpfeiler – Strömungsverhältnisse an gekrümmten Wänden“. Theodor-Rehbock-Flussbaulaboratorium, Technische Hochschule, Karlsruhe, 1958.
- [02] Yakhot V and Orszag S. A: "Renormalization-Group analysis of turbulence" Physical Review Letters, 57 (14), pp. 1722-1724, 1986.
- [03] Yakhot V and Smith L. M: "The Renormalization Group, the ϵ -Expansion and Derivation of Turbulence Models," Journal of Scientific Computing, 7 (1), pp. 35-61, 1992.
- [04] Nezu I and Nakagawa H: "Turbulence in open-channel flows". Balkema, 1993.
- [05] BASEMENT – Basic Simulation Environment for Computation of Environmental Flow and Natural Hazard Simulation. © VAW, ETH Zurich, Faeh, R., Mueller, R., Roussetot, P., Veprek R., Vetsch, D., Volz, C., Farshi, D., 2006-2010.

Anmerkung

Die VAW bedankt sich bei der Kraftwerk Ryburg-Schwörstadt AG, insbesondere bei Herrn Dr. A. Fust für den Auftrag und die angenehme Zusammenarbeit. Die Software BASEMENT wurde mit finanzieller Unterstützung des schweizerischen Bundesamts für Umwelt entwickelt und ist frei erhältlich unter www.basement.ethz.ch.

Anschrift der Verfasser

Dipl.-Ing. Nicola Mache und Dipl.-Ing. David Vetsch
 Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich
 Gloriastrasse 37-39
 8092 Zürich, Schweiz
mache@vaw.baug.ethz.ch vetsch@vaw.baug.ethz.ch