

**Zeitschrift:** Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria  
**Herausgeber:** Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband  
**Band:** 98 (2006)  
**Heft:** 3

**Artikel:** Entwicklung einer Wasserstrahl-Lenzpumpe für das Kopswerk II  
**Autor:** Staubli, Thomas / Walpen, Raphael  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-939349>

### **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:** 25.12.2025

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

# Entwicklung einer Wasserstrahl-Lenzpumpe für das Kopswerk II

■ Thomas Staubli, Raphael Walpen

## Zusammenfassung

Der tiefste Punkt der Kavernenzentrale Kopswerk II der Vorarlberger Illwerke liegt 60 m unter dem Unterwasserspiegel. Um auch im unwahrscheinlichen Fall eines vollständigen Stromausfalls in der Anlage in der Lage zu sein, in die Kaverne eindringendes Wasser abzapumpen, wurde eine Wasserstrahl-Lenzpumpe entwickelt. Besondere Herausforderung beim Entwurf dieser Pumpe lag beim sehr hohen Triebwasserdruck von 83 bar, denn Strahlpumpen mit so grossem Speisedruck und entsprechend hohen Strahlgeschwindigkeiten neigen dazu, stark zu kavitieren.

Der Schwerpunkt bei der Pumpenauslegung lag deshalb bei der Kavitationsvermeidung. Die Grundausslegung der Pumpe wurde aufgrund empirischer Auslegungskriterien aus verschiedenen Quellen vorgenommen. Zur Optimierung der Auslegung wurde numerische Strömungsberechnung eingesetzt, indem schrittweise die Aussenkontur der Mischkammer so modifiziert wurde, dass Unterdruckgebiete vermieden werden konnten. Der Wirkungsgrad der Pumpe wurde durch Anpassung der Düsenposition in der Mischkammer optimiert. Die numerisch berechneten, globalen Pumpendaten stimmen gut mit den in der Literatur veröffentlichten experimentellen Daten überein.

## Einleitung

Im Zuge der Deregulierung des europäischen Strommarktes im letzten Jahrzehnt haben sich die Randbedingungen für die Stromerzeugung rasch geändert. Mit der wachsenden Nachfrage für Spitzenstrom zur Stabilisierung der Stromnetze ist es insbesondere wieder lohnend geworden, in Pumpspeichieranlagen zu investieren.

Im Jahre 2004 haben die Vorarlberger Illwerke mit der Konstruktion der neuen Pumpspeichieranlage, Kopswerk II, mit einer installierten Minimalleistung von 450 MW (3 x 150 MW) begonnen. Die Inbetriebnahme der ersten Turbinen/Pumpeinheit ist auf Ende 2007 geplant. Die weiteren zwei Einheiten sollen dann bis Mitte 2008 in Betrieb genommen werden [1].

Für das Kopswerk II wurde ein Konzept mit drei Pelton-turbinen und drei separaten Pumpen, wie in Bild 3 dargestellt, gewählt. Die Pelton-turbinen zeichnen sich durch optimales Betriebsverhalten von Teillast bis zu maximaler Last bei guten Wirkungsgraden im ganzen Bereich aus. Sie eignen sich für rasche Leistungsänderungen.

Der tiefste Punkt dieser Kavernenzentrale liegt 60 m unter dem Unterwasserspiegel. Im allerschlimmsten Szenario eines Wassereintruchs bei gleichzeitigem

Ausfallen der Stromversorgung sollte die Anlage noch immer entleert werden können. Dies wird möglich durch den Einsatz einer Wasserstrahlpumpe, welche vom Oberwasser gespeisen wird.

## Wasserstrahlpumpe

Wasserstrahlpumpen haben zwei Zuströmungen: einerseits den Primärstrom des Triebwassers durch die Düse und andererseits den Sekundärstrom des angesaugten Wassers. Der Triebstrom bildet nach Austritt aus der Düse einen Strahl hoher Geschwindigkeiten, welche das umgebende Wasser mitreissen. Der entsprechende Mitnahmeeffekt bewirkt den im Mischrohr angesaugten Sekundärstrom. In der Mischzone am Strahlrand treten aufgrund der grossen Geschwindigkeitsdifferenzen enorm hohe Schubspannungen auf. Nach einer Distanz von ca. 8 Durchmessern des Mischrohres sind die Teilströme vollständig vermischt. Durch den Impulsaustausch während des Mischens steigt der Druck im Mischrohr stark an. Im nachfolgenden Diffusor wird der Druck weiter durch den Abbau kinetischer Energie erhöht. Der Förderstrom der Pumpe entspricht also der Summe der beiden zugeführten Teilströme (Bild 2).

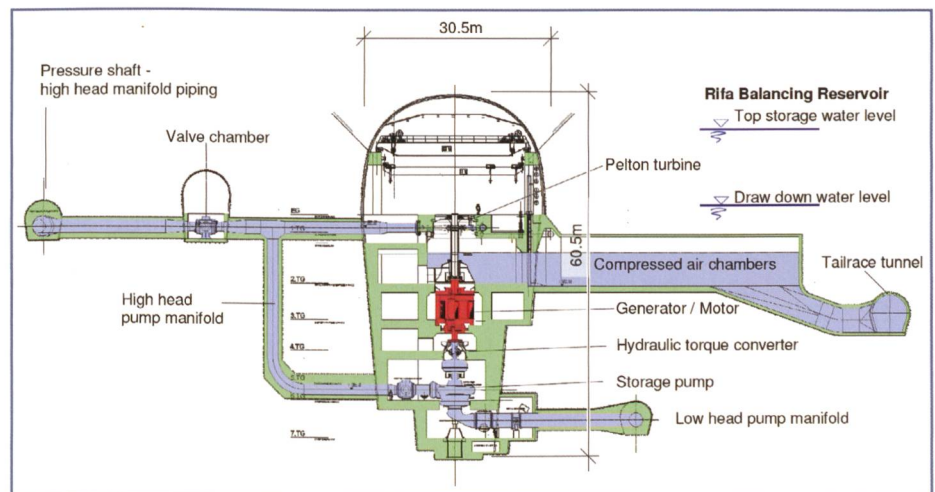


Bild 1. Querschnitt durch die Kaverne des Kopswerk II [1].

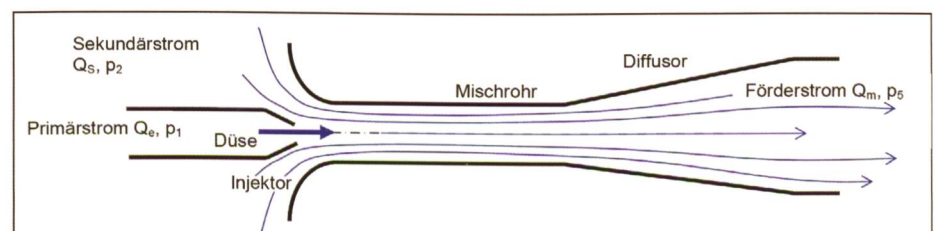


Bild 2. Schematische Darstellung der Elemente einer Strahlpumpe.

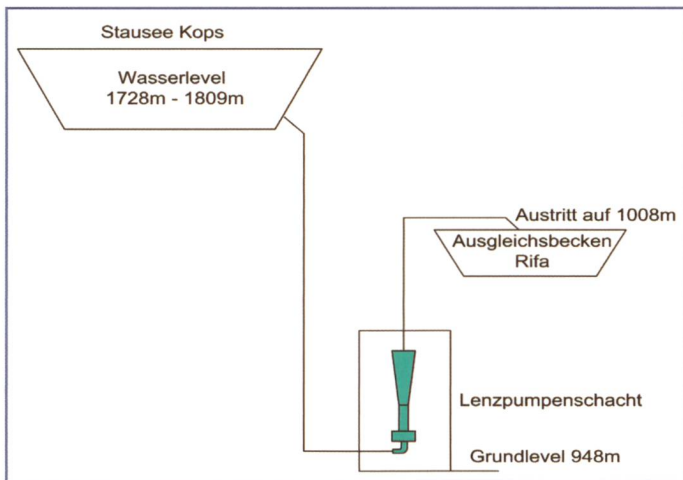


Bild 3. Anlagenschema mit geodätischen Höhen.

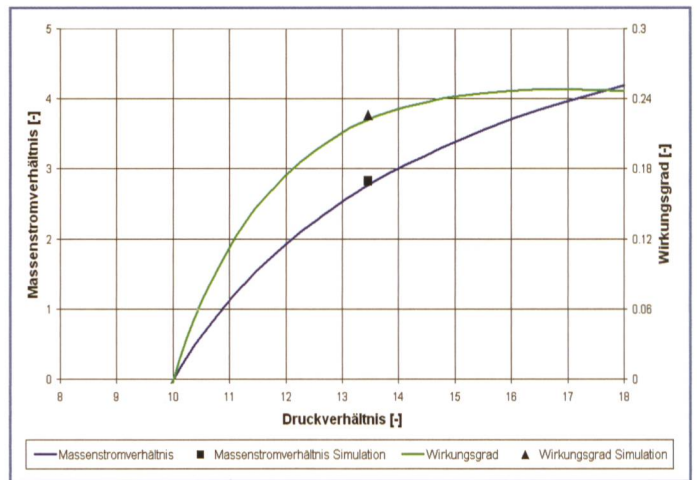


Bild 4. Vergleich des numerisch berechneten Massenstromverhältnisses (Quadrat) und Wirkungsgrades (Dreieck) mit den Auslegungsdaten gemäss Schulz [4] (ausgezogene Kurven).

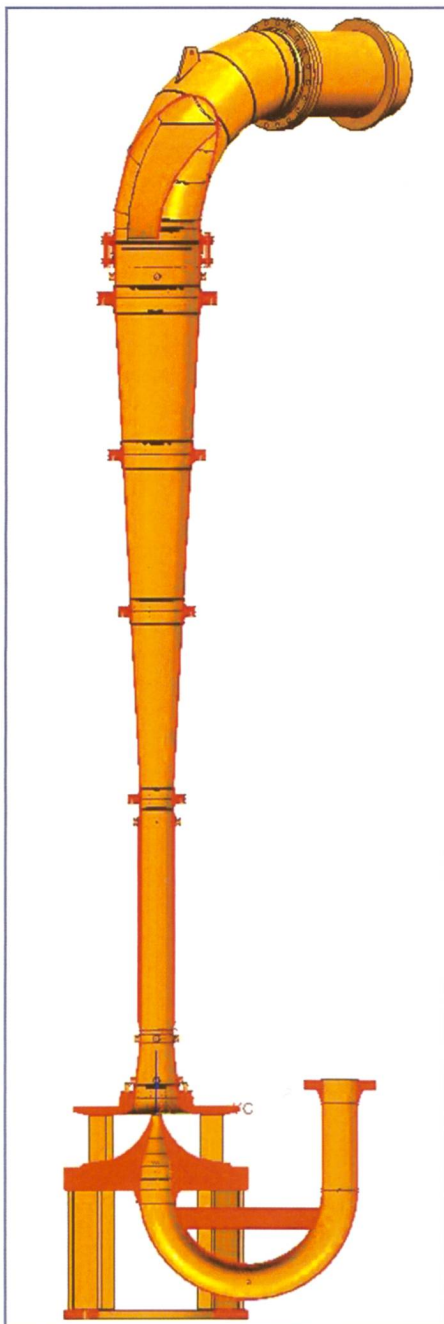


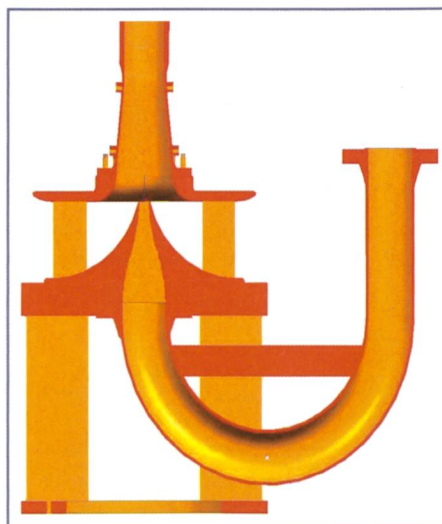
Bild 5. Zusammenstellung der Strahlpumpe und Schnitt durch den Einlaufbereich.

Die HTA Luzern hat von den Vorarlberger Illwerken den Auftrag erhalten, eine optimierte Wasserstrahlpumpe für das Kopswerk II zu entwerfen. Bei der Konstruktion war dabei besonders darauf zu achten, das Auftreten von Kavitation möglichst zu minimieren. Von der Anlage gegebene geodätische Randbedingungen sind in Bild 3 aufgeführt.

Eine erste Grobauslegung der Wasserstrahlpumpe wurde aufgrund der Auslegungsrichtlinien, welche in [2], [3], [4], [5] veröffentlicht sind, vorgenommen. Die diesen Publikationen zugrunde liegenden Messdaten sind älteren Datums, haben aber ihre Gültigkeit nicht verloren, wie nachfolgend gezeigt wird.

Das zur Auslegung benötigte Druckverhältnis  $\pi$  ist durch die geodätischen Randbedingung definiert:

$$\pi = \frac{p_1 - p_2}{p_5 - p_2}$$



wobei die Drücke den Bezeichnungen in Bild 2 entsprechen. Für die gewünschte Ansaugwassermenge  $Q_s$  muss ein experimentell bestimmtes Massenstromverhältnis  $\mu$  eingehalten werden:

$$\mu = \frac{\rho Q_s}{\rho Q_p}$$

Der Pumpenwirkungsgrad ist folgendermassen definiert:

$$\eta = \frac{P_s}{P_p} = \frac{\rho Q_s \cdot p_5 - p_2}{\rho Q_p \cdot p_1 - p_5} = \frac{\mu}{\pi - 1}$$

Die Resultate von nachfolgend durchgeführten numerischen Strömungsberechnungen bestätigten, wie in Bild 4 gezeigt, sehr gut die zum Beispiel von Schulz [4] angegebenen Wirkungsgrade und Massenstromverhältnisse. Aus der guten Übereinstimmung kann gefolgert werden, dass einerseits die empirischen Entwurfskriterien auch für die Wasserstrahlpumpe des Kopswerks II ihre Gültigkeit haben, andererseits aber auch dass den durchgeführten numerischen Simulationen vertraut werden kann. Basierend auf dieser Ausgangslage wurde die numerische Strömungsberechnung in den folgenden Entwicklungsschritten zur Optimierung der lokalen Formgebung im Einlaufbereich des Mischrohrs eingesetzt.

Nach Durchführung der Optimierung wurden aufgrund der Resultate der numerischen Berechnungen die folgenden Betriebsdaten der Pumpe bestimmt:

- Aufstellhöhe: 948,0 m
- Auslasshöhe: 1008,0 m
- Maximale Zulaufhöhe: 1809 m

- Angesaugter Volumenstrom (Sekundärstrom):  $Q_S = 0,56 \text{ m}^3/\text{s}$
- Triebvolumenstrom (Primärstrom):  $Q_e = 0,19 \text{ m}^3/\text{s}$
- Förderstrom:  $Q_m = 0,75 \text{ m}^3/\text{s}$
- Maximale Triebleistung:  $P_e = 1,54 \text{ MW}$
- An Sekundärstrom abgegebene Leistung:  $P_s = 0,32 \text{ MW}$
- Förderleistung:  $P_m = 0,46 \text{ MW}$
- Druckverhältnis:  $\pi = 13,64$

## Entwurf

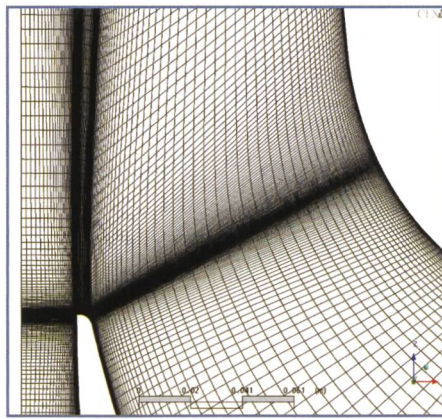
Die Wasserstrahlpumpe wurde auf der Basis der CAD-Software von Unigraphics Version NX3 in Übereinstimmung mit ISO-Normen entworfen. Die Detail-Konstruktion wurde in Zusammenarbeit mit dem Ingenieurbüro Brunner (siehe Kasten) ausgearbeitet. Nach der Erstellung eines 3D-Modells wurden 2D-Zeichnungen extrahiert. Für den Aufbau der Pumpe wurden Angaben zu den Fundamentkräften mitgeliefert.

Die Strahlpumpe wird derzeit bei den Vorarlberger Illwerke aus rostfreiem Stahl gefertigt. Bild 5 zeigt den Gesamtaufbau der Pumpe und einen vergrößerten Schnitt durch den Einlaufbereich. Eine Reihe von vorgesehenen Druckmessstellen wird dazu dienen, den Druckaufbau in der Pumpe im Rahmen der Inbetriebnahme zu überprüfen.

## Numerische Modellierung der Strömung

Die Berechnungen wurden mit Ansys CFX5.7, einem kommerziellen Code zur numerischen Strömungsberechnung durchgeführt [6]. Zur Modellierung der turbulenten Strömung wurde das SST-Modell (shear stress transport model) eingesetzt. Dieses Modell wurde von Menter entwickelt [7]. Das SST-Modell basiert auf dem  $k-\omega$ -Modell in Wandnähe und dem  $k-\varepsilon$ -Modell im übrigen Strömungsfeld.

Die für die Berechnungen benötigten Berechnungsnetze wurden mit ICEM-CFD Hexa erstellt. Dank des strukturierten Netzes konnte eine hohe Gitterqualität erreicht werden (minimale Winkel der Elemente  $50^\circ$ ). Es wurde Wert auf eine gute Grenzschichtauflösung gelegt. Die Beträge der dimensionslosen Wandabstände  $y^+$  lagen zwischen 8 und 80 im Mischrohr und zwischen 0,2 und 100 innerhalb der Düse. Bei der Simulation wurde die Rotationssymmetrie des Problems genutzt und nur ein  $2^\circ$ -Keil berechnet. Besonders fein wurde die Scherschicht des Strahls aufgelöst, wie in Bild 6 ersichtlich ist. Insgesamt wurden 170 000 Elemente benötigt, um netzunabhängige Resultate zu erreichen.



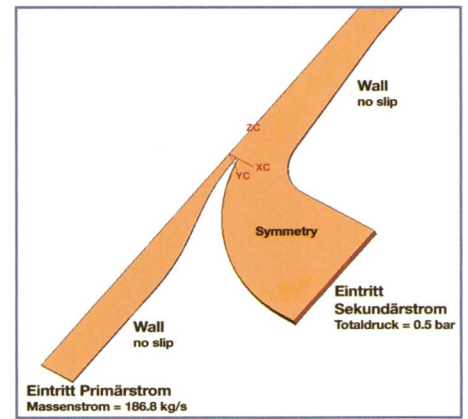
**Bild 6. Netzauflösung im Bereich des Düsenaustritts und der Scherschicht des Strahls.**

## Optimierung der Strahlpumpe

Die äussere Kontur des Injektors wurde schrittweise so modifiziert, dass Unterdruckgebiete an der Gegenkontur weitgehend vermieden werden konnten. Die statische Druckverteilung zeigte im ersten Entwurf (Bild 8 links) noch unzulässig tiefe Drücke, während für den endgültigen Entwurf (Bild 8 rechts) Unterdruckgebiete weitgehend eliminiert werden konnten. Da die Modifikation der Gegenkontur auch den Wirkungsgrad der Pumpe beeinflusste, musste im Zuge der Modifikationen auch immer die Position der Düse im Injektor neu optimiert werden.

## Kavitation in der freien Scherschicht

In den allermeisten technischen Strömungen spielen Schubspannungen im Vergleich zu den Drücken eine eher untergeordnete Rolle. Im Falle der freien Scherschicht an den Strahlberandungen hingegen dominieren die Einflüsse der Schubspannungen das lokale Strömungsfeld. Es sind die Schubspannungen, welche den Impulsaustausch mit dem Strahl erst ermöglichen und so die Pumpe antreiben.



**Bild 7. Randbedingungen der numerischen Strömungsberechnung.**

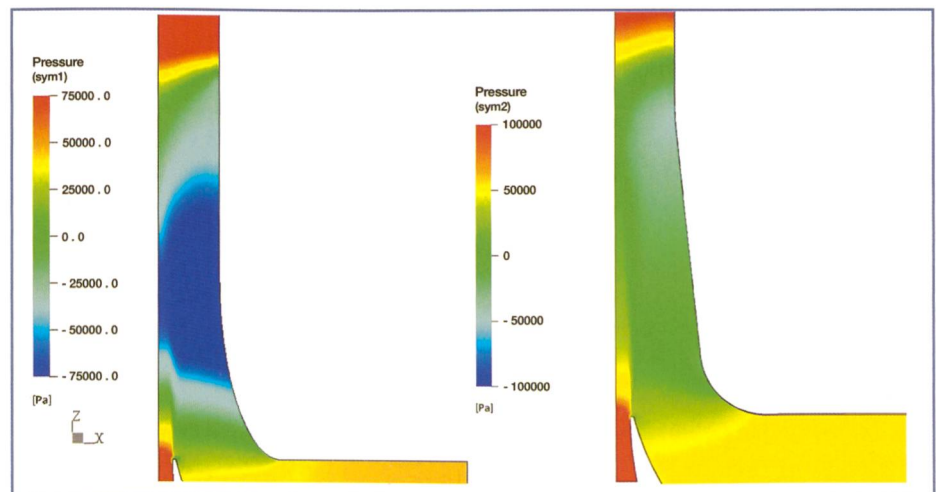
Die Schubspannungen sind für eine starke Produktion turbulenter kinetischer Energie in der Scherschicht verantwortlich. Dies führt zu lokaler Anisotropie der Turbulenz, was mit dem verwendeten SST-Modell nicht richtig wiedergegeben werden kann. Statische Drücke sind im Modell wie folgt definiert:

$$p' = p_{\text{Stat}} + \frac{2}{3} \cdot \rho \cdot k$$

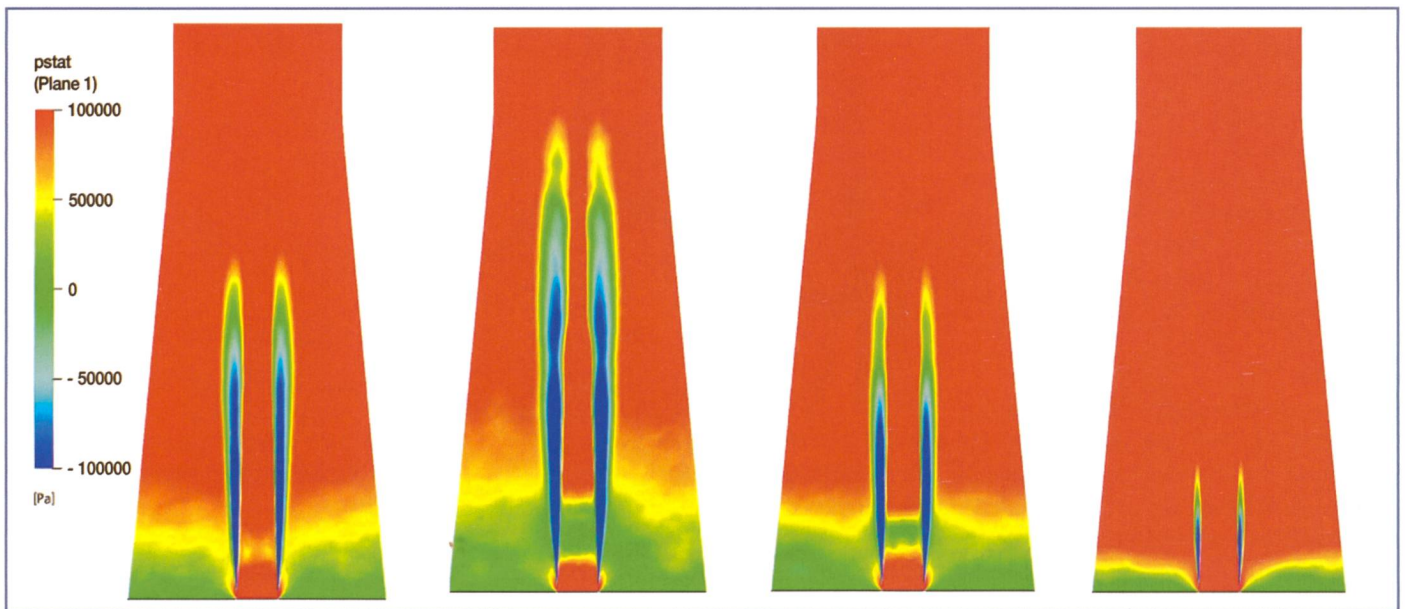
Da die turbulente kinetische Energie  $k$  sehr gross ist, werden am Strahlrand keine negativen Drücke in Abbildung 8 beobachtet. Dies steht im Widerspruch zu Experimenten, wo an den Strahlgrenzen Kavitation beobachtet werden kann.

Um die lokalen Drücke an den Strahlgrenzen etwas genauer zu untersuchen, wurde für zusätzliche Simulationen auch das SAS-Modell (Scale-Adaptive Simulation) von CFX5.10 [8] eingesetzt. Dieses Modell berücksichtigt inhomogene Schubspannungsverteilungen.

Das SAS-Konzept stützt sich auf die Einführung des von Kármán Längen-



**Bild 8. Statische Druckverteilung im Injektor (Überdruck).**



**Bild 9. Zeitlich veränderliche statische Druckverteilungen im Bereich der Strahl-Scherschichten simuliert mit dem SAS-Modell (rot  $\leq 1\text{bar}$ , blau =  $-1\text{bar}$ ).**

massstabs in den Turbulenzskalierungsgleichungen. Die durch den Längenmassstab gegebenen Zusatzinformationen erlauben im SAS-Modell, dynamisch die aufgelösten Wirbelstrukturen in der URANS-Simulation (Unsteady Reynolds Averaged Navier-Stokes) anzupassen. Ähnlich wie bei LES-Simulationen (Large Eddy Simulation) können damit zeitlich veränderliche, dynamische Strukturen im Strömungsfeld aufgelöst werden. Um den Rechenaufwand in Grenzen halten zu können, wird in stabilen Strömungsgebieten auf die Standard-RANS zurückgegriffen.

Wegen der inhärenten 3-Dimensionalität von Wirbelstrukturen müssen für SAS-Simulationen entsprechend auch 3D-Berechnungen durchgeführt werden, was den Rechenaufwand weiter enorm erhöht. Die SAS-Simulationen wurden deshalb nicht auf die gesamte Strahlpumpe angewandt sondern auf den Injektorbereich begrenzt. Dennoch war der Berechnungsaufwand für diese zeitvariablen Simulationen turbulenter Strukturen enorm. Für diese Berechnungen wurde ein Linux-Cluster mit 18 AMD Opteron 64 bit Prozessoren und insgesamt 20 Gbyte RAM eingesetzt.

Bild 10 zeigt 4 ausgewählte statische Druckverteilungen aus einer Zeitreihe. Es kann erwartet werden, dass die blau eingefärbten Zonen mit tiefen Drücken kavieren werden. Jedoch werden diese Kavitationszonen nicht in Kontakt mit Oberflächen kommen und somit keinen Schaden anrichten. Es kann aber erwartet werden, dass die Lärmproduktion enorm sein wird. Weiter kann aus den Simulationen mit dem SAS-Modell

geschlossen werden, dass aufgrund der Strahlinstabilitäten Druckschwankungen auftreten werden.

### Schlussfolgerungen

Es wurde eine Wasserstrahlpumpe für die Notfall-Lenzung der Kavernenzentrale Kopswerk II entwickelt und konstruiert. Im Verlauf dieser Arbeiten konnte das Wissen zur Auslegung solcher Pumpen wesentlich vergrößert werden. Strömungssimulationen mit dem SST- und dem SAS-Modell ergaben wertvolle Einsicht in die lokalen Strömungseffekte. Kavitation an den Injektorwänden konnten durch Geometrievariationen vermieden werden. Durch optimale Positionierung der Düse konnte der Wirkungsgrad ebenfalls optimiert werden.

Das erstellte 3-D CAD-Modell der Pumpe erlaubt den Vorarlberger Illwerken die Herstellung der Strahlpumpe unter Ausnützung der Möglichkeiten von CNC-Bearbeitung.

Die Inbetriebnahme der Strahlpumpen ist für das Jahr 2007 geplant. Feldmessungen werden es dann erlauben, die globalen Betriebsdaten wie auch die vorhergesagten lokalen statischen Drücke zu verifizieren.

### Literatur

- [1] Pürer E., Gökler G., «The power plant Kops II – Basic conditions, design and details of construction», Hydro2005, Villach, Austria, 2005
- [2] Schulz F., «Modellversuche für Wasserstrahl-Wasserpumpen», Habil. TU Wien, 1952
- [3] Raabe J., «Hydraulische Maschinen und Anlagen» VDI Verlag, 1989

[4] Schulz H., «Die Pumpen», Springer Verlag, 1977

[5] Flügel G., «Berechnung von Strahlapparaten», VDI- Forschungsheft 395, 1951

[6] ANSYS CFX 5.7 User Manual.

[7] Menter, F. R., «Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications», AIAA Journal 32 (8), 1994.

[8] Menter F.R., Egorov Y., «A Scale-Adaptive Simulation Model using Two-Equation Models», ANSYS CFX Germany, 2005

### Anschrift der Verfasser

Thomas Staubli ist Dozent für Hydromaschinen und Fluidmechanik an der Hochschule für Technik und Architektur Luzern.

Raphael Walpen ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Produktentwicklung der HTA Luzern

rwalpen@hta.fhz.ch

Hochschule für Technik+

Architektur Luzern

Technikumstr. 21

CH-6048 Horw