Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 79 (1987)
Heft: 9

Artikel: Hydraulische Modellversuche zur Gestaltung von Turbineneinläufen
Autor: Müller, Dieter / Raemy, Félix
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-940662

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: 05.07.2025

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

[3] Commission Internationale des Grands Barrages: Sécurité des Barrages. Bull. no 59, 1987.

[4] *Durville, J. L.:* Mouvement des Terrains. Colloque de CAEN, 1984; document no 83 du BRGM.

[5] *Gellatly, A. F.* et al.: Rockfalls in mountainous regions: Establishing a rationale for effective study. Colloque de CAEN, 1984; document no 83 du BRGM.

[6] *Lukáč, M.:* Failure of reservoir banks stability caused by wave abrasion. ICOLD Proceedings Rio de Janeiro, Q. 54, R. 1, 1982.

[7] *Rat, M.:* Météorologie, hydrogéologie et glissements de terrain. IV International symposium on landslides, Volume 3, Toronto 1984.

[8] *Sinniger, R.:* Geotechnik und Umwelt. «Schweizer Ingenieur und Architekt», Jahrg. *103*, no. 19, 1985.

Conférence tenue lors des jourrnées d'étude «Surveillance des rives des retenues; éboulement et glissements» des 25 et 26 juin 1987 à Lugano. Ces journées ont été organisées par le Groupe de travail pour l'observation des barrages du Comité national suisse des grands barrages.

Adresse de l'auteur: *Richard Sinniger,* Professeur à l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, Chaire de constructions hydrauliques, CH-1015 Lausanne.

Hydraulische Modellversuche zur Gestaltung von Turbineneinläufen

Dieter Müller und Félix Raemy

Zusammenfassung

Die Erneuerung und der Ausbau bestehender Wasserkraftwerke können zu hydraulischen Problemen führen, die durch Modellversuche gelöst werden müssen. Dies trifft insbesondere bei der optimalen Gestaltung von Turbineneinläufen zu. Einfache Versuchsprozeduren, die aber systematisch und unter enger Zusammenarbeit zwischen dem Bauingenieur und dem Maschinenkonstrukteur erfolgen müssen, erlauben die gestellten Ziele auf effiziente Weise zu erreichen.

Résumé: Dimensionnement du convergent d'alimentation de turbines à l'aide d'essais hydrauliques sur modèle

Le renouvellement et l'agrandissement d'aménagements hydro-électriques peuvent poser des problèmes d'hydraulique dont la solution est souvent donnée par les essais réalisés sur modèle. C'est en particulier le cas pour le dimensionnement optimal du convergent d'alimentation des turbines équipant les usines à basse chute. Une investigation simple permet d'atteindre efficacement les objectifs fixés. Celle-ci doit être toutefois menée d'une manière systématique et avec la collaboration étroite entre l'ingénieur civil et le constructeur des machines.

Summary: Using hydraulic model tests to shape turbine intakes

The renewal and extension of existing water power stations can bring hydraulic problems, which have to be solved with model tests. This is particulary the case for finding the optimum form of the turbine intakes. The form can be found efficiently by simple tests, which however have to be carried out systematically and with close cooperation between the civil and the mechanical engineer.

I. Einleitung

Aus technischen, betrieblichen und wirtschaftlichen Gründen werden immer häufiger ältere Wasserkraftwerke erneuert und ausgebaut. Dabei stellen sich oft spezielle hydraulische Probleme, die mit vorhandenen, einschränkenden Auflagen konstruktiver Natur verbunden sind. In diesem Zusammenhang wurde die Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) der ETH Zürich beauftragt, hydraulische Modellversuche zur Gestaltung verschiedener Turbineneinläufe durchzuführen. Die Lösung dieser Aufgabe setzt eine enge Zusammenarbeit zwischen dem Bauingenieur und dem Turbinenkonstrukteur voraus. Als Beispiel wird hier die Detailuntersuchung der vorgesehenen, neuen Turbineneinläufe am Kraftwerk Laufenburg präsentiert. Diese Studie erfolgte an der VAW im Auftrage der Elektrowatt Ingenieurunternehmung AG, in Vertretung der Kraftwerk Laufenburg AG, und unter der Mitwirkung der ebenfalls am Projekt beteiligten Sulzer-Escher Wyss AG.

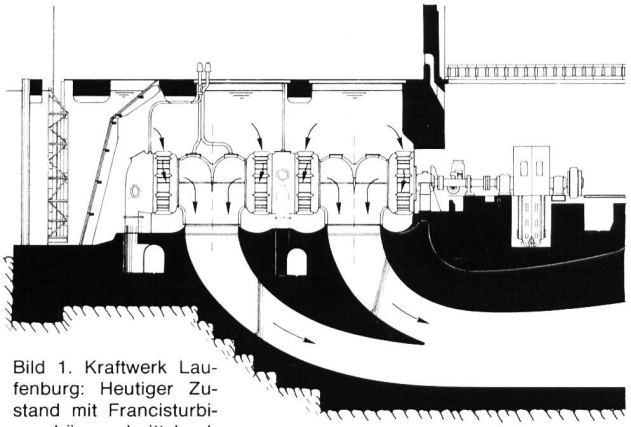


Bild 1. Kraftwerk Laufenburg: Heutiger Zustand mit Francisturbinen. Längsschnitt durch eine Öffnung.

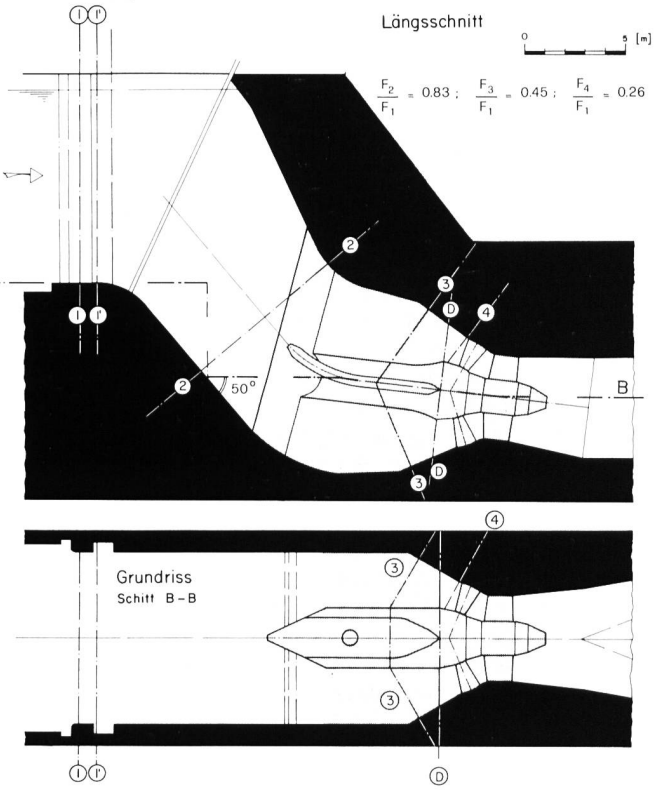


Bild 2. Kraftwerk Laufenburg: Schematische Darstellung der im Modell untersuchten neuen Einlaufform, mit Strafloturbine. Angegeben sind ebenfalls die benutzten Messprofile (Geschwindigkeits- und Druckmessungen) sowie das Verhältnis der entsprechenden Durchflussquerschnitte *F*.

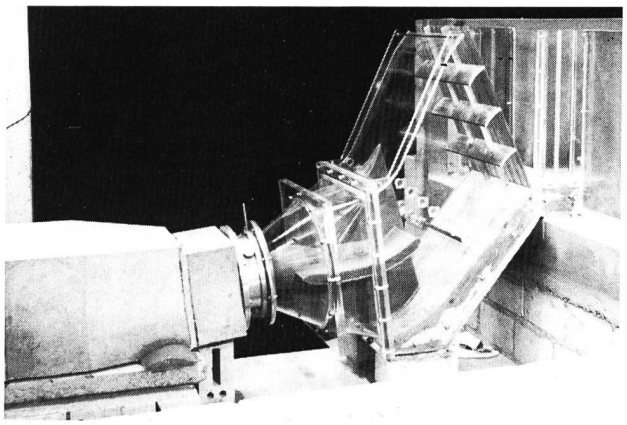


Bild 3. Modellnachbildung des Einlaufes mit Rechen und Turbinenkörper (Projektvariante).

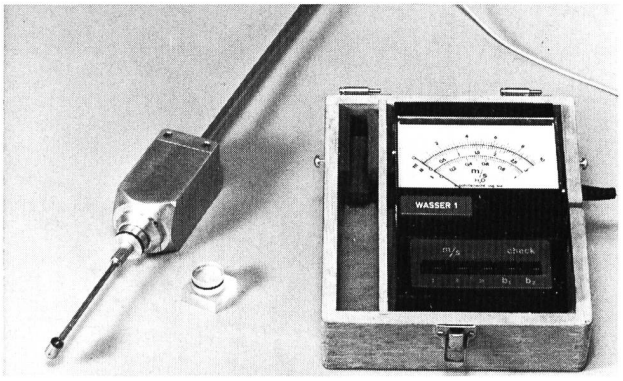


Bild 4. Geschwindigkeitsmessung. Messgerät mit Messflügel (Durchmesser 10 mm), Anzeige und Adapter für den Einsatz im Modell. Wenn die Sonde nicht eingesetzt ist, wird die Öffnung mit dem abgebildeten Zapfen aus Plexiglas verschlossen.

II. Die Ziele der Modellversuche

Beim geplanten Ausbau des Kraftwerkes Laufenburg sollen die zehn Francisturbinen durch modernere Strafloturbinen ersetzt werden. Gleichzeitig wird die gesamte Ausbauwassermenge von 1025 auf etwa 1400 m³/s erhöht. Die Realisierung dieser Massnahmen unter den gegebenen Platzverhältnissen (Bild 1) verlangt eine erhebliche Änderung der heutigen Einlaufkonfiguration (Bild 2), so dass vor den Turbinen neue Strömungszustände erwartet werden müssen. Der Turbinenkonstrukteur hatte eine aus Berechnungen und Erfahrung definierte vernünftige Einlaufform gewählt. Da diese eine stark geneigte Sohle aufweist, wurde jedoch das Auftreten von Ablösungen infolge Umleitung der Zulaufströmung befürchtet.
Um das Funktionieren des neu projektierten Bauwerks zu überprüfen, wurden Modellversuche mit folgender besonderer Zielsetzung in Betracht gezogen:

- Kontrolle, dass keine Ablösungen und Wirbel gebildet werden.
- Ausgeglichene Belastung der Turbine sowohl bei symmetrischer als auch bei asymmetrischer Zuströmung oberhalb des Einlaufes (untersuchte Ausbauwassermenge pro Einheit: 145 m³/s).
- Erfassung des Recheneinflusses auf die Turbinenzuströmung und Bestimmung optimaler Formen der Rechentragkonstruktion.

Diese Bedingungen wurden hauptsächlich anhand systematisch ermittelter Geschwindigkeitsprofile (Isotachenbilder) und durch Sichtbarmachung der Strömfäden im Turbineneinlauf überprüft.

Die Strafloturbine, deren Name von «straight flow» abgeleitet wurde, ist die moderne Ausführung der axial durchströmten Turbine mit um das Laufrad herum angeordnetem Generator. Sie weist folgende Hauptcharakteristiken auf:
- keine leistungsmässige Begrenzung durch den innenliegenden Generator,
- kompakte Bauweise,
- einfache und wirksame Generatorkühlung,
- genügend Raum am Laufradumfang, um einen Generator selbst für grössere Leistungen unterzubringen,
- stabiler Lauf und keine Leistungsschwankungen dank grossem Schwungmoment.

Bei diesem Turbinentyp muss aber der Lagerung und der Dichtung grosse Beachtung geschenkt werden.

III. Das Modell und die Versuchsdurchführung

Die Versuche wurden an einem Modell, basierend auf dem Froudeschen Ähnlichkeitsgesetz im Massstab 1:20 durchgeführt. Nachgebildet wurde eine Öffnung mit Turbinenblock (ohne Laufrad), Einlauf und einem Teil der Naturstrecke oberhalb derselben (Bild 3).
Da der Einlaufrechen des Prototyps gemäss Projektvariante aus rechteckigen Stäben mit 1,2 cm Dicke und 14 cm Lichtweite bestand, war eine Nachbildung im gewählten Massstab technisch nicht sinnvoll. Deshalb wurde im Modell nur jeder zweite Stab mit doppelter Dicke nachgebildet. Bei gleichbleibendem Verhältnis «Stabdicke zu Lichtweite» konnte die Wirkungsweise des vereinfachten Rechens als korrekt angenommen werden.
Die Zuströmungsverhältnisse zur Strafloturbine wurden im Einlauf selber qualitativ mittels Farbinjektionen beobachtet. Systematische Geschwindigkeitsmessungen wurden in den Profilen 1 bis 4 (siehe Bild 2) mit einem geeichten Mini-Flügel durchgeführt. Drücke wurden nur im einzigen Profil D mittels Wandpiezometer zur Kontrollzwecken ermittelt (Bild 4).
Verschiedene Änderungen am Einlauf wurden im Rahmen einer Variantenstudie geprüft. Dabei wurden die Trennpfeilerform und die Sohlenkote vor der Einlaufschwelle variiert, währenddem die Neigung von 50° der steilen Einlaufsohle beibehalten wurde.
Aufgrund punktueller Messwerte wurden systematisch Isotachenbilder ermittelt. Im Hauptmessquerschnitt (Profil 2) wurden diese mit dem VAW-Computer ausgewertet. Bei normaler, gerader Anströmung sollte erreicht werden, dass die gemessene Geschwindigkeitsverteilung im Einlauf möglichst symmetrisch und störungsfrei für alle Mengen bis Q_{max} bleibt. Die Abweichungen zwischen den örtlichen Geschwindigkeit v und der im Gesamtprofil bestimmten mittleren Geschwindigkeit v_m sollten ± 20% nicht überschreiten. Ferner sollte der Mittelwert der Strömungsrichtung in horizontaler und vertikaler Ebene nicht zu stark von der Ideallinie abweichen.
Bei allen Varianten wurden die Teilwassermengen Q_o und Q_u kontrolliert, die oberhalb respektive unterhalb der Längsrippe (siehe Turbinenkörper, Bild 2) fliessen. Damit konnte direkt aus der Integration der Isotachenbilder überprüft werden, ob die Turbinenöffnung gleichmässig belastet wird.

IV. Die Versuchsergebnisse

Optimierung des Einlaufrechens

Die ursprüngliche Form der Rechenquerträger sowie deren Orientierung zur Strömung mussten wegen Ablösungs-

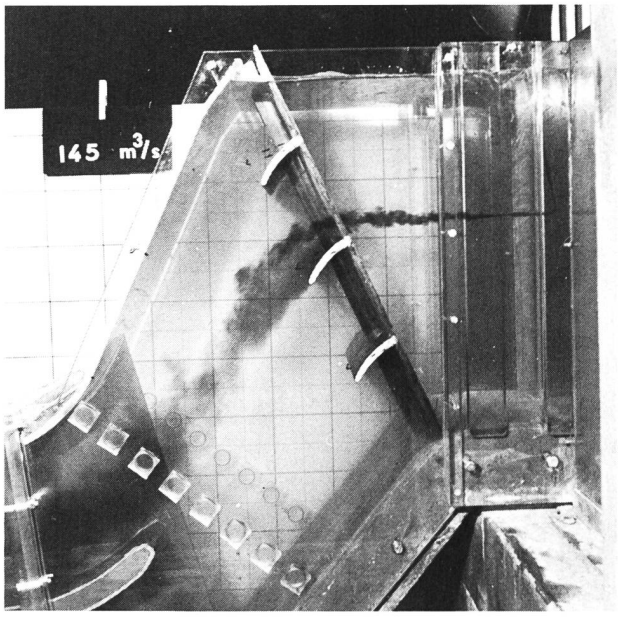


Bild 5. Ursprüngliche Form der Rechenquerträger: Ablösungserscheinungen am mittleren Träger bei $Q = 145$ m³/s (Visualisierung der Stromfäden mittels Farbe).

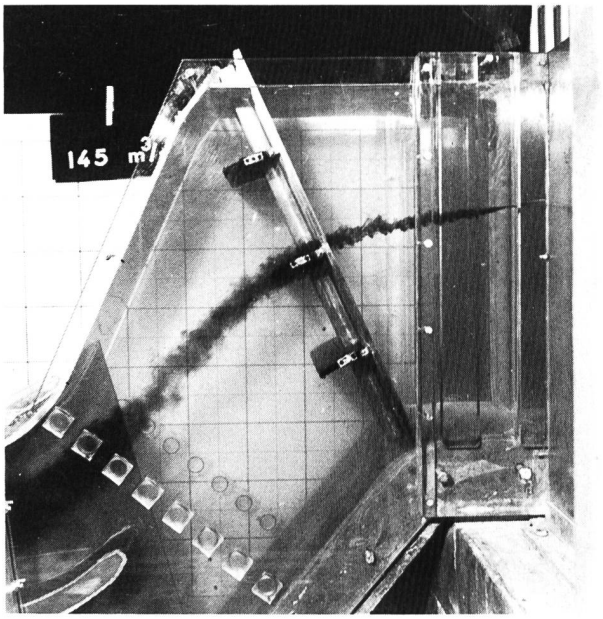
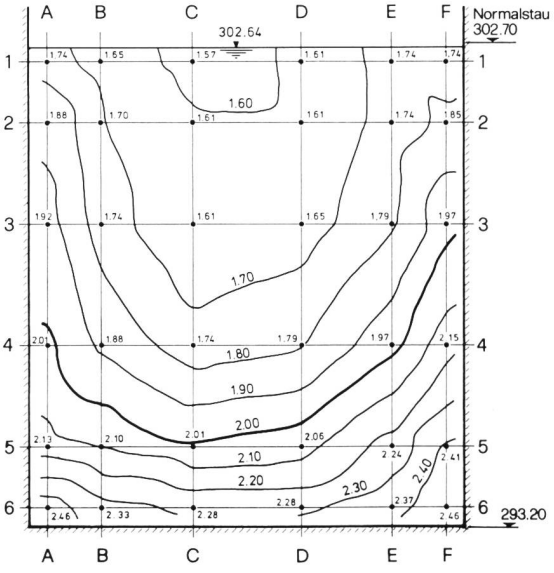
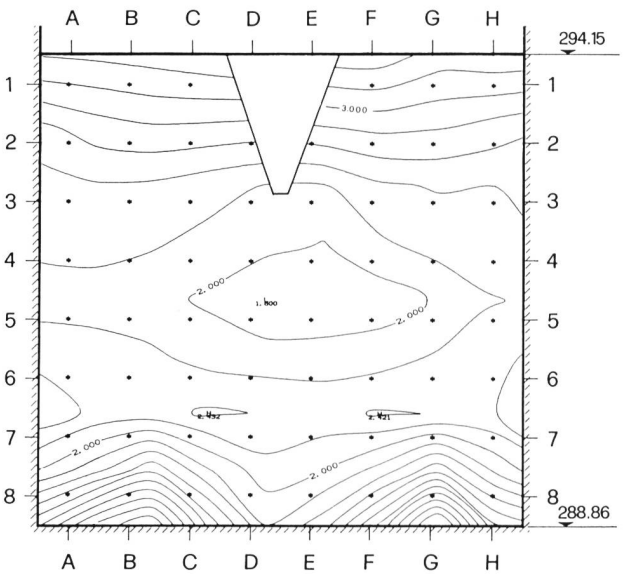


Bild 6. Optimierte Rechenform. Strömung im Bereich des mittleren Trägers bei $Q = 145$ m³/s.

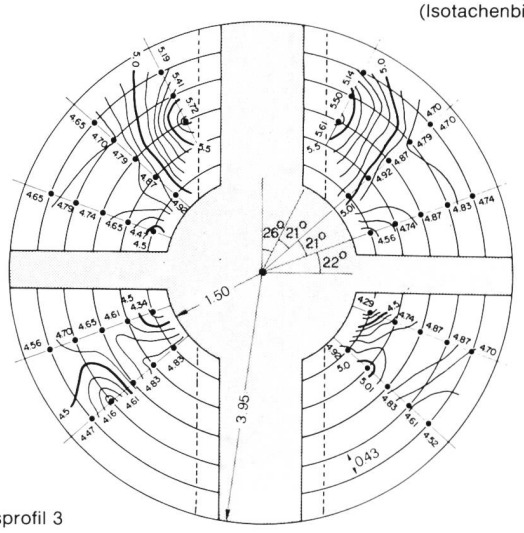


Messprofil 1

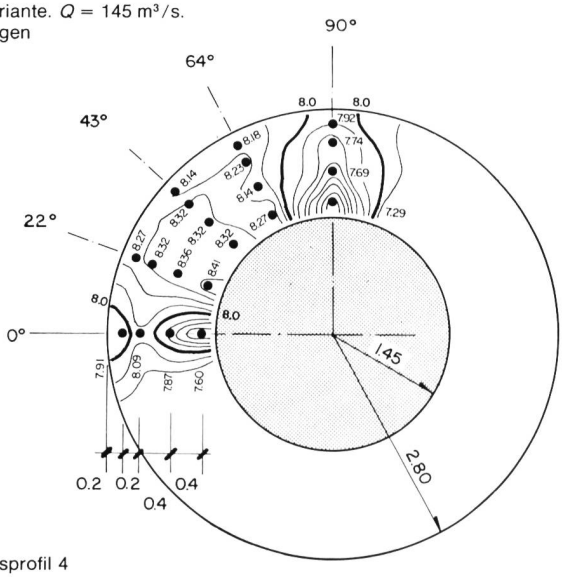


Messprofil 2

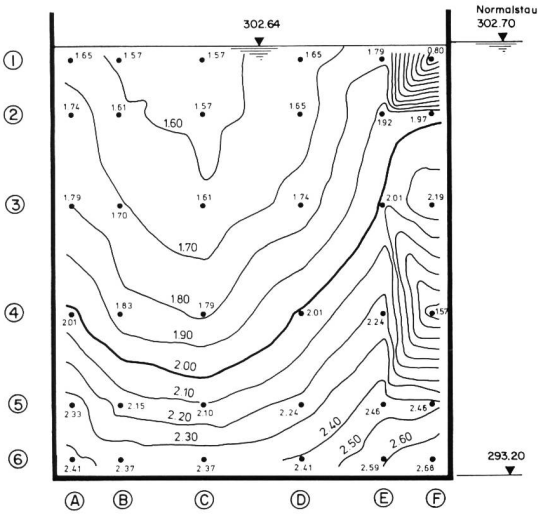
Bild 7. Vorgeschlagene Einlaufvariante. $Q = 145$ m³/s. Geschwindigkeitsverteilungen (Isotachenbilder).



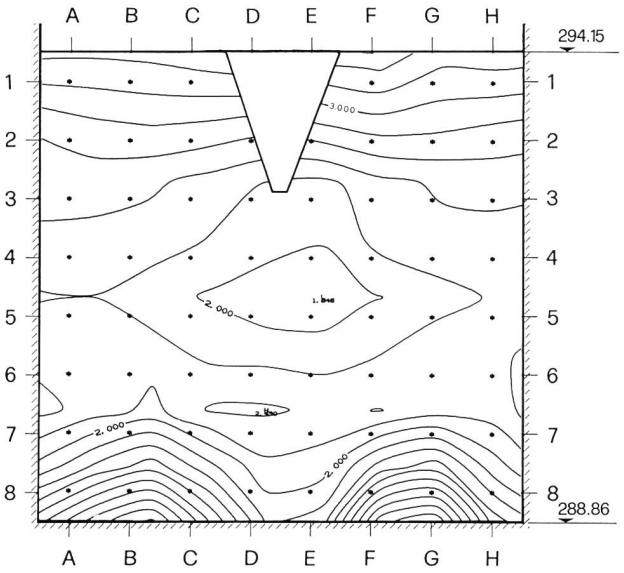
Messprofil 3



Messprofil 4



Messprofil 1



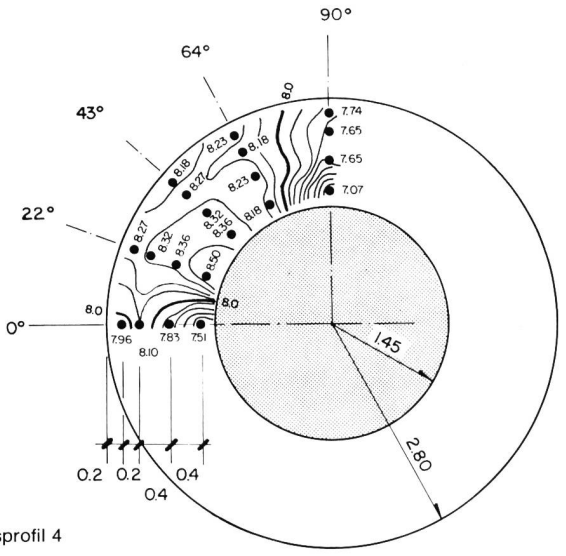
Messprofil 2

erscheinungen abgeändert werden. Aus dem Vergleich der Bilder 5 und 6 geht hervor, dass die Stromlinienführung am optimierten Rechen (Bild 6) wesentlich besser aussieht. Durch die geeignete Lage der Querbalken kann das Auftreten der Ablösungen praktisch vermieden werden.

Turbineneinlauf

Die Modelluntersuchung der verschiedenen Einlaufvarianten erlaubt die wesentlichen Ergebnisse wie folgt festzuhalten:

- Die steile Einlaufsohle gemäss Projektvariante mit Neigung von 50° bleibt bei allen betrachteten Wassermengen frei von Ablösungen.
- Der Einfluss der Einlaufkonfiguration (Trennpfeilerform, Flusssohlenkote) auf die Geschwindigkeitsverteilungen nach dem Rechen (Profile 2 bis 4) ist im allgemeinen gering.
- Die Isotachenbilder derselben Variante bei unterschiedlichen Wassermengen sind ähnlich.
- Die Strömung weist allgemein eine gute vertikale Symmetrie auf. Bei der vorgeschlagenen Einlaufvariante (Bild 7) lässt sich ferner ein sehr ausgeglichenes Isotachenbild unmittelbar vor der Turbine (Profil 4) feststellen. Mit den Verhältnissen $v_{max}/v_m = 1{,}04$ und $v_{min}/v_m = 0{,}9$ bei $Q =$ 145 m³/s, ist die gestellte Bedingung $0{,}80 \leqq v/v_m \leqq 1{,}20$ gut erfüllt.
- Durch die starke Längskrümmung der Einlaufdecke bedingt, fliesst allgemein in der oberen Profilhälfte mehr Wasser zu den Turbinen. Diese Mehrbelastung ($Q_o - Q_u$ liegt zwischen 2,5% (Bestvariante) und 5,4% der totalen Wassermenge, was als noch zulässige Abweichung betrachtet wurde.
- Die Überprüfung der vorgeschlagenen Einlaufvariante bei asymmetrischer Zuströmung im Oberwasser (Fall mit einer der beiden Nachbarturbinen geschlossen) hat gezeigt, dass der Einfluss dieser Asymmetrie schon kurz unterhalb des Rechens im Messprofil 2 nicht mehr erkennbar ist. Ein wirksamer Ausgleich findet in der Zulauftrompete statt, so dass das hydraulische Verhalten des Einlaufes auch bei ungünstigen Betriebsfällen einwandfrei bleibt (Bild 8).



Messprofil 4

Bild 8. Vorgeschlagene Einlaufvariante. Hydraulisches Verhalten bei asymmetrischer Zuströmung. Fall mit einer der beiden Nachbarturbinen geschlossen. $Q = 145$ m³/s. Isotachenbilder.

Adresse der Verfassers: *Dieter Müller,* dipl. Bauing. ETH, und *Félix Raemy,* Dr. sc. techn., dipl. Bauing. ETH, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, VAW, der ETH-Zürich, CH-8092 Zürich.