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

Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband

Band: 77 (1985)

Heft: 10

Artikel: Schwingungen von Einlaufrechen bei Wasserkraftanlagen : Ursachen, Bemessungsansätze und konstruktive Massnahmen

Autor: Schleiss, Anton

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-940959

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: 16.07.2025

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

Es wurden jeweils 5 Rechentafeln zu einem Grossfeld verschraubt, wodurch die Schwingfreudigkeit der verbundenen Felder gemindert wurde. Bis heute, etwa 9 Jahre nach der Montage dieser Stossverbindungen, konnten noch keine Veränderungen oder sonstige Schäden an einem Rechenfeld festgestellt werden. Allerdings werden diese im Dezember 1976 eingebauten Stossverbindungen vom Taucher regelmässig (einmal jährlich) kontrolliert. Dabei ergab sich, dass besonders während der ersten Jahre nach der Montage der Klemmverbindungen diese oft nachgezogen werden mussten (Bild 16).
Anstelle der glatten, auf Reibung basierenden Verbindungselemente könnte unter Umständen ein formschlüssiges Verbindungsstück mit selbstsichernden Schrauben in Betracht gezogen werden.

Massnahmen und Vorschläge

Die turnusmässig durchgeführten Rechenkontrollen durch Taucher bilden für unser Kraftwerk die einzige Möglichkeit einer schnellen Kontrolle. Versuche mit einer an der Harke der Rechenreinigungsmaschine montierten Unterwasserkamera befriedigten nicht. Die visuelle Prüfung durch den erfahrenen Taucher und dessen Klangprobe an Schweissstellen des Einlaufrechens sind praktische und in der Regel zufriedenstellende Prüfmethoden. Für den Taucher ist bei diesen Prüfungen infolge starker Strömung im Grenzbereich zur nächsten Maschine stets eine nicht ganz auszuschliessende Gefahr vorhanden. Dieser Gefahrenbereich sowie die Verhaltensmassregeln der Taucher sind durch Vorschrift VBG-Nr. 39 unter «Taucherarbeiten» genau festgehalten; diese wurden vom Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften herausgegeben.
Bei der nächsten grossen Revision an der Maschine 1 (planmässig im Winter 1985/86) ist vorgesehen, 2 bis 3 Rechenfelder aus dem Einlauf der Maschine 1 zu ziehen und durch Reservefelder zu ersetzen. Die 3 gezogenen Rechenfelder werden danach gereinigt, sandgestrahlt und anschliessend von einer Materialprüfanstalt auf Risse untersucht.
Alles in allem hielt der dritte Maschinenhaus-Einlaufrechen bis jetzt die in ihn gesetzten Erwartungen. Wenn in einem Jahr die geplante metallurgische Untersuchung in unserem Sinne positiv ausfällt, werden wir für die nächsten Jahre keinen grösseren Kummer mit unserem Einlaufrechen haben.

Adresse des Verfassers: *Günter Schlageter*, Ing. grad., Stellvertreter des Betriebsleiters, Rheinkraftwerk Albbruck-Dogern AG (RADAG), Kraftwerkstrasse 34, D-7892 Albbruck.

Schwingungen von Einlaufrechen bei Wasserkraftanlagen

Ursachen, Bemessungsansätze und konstruktive Massnahmen

Anton Schleiss

Zusammenfassung

Die Verhinderung von Resonanzschwingungen durch Hochabstimmung des Einlaufrechens ist das Hauptziel der dynamischen Bemessung. Da Schwingungen mit geringen Amplituden gleichwohl auftreten können, gewährleistet nur der Ermüdungsnachweis in Kombination mit konstruktiven Massnahmen die Betriebssicherheit des Rechens.

Résumé: Vibration des grilles de prise d'eau équipant les centrales hydroélectriques – Origine des vibrations, conditions de stabilité et mesures constructives

Le but du dimensionnement dynamique est d'empêcher l'apparition des fréquences de résonance grâce au choix de fréquences propres de la grille plus élevées. Des vibrations de faible amplitude pouvant toutefois être engendrées, la sécurité de fonctionnement de la grille n'est alors garantie que par une résistance à la fatigue appropriée et par la prise de mesures constructives adéquates.

Synopsis: Trashrack vibrations in hydroelectric power plants – Causes of forcing frequencies, prevention of resonant response and fatigue failure, constructive measures.

The main aim in dynamic trashrack design is to avoid resonance by ensuring the natural frequency of the trashrack is sufficiently higher than the forcing frequency. Despite this it is still possible for small amplitude vibrations to occur. Trashracks must therefore be designed with additional constructive elements to prevent fatigue failure.

Einleitung

Einlaufrechen schützen empfindliche Anlageteile von Kraftwerken wie Turbinen, Pumpen und Schieber vor Geschwemmsel und Eis. Ein gebrochener Rechen kann diese Schutzaufgabe nicht mehr erfüllen, er verursacht sogar eine zusätzliche Gefährdung, indem neben dem Geschwemmsel selbst auch Stahlteile in die hydraulischen Maschinen gelangen können. Die schwerwiegenden Folgen sind bekannt: Schäden in Kraftwerkszentralen und kostspielige Betriebsunterbrüche. Zu Zerstörungen an Einlaufrechen führen hauptsächlich dynamische Beanspruchungen wie Stossbelastungen und lang andauernde Schwingungen. Vor allem letztere sind bei den Betriebsleitern von Flusskraftwerken am meisten gefürchtet, und zwar zu Recht, wie ein Erfahrungsaustausch anlässlich der Betriebsleiterversammlung des Verbandes Aare-Rheinwerke (14. März 1985 in Kleindöttingen) deutlich zeigte.

Ursachen von Rechenschwingungen

Rechenstäbe schwingen physikalisch gesehen wie die Saiten eines Musikinstrumentes. Deshalb ist in gewissen Fällen das Schwingen eines Einlaufrechens hörbar. Eine Klaviersaite vergleichsweise klingt resp. schwingt erst nach einer Anregung, nämlich dem Anschlagen der Klaviertaste. Es ist aber auch möglich, eine bestimmte Klaviersaite ohne An-

schlagen der Klaviertaste anzuregen, indem man die entsprechende Saite an einem anderen, in der Nähe stehenden Klavier erklingen lässt. Rechenschwingungen entstehen also nicht nur durch kurzzeitige Störungen wie Aufprall von Geschwemmsel – sprich Anschlagen der Klaviertaste – sondern auch durch Fremdschwingungen – sprich Nachbarklavier.

Die Anregung eines Rechens ist grundsätzlich durch zwei Arten von Fremdschwingungen möglich:

1) Vibration der Rechenauflager
2) Periodische Wirbelablösungen an den Rechenstäben im strömenden Wasser.

Ausgangspunkt für die *Vibration der Rechenauflager* sind die Turbinengruppen, ausnahmsweise auch Rechenreinigungsmaschinen. Von einer Rohrturbine beispielsweise können etwa folgende Anregerfrequenzen ausgehen:

Anregerfrequenzen einer Rohrturbine
Drehzahl 108 U/min: Maschinendrehfrequenz 1,8 Hz
4 Turbinenschaufeln: Schaufeldrehfrequenz 7,2 Hz (4×1,8)
16 Leitschaufeln: Höhere Frequenzen bis 115 Hz (16×7,2)

Hauptanreger für Rechenschwingungen ist das strömende Wasser, indem sich an den Rechenstäben periodisch Wirbel ablösen. Dieses Phänomen lässt sich besonders an einem Rundstab sehr gut visualisieren (Bild 1). Die Wirbellösung beginnt bei einem 5 cm dicken Stab etwa bei einer Fliessgeschwindigkeit von 1 mm/s. Diese sogenannte Karmansche Wirbelstrasse verändert sich ab ungefähr 1 m/s zu einem stark turbulenten Wirbelband. Die sich periodisch

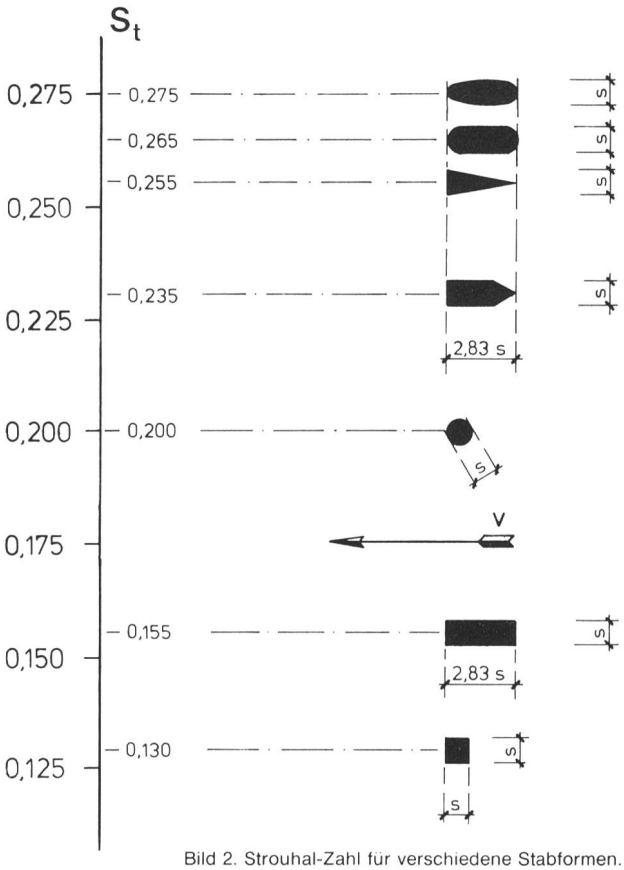

Bild 2. Strouhal-Zahl für verschiedene Stabformen.

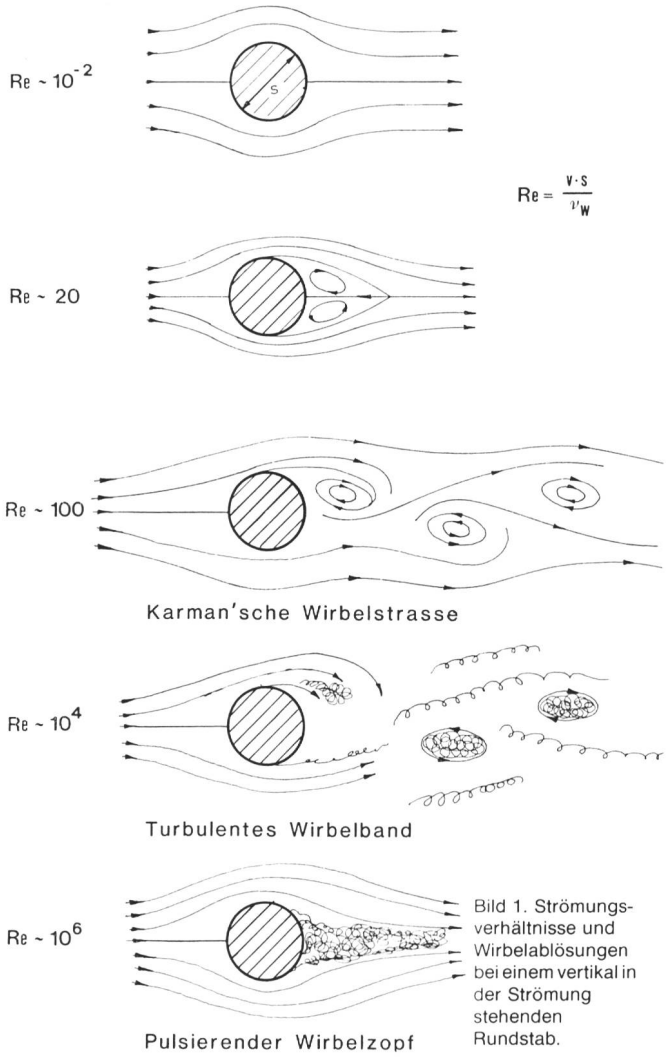

Bild 1. Strömungsverhältnisse und Wirbelablösungen bei einem vertikal in der Strömung stehenden Rundstab.

links und rechts vom Stab ablösenden Wirbel verursachen so die Stabschwingungen. Bei höheren Fliessgeschwindigkeiten (= 10 m/s) entsteht ein pulsierender Wirbelzopf.

Anregerfrequenzen des strömenden Wassers

Die Frequenz der periodischen Wirbelablösungen ist proportional zum Verhältnis der Fliessgeschwindigkeit zur Stabdicke, wobei die Proportionalität durch die sogenannte Strouhal-Zahl gegeben ist [1, 2].

$$f_{AW} = \frac{S_t \cdot v}{s} \qquad (1)$$

f_{AW} Frequenz der Wirbelablösungen
S_t Strouhal-Zahl
v Fiessgeschwindigkeit im Nettoquerschnitt
s Stabdicke

Die Strouhal-Zahl hängt von der Stabform sowie vom Stababstand ab. Je hydrodynamischer ein Stabquerschnitt ist, desto grösser ist die Strouhal-Zahl und somit die Frequenz der Wirbelablösungen (Bild 2). Der Stabstand beeinflusst die Strouhal-Zahl nur, falls er weniger als die fünffache Stabdicke beträgt. Die Stababstände bei den üblichen Rechenanlagen von Flusskraftwerken liegen meistens darüber, so dass die Annahme einer konstanten Strouhal-Zahl gerechtfertigt ist.

Eine wesentliche Unsicherheit bei der Vorhersage der Anregerfrequenz des Wassers liegt in der Durchströmgeschwindigkeit des Rechens. Trotz strömungstechnisch günstiger Ausbildung des Einlaufes können lokale Geschwindigkeitsspitzen auftreten; diese erreichen bei Flusskraftwerken etwa den 2- bis 3fachen Wert der mittleren Durchströmungsgeschwindigkeit [5, 6], bei Pumpspeicherwerken gar den 5- bis 10fachen Wert [7]. Diese Tatsache wird auch durch das lokale Auftreten von Rechenbrüchen bestätigt [9].

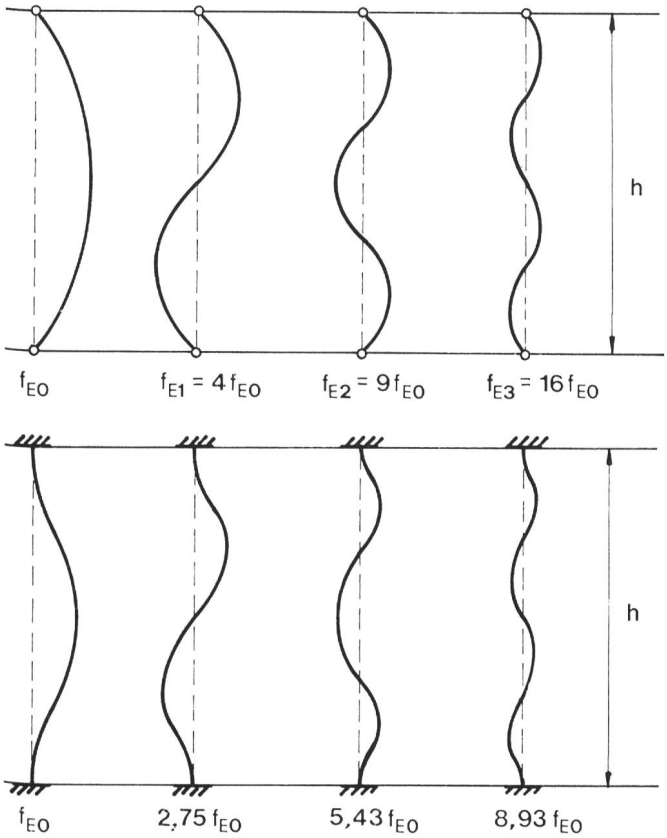

Bild 3. Schwingungsformen und Eigenfrequenzen von gelenkig gelagerten (oben) und eingespannten (unten) Rechenstäben.

Das Anfahren der Maschinen sowie das auf dem Rechen liegende Geschwemmsel kann kurzzeitig die Frequenz der Wirbelablösung bestimmen; für die Anregung des Rechens ist aber der stationäre Zustand massgebend.

Eigenfrequenzen von Rechenstäben und Rechenfeldern

Falls die Anregerfrequenz der Eigenfrequenz eines Einlaufrechens entspricht, entsteht eine Resonanzschwingung, welche innert kürzester Zeit zu einem Rechenbruch führt. Ein einzelner Rechenstab kann verschiedene Schwingungsformen annehmen und weist somit auch mehrere, gesetzmässig miteinander verbundene Eigenfrequenzen auf (Bild 3). Die Grundfrequenz eines Stabes ist umgekehrt proportional zur Wurzel seiner Durchbiegung, welche sich mit Gleichung (2) bestimmen lässt [1, 2]:

$$f_{Eo} = \frac{M}{h^2}\sqrt{\frac{E_s \cdot I}{A(\varrho_s + \varrho_w \cdot b_{wirk}/s)}} \qquad (2)$$

f_{Eo}	Grundfrequenz
h	schwingungsfähige Stablänge (Querstababstand)
M	Lagerungskoeffizient (gelenkig M=1,57, eingespannt M=3,57)
E_s	Elastizität von Stahl
I	Trägheitsmoment des Stabes quer zur Fliessrichtung
A	Querschnittsfläche des Stabes (Flachstahl $A = s \cdot l$)
ρ_s, ρ_w	Dichte von Stahl resp. Wasser
b_{wirk}	wirksamer Stababstand ($b_{wirk} < b$ resp. $< 0{,}7l$)

Der letzte Summand in Gleichung (2) berücksichtigt, dass eine bestimmte Wassermasse zwischen den Stäben mitschwingt. Diese wird durch einen wirksamen Stababstand charakterisiert, welcher höchstens 70% der Stabbreite resp. dem tatsächlichen Abstand entspricht.

In Bild 4 ist die Grundfrequenz eines rechteckigen, beidseitig eingespannten Rechenstabes in Abhängigkeit der Stablänge für verschiedene Stabdicken dargestellt. Variiert wurde auch das Verhältnis Stabdicke zum wirksamen Stababstand.

Rechentafeln oder Rechenbündel bestehen üblicherweise aus 5 bis 10 Rechenstäben, die durch Distanzhalter in bestimmten Abständen miteinander verbunden sind. Diese Distanzhalter übernehmen bei der europäischen Ausbildungsart, im Gegensatz zur amerikanischen, keine eigentliche Tragfunktion. Die Rechenlasten werden über die Einzelstäbe auf die Quer- und Randträger abgegeben. Die Bestimmung der Eigenfrequenzen eines solchen Gitterrostes erscheint auf den ersten Blick problematisch. Beobachtungen und Modellversuche zeigen aber, dass die prädominante Schwingung von den Einzelstäben ausgeht und die Distanzhalter nur die ihnen aufgezwungenen Deformationen mitmachen. Erfahrungsgemäss treten Rechenbrüche infolge Schwingungen fast ausschliesslich bei den Knoten Rechenstab-Distanzhalter auf [4, 5, 9]. Die maximale Beanspruchung in diesen Knoten entsteht dann, wenn alle Stäbe eines Rechenfeldes in Phase mit der Grundfrequenz schwingen (Bild 2: f_{Eo}). Eine Abschätzung mit der Deformationsmethode zeigt, dass die kurzen, widerstandsfähigen Distanzeisen eine nahezu hundertprozentige Einspannung des Rechenstabes bewirken. Dies gilt sowohl für geschweisste wie auch mit Zugstangen zusammengehaltene Rechenfelder. Bruch- und Deformationsbilder bestätigen diese vollständige Einspannung (Bild 5). Bei geschweissten Rechentafeln bricht der Rechenstab häufig längs der Schweissnaht des Distanzhalters, was mit der Kerbwirkung der Naht zu erklären ist (Bild 6). Für die Grundschwingung eines Rechenstabes zwischen den Distanzeisen treten also in der Praxis am häufigsten Rechenbrüche auf. Die Verhinderung von Resonanz für diese Schwingungsform muss das Hauptziel jeder Rechenbemessung sein.

Verhinderung von Resonanz – Hochabstimmung des Rechens

Damit keine Resonanzschwingung mit sehr grossen Amplituden entsteht, ist der Rechen hoch abzustimmen. Die massgebende Eigenfrequenz des Rechens muss also mit einem bestimmten Sicherheitsabstand über der zu erwartenden Anregerfrequenz liegen. Für die Bemessung wird etwa folgende Bedingung vorgeschlagen [6]:

$$f_A < 0{,}60 \div 0{,}65 \cdot f_E \qquad (3)$$

Die Hochabstimmung des Rechens muss natürlich in erster Linie für die Anregerfrequenz des strömenden Wassers erfolgen, wobei als massgebende Eigenfrequenz die erwähnte Grundschwingung eines Einzelstabes zwischen den Distanzhaltern zu wählen ist. Anschliessend ist zu kontrollieren, ob auch für die möglichen Anregerfrequenzen der Turbinengruppen keine Resonanzgefahr besteht. Problematisch sind meistens über der Grundfrequenz des Rechenstabes liegende Anregerfrequenzen (Bild 2, $f_A > f_{E1}$).

Konstruktive Massnahmen zur Resonanzverhinderung

Ein Rechen kann grundsätzlich durch Verminderung der Anregerfrequenz oder durch Erhöhung der Eigenfrequenz hoch abgestimmt werden.

Die *Anregerfrequenz des strömenden Wassers* (Gleichung 1) lässt sich praktisch nur über die Strouhal-Zahl, also die Stabform beeinflussen. Stababstand und Anströ-

mungsgeschwindigkeit sind an übergeordnete Ziele wie Schutz vor Geschwemmsel und minimale Einlaufverluste gebunden. Hydrodynamische Rechenprofile sind nicht nur teurer, sondern auch schwingungsanfälliger (Bild 3). Flachstähle (Rechteckprofile) reduzieren im Vergleich dazu die Anregerfrequenz etwa um 40%. Die grösseren Rechenverluste lassen sich in der Praxis durch einen vermehrten Einsatz der Rechenreinigungsmaschine oft ohne weiteres kompensieren, da die Verluste infolge Geschwemmselbelegung weit beträchtlicher sind.

Ein Rechen wird aber wirkungsvoller über die *Erhöhung seiner Eigenfrequenz* hoch abgestimmt. Dies ist durch die Verringerung der Abstände der Distanzhalter sowie Vergrösserung des Stabwiderstandes quer zur Fliessrichtung möglich (Gleichung 2). Oft zitiert wird ein Bemessungsdiagramm von *Zowski,* das den maximal zulässigen Abstand der Distanzhalter in Abhängigkeit der Rechenanströmungsgeschwindigkeit für verschiedene Rechenstabdicken angibt [3]. Zu beachten ist, dass dieses Diagramm nur für Rundstäbe gilt (S_t = 0,2) sowie auf einem Verhältnis f_A/f_E = 0,4 basiert und deshalb nur als Abschätzung dienen kann. Genauere Resultate liefert die Bemessung mit den Gleichungen (1), (2) und (3).

Als sehr erfolgreiche flankierende Massnahme zur Resonanzverhinderung wäre die seitliche Verbindung der Rechenfelder auf der Höhe der Distanzeisen zu erwähnen [4, 10]. Durch diese Massnahme wird einerseits die Schwingung gedämpft, da benachbarte Rechentafeln kaum in Phase schwingen. Anderseits wirken die Distanzhalter für die Rechenstäbe als Fixpunkte, so dass die schwingfähige Rechenlänge tatsächlich dem Querabstand entspricht. Geschweisste seitliche Verbindungen sind starrer als geschraubte, dafür ist der Aufwand bei einer allfälligen Demontage der einzelnen Rechenfelder erheblich grösser. Bei Schraubenverbindungen besteht allerdings Lockerungsgefahr [9]. Gute Erfahrungen wurden auch mit feldweise abwechselnd horizontal und schräg angeordneten Querstäben gemacht [8]. Nicht empfehlenswert ist eine elastische Verbindung zwischen Rechenstab und Distanzhalter (Druckhülse mit Zugstange und Neopreneplatte als Unterlagsscheibe), da dadurch die Grundfrequenz des Rechens vermindert und die Resonanzgefahr erhöht wird. Angebracht sind solche elastischen Anschlüsse nur bei den Rechenauflagern, falls von den Maschinengruppen massgebende Anregerfrequenzen ausgehen.

Bemessung auf Ermüdungssicherheit

Bei verhinderter Resonanz treten trotzdem Schwingungen auf, deren Amplituden allerdings wesentlich geringer sind. Die maximale Auslenkung eines zwischen den Distanzeisen mit der Grundfrequenz schwingenden Rechenstabes kann mit der folgenden Formel abgeschätzt werden [11]:

$$\delta = \underbrace{\frac{c \cdot p_o \cdot h}{k}}_{\delta_o} \cdot \frac{1}{\sqrt{(1-(f_E/f_A)^2)^2 + (2\xi f_E/f_A)^2}} \qquad (4)$$

δ Maximale Schwingungsamplitude

c Lastfaktor (gelenkig c = 0,64, eingespannt c = 0,533)

p_o Statische Stabbelastung quer zur Fliessrichtung infolge Wirbelablösung: $p_o = 0{,}25\ \rho_w \cdot (v^2/2)l$ [10]

k Stabsteifigkeit (gelenkig $k = 384\ EI/5h^3$, eingespannt $k = 384\ EI/h^3$)

ε Dämpfung (Stahl 1 bis 2%)

Für einen nach Gleichung (3) hoch abgestimmten Rechen ist der Einfluss der Dämpfung vernachlässigbar. Der Vergrösserungsfaktor der Auslenkung (Kehrwert des Wurzelausdruckes) beträgt dann 1,56 bis 1,73 (f_A/f_E = 0,6 bis 0,65). Mit der bekannten Rechenstabdurchbiegung in der Mitte zwischen zwei Distanzeisen lässt sich nun die Beanspruchung beim Knoten bestimmen. Aufgrund der hohen Spannungswechselzahl ($N_e > 10^7$) ist Dauerfestigkeit des Grundmaterials (35 N/mm²) und der Schweissnähte (25 N/mm²) massgebend. Für die Führung des Ermüdungsnachweises sei auf die SIA-Norm 161 (1979) verwiesen.

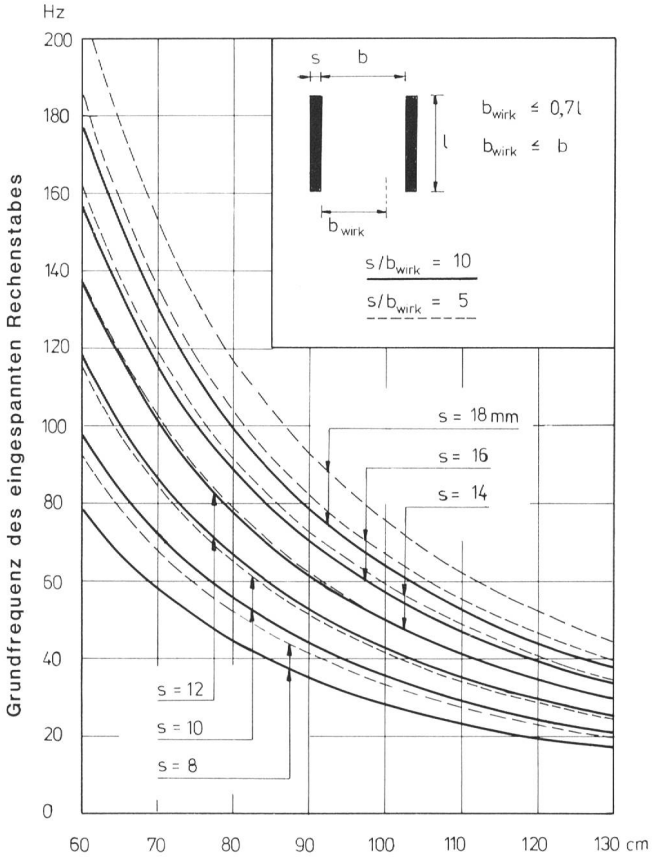

Bild 4. Grundfrequenz eines beidseitig eingespannten Rechteckstabes in Abhängigkeit der Stablänge und Stabdicke. Einfluss des wirksamen Stababstandes.

Bemessungsbeispiel

Dritter Maschinenhausrechen des Rheinkraftwerkes Albbruck-Dogern (RADAG) [9]:

Rechenstababmessungen:	s × l = 18 × 150 mm (Rechteckprofil)
Querstababstand:	h = 1038 mm
Mittlere Durchströmungsgeschwindigkeit:	v_m = 1,44 m/s (Q = 1100 m³/s)
Geschätzte lokale Maximalgeschwindigkeit:	v_{max} = 3 m/s
Anregerfrequenz nach Gleichung (1):	f_A = 26 Hz
Eigenfrequenz nach Gleichung (2):	f_E = 67,5 Hz (eingespannt)

Die Schwingungsmessungen ergaben eine Eigenfrequenz von 64 bis 67 Hz. Mit einem Verhältnis f_A/f_E = 0,385 ist der Rechen genügend hoch abgestimmt. Trotzdem stellte man nach 7 Betriebsjahren erstmals Ermüdungsbrüche fest. Dies deutet auf eine hohe Querbeanspruchung der Rechenstäbe durch die Wirbelablösungen hin. Die Durchbiegung in Stabmitte beträgt nach Gleichung (4) 0,18 mm, wobei der nicht aufgeschaukelte Anteil δ_o bereits 0,15 mm ausmacht. Mit der Durchbiegung von 0,18 mm berechnet sich in der Schweissnaht eine Spannung von 21 N/mm², welche

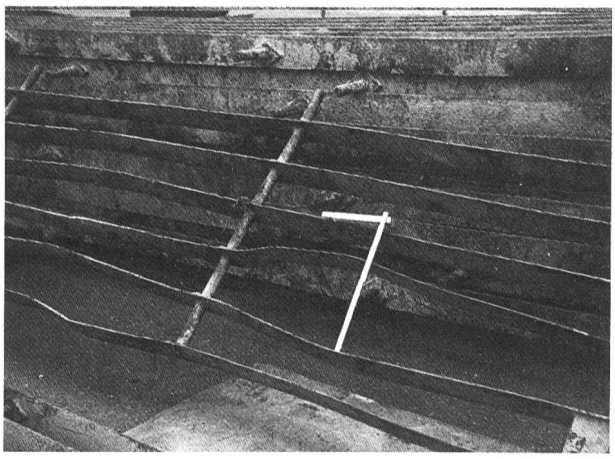

Bild 5. Deformierte Rechentafeln. (Photo RADAG)

also leicht über der zulässigen Dauerbeanspruchung liegt (20 N/mm²). Der Rechen wurde durch ein seitliches Verbinden der Rechenfelder saniert. Mit dieser Massnahme wird die Anfachung einer erzwungenen Schwingung verhindert, so dass der Rechenstab allein durch die Querkraft infolge Wirbelablösungen beansprucht ist. Die Schweissnahtspannung reduziert sich so auf 17 N/ mm², also auf ein für die Dauerhaftigkeit erträgliches Mass.

Schlussfolgerungen

Die Strategie zur Vermeidung von Rechenbrüchen infolge Schwingungen lässt sich in zwei Hauptpunkte zusammenfassen:

1. Resonanzschwingungen können durch eine Hochabstimmung des Rechens verhindert werden. Die Verwendung weniger hydrodynamischer Rechenprofile wie Flachstähle erleichtert die Hochabstimmung.
2. Schwingungen mit kleinen Amplituden treten trotz der Hochabstimmung des Rechens auf. Die Konstruktionsart des Rechens muss deshalb den dynamischen Beanspruchungen genügen, eine Bemessung auf Ermüdungssicherheit ist unerlässlich.

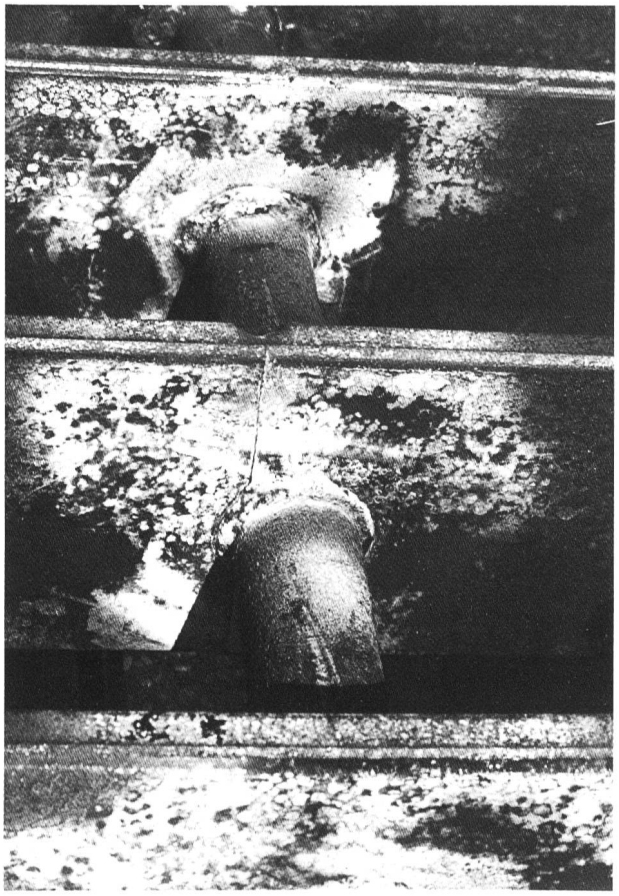

Bild 6. Bei den Distanzhaltern gebrochene Rechenstäbe. (Photo RADAG)

Der beschriebene Bemessungsweg erlaubt eine gute Beurteilung der Schwingungsanfälligkeit von einzelnen Rechenstäben. Rechnerisch schwer zu erfassen sind hingegen die kritischen Schwingungsformen ganzer Rechenfelder. Diese müssen deshalb zum vornherein mit konstruktiven flankierenden Massnahmen wie das seitliche Verbinden der Rechenfelder ausgeschaltet werden.

Literatur

[1] *Levin L.*, Etude hydraulique des grilles de prise d'eau. Proc. IAHR (7th General Meeting) Vol. I 1957.

[2] *Levin L.*, Problèmes de perte de charge et de stabilité des grilles de prise d'eau. «La Houille Blanche» No. 3, 1967, pp. 271–278.

[3] *Zowski T.*, Trashracks and Raking Equipment. «Water Power», Sept. 1960, pp. 342–348; Okt. 1960, pp. 399–407.

[4] *Bauer E.*, Gewalt- und Dauerbrüche an Einlaufrechen von Wasserturbinen. «Elektrizitätswirtschaft» Jg. *65*, Heft 14, 1966, pp. 465–567.

[5] *Bugl H.; Jericha H.*, Fragen der Dimensionierung und Ausbildung der Rechenanlagen vor den Turbineneinläufen von Flusskraftwerken. «Öst. Ing. Zeitschrift», März (Heft 3), April (Heft 4), 1968, pp. 81–84, 129–135.

[6] *Sell L.E.*, Hydroelectric power plant trashrack design. «Journal of the Power Division», Proc. ASCE PO I, January 1971, pp. 115–121.

[7] *Hamilton W.S.*, a.o. Some design factors for the Bath County trashracks. «Water Power», Aug./1982, pp. 16–19.

[8] *Schwarz H.J.*, Die Einlaufrechen des Kraftwerkes Ottensheim-Wilhering. «Donau-Strom» 1973, Verlag Koska, Wien.

[9] *Schlageter G.*, Erfahrungen an Maschinenhausrechen des RADAG. «wasser, energie, luft» *77* (1985) Heft 7/8.

[10] *Korenev B.G., Rabinović*, Baudynamik. VEB Verlag für Bauwesen Berlin, 1980.

[11] *Biggs M.H.*, Introduction in structure dynamics. Mc. Graw-Hill Book Company, New York 1964.

Verdankung

Der Autor dankt der Rheinkraftwerk Albbruck-Dogern AG für die zur Verfügungstellung der Photos und der Ergebnisse der Schwingungsuntersuchungen von 1978.

Überarbeitete Fassung eines Vortrages, gehalten anlässlich der Betriebsleiterversammlung des Verbandes Aare-Rheinwerke am 14. März 1985 in Kleindöttingen.

Adresse des Verfassers: *Anton Schleiss*, Assistenz für Wasserbau/VAW, ETH-Hönggerberg, CH-8093 Zürich.

Hoover Dam – le plus prestigieux barrage des USA a 50 ans

Daniel Quinche

Après un demi-siècle, et tenant compte des immenses progrès de la technique de construction des barrages, le Hoover Dam représente aujourd'hui encore une performance extraordinaire. Ce barrage prestigieux s'élève à une hauteur maximale sur fondations de 221 m pour une longueur au couronnement de 379 m. Un dimensionnement phantastique pour l'époque! Il a fallu couler, en quatre ans, près de 2,5 millions de m³ de béton pour réaliser ce barrage situé au sud-ouest des Etats-Unis. Contrairement aux usages sous nos latitudes, les eaux accumulées du Colorado River ne servent pas uniquement à la production d'électricité, mais également à l'irrigation et au ravitaillement en eau potable.

Le 30 septembre 1935, après quatre ans de travaux, le barrage voûte-poids situé à la frontière entre les Etats fédéraux