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

Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband

Band: 97 (2005)

Heft: 5-6

Artikel: Energieverluste an Einlaufrechen von Flusskraftwerken; eine verbesserte Berechnungsmethode

Autor: Meusburger, Hubert / Volkart, Peter / Minor, Hans-Erwin

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-941752

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

Energieverluste an Einlaufrechen von Flusskraftwerken; eine verbesserte Berechnungsmethode

Hubert Meusburger, Peter Volkart, Hans-Erwin Minor

Zusammenfassung

Mit der in der Praxis häufig angewendeten Gleichung von Kirschmer wird der Energieverlust durch den Einlaufrechen meist massiv unterschätzt. Auch Formeln anderer Autoren – etwa Zimmermann – können diese Tatsache nicht korrigieren, da auch sie von idealen, gleichförmigen Zuströmungen ausgehen.

Basierend auf langjährigen Studien sowie umfangreichen Modellmessungen und Naturerhebungen konnte in der VAW Mitteilung Nr. 179, 2002, eine physikalisch besser abgestützte Formel erarbeitet werden. Insbesondere sind die wesentlichen Einflüsse von konstruktiver Verbauung und Rechenverlegung sowie horizontaler und vertikaler Schräganströmung berücksichtigt.

Der vorliegende Artikel fasst die Hauptresultate zusammen und präsentiert die neue, verbesserte Berechnungsformel.

Abstract

The well known formulae by Kirschmer and other authors markedly underestimate the trash rack energy losses at river power plants because they are based on an idealized approach flow.

VAW report No. 179, 2002, presents results of a several years model and field study considering additional physical parameters of importance: the screen blockage ratio, the trash blockage ratio as well as the transverse approach flow, both in horizontal and vertical direction.

The presented article condenses the main results from the VAW report focusing on a novel and improved formula for trash rack energy losses.

Bild 1. Starker Geschwemmselanfall am Rechen des Rheinkraftwerks Albbruck-Dogern beim Maihochwasser 1991. Innerhalb von zwei Tagen fielen insgesamt rund 4000 m³ Geschwemmsel an, was dem Transportvolumen von ca. 500 Lastwagen entsprechen würde.

1. Einleitung

Vor den Eintrittsöffnungen von Niederdruck-Wasserkraftwerken wird im Normalfall ein Einlaufrechen angeordnet, um Schwimm- und Schwebstoffe von Leitapparat und Turbinen fern zu halten (Bild 1). Durchströmte Rechen erzeugen einen örtlichen Energieverlust, der der Energieerzeugung der Wasserkraftanlage entgeht. In der Vergangenheit wurden immer wieder Formeln zur Berechnung dieses Energieverlustes publiziert. Einige haben sich mittlerweile in der Praxis fest verankert; dazu gehört insbesondere die Beziehung von Kirschmer (1926), die im deutschsprachigen Raum meistens angewendet wird. In der Praxis hat sich jedoch klar herausgestellt, dass sich nach Kirschmer oder auch Zimmermann (1969) rechnerische Werte für die Energieverluste ergeben, die eindeutig zu klein sind – oft um ein Vielfaches (Bild 2). Der Grund liegt in der zu starken Vereinfachung hinsichtlich der verlustrelevanten Parameter.

Um das Investitionsrisiko bei einem Neu- oder Umbau eines Kraftwerkes zu minimieren, sollte man auch die Energieverluste am Einlaufrechen möglichst genau kennen. Bei kleinen Fallhöhen können diese Verluste einen beträchtlichen Anteil ausmachen.

Im vorliegenden Artikel wird eine neue, verbesserte Berechnungsmethode vorgestellt, die es erlaubt, Energieverluste an Einlaufrechen zuverlässiger zu bestimmen. Sie basiert zum einen auf umfangreichen hydraulischen Modellversuchen der VAW im Massstab 1:3 (Meusburger, 2002), zum andern auf Naturmessungen (Volkart et al., 2001), systematischen Umfragen bei Kraftwerksbetreibern in der Schweiz und Deutschland (Meusburger et al., 1999) sowie auf numerischen Simulationen (Hermann et al., 1998).

2. Definition des Rechenverlustes

Bild 3 gibt die energetischen Verhältnisse am Einlauf eines Laufkraftwerkes schematisch wieder. Der eigentliche Rechenverlust Δh_R, um den es hier geht, ist im Zusammenhang mit andern Energiekomponenten zu sehen. Die Energiehöhe $EL_{Oberwasser}$ vor dem Rechen nimmt auf $EL_{Dammbalkennut}$ nach dem Rechen ab. Dieser Energieverlust beinhaltet einen kontinuierlichen Verlust, verursacht durch Reibung an den Berandungen inklusive Umlenkverlusten Δh_E sowie den eigentlichen Rechenverlust Δh_R.

Der Rechenverlust ist folgendermassen definiert:

$$\Delta h_R = \zeta_R \cdot \frac{v_R^2}{2g} \qquad (1)$$

Dabei entspricht ζ_R dem gesuchten Verlustbeiwert des Rechens, v_R der über den unver-

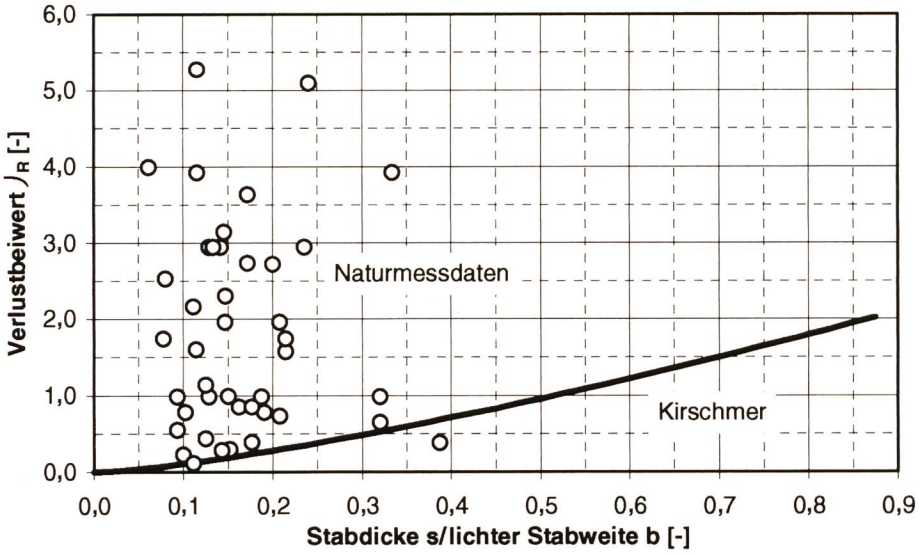


Bild 2. Vergleich der Verlustbeiwerte ζ_R aus Naturmessdaten mit den theoretisch berechneten nach Kirschmer (1926). Die Kirschmer-Formel gibt meist zu kleine Verlustwerte, da von idealen Anströmverhältnissen ausgegangen wird.

bauten Rechenfeldquerschnitt gemittelten Anströmgeschwindigkeit und g der Gravitationskonstanten.

Primäre konstruktive respektive geometrische Parameter sind:

- s Stabdicke in Querrichtung
- l Stablänge senkrecht zur Rechenebene
- b freier Stababstand
- α' Neigungswinkel des Rechens zur Horizontalen.

Zusätzlich zu v_R kommen weitere strömungsbezogene Grössen:

- k_F Formbeiwert des Stabes bei frontaler Anströmung
- α vertikaler Durchströmwinkel bezüglich der Rechenebene
- δ horizontaler Anströmwinkel.

3. Verlustrelevante Parameter

In der Folge werden die wesentlichen Parameter kommentiert, um den Zugang zu den Berechnungsformeln (5) bis (11) zu erleichtern.

Die geometrischen Grössen werden, soweit hier relevant, im Verbauungsgrad *P* erfasst.

Verbauungsgrad P

Die gegenüber der Zuströmung verbaute Fläche A_P eines Rechenfeldes resultiert aus der in Hauptströmungsrichtung projizierten Fläche aller Konstruktionsteile des Rechens:

$$A_P = A_{RS} + A_{AH} \qquad (2)$$

Dabei entspricht A_{RS} der verbauten Fläche durch die Rechenstäbe und A_{AH} der zusätzlich verbauten Fläche durch Abstandhalter, Aussteifungsdiagonalen sowie Rechenträger usw. Der Verbauungsgrad P des Rechenfeldes definiert sich aus dem Verhältnis der verbauten Fläche A_P (schwarze Fläche in Bild 4) zur Fläche des gesamten Rechenfeldes A_{RF} und kann in der Praxis bereits aus den Konstruktionsplänen eines Rechens ermittelt werden.

$$P = \frac{A_{RS} + A_{AH}}{A_{RF}} = \frac{A_P}{A_{RF}} \qquad (3)$$

Die mittels Fragebogen für die Niederdruckanlagen der Schweiz erhobene Grösse des Verbauungsgrades variiert in der Praxis zwischen P = 0,1 und P = 0,4. Die ursprünglich freie Eintrittsfläche (ohne Rechen) zum Einlaufschlauch kann somit durch Einlaufrechen bis zu 40% verbaut sein.

Die bekannten Gleichungen für den Rechenverlust Δh_R berücksichtigen zwar die Stabfläche A_{RS}, vernachlässigen aber den Anteil A_{AH} der zusätzlichen konstruktiven Elemente im Rechenfeld.

So ergaben etwa die Umfragen an 43 Anlagen in der Schweiz, dass die Abstandshalter, Aussteifungsdiagonalen und Rechenträger 10 bis 70% an die Gesamtverbauung beitragen. Dies ist einer der massgeblichen Gründe, weshalb der mit den bekannten Beziehungen theoretisch ermittelte Rechenverlust wesentlich zu tiefe Werte geben kann.

Stabformbeiwert k_F

Kirschmer (1926) hat Stabformen hinsichtlich ihres Strömungswiderstandes untersucht (Bild 5). Daraus ist ersichtlich, dass die recht-

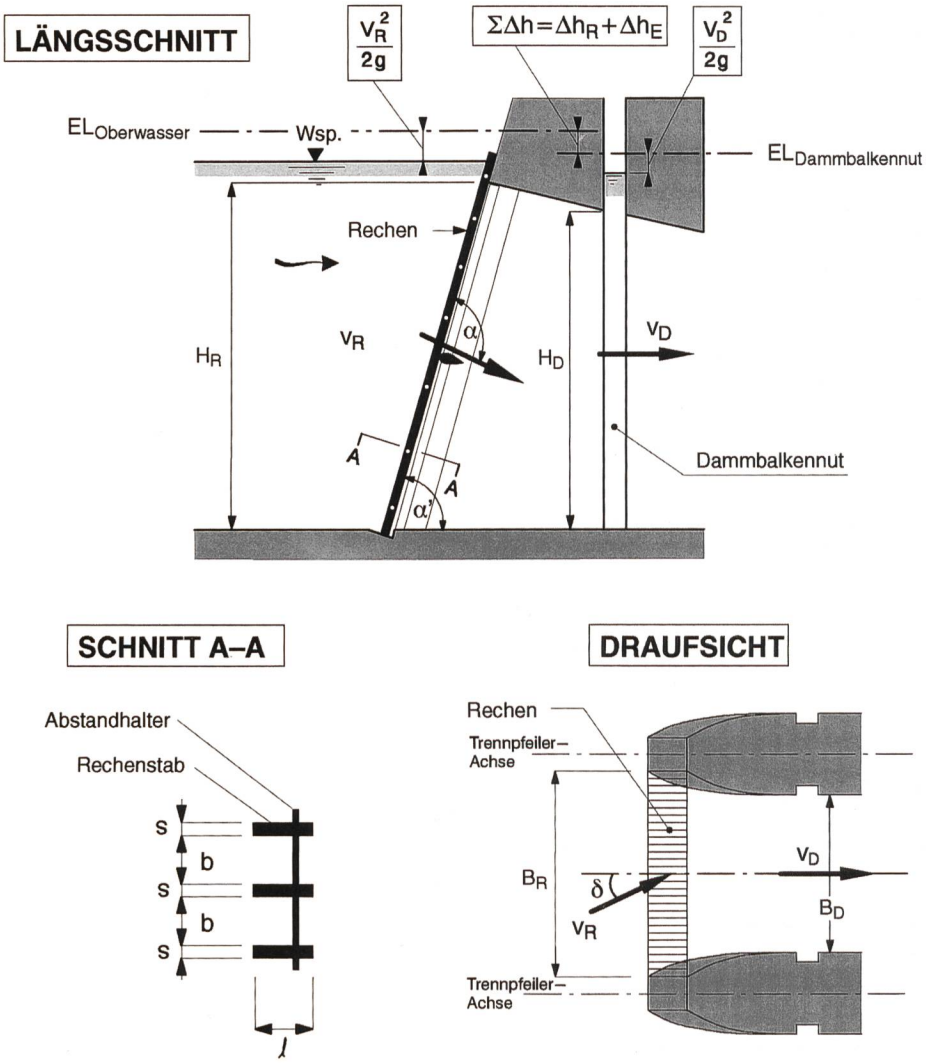


Bild 3. Definition der Energiegrössen und verlustrelevanten Parameter.

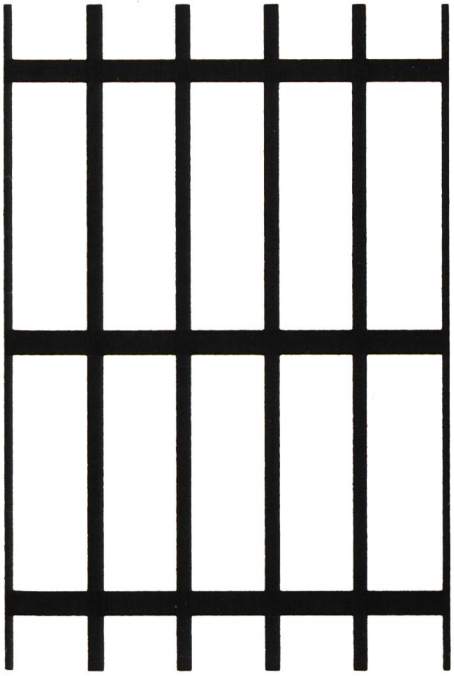
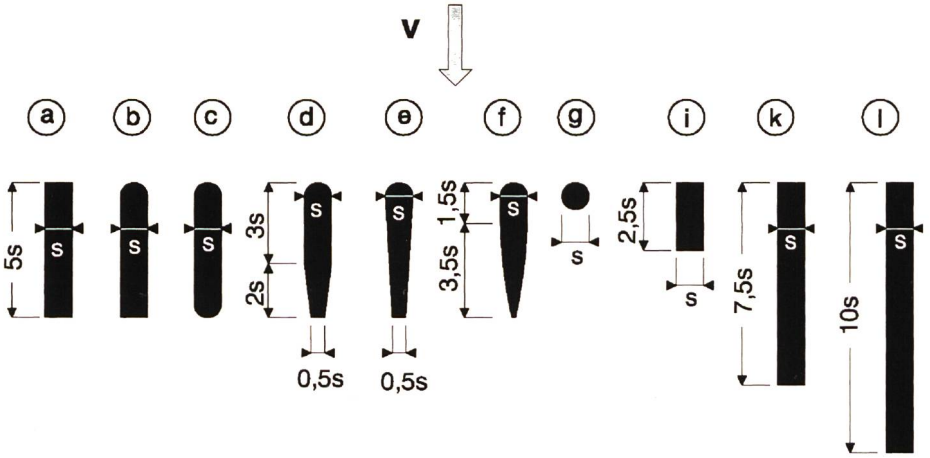


Bild 4. Definitionsskizze Verbauung: P = Gesamtfläche der Stäbe plus aller konstruktiven Elemente dividiert durch die Bruttofläche des Rechenfeldes.



Stabform	a, i, k, l	b	c	d	e	f	g
k_F [–]	2,42	1,83	1,67	1,04	0,92	0,76	1,79

Bild 5. Querschnittsformen und Abmessungen von Rechenstäben nach Kirschmer (1926). Formbeiwerte k_F für frontale Anströmung.

eckigen Stabformen a, i, k und l mit einem Wert von 2,42 einen mehr als dreimal höheren Stabformbeiwert k_F besitzen als etwa die fischbauchförmige Stabform f mit 0,76. Dieser Umstand wirkt sich direkt proportional auf die Rechenverluste aus. Den Stabformen a, i, k und l wird derselbe Stabformbeiwert zugeordnet, woraus folgt, dass Reibungsverluste entlang der Oberfläche des Rechenstabes, für Stäbe mit üblichen Abmessungen, von untergeordneter Bedeutung sind. In der heutigen Praxis wird trotz des theoretischen Nachteils aus fertigungstechnischen Gründen die Rechtecksform am häufigsten eingesetzt.

Mittlere Anströmgeschwindigkeit v_R

Normalerweise wird der Rechenverlust eines Rechenfeldes über die mittlere Ausströmungsgeschwindigkeit v_R bestimmt. Diese kann je nach den Wasserständen und den Lastfällen der Turbinen variieren.

Moderne Niederdruckanlagen sind für eine auf den ganzen Einlaufquerschnitt (Bruttorechenfeldfläche) bezogene mittlere frontale Geschwindigkeit von 0,9 bis 1,2 m/s ausgelegt. Vom Mittelwert stark abweichende lokale Geschwindigkeiten führen zu erhöhten Gesamtverlusten am Einlaufrechen und können auch schlechtere Wirkungsgrade der Turbine zur Folge haben.

Falls örtliche Strömungen dominierenden Einfluss erwarten lassen, etwa verursacht durch Trennpfeiler oder besondere Formen der oberwasserseitigen Vorbecken, wird man nicht darum herumkommen, Modellversuche und/oder numerische Simulationen zu Rate zu ziehen (siehe auch Kapitel 7).

Horizontaler Anströmwinkel δ

Das Gesagte gilt auch für weitere, meist unvermeidliche Strömungseinflüsse, verursacht etwa durch Einlaufbuchten, asymmetrischen Turbinenbetrieb bis hin zu Strömungsablösungen und Wirbelbildungen sowie Totwasserbereichen. Damit verbunden ist meist auch eine Schräganströmung des Einlaufrechens.

Verlegung V

Die Ansammlung von Geschwemmsel am Rechen führt zu erhöhten Rechenverlusten. Naturmessungen am Kraftwerk haben gezeigt, dass innerhalb von 6 Stunden (ohne Rechenreinigung) eine Steigerung des Verlustbeiwertes ζ_R von 1,19 bis 5,86 stattgefunden hat (VDEW, 1989).

In der Praxis ist es von Bedeutung, ob eine Verlegung periodisch durch die Rechenreinigungsmaschine wieder entfernt wird oder ob den unerwünschten Objekten erst im Zuge einer Revision beizukommen ist. Nicht zu unterschätzen sind Wasserpflanzen, die sich um die Quertraversen legen (Bild 6).

Der Verlegungsgrad V bezieht sich auf den Momentanzustand und wird als das Flächenverhältnis der Verlegung A_V (schwarze Fläche in Bild 7) zur gesamten Rechenfeldfläche definiert.

$$V = \frac{A_V}{A_{RF}} \tag{4}$$

Trotz zahlreicher Untersuchungen in der Vergangenheit existieren bis heute keine verlässlichen Aussagen über den Einfluss der Rechenverlegung V auf den Rechenverlust Δh_R.

4. Durchgeführte Untersuchungen der VAW

Die aufwändigen hydraulischen Modellversuche im Massstabe 1:3 wurden mit Rechteckstäben der Naturabmessungen s = 10 mm und l = 100 mm durchgeführt (Tabellen 1a, 1b). Diese sind ebenso wie die Naturmessungen in Meusburger (2002) ausführlich beschrieben. Am hydraulischen Modell wurden systematisch die Parameter Verbauung P, Schräganströmung δ, Verlegung V sowie die Strömungsinhomogenitäten, ausgedrückt durch den Turbulenzgrad, untersucht. Dabei zeigte sich, dass die durch Trennpfeiler- und Einlaufsohlenformen verursachten Strömungsinhomogenitäten den Verlustbeiwert ζ_R weniger beeinflussen als anfänglich angenommen. Stabformen wurden nicht nochmals untersucht, sondern es wird auf die k_F-Werte nach Kirschmer zurückgegriffen.

Geometrische Parameter						
k_F	s	l	b	l/b	P	α
[–]	[mm]	[mm]	[mm]	[–]	[–]	[°]
2,42*	15	150	15 ÷ 135	1,11 ÷ 10	0,19 ÷ 0,55	90

* scharfkantiger Rechteckstab (Kirschmer: k_F = 2,42)

Tabelle 1a. Geometrische Parameter und ihr Variationsbereich für die Modellversuche (Naturmasse).

Strömungsmechanische Parameter		
v_R	δ	V
[m/s]	[°]	[–]
0,5 ÷ 1,5	0 ÷ 30	0 ÷ 0,25

Tabelle 1b. Strömungsmechanische Parameter und ihr Variationsbereich für die Modellversuche (Naturmasse).

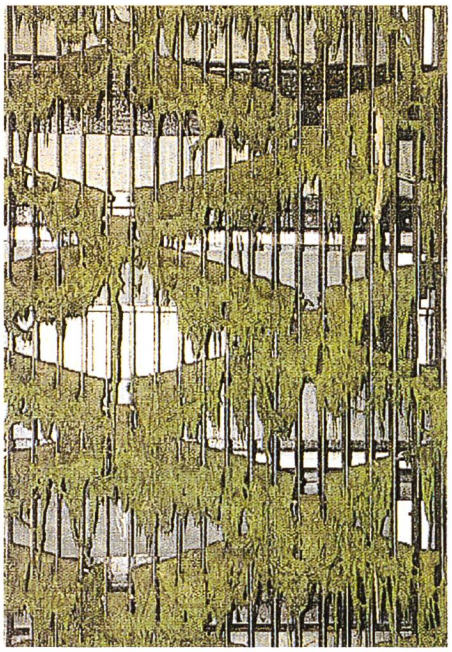


Bild 6. Starke Verlegung des Einlaufrechens mit Wasserpflanzen, die sich um die Quertraversen gelegt haben und sich dem Zugriff durch die automatische Rechenreinigung weitgehend entziehen.

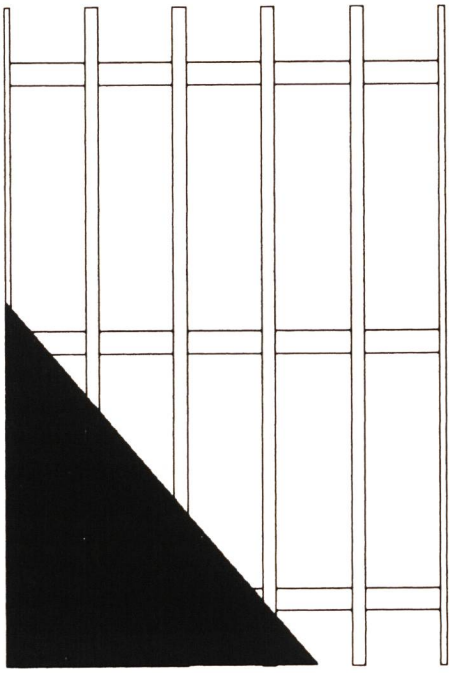


Bild 7. Definitionsskizze zur Verlegung.

Bei Naturmessungen war u.a. zu beachten, dass beim Druckabfluss nach dem Rechen im Normalfall der Wasserspiegel in der Dammbalkennut gemessen werden muss. Dieser stellt aber nicht die gesuchte Energiehöhe dar; es muss noch die Geschwindigkeitshöhe im entsprechenden Querschnitt addiert werden.

Je nach Formgebung der Einlaufhaube und der Nut können sich lokale Über- oder Unterdrücke einstellen, die den Wasserspiegel in der Nut direkt beeinflussen, aber keinen eigentlichen Energieverlust darstellen.

Mit andern Worten: Die Wasserspiegeldifferenz zwischen Oberwasser und Dammbalkennut lässt nur bedingt Rückschlüsse auf den Energieverlust Δh_R zu. Eine einfache visuelle, aber genaue Überprüfung der Rechenverluste vor Ort ist deshalb meist nicht möglich.

Folgende Parameter stellten sich schliesslich als relevant für die verbesserte Berechnung des Rechenverlustes heraus:

- Stabformbeiwert k_F nach Kirschmer (1926)
- Verbauung P
- Schräganströmung δ
- Verlegung V
- vertikaler Winkel α zwischen mittlerem Stromfaden und der Rechenebene.

5. Die neue, verbesserte Berechnungsmethode

Es wird von der klassischen Gleichung (1) ausgegangen:

$$\Delta h_R = \zeta_R \cdot \frac{v_R^2}{2g}$$

Neu wird der Verlustbeiwert ζ_R entsprechend den zusätzlich berücksichtigten Einflüssen wie folgt auf geschlüsselt:

$$\zeta_R = \zeta_P \cdot k_\delta \cdot k_V \cdot k_\alpha \qquad (5)$$

Dabei entspricht:

ζ_R Gesamtverlustbeiwert resultierend aus den relevanten Verlustfaktoren

ζ_P Verlustbeiwert infolge der Verbauung P (Basiswert für die Berechnung des Gesamtverlustbeiwertes ζ_R)

k_δ Verlustfaktor infolge der Schräganströmung δ

k_V Verlustfaktor infolge der Rechenverlegung V

k_α Verlustfaktor infolge des Winkels α.

Die Bestimmung des Verlustbeiwertes ζ_P (Basiswert) und der verschiedenen Verlustfaktoren wird im Folgenden erläutert. Für die Herleitung wird auf Meusburger (2002) verwiesen.

Verlustbeiwert ζ_P infolge Verbauung:

$$\zeta_P = k_F \cdot \left(\frac{P}{1-P}\right)^{\frac{3}{2}} \qquad (6)$$

Der Verbauungsgrad P des Rechens ergibt sich aus dem Verhältnis der verbauten Fläche zur Fläche des Rechenfeldes und muss anhand der Konstruktionspläne und Gleichung 3 ermittelt werden. Der Stabformbeiwert k_F nach Kirschmer (1926) ist mit Hilfe von Bild 5 zu bestimmen.

Verlustfaktor k_δ infolge horizontaler Schräganströmung:

$$k_\delta = \left(1 - \frac{\delta}{90°}\right) \cdot P^{-1,4 \cdot \tan\delta} \qquad (7)$$

Der Winkel der horizontalen Schräganströmung δ lässt sich in der Praxis bei einem bestehenden Kraftwerk für die oberflächennahe Strömung visuell abschätzen. Aufwändiger sind Naturmessungen über die ganze Fliesstiefe, etwa mit einer Ultraschallsonde.

In der Projektierungsphase empfiehlt es sich, den Winkel der horizontalen Schräganströmung erst grob abzuschätzen und genauere Werte bei Bedarf später mittels Modellversuchen oder aus Computersimulationen zu ermitteln.

Verlustfaktor k_V infolge Rechenverlegung:

In umfangreichen Versuchen wurden Verlustfaktoren k_V für verschiedene abstrahierte Verlegungsarten untersucht. Aufgrund der Resultate wurden zwei Gruppen gebildet, die aus den Tabellen 2a und 2b ersichtlich sind. Die gefundenen Beziehungen lauten:

Für Gruppe 1: Grosse Verlegung oben, beispielsweise durch Schwimmstoffe oder grosse Verlegung an der Sohle, etwa durch Sediment

$$k_{V1} = 1 + 5{,}2 \cdot P^{-1,5} \cdot \left(\frac{V}{1-V}\right)^2 \qquad (8)$$

Für Gruppe 2: Kleinflächigere Verlegungen oder solche, die der Strömung tendenziell mehr Ausweichsmöglichkeiten bieten

$$k_{V2} = 1 + 1{,}8 \cdot P^{-1,2} \cdot \left(\frac{V}{1-V}\right)^{1,2} \qquad (9)$$

Verlegungen aus der Gruppe 1 erzeugen die höheren Verluste als Verlegungen aus Gruppe 2 bei gleichem Verlegungsgrad. Es liegt in der Natur der Anströmung, dass neben der gleichmässig verteilten Verlegung (Nr. 15 und 16, Tabelle 2b) Verlegungen oben (z.B. Geschwemmsel) und unten (Geröll), jeweils mit horizontaler Ausrichtung, am häufigsten vorkommen.

Wesentliche Faktoren, die die Verlegungsfläche A_V bestimmen, sind die lichte Rechenstabweite b, Art und Menge des Treibgutes und die Effektivität der Rechenreinigung. Durchschnittliche Verlegungsgrade in der Praxis bei Normalbetrieb sind ca. 5 bis 10%. In Ausnahmesituationen wie Hochwasser, Eisgang, starkem Laubanfall im Herbst usw. kann der Verlegungsgrad auch bedeutend grösser sein und kann im Extremfall bekanntlich zur vorübergehenden Abschaltung des Kraftwerkes führen.

Verlustfaktor infolge vertikaler Rechenneigung:

Der Verlustfaktor k_α infolge des Winkels α zwischen mittlerem Stromfaden und Rechenebene im Längsschnitt ergibt sich zu

$$k_\alpha = \sin\alpha \qquad (11)$$

Der Winkel α kann mit Hilfe der Konstruktionspläne durch Einzeichnen des gedachten

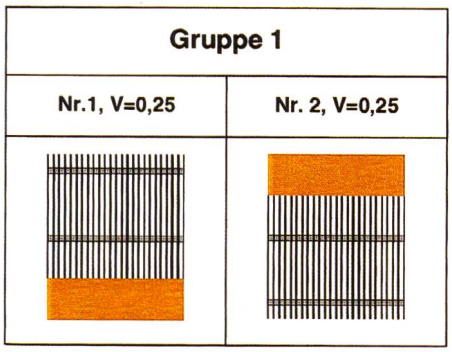


Tabelle 2a. Verlegungsarten und Verlegungsgrade, deren charakteristisches Verlustverhalten der Gruppe 1 zugeordnet werden kann.

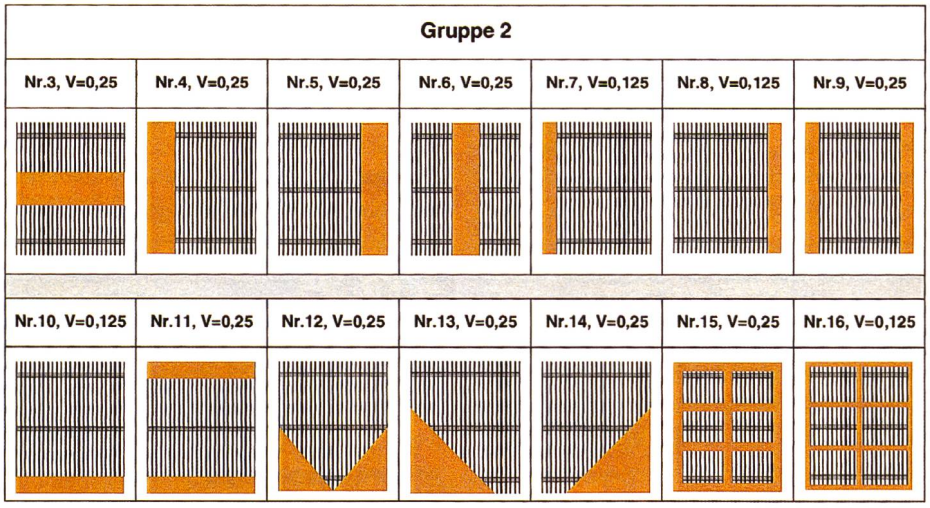


Tabelle 2b. Verlegungsarten und Verlegungsgrade, deren charakteristisches Verlustverhalten der Gruppe 2 zugeordnet werden kann.

mittleren Stromfadens abgeschätzt werden. Der Winkel α entspricht im Normalfall nicht dem Winkel der vertikalen Rechenneigung zur Horizontalen.

6. Gültigkeitsbereich

Die gewählten Variationsbereiche der Parameter lichte Rechenstabweite b, Verbauung P, Anströmgeschwindigkeit v_R, horizontaler Anströmwinkel δ und Verlegung V decken den in der Praxis vorkommenden Bereich zum grössten Teil ab. Die ermittelten Beziehungen für die verschiedenen Verlustfaktoren k_δ, k_v und k_α können aber auch dann angewendet werden, wenn die genannten Parameter vom gewählten Variationsbereich abweichen, da sie einerseits die Randbedingungen für die Maximal- und Minimalwerte erfüllen und anderseits die Abweichungen der Parameter in der Praxis – wenn überhaupt – von den untersuchten und grosszügig gewählten Variationsbereichen sehr gering sein werden. Sie dürfen deshalb im für die Praxis üblichen Rahmen extrapoliert werden.

Einschränkungen – Stabformbeiwert k_F:
Die Modellversuche wurden nur mit einer Rechenstabform (scharfkantig, rechteckig, s/l = 10) durchgeführt. Der Stabformbeiwert k_F für diese Stabform wurde für die Ermittlung des Verlustbeiwertes ζ_P infolge Verbauung von Kirschmer (1929) übernommen. Für den Fall der frontalen Anströmung und einer Stabform, die von der untersuchten abweicht, können auch die entsprechenden Stabformbeiwerte k_F nach Kirschmer angewendet werden, da der Versuchsaufbau ähnlich war. Aufgrund der Untersuchungen von Spangler (1928) und Idel'cik (1979) lässt sich sagen, dass der Verlustbeiwert ζ_R für eine Schräganströmung δ bis 45° bei den Stabformen a, i, k, l (scharfkantige, rechteckige Profile) bis maximal 10% unterschätzt und für die Stabformen b, c, d, e, f, g (abgerundete Profile) bis maximal 10% überschätzt wird. Eine Anwendung der hier entwickelten Formel erscheint aber unter der Voraussetzung, dass $\delta < 45°$ und $l/b > 0{,}70$ ist, zulässig.

Verhältnis Stablänge zu lichter Stabweite l/b:
Am Modell wurden lediglich Verhältnisse Stablänge zu lichter Rechenstabweite $l/b > 1$ untersucht. In diesem Bereich liegen auch die meisten der mittels Fragebogen erfassten Rechengeometrien. Bei Vorhandensein einer Schräganströmung und Verhältnissen $l/b < 1$ haben sowohl Spangler (1928) als auch Zimmermann (1969), infolge einer unvollkommenen Umlenkung der Strömung durch die Rechenstäbe, bei gleicher lichter Stabweite b, grössere Verlustbeiwerte festgestellt (geringer Gleichrichtereffekt). Spangler hat Schräganströmungen bis zu einem Winkel $\delta = 60°$ und Verhältnisse l/b bis zu 0,77 für rechteckige Stäbe untersucht und dabei festgestellt, dass die Abweichungen vernachlässigbar klein sind. Die aufgestellten Beziehungen sind somit auch auf $0{,}70 < l/b < 10$ anwendbar.

7. Vorgehen bei ungleichförmiger Anströmung

Bekanntlich wird die Strömung im Nahbereich eines Einlaufrechens sowohl vom Oberwasser als auch von der Abströmsituation in Richtung der Turbinen beeinflusst. Auch bei bester Formgebung der Berandung des Einlaufbereichs ergeben sich immer ungleichmässige Geschwindigkeitsprofile, und zwar sowohl in der Tiefe als auch nach der Breite. Zwangsläufig werden dadurch gewisse Teilflächen eines Rechens stärker und andere schwächer beaufschlagt. Da die Energieverluste mit dem Quadrat der Geschwindigkeit zunehmen, hat eine inhomogene Anströmung einen höheren Gesamtverlust zur Folge als eine homogene. Zusätzlich werden meist weitere Phänomene überlagert, die eine Verkleinerung der durchströmbaren Rechenfläche zur Folge haben; es sind dies Rechenverlegung, Eck- und Rankinewirbel sowie lokale Rückströmungen. Die Schräganströmung, die sich aus der Lage des Kraftwerkes und der

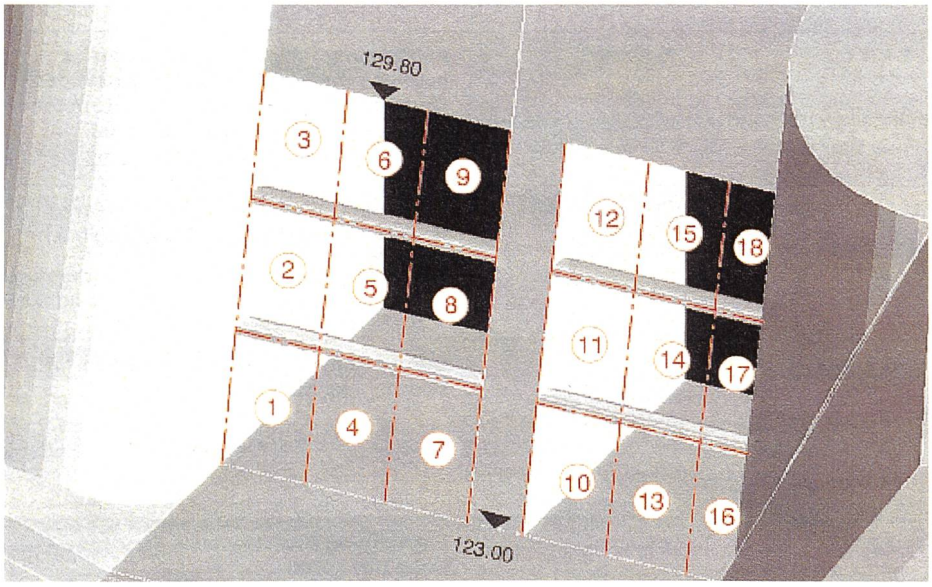


Bild 8. Mögliche Aufteilung eines Rechenfeldes in Teilfelder.

Anordnung der gegebenenfalls ungleich belasteten Turbinen ergibt, hat ebenfalls, wie oben gezeigt, einen wesentlichen Einfluss.

Werden in der Projektierungsphase bezüglich der Kraftwerksanströmung Modellversuche mit grossem Massstab oder auch Computersimulationen (2-D, 3-D) durchgeführt, empfiehlt es sich, das Rechenfeld in mehrere Teilfelder aufzuteilen (Bild 8) und die Berechnung des Energieverlustes für jedes Teilfeld einzeln durchzuführen. Der Gesamtenergieverlust des Einlaufrechens ergibt sich aus dem flächengewichteten Mittelwert der Energieverluste an den einzelnen Teilfeldern.

Dank

Unser besonderer Dank gilt dem Projekt- und Studienfonds der Elektrizitätswirtschaft (PSEL), welcher durch seine grosszügige Unterstützung diese Arbeit ermöglicht hat.

Für die Möglichkeit Naturmessungen durchzuführen und deren tatkräftige Unterstützung dabei, sei den Kraftwerksgesellschaften BKW FMB Energie AG, Bern, und der Limmatkraftwerke AG, Baden, ein herzlicher Dank ausgesprochen.

Bei allen anderen Kraftwerksgesellschaften und deren Mitarbeiter, die den umfangreichen Fragebogen beantwortet haben, bedanken sich die Autoren hier an dieser Stelle ebenfalls ausdrücklich.

Die Vereinigung Deutscher Elektrizitätswerke e.V. hat den eigentlichen Denkanstoss für diese Arbeit geliefert. An dieser Stelle sei ihr hier herzlich gedankt.

Literatur

Hermann, F. & Hollenstein, R. (1998): Zur Entstehung von Rechenverlusten bei gerader und schräger Anströmung, Symposium Planung und Realisierung im Wasserbau, Versuchsanstalt Obernach des Lehrstuhls für Wasserbau und Wasserwirtschaft der Technischen Universität München, Heft 82, S. 69–78.

Idel'cik, I. E. (1979): Memento des pertes de charge, Coefficients de pertes de charge singulières et pertes de charge par frottement, Collection de la direction des études et recherches d'Electricité de France, Paris.

Kirschmer, O. (1926): Untersuchungen über den Verlust an Rechen, Mitteilungen Hydraulisches Institut München, Nr. 1.

Meusburger, H. & Volkart, P. (1999): Energieverluste an Einlaufrechen – Fragebogen an alle Niederdruck-Kraftwerke in der Schweiz, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich, unveröffentlicht.

Meusburger, H. (2002): Energieverluste an Einlaufrechen von Flusskraftwerken, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der Eidgenössichen Technischen Hochschule Zürich, Mitteilung Nr. 179, Hrsg. Prof. Dr.-Ing. H.-E. Minor.

Spangler, J. (1928): Untersuchung über den Verlust an Rechen bei schräger Zuströmung, Mitteilung des hydraulischen Instituts der TH München, H2.

VDEW (1989): Datenerfassung Rechenverluste, Vereinigung Deutscher Elektrizitätswerke, unveröffentlicht.

Volkart, P. & Meusburger, H. (2001): Zwischenbericht an den Projekt, und Studienfonds der Elektrizitätswirtschaft (PSEL), Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich, unveröffentlicht.

Zimmermann, J. (1969): Widerstand schräg angeströmter Rechengitter, Universität Fridericana Karlsruhe, Theodor-Rhebock-Flussbaulaboratorium, Mitteilungen Heft 157.

Anschrift der Verfasser

Dr. *Hubert Meusburger,* Baudepartement des Kantons St. Gallen, Tiefbauamt, Abt. Gewässer, CH-9001 St. Gallen, E-Mail: hubert.meusburger@sg.ch, vormals Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH-Zentrum, CH-8092 Zürich.

Dr. *Peter Volkart,* Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH-Zentrum, CH-8092 Zürich; E-Mail: volkart@vaw.baug.ethz.ch

Prof. Dr.-Ing. *Hans-Erwin Minor,* Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH-Zentrum, CH-8092 Zürich; E-Mail: minor@vaw.baug.ethz.ch

Agenda

Datum/Ort Date/Lieu		Veranstaltung Manifestation	Organisation Information
21.6.2005	Bern	**Das wirtschaftliche Potenzial des Umweltschutzes**	Praktischer Umweltschutz Pusch, Hottingerstrasse 4, Postfach 211, CH-8024 Zürich, Tel. 044 267 44 11, www.umweltschutz.ch/agenda
21.–24.6.2005	Bern	**Suisse Public, Schweizer Fachmesse für öffentliche Betriebe + Verwaltungen**	BEA bern expo AG, Mingerstrasse 6, Postfach, CH-3000 Bern 22, Telefon 031 340 11 11, Fax 031 340 11 10, E-Mail: info@beaexpo.ch
23.+24.6.2005	Interlaken	**Fachtagung Talsperren: Talsperren im heutigen Umfeld, Exkursion Stauanlagen Grimsel/Barrages dans le contexte actuel, Excursion aux barrages du Grimsel**	Schweizerisches Talsperrenkomitee – Arbeitsgruppe Talsperrenbeobachtung, c/o Bundesamt für Wasser und Geologie, CH-2501 Biel, Telefon 032 328 87 24, Fax 032 328 87 12, E- Mail: alexandre.oberholzer@bwg.admin.ch
30.6.+1.7.2005	ETH Lausanne	**Small Hydropower Workshop on Marketing, Environmental Integration and Engineering Aspects**	European Small Hydropower Association (ESHA), Mhylab and EPFL-LCH. Contact: ESHA, Rue de Trone 26, B-1000 Brussels, Belgium, Secretariat E-Mail: maria.laguna@esha.be, www.esha.be
5.+6.7.2005	Graz	**Call for Papers: High Strength Steels for Hydropower Plants**	Institute for Materials Science, Welding and Forming (IWS), University of Technology Graz, Kopernikusgasse 24, A-8010 Graz, Dr. *Norbert Enzinger,* Telefon 0043 316 873 7182, Fax 0043 316 873 7187, E-Mail: Norbert.Enzinger@tugraz.at, www.cleuson-dixence.ch, iws.tugraz.at
21.7.2005	Karlsruhe Universität	**Fachtagung 2005: Hochwasserschutz – Neue DIN 19700**	Wasserwirtschaftsverband Baden-Württemberg e.V. – WBW, c/o Universität Karlsruhe, IWK, Kaiserstrasse 12, D-76131 Karlsruhe, Fax 0049 721 608 6460, E-Mail: wbw@uni-karlsruhe.de