

Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Band: 93 (2001)
Heft: 11-12

Artikel: Einfluss der Teilverlegung auf die Energieverluste am Einlaufrechen :
Theorie und Praxis

Autor: Meusbürger, Hubert / Rutishauser, Katja / Volkart, Peter

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-939929>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

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. [Voir Informations légales.](#)

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. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 20.11.2024

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

Einfluss der Teilverlegung auf die Energieverluste am Einlaufrechen; Theorie und Praxis

■ Hubert Meusburger, Katja Rutishauser, Peter Volkart, Hans-Erwin Minor

Zusammenfassung

Einlaufrechen vor den Eintrittsöffnungen von Wasserkraftwerken dienen dem Zweck, Schwimm- und Schwebstoffe zum Schutz der Turbinen zurückzuweisen. Dies führt trotz leistungsfähiger Reinigungsmaschinen zwangsläufig zu Teilverlegungen des Rechens. Einer der Gründe, dass die theoretisch berechneten Energieverluste an den Einlaufrechen oft um ein Vielfaches tiefer sind als die in der Praxis gemessenen, liegt in der unvermeidbaren Teilverlegung, welche in den bekannten Gleichungen nicht mitberücksichtigt wird. Mit Hilfe von Modellversuchen und einer Naturmessung mit künstlich angebrachten Verlegungen wird dargelegt, dass schon geringe Teilverlegungen gegenüber dem unverlegten Rechen bedeutend höhere Energieverluste erzeugen. Dies trifft sowohl für die Ergebnisse am hydraulischen Modell als auch für die Ergebnisse der Naturmessung zu.

Summary

Trashracks are usually positioned in front of the intake structure as a means of exclusion of floating and submerged debris and thereby preventing damage to the powerplant. Despite efficient trashrake systems this leads inevitably to sectional blockage of the trashrack. One of the reasons why the calculated head loss through the trashrack is less than the one measured in practice, is the unavoidable sectional blockage which is usually not considered in the current formulae. This contribution points out, based on model tests and field measurements, that already a small sectional blockage produces significantly higher head losses. This applies to the results from the experimental set-up, as well as to the results from the field measurements.

1. Einleitung

Unmittelbar vor den Eintrittsöffnungen von Niederdruck-Wasserkraftwerken wird in der Regel ein Einlaufrechen angeordnet, der Schwimm- und Schwebstoffe zum Schutz der Turbinen zurückhalten soll. Trotz leistungsstarker Rechenreinigungsmaschinen

sind Teilverlegungen einzelner Rechenfelder häufig. Dies ist eine der Ursachen, die die strömungsbedingten Energieverluste am Rechen zusätzlich und überproportional anheben. Verschärfend auf diese Problematik würde sich zudem auswirken, wenn – wie gelegentlich gefordert – die lichte Weite der Rechenstäbe bei Einlaufrechen von Wasserkraftwerken unabhängig von Maschinengrössen und den individuellen betrieblichen Anforderungen auf einen einheitlichen Wert von 20 mm festgelegt würde. Der enge Stababstand von 20 mm soll verhindern, dass Fische in die Turbinen gelangen.

Bereits vor Jahrzehnten wurden Formeln für die Strömungsverluste an Rechen publiziert; einige haben sich mittlerweile in der Praxis fest verankert. Dazu gehört die Beziehung von Kirschmer [1] aus dem Jahre 1926. Die Formeln basieren meist auf den idealen Randbedingungen der Versuchsstände im Laboratorium. Die bei allen Kraftwerken im Einlaufbereich auftretenden Strömungsinhomogenitäten, der Einfluss der Tragkonstruktion und Teilverlegungen des Rechens werden mit diesen Formeln nicht berücksichtigt.

Dies mag ein Grund dafür sein, dass die tatsächlich gemessenen Rechenverluste häufig um ein Vielfaches grösser sind als die theoretisch berechneten. Im vorliegenden Artikel wird im Besonderen der Teilaspekt der Rechenverlegung erörtert.

2. Grundlagen und Definitionen

2.1 Rechenverlusthöhe

Die Rechenverlusthöhe Δh_R wird allgemein theoretisch mit der Gleichung (1) bestimmt,

$$\Delta h_R = \zeta_R \cdot \frac{v_R^2}{2g} \quad [m] \quad (1)$$

wobei der Verlustkoeffizient ζ_R , je nach Autor verschieden, empirisch bestimmt wurde. Als Geschwindigkeit v_R ist die Anströmgeschwindigkeit zum Rechen anzusetzen, welche aus $v_R = Q/A$ mit A als Projektion der benetzten Rechenfläche in die Anströmrichtung erhalten wird.

Bei der praktischen Ermittlung der Rechenverluste für ein bestehendes Kraftwerk wird in der Praxis häufig die Wasserspiegeldifferenz bzw. die Druckdifferenz gemessen. Da die Rechenverluste aber Energieverluste darstellen, sind die Geschwindig-

keitshöhen mit zu berücksichtigen. Eventuell andere auftretende Verluste wie Einlaufverlust (Formverlust), Pfeilerstau und Ähnliches sind zu subtrahieren, will man den tatsächlichen Rechenverlust ermitteln.

2.2 Der Verbauungsgrad

Der Verbauungsgrad p berücksichtigt alle Konstruktionsteile, welche die freie Durchflussfläche verbauen. Darin enthalten sind neben den Rechenstäben auch Abstandhalter, Aussteifungsdiagonalen und Rechenräger. Die Grösse des Verbauungsgrades variiert in der Praxis zwischen 0,1 und 0,4 [2] und kann anhand der Konstruktionspläne des Rechens und mit Gleichung (2) berechnet werden.

$$p = \frac{A_{RS} + A_{AH} + A_{RT}}{A_{RF}} \quad [-] \quad (2)$$

A_{RS} entspricht dabei der Verbauungsfläche der Rechenstäbe, A_{AH} der Verbauungsfläche der Abstandhalter, A_{RT} der Verbauungsfläche der Rechenräger und A_{RF} der Fläche des gesamten Rechenfeldes.

2.3 Der Verlegungsgrad

Jährlich werden ca. 40 000 bis 60 000 m³ Schwimmstoffe allein an den Turbinenrechen der Kraftwerke von Aare, Reuss und Rhein angeschwemmt. Dieses Material wird im Sinne eines effizienten Kraftwerkbetriebes fortlaufend entfernt, denn mit zunehmendem Rechengutaukommen steigt die Rechenverlegung an und mit ihr die mittlere lokale Durchströmgeschwindigkeit in der frei bleibenden Rechenebene. Da die Verlusthöhe quadratisch von der Geschwindigkeit abhängt, ist der Einfluss der Rechenverlegung gross. Messungen an einem Kraftwerk haben gezeigt, dass innerhalb von 6 Stunden ohne Rechenreinigung eine Steigerung des Verlustkoeffizienten ζ_R von 1,19 (gereinigt) bis 5,86 (ungereinigt) stattgefunden hat [3].

Trotz der heute sehr leistungsfähigen, vollautomatischen Rechenreinigungsmaschinen ist ein gewisser Verlegungsgrad nicht zu vermeiden. Zusätzlich wird der Rechen auch durch Muschelbesatz oder eingeklemmtes Geschwemmsel, welches nur in Verbindung mit einer Revision entfernt werden kann, verlegt. Auch Geschiebe kann den Rechen massgeblich verlegen. Der Verlegungsgrad v ist mit Gleichung (3) definiert.

Rechen	Anzahl Stäbe	Stablänge l [mm]	Stabdicke s [mm]	Lichte Weite b [mm]	Verbauung p [-]
A	10	150	15	135	0,19
B	25	150	15	45	0,34
C	40	150	15	22,5	0,46
D	50	150	15	15	0,55

Tabelle 1. Parameter der untersuchten Rechen und deren Verbauungsgrade (Naturmasse).

Verlegungsart	Bezeichnung	Verlegungsart	Bezeichnung
	Nr. 1 Rechteck 25 % unten		Nr. 8 Rechteck 12,5 % rechts
	Nr. 2 Rechteck 25 % oben		Nr. 9 Rechteck 12,5 % rechts und links
	Nr. 3 Rechteck 25 % Mitte		Nr. 10 Rechteck 12,5 % unten
	Nr. 4 Rechteck 25 % links		Nr. 11 Rechteck 12,5 % unten und oben
	Nr. 5 Rechteck 25 % rechts		Nr. 12 Dreieck 12,5 % rechts und links
	Nr. 6 Rechteck 25 % Mitte		Nr. 13 Dreieck 25 % links
	Nr. 7 Rechteck 12,5 % links		Nr. 14 Dreieck 25 % rechts

Tabelle 2. Am hydraulischen Modell untersuchte Verlegungsarten.

$$v = \frac{A_{VL}}{A_{RF}} [-] \quad (3)$$

Dabei entspricht A_{VL} der Fläche der Verlegung und A_{RF} der Fläche des gesamten Rechenfeldes.

2.4 Der Blockierungsgrad

Der Blockierungsgrad B gibt das Verhältnis der gesamten vom Wasser nicht durchströmbar Fläche zur Fläche des gesamten Rechenfeldes an. Er wird mit Gleichung (4) definiert.

$$B = \frac{A'_{RS} + A'_{AH} + A'_{RT} + A_{VL}}{A_{RF}} [-] \quad (4)$$

Dabei entsprechen A'_{RS} , A'_{AH} und A'_{RT} den Flächen der Rechenstäbe, Abstandhalter und Rechenräger, welche nicht von der Verlegung abgedeckt sind. A_{VL} entspricht der Fläche der Verlegung und A_{RF} der Fläche des gesamten Rechenfeldes.

3. Modellversuche im hydraulischen Labor

3.1 Allgemeines

Zur Untersuchung des Einflusses der Verlegung auf den Rechenverlust wurden Versuche in einem 0,5 m breiten und 0,6 m tiefen Kanal unter Druckabfluss durchgeführt. Der Rechen ist in diesen Kanal eingebaut und besteht aus den Rechenstäben und den Abstandhaltern. Insgesamt werden vier unterschiedliche Rechen mit rechteckigen Stäben untersucht, die sich lediglich durch die lichte Rechenstabweite b unterscheiden (Tabelle 1). Zur Messung der Druckverteilung sind entlang der Strömungsrichtung in die Plexiglasdeckel des Kanals vor und nach der Rechenebene je zwei Drucksonden eingebaut. Die Messung der lokalen Geschwindigkeit erfolgt berührungslos mit einem hochintegrierten fiberoptischen 2-Komponenten-Laser-Doppler-Anemometer.

Um die Grösse und die Lage typischer Teilverlegungen festlegen zu können, wurde eine Umfrage bei Betreibern schweizerischer Flusskraftwerke vorgenommen. Leider erlaubten die Umfrageergebnisse keine eindeutige Festlegung. Allerdings lassen Fotos, die bei Kraftwerksrevisionen gemacht worden sind, Schlüsse über typische Verlegungsarten zu. Die wirklichen Verlegungsarten, herrührend von rollendem, schwebendem oder schwimmendem Antransport, wurden abstrahiert und vereinfacht modelliert. Die untersuchten Verlegungsarten sind in Tabelle 2 mit Nummern angegeben.

3.2 Ergebnisse

Alle Ergebnisse hier aufzuzeigen, ist aus

Platzmangel nicht möglich. Stellvertretend für alle untersuchten Verlegungsarten werden in den Bildern 1 bis 3 die wichtigsten Ergebnisse vorgestellt und miteinander verglichen.

- Rechteck-Verlegung 25 %, unten (Nr. 1), oben (Nr. 2), Mitte (Nr. 3)

Aus Bild 1 erkennt man, dass der Rechenverlustbeiwert ζ_R für die Verlegung in der Mitte für alle Rechen am kleinsten ist. Der prozentuale Unterschied ist für den Rechen A am grössten und wird mit steigendem Blockierungsgrad der Rechen kleiner. Eine Verlegung in der Mitte des Rechenfeldes erzeugt also geringere Energieverluste am Einlaufrechen als eine Rechenverlegung unten (z.B. Geröll) bzw. oben (z.B. Geschwemmsel). Der Unterschied wird jedoch mit steigendem Blockierungsgrad geringer.

- Rechteck-Verlegung unten 0 %, 12,5 % (Nr. 10), 25 % (Nr. 1)

Die Ergebnisse für die 12,5 %-Verlegung unten zeigen praktisch keinen Unterschied zu den Ergebnissen für den vollkommen freien Rechen (0 % Verlegung) (Bild 2). Die Ursache liegt in der Geschwindigkeitsverteilung. Die 12,5 %-Verlegung reicht noch nicht so stark in das Geschwindigkeitsprofil mit den hohen Geschwindigkeiten wie die 25 %-Verlegung. Für die Praxis darf also davon ausgegangen werden, dass der Verlustbeiwert mit der Mächtigkeit der Sohlablagerungen überproportional zunimmt.

Weiter ist ersichtlich, dass die Verlegung einen bedeutend grösseren Einfluss auf die Rechenverluste hat als die Verbauung. Nimmt man z.B. in Bild 2 den Rechen C ohne Verlegung, beträgt der Blockierungsgrad ca. 46 % und der Rechenverlustbeiwert ζ_R 1,82. Fast denselben Blockierungsgrad von 48 % weist der Rechen B mit einer Verlegung unten von 25 % auf, jedoch ist der Verlustbeiwert dort mit $\zeta_R = 3,34$ bedeutend höher. In der Praxis bedeutet diese Tatsache, dass mit der Forderung nach engeren Rechenstababständen nicht nur der Rechenverlust auf Grund der grösseren Verbauung zunehmen wird; durch die zu erwartende stärkere Verlegung von Rechen mit engerem Stababstand werden die Energieverluste stark überproportional ansteigen.

- Rechteck-Verlegung rechts 0 %, 12,5 %, (Nr. 8), 25 % (Nr. 5)

Die vertikale Rechenverlegung verhält sich anders als die zuvor geschilderte horizontale Verlegung. In Bild 3 lässt sich eine eindeutige Kurve unabhängig vom Rechentyp oder der Verlegung angeben. Der Verlustbeiwert hängt lediglich vom Blockierungsgrad ab. Die Verlegung hat also in diesem Fall den gleichen Einfluss wie die Verbauung.

Dies hängt damit zusammen, dass sich die horizontalen Wirbelstrukturen, her-

vorgerufen durch Verlegung, mit den horizontalen Wirbeln, hervorgerufen durch die einzelnen Rechenstäbe, überlagern und teils aufheben. Die dominierende Wirbelstruktur ist in diesem Fall zweidimensional und die Energie-dissipation nicht so gross wie bei der horizontalen Verlegung, wo sich die vertikalen Wirbelstrukturen der Verlegung mit den horizontalen Wirbelstrukturen der einzelnen Rechenstäbe superponieren und ein dominierendes dreidimensionales Wirbelfeld bilden.

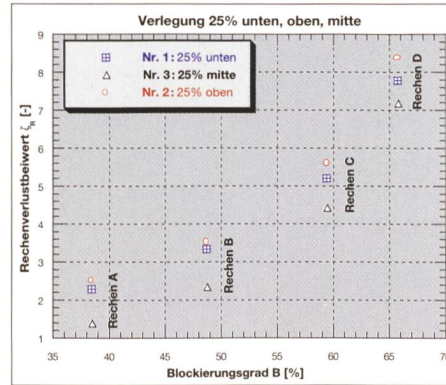


Bild 1. Abhängigkeit des Verlustkoeffizienten vom Blockierungsgrad bei einer horizontalen Rechteck-Verlegung mit 25% unten, oben, Mitte.

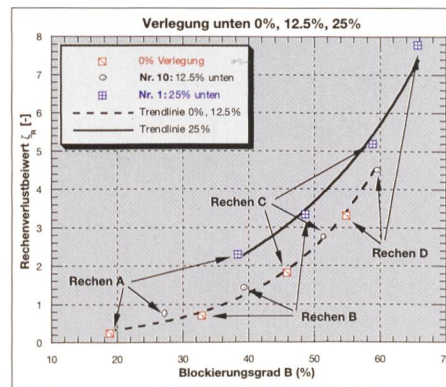


Bild 2. Abhängigkeit des Verlustkoeffizienten vom Blockierungsgrad bei einer variierenden horizontalen Rechteck-Verlegung (0 %, 12,5 %, 25 %) unten.

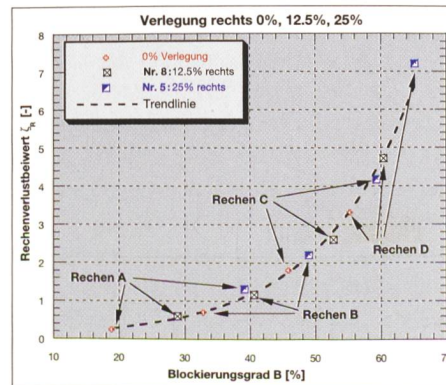


Bild 3. Abhängigkeit des Verlustkoeffizienten vom Blockierungsgrad bei einer variierenden vertikalen Rechteck-Verlegung (0 %, 12,5 %, 25 %) rechts.

Verlegungen mit einer vertikalen Ausrichtung erzeugen geringere Energieverluste als Verlegungen mit horizontaler Ausrichtung. Auf Grund der Gegebenheiten, die in der Natur der Anströmung liegen, sind jedoch in der Praxis Verlegungen mit horizontaler Ausrichtung häufiger und somit entscheidender für die Entstehung von Energieverlusten.

4. Naturmessung

4.1 Allgemeines

Mit der Naturmessung sollten die tatsächlichen Strömungsbedingungen vor der Rechenebene und die am Objekt auftretenden Rechenverluste erfasst und der zuvor am wasserbaulichen Modell untersuchte Einfluss der Verlegung mit Hilfe der Naturmessung überprüft werden. Die detaillierten Ergebnisse der Naturmessung sind in einem Bericht an die BKW FMB Energie AG zusammengefasst [4].

Das Wasserkraftwerk Kallnach befindet sich im Besitz der BKW FMB Energie AG, Bern, und liegt an der Aare etwa auf halber Fließstrecke zwischen Bern und dem Bielersee (Bild 4). Die Wasserfassung an der die Naturmessung stattfand, liegt direkt vor der Wehranlage beim KW Niederried-Radelfingen. Diese Wehranlage wurde ursprünglich für den Betrieb des Wasserkraftwerkes Kallnach erstellt und dient heute beiden Kraftwerken. Das Wasser gelangt durch einen unterirdischen Freispiegelstollen zum Wasserschloss Kallnach, von wo es via Druckleitung zur Turbine fliesst. Über den künstlich geschaffenen Kallnach-Kanal wird es offen in den Hagneck-Kanal zurückgeführt. Das Kraftwerk ist mit einer Kaplan-Rohrturbine mit 8 MW Leistung ausgerüstet. Die Rechenanlage besteht aus zwei Rechenfeldern mit Rechenstäben, welche ein Fischbauch-Profil aufweisen. Die lichte Rechenstabweite b beträgt 49,8 mm, die Stabdicke $s = 16$ mm, die Stablänge $l = 120$ mm und der Verbauungsgrad $p = 0,335$ bzw. 33,5 %.

Die Naturmessung wurde am 25. und 26. April 2001 durchgeführt. Die 0,76 m breiten und 6 m hohen Verlegungselemente wurden an der VAW vorbereitet und mit Hilfe eines Mobilkranes vor den Rechenfeldern vertikal eingebaut. Die Art der Verlegung musste für die Naturmessung, wie auch schon bei den Modellversuchen, im Gegensatz zur tatsächlich auftretenden Verlegung, abstrahiert werden. Aus Gründen der einfachen Montage während des Kraftwerkbetriebes wurde eine vertikale Verlegung über die gesamte Höhe des benetzten Fließquerschnittes gewählt. Die damit erzeugte Verlegung variierte zwischen 0 %, 12,5 % und 25 % pro Rechenfeldfläche. Folgende Last-

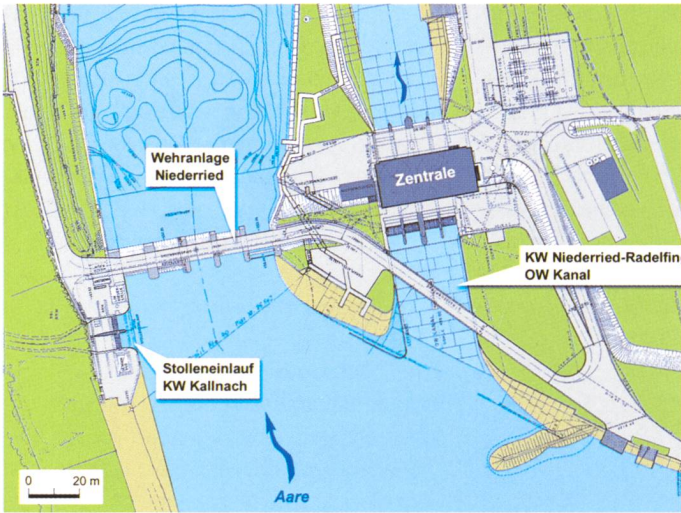


Bild 4. Situation Wasserfassung KW Kallnach, Aare.



Bild 5. Verlegung für Lastfall 2. Beide Rechenfelder sind jeweils vertikal mit 12,5% verlegt.

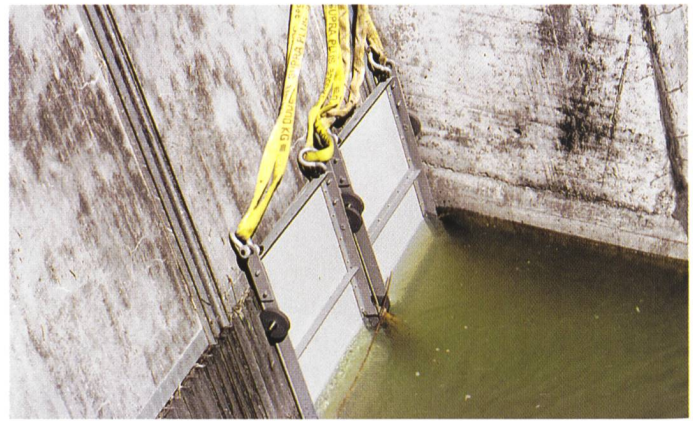


Bild 6. Verlegung für Lastfall 3. Rechenfeld 1 ist mit 25% verlegt. Rechenfeld 2 ist unverlegt.

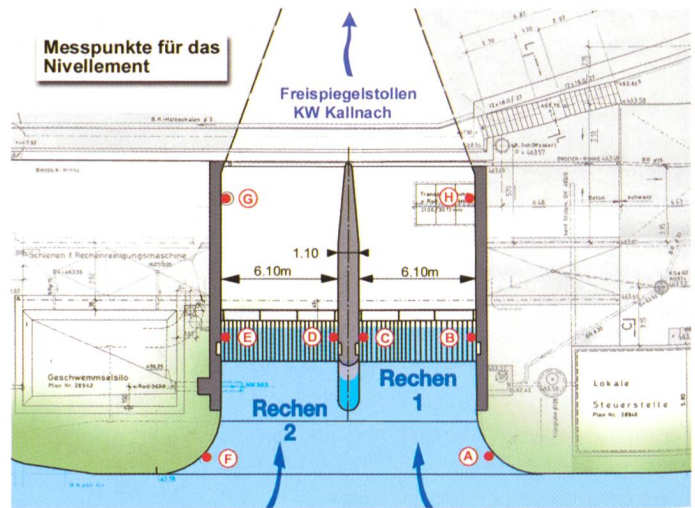


Bild 7. Übersicht der Messpunkte für das Wasserspiegel-nivellement.

fälle, welche sich nur durch die Verlegung der einzelnen Rechenfelder unterscheiden, wurden dabei untersucht:

- Lastfall 1: Rechen 1 = 0% verlegt, Rechen 2 = 0% verlegt
- Lastfall 2: Rechen 1 = 12,5% verlegt, Rechen 2 = 12,5% verlegt (Bild 5)
- Lastfall 3: Rechen 1 = 25% verlegt, Rechen 2 = 0% verlegt (Bild 6)

Die Geschwindigkeitsmessung erfolgte dreidimensional mit zwei baugleichen ADV-Sonden (Acoustic Doppler Velocimeter) der Firma Nortek nach ISO 3354-1975 [5]. Um die Messpunkte im Querschnitt genau abfahren zu können, wurde ein speziell an der VAW konstruierter Messwagen verwendet. Dieser wurde mit Hilfe des Mobilkranes in die entsprechende vertikale Position gefahren.

Um die genaue lastfallabhängige Lage der Wasserspiegel vor und nach dem Rechen zu ermitteln, wurde pro Lastfall jeweils ein Nivellement vor und nach der Geschwindigkeitsmessung durchgeführt. Die Punkte, an denen der Wasserspiegel gemessen wurde, sind in Bild 7 eingezeichnet. Die Wahl der Messpunkte musste in erster Linie

auf Grund ihrer Aussagekraft und der Durchführbarkeit einer genügend genauen Messung erfolgen.

4.2 Ergebnisse

Für alle untersuchten Lastfälle wurden die genaue Wasserspiegellage vor und nach dem Rechen, die Geschwindigkeits- und Turbulenzverteilung, der Durchfluss, die Energieverlusthöhe am Rechen und der effektive Rechenverlustkoeffizient bestimmt.

Die Wasserspiegellagen vor dem Rechen der drei gemessenen Lastfälle unterscheiden sich nur unwesentlich voneinander. Die Wasserspiegel vor (z_v) und nach (z_n) dem Rechen sind in Tabelle 3 angegeben. Der Wasserspiegel vor dem Rechenfeld 1 liegt tendenziell um ca. 2 cm tiefer als der vor dem Rechenfeld 2. Dies kann auf die Strömungssituation vor der Wasserfassung zurückgeführt werden. Die Wehranlage war an beiden Messtagen geöffnet und erzeugte eine Absenkkurve. Lediglich bei Lastfall 3 liegt der Wasserspiegel vor Rechen 1, wegen der dort angebrachten 25%-Verlegung, um ca. 3 cm höher als vor Rechen 2.

Die Geschwindigkeitsverteilung in der Hauptströmungsrichtung x ist für alle Lastfälle und die einzelnen Rechen recht einheitlich. Auffallend ist, dass der Rechen 1 für alle Lastfälle die höhere mittlere Anströmgeschwindigkeit aufweist, was auf die unmittelbare Nähe des Wehrabflusses zurückzuführen ist. Die mittleren Anströmgeschwindigkeiten (v_R) sind in Tabelle 3 angegeben. In y -Richtung hingegen kann die Geschwindigkeitsverteilung nur bei Lastfall 1 als homogen bezeichnet werden. Es treten dort so gut wie keine Geschwindigkeiten in diese Richtung auf. Die beiden Rechen 1 und 2 sind somit frontal angeströmt. Bei Lastfall 2 wird durch die Rechenverlegung eine starke Geschwindigkeitskomponente in y -Richtung erzeugt. Diese Geschwindigkeitskomponente wird bei Lastfall 3 vor Rechen 1 durch die dort angebrachte 25%-Verlegung noch verstärkt. Die z -Komponente der Geschwindigkeit ist für alle Lastfälle auf Grund der Sohlentopografie im Einlaufbereich nach unten gerichtet und etwa gleich gross.

Auch die Turbulenzverteilung darf für alle Lastfälle als einheitlich bezeichnet wer-

den. Der mittlere Turbulenzgrad beträgt ca. 10 %. Lediglich im sohnlahen Bereich und im Nahfeld der Verlegung sind vereinzelt Turbulenzspitzen zu beobachten. Diese sind mit den erhöhten Abweichungen der Geschwindigkeitskomponenten in y- und z-Richtung und der kleineren mittleren Geschwindigkeit in Hauptströmungsrichtung zu erklären.

Der bei der Naturmessung nach ISO 3354-1975 [5] ermittelte *Gesamtdurchfluss* liegt bei allen drei Lastfällen etwas über dem Wert, der von der Leitstelle Aarberg für die Dauer der Naturmessung angegeben wurde. Einerseits können mögliche Ursachen für diese Differenz in der angewendeten Messsystematik und/oder in der Messgenauigkeit liegen. Andererseits liegt eine mögliche zusätzliche Ursache in der Angabe des Durchflusses von der Leitstelle. Der Durchfluss wird in der Regel aus der Leistung ab Generator oder Trafo berechnet. Durch die Annahmen für die Wirkungsgrade von Turbine, Generator und Trafo entstehen gewisse Unsicherheiten. Die Durchflüsse (Q) für die einzelnen Rechenfelder sind in Tabelle 3 angegeben.

Die Energielinienhöhe setzt sich für den betrachteten Fall aus geodätischer Höhe (z), Geschwindigkeitshöhe ($v^2/2g$), Druckhöhe ($p/\rho g$) und eventuell vorkommenden Verlusthöhen ($\Sigma \Delta h_v$) zusammen (Gleichung 5). Die Energiehöhen werden vor dem Rechen (H_{ev}) und nach dem Rechen (H_{en}) bestimmt.

$$H_e = z + \frac{v^2}{2g} + \frac{p}{\rho g} - \Sigma \Delta h_v \quad [\text{m ü. M.}] \quad (5)$$

Da in diesem Fall lediglich die Energieverlusthöhe durch den Rechen bestimmt werden soll, muss der Energieverlust Δh_E , welcher im Einlaufbereich nach Gleichung 6 entsteht, in Abzug gebracht werden.

$$\Delta h_E = \zeta_E \frac{v_R^2}{2g} \quad [\text{m}] \quad (6)$$

Der Verlustkoeffizient ζ_E für den Einlaufbereich wird für beide Rechen mit 0,2 eingesetzt. Die *Energieverlusthöhe* Δh_R durch den Rechen ergibt sich dann aus Gleichung 7 und der *Rechenverlustkoeffizient* ζ_R aus Gleichung 8.

$$\Delta h_R = H_{ev} - \Delta h_E - H_{en} \quad [\text{m}] \quad (7)$$

$$\zeta_R = \frac{\Delta h_R}{v_R^2} 2g \quad [-] \quad (8)$$

Die Ergebnisse für die einzelnen Lastfälle und Rechen sind in Tabelle 3 aufgelistet.

Durch das Anbringen einer 12,5 %-Verlegung steigt die Energieverlusthöhe am Rechen von ca. 2 cm (unverlegt) auf ca. 5 cm an. Dieser Effekt wird durch eine 25 %-Verlegung noch verstärkt. In diesem Fall verfünf-

facht sich die Energieverlusthöhe auf 10 cm gegenüber dem Lastfall 1 ohne Verlegung.

5. Vergleich der Naturmessungen mit Messungen am Modell

5.1 Allgemeines

Bei der Naturmessung wurden mit den drei Lastfällen die selben Konfigurationen wie schon bei den Modellversuchen untersucht. Auch der Rechen besitzt im Modell ($p = 34\%$) ungefähr den selben Verbauungsgrad wie in der Natur ($p = 33,5\%$). Lediglich das Rechenstabprofil im Modell (rechteckig) unterscheidet sich von dem in der Natur (fischbauchförmig). Mit den vorhandenen Daten lässt sich nun ein Vergleich zwischen Natur- und Modellergebnissen wie auch mit denen nach der Kirschmer- und VAW-Gleichung durchführen. Die Gleichung von Kirschmer (9) ist im deutschsprachigen Raum nach wie vor die am häufigsten für die Berechnung der Energieverlusthöhe am Rechen verwendete.

$$\zeta_R = k_f \left(\frac{s}{b} \right)^3 \quad [-] \quad (9)$$

In der Kirschmer-Gleichung entspricht k_f dem Stabformbeiwert (0,76, fischbauchförmig; 2,42, rechteckig); s entspricht der Stabdicke (16 mm) und b der lichten Stabweite (48,9 mm).

Die VAW-Gleichung (10) wurde im Zuge einer Untersuchung für die VDEW (Vereinigung Deutscher Elektrizitätswerke) [6] am hydraulischen Versuchsstand empirisch entwickelt.

$$\zeta_R = k_f \cdot (1 + W \cdot \tan \delta) \cdot p^C \cdot \left(\frac{1}{b} \right)^D \quad [-] \quad (10)$$

Dabei entspricht k_f dem Stabformbeiwert nach Kirschmer (0,76, fischbauchförmig; 2,42, rechteckig); W dem Koeffizienten für die Schräganströmung (0,65); δ dem Winkel der horizontalen Schräganströmung (0°), p dem Verbauungsgrad (0,335), C dem Koeffizienten für die Verbauung (1,33), b der lichten

ten Stabweite (48,9 mm), l der Stablänge (120 mm) und D dem Koeffizienten für das Verhältnis l/b (0,43).

Zweck dieses Vergleichs ist es, unter anderem auch das hydraulische Modell auf seine Tauglichkeit zu überprüfen und mögliche Massstabeffekte bei der Modelluntersuchung zu lokalisieren.

5.2 Ergebnisse

Die Ergebnisse sind in Bild 8 dargestellt. Der Verlustkoeffizient ζ_R nimmt mit ansteigender Verlegung d.h. zunehmender Blockierung stark zu und ist im Fall der 25 %-Verlegung ca. 3,5-mal so hoch wie ohne Verlegung. Dies trifft sowohl für die Ergebnisse am hydraulischen Modell als auch für die Ergebnisse der Naturmessung zu. Diesbezüglich stimmen die Ergebnisse recht gut überein. Mit zunehmender Verlegung steigt die mittlere Geschwindigkeit, was die Energieverlusthöhe überproportional ansteigen lässt. Dies ist einer der massgebenden Gründe dafür, dass die Energieverluste an Einlaufrechen mit den bekannten Gleichungen, von denen keine die Verlegung mitberücksichtigt, häufig unterschätzt werden.

Betrachtet man nun den Fall mit 0% Verlegung fällt auf, dass der mit der Kirschmer-Gleichung bzw. VAW-Gleichung berechnete Verlustkoeffizient für das fischbauchförmige Rechenstabprofil im Vergleich zur Naturmessung tiefer ausfällt. Als möglicher Grund für diese Differenz kommt das durch Belag veränderte Rechenstabprofil in Frage. Im Zuge einer Begehung während einer Revision konnte an den Rechenstäben ein aus kleinen Muscheln und Algen bestehender Belag festgestellt werden, der das ursprüngliche Fischbauch-Profil zu einem annähernd rechteckförmigen Profil verändert hat. Wird für die Berechnung mit der Kirschmer- und der VAW-Gleichung der Stabformbeiwert $k_f = 2,42$ für das rechteckige Rechenstabprofil als Extremwert eingesetzt, stimmen die Ergebnisse aus der Naturmes-

Parameter	Lastfall 1		Lastfall 2		Lastfall 3	
	Rechen 1	Rechen 2	Rechen 1	Rechen 2	Rechen 1	Rechen 2
Verlegung [%]	0	0	12,5	12,5	25	0
m. Wsp. z_n [m ü.M.]	461,043	461,064	461,013	461,029	461,041	461,034
m. Wsp. z_n [m ü.M.]	461,030	461,050	460,980	461,000	460,960	461,020
v_R [m/s]	0,82	0,69	0,94	0,79	0,97	0,88
Q [m ³ /s]	24,40	20,62	24,56	20,70	21,85	26,11
H_{ev} [m ü.M.]	461,077	461,088	461,058	461,061	461,089	461,059
Δh_E [m]	0,007	0,005	0,009	0,006	0,010	0,005
H_{en} [m ü.M.]	461,046	461,064	461,000	461,014	460,975	461,034
Δh_R [m]	0,021	0,020	0,050	0,041	0,104	0,020
ζ_R [-]	0,63	0,82	1,10	1,27	2,15	0,81

Tabelle 3. Ausgewertete Messergebnisse der Naturmessung.

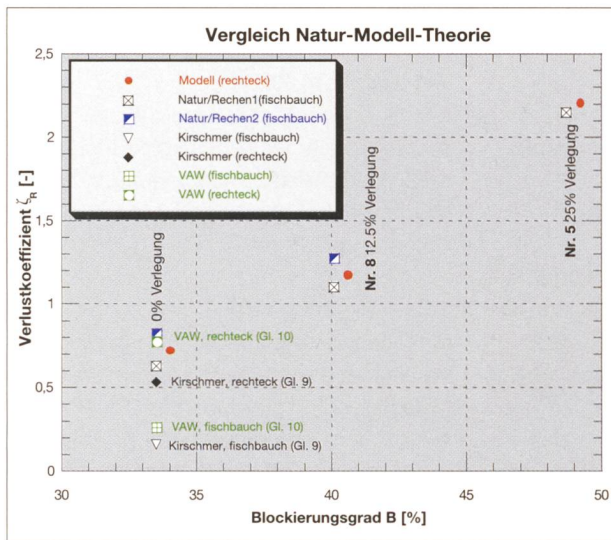


Bild 8. Vergleich der Verlustkoeffizienten in Abhängigkeit vom Blockierungsgrad für eine variierende vertikale Verlegung zwischen Natur, Modell und Kirschmer.

sung mit den Ergebnissen am hydraulischen Modell und den Berechnungen nach der VAW-Gleichung sehr gut überein.

Jedoch lässt sich dieser Unterschied nicht nur durch das durch Belag veränderte Rechenstabprofil erklären. Als mögliche weitere Ursachen kommen die unvermeidlichen Strömungsinhomogenitäten, welche bei der Berechnung mit der VAW- bzw. Kirschmer-Gleichung nicht berücksichtigt werden, in Frage. Durch weitere Untersuchungen am hydraulischen Modell muss der Einfluss von Strömungsinhomogenitäten auf die Energieverluste an Rechen noch geklärt werden.

6. Schlussfolgerungen

Mit der in der Praxis häufig angewendeten Gleichung von Kirschmer wird der tatsächlich auftretende Energieverlust stark unterschätzt, da damit weder der Verbauungsgrad noch Schräganströmung, Verlegung und Strömungsinhomogenitäten berücksichtigt werden.

Mit der bisher vorhandenen VAW-Gleichung, welche noch nicht die verlustrelevanten Parameter wie Verlegung und Strömungsinhomogenitäten mitberücksichtigt, werden die Energieverluste, wenn auch nicht so stark wie mit der Kirschmer-Gleichung, unterschätzt.

Die horizontal ausgerichtete Verlegung (Geschwemmsel, Geröll usw.) hat einen bedeutend grösseren Einfluss auf die Energieverluste am Rechen als die Verbauung (Rechenstäbe usw.). In der Praxis bedeutet dies, dass mit der Forderung nach engeren Rechenstababständen nicht nur der Rechenverlust auf Grund der engeren Verbauung zunehmen wird. Durch die zu erwartende stärkere Verlegung von Rechen mit engerem Stababstand werden die Energieverluste zusätzlich stark überproportional ansteigen.

Eine praxisnahe Verlegung mit horizontaler Ausrichtung, wie zum Beispiel Geröll

an der Sohle oder Laub und Geschwemmsel an der Wasseroberfläche, ruft bedeutend grössere Energieverluste hervor als eine prozentual gleich grosse praxisferne Verlegung mit vertikaler Ausrichtung.

Modellversuche und Naturmessung haben gezeigt, dass sich die Energieverlusthöhe bei einer 12,5 %-Verlegung mit vertikaler Ausrichtung gegenüber dem Fall ohne Verlegung verdoppelt. Durch eine 25 %-Verlegung wird die Energieverlusthöhe sogar verfünffacht. Dieser Effekt wird bei einer 25 %-Verlegung mit horizontaler Ausrichtung, zum Beispiel Geröll an der Sohle oder Geschwemmsel an der Wasseroberfläche, bis zum Siebenfachen verstärkt.

7. Ausblick

Mit Hilfe von weiteren Modellversuchen an der VAW und Naturmessungen soll die vorhandene VAW-Gleichung durch die zusätzlichen verlustrelevanten Parameter Verlegung und Strömungsinhomogenitäten erweitert werden, womit in Zukunft die tatsächlich auftretenden Energieverluste an Einlaufrechen realistischer abgeschätzt werden können.

Dank

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

Der BKW FMB Energie AG, insbesondere allen direkt Beteiligten an der Messkampagne beim Kraftwerk Kallnach, Aare, möchten wir an dieser Stelle herzlich für die tatkräftige Unterstützung bei der Vorbereitung wie auch während der Messtage danken.

Literatur

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

[2] VAW (2001): Energieverluste an Einlaufrechen von Flusskraftwerken bei inhomogener Anströmung, 1. Zwischenbericht an den Projekt- und Studienfonds der Elektrizitätswirtschaft (PSEL), Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH-Zürich (VAW).

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

[4] VAW (2001): Energieverluste an Einlaufrechen, Naturmessung KW Kallnach, Bericht an den Projekt- und Studienfonds der Elektrizitätswirtschaft (PSEL), Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH-Zürich (VAW).

[5] International Standard ISO 3354 (1975): Measurement of clean water flow in closed conduits – velocity-area method using current-meters.

[6] VAW (1999): Untersuchung über den Einfluss der Geometrie und Anströmung von Einlaufrechen auf den Betrieb von Wasserkraftwerken. Schlussbericht an die Vereinigung Deutscher Elektrizitätswerke (VDEW), Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH-Zürich (VAW).

Anschrift der Verfasser

Hubert Meusburger, dipl. Ing. ETH, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, CH-8092 Zürich. E-Mail: meusburger@vaw.baug.ethz.ch

Katja Rutishauser, dipl. Ing. ETH, pom+ Consulting AG, CH-8055 Zürich. E-Mail: rutishauser@pom.ch

Dr. *Peter Volkart*, dipl. Ing. ETH, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, CH-8092 Zürich. E-Mail: volkart@vaw.baug.ethz.ch
Prof. Dr. *H.-E. Minor*, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, CH-8092 Zürich. E-Mail: minor@vaw.baug.ethz.ch