

Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Band: 95 (2003)
Heft: 5-6

Artikel: Hochwassersituaiton und Schwallentwicklung beim Kraftwerk Rüchling
Autor: Hollenstein, Roland / Hermann, Felix / Egli, Stefan
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-939465>

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: 19.11.2024

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

Hochwassersituation und Schwallentwicklung beim Kraftwerk Rüchlig

■ Roland Hollenstein, Felix Hermann, Stefan Egli, Peter Volkart

Für eine genauere Beurteilung des Systemverhaltens des Kraftwerks Rüchlig bei Hochwasser wurden an der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) der ETH Zürich verschiedene stationäre und instationäre Abflusszustände numerisch simuliert.

Die stationären Abflussberechnungen zeigen, dass die Ausuferungsgefahr wesentlich vom Betrieb des Kraftwerks abhängt. Ohne Kraftwerkbetrieb erfolgt eine Ausuferung im Stauraum bereits bei $900 \text{ m}^3/\text{s}$ und mit Kraftwerkbetrieb bei $1400 \text{ m}^3/\text{s}$. Als instationäre Lastfälle wurden verschiedene Schwallberechnungen mit unterschiedlichen Massnahmen wie Wehrabsenkung, Abflussdrosselung beim Kraftwerk, Sohlenvertiefung und Ufererhöhung untersucht. Bis zu einem Aareabfluss von $Q_{\text{Aare}} = 750 \text{ m}^3/\text{s}$ kann eine schnelle oder vorzeitige Wehrabsenkung eine Ausuferung verhindern. Ab $Q_{\text{Aare}} = 1000 \text{ m}^3/\text{s}$ würde eine Schwallwelle trotz vorgängig geöffnetem Wehr stellenweise zu Ausuferungen führen. Eine Erfolg versprechende Massnahme ist in jedem Fall eine lokale Ufererhöhung an den kritischen Stellen.

1. Einleitung

Das Kraftwerk (KW) Rüchlig ist ein Ausleitkraftwerk, das sich an der Aare in Aarau befindet und bis ins Jahr 2002 von den Jura-Cement-Fabriken (JCF) betrieben wurde und neu den Nordostschweizerischen Kraftwerken untersteht. Das Maschinenhaus und das Wehr liegen bezüglich der Flussachsen auf gleicher Höhe und sind durch eine Insel voneinander getrennt (Bild 1). Die Abzweigung des Oberwasserkanals zum Kraftwerk erfolgt 400 m oberstrom des Maschinenhauses. Die Strecke von der Abzweigung bis zum Wehr beträgt ca. 500 m. In einer Entfernung von 1,3 km oberstrom des Maschinenhauses des KW Rüchlig befindet sich das KW Aarau.

Die obere Konzessionsgrenze liegt ca. 300 m im Unterwasser des KW Aarau und die untere Konzessionsgrenze 1,7 km unterstrom des KW Rüchlig. Die Stauhaltung ist

abflussreguliert, wobei eine vorgegebene Pegel-Abfluss-Beziehung bei der oberen Konzessionsgrenze einzuhalten ist.

Das Maschinenhaus enthält drei Rohr-, zwei Propeller- und eine Kaplan turbine und ist bei einem Gefälle von 3 bis 4 m auf eine Gesamtausbauwassermenge von $340 \text{ m}^3/\text{s}$ ausgelegt. Der mittlere Jahresabfluss der Aare beträgt $300 \text{ m}^3/\text{s}$. Das Wehr besteht aus fünf Hubklappenschützen. Es ist eine Restwassermenge von $10 \text{ m}^3/\text{s}$ einzuhalten.

Auf Grund kritischer Hochwassersituationen in den Jahren 1994 und 1999 mit Aareabflüssen von über $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ beabsichtigen die JCF eine Neuurteilung der Hochwassersicherheit des KW Rüchlig. Als massgebender Lastfall wird dabei ein Notschluss der Turbinen betrachtet, da das Kraftwerk über keine Schwallentlastung verfügt und nur einen geringen Wasserdurchfluss mittels Segelbetrieb der Turbinen erlaubt. Ein Notschluss führt zu einem Schwall im Stauraum, was während einer Hochwassersituation zu Ausuferungen führen könnte. Mögliche Lösungen, um dies zu vermeiden, sind eine Anpassung des Betriebsreglements und bauliche Massnahmen.

2. Hydraulische Bemessung

Massgebend für eine mögliche Ausuferung ist die höchste Wasserspiegellage, sowohl bei stationären als auch bei instationären Abflusszuständen.

Um die Sicherheit gegen Ausuferungen zu erhöhen, muss ein zusätzliches Freibord berücksichtigt werden.

Bei langen, prismatischen Gerinnen entspricht der stationäre Abfluss näherungsweise einem Normalabfluss, wobei die grösste Unsicherheit für dessen Berechnung bei der Beurteilung der Sohlen- und Wandrauigkeit liegt.

Als instationäre Abflusszustände gelten unter anderem Schwall-, Sunk-, Wind- oder Schiffswellen. Schwall- und Sunkwellen entstehen bei schnellen Abflussänderungen, bei Schliessung oder Öffnung von Turbinen oder Schützen (Bild 2 a und b). Im vorliegenden Fall kann durch die Turbinendrosselung ein Absperschwall und durch die Öffnung der Hubklappenschützen beim Wehr ein Entnahmesunk in den Stauraum des KW Rüchlig auftreten. Zudem ist bei einem schnell ansteigenden Hochwasser mit einem Füllschwall zu rechnen.

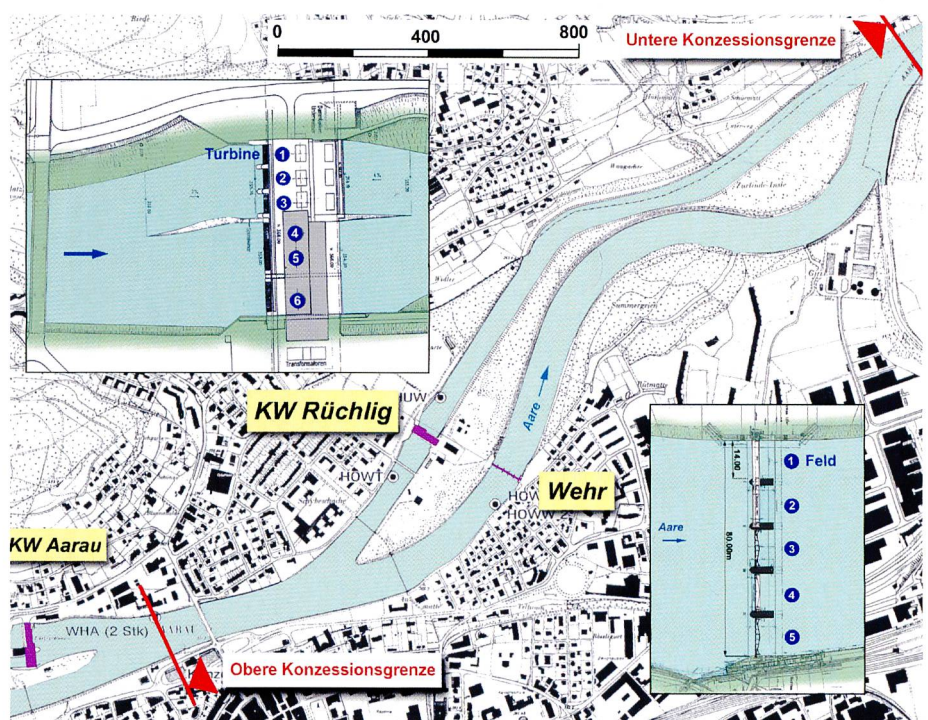


Bild 1. Situation des KW Rüchlig an der Aare, mit oberer und unterer Konzessionsgrenze. Das Kraftwerk und der Stauraum befinden sich mitten in der Stadt Aarau.

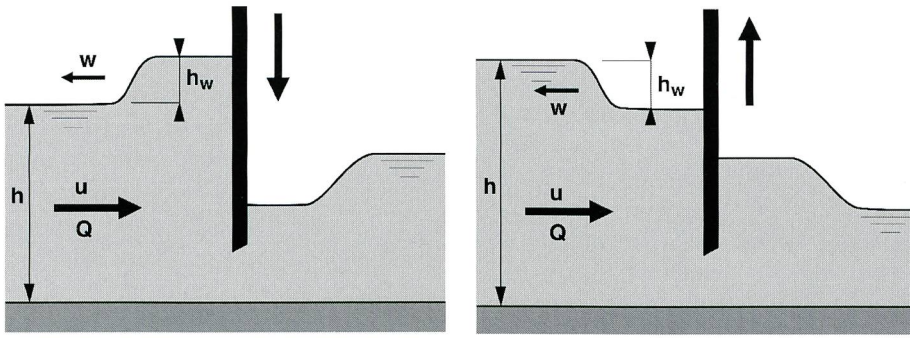


Bild 2. a) Absperrschwall und b) Entnahmesunk.

Für eine erste Abschätzung kann die Schwallwelle als stationärer Strömungsvorgang berechnet werden, wobei die Schwallwelle in einem mitbewegten Bezugssystem betrachtet wird. Die weitere Entwicklung der Schwallwelle setzt eine Änderung des Volumenstroms voraus, was nur mittels iterativer Verfahren zu modellieren ist (Press/Schröder, 1966). Es ist nahe liegend, dass auf Grund des grossflächigen Gebietes und der heterogenen Topografie eine detaillierte Beurteilung der stationären Abflussverhältnisse und der Schwallentwicklung nur durch eine rechnerunterstützte Simulation zu lösen ist.

3. Numerische Modellierung

3.1 Allgemeines

Mit Hilfe der Bewegungsgleichungen von Navier-Stokes lassen sich hydraulische Strömungen exakt beschreiben. Zusammen mit der Kontinuitätsgleichung bilden die Bewegungsgleichungen in den drei Raumkoordinaten das Gleichungssystem für die Zustands-

grössen u_x, u_y, u_z und p der Strömung. Zusätzlich zum hydrodynamischen Druck werden bei den Navier-Stokes-Gleichungen die Schubspannungen der inneren Reibung berücksichtigt, welche auf Grund des Verformungswiderstandes, der Fluidzähigkeit auftreten.

$$\rho \cdot \underline{f} - \text{grad } p + \eta \cdot \Delta \underline{u} = \rho \cdot \frac{d\underline{u}}{dt}$$

ρ : Dichte, f : Massenkraften, p : Druckkomponente, η : dynamische Viskosität, \underline{u} : Geschwindigkeitsvektor

Eine vereinfachte Form der Navier-Stokes-Gleichungen ist im numerischen Modell Hydro2de (Beffa, 1994) implementiert, welches für die vorliegenden Berechnungen verwendet wurde.

3.2 Verwendetes numerisches Modell

Das numerische Modell Hydro2de löst die tiefengemittelten Flachwassergleichungen basierend auf einem Finite-Volumen-Verfahren

mit expliziter Zeitdiskretisierung. Durch die Tiefenmittelung ergibt sich eine Formulierung im zweidimensionalen Raum, welche auch auf kleineren Rechnern die Bearbeitung grösserer Gebiete erlaubt.

Damit lassen sich Strömungen mit freier Oberfläche überall dort berechnen, wo eine hydrostatische Druckverteilung angenommen werden kann und demzufolge keine oder nur geringe Druckänderungen auftreten. Für stationäre Abflüsse ist diese Annahme erfüllt, für Schwallwellen gilt diese Annahme nur unter bestimmten Kriterien.

Der Gültigkeitsbereich der Flachwassergleichungen wird dadurch eingeschränkt, dass für schnelle örtliche und zeitliche Wasserspiegeländerungen die Druckverteilung nicht mehr zwingend hydrostatisch ist und die vertikalen Beschleunigungen nicht mehr vernachlässigt werden können. Die verwendeten Flachwassergleichungen gelten streng genommen nur für Grundwellen nach der linearen Wellentheorie von Airy (Beffa, 1994), mit kleinen Verhältnissen zwischen Wassertiefe und Wellenlänge ($\neq 0,04$) und zwischen Wellenhöhe und Wassertiefe ($\neq 0,02$). Für Schwallwellen gilt dies in der Regel nicht, da Schwallwellen ein grosses Verhältnis zwischen Wellenhöhe und Wassertiefe besitzen und dadurch für die Berechnung nichtlineare Effekte entstehen. Versuche (Beffa, 1994) haben jedoch gezeigt, dass in diesem Fall der erste Wellenberg trotzdem gut wiedergegeben werden kann und sich der Berechnungsfehler erst auf die nachfolgenden Wellen auswirkt. Es ist dabei vor allem ein zeitlicher Verzögerung der Wellenberge zu erwarten.

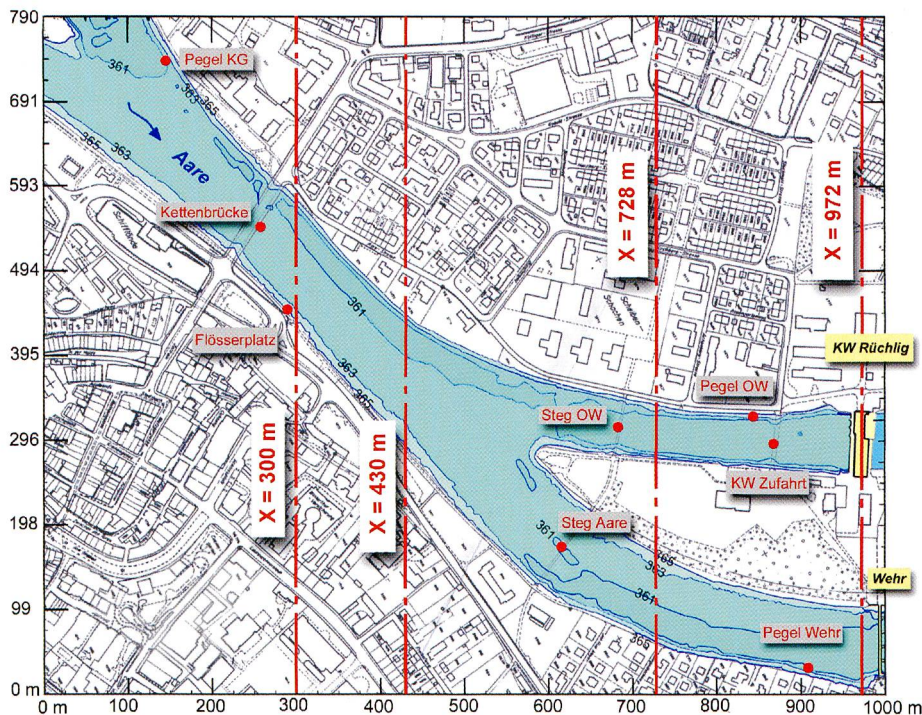


Bild 3. Modellberandung des berechneten Gebietes mit Messpunkten der Naturmessung und Bezeichnung der ausuferungskritischen Profile.

3.3 Modelldiskretisierung

Für die Abbildung der Topografie stellte die IUB Ingenieur-Unternehmung AG Bern ein digitales Geländemodell zur Verfügung, welches mit 790×1000 m den gesamten Stauraum des KW Rüchlig umfasst (Bild 3).

Ergänzend dazu wurden für eine genaue Beurteilung der Uferkote detaillierte topografische Aufnahmen durchgeführt, die eine genaue Lokalisierung der ausuferungskritischen Uferbereiche erlauben.

Die erforderliche räumliche Auflösung für das numerische Modell wurde mit einer konventionellen Schwallberechnung abgeschätzt und nach Vorversuchen auf eine Gitterweite von 2 m festgelegt.

3.4 Modelleichung

Als Grundlage der Kalibrierung galt die gemäss Konzession festgelegte Pegel-Abfluss-Beziehung bei der oberen Konzessionsgrenze (Pegel KG). Zusätzlich bestehen langjährige Pegel-Abfluss-Messreihen beim Pegel OW und beim Pegel Wehr.

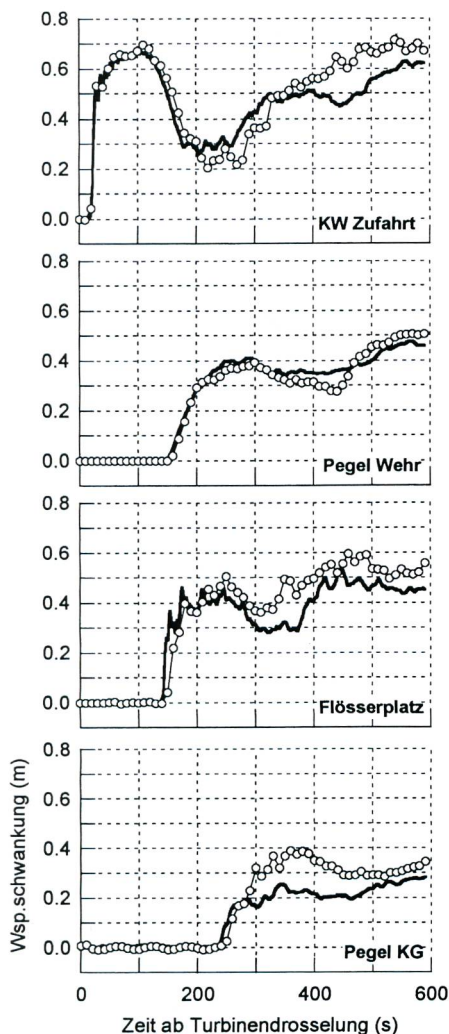


Bild 4. Vergleich der gemessenen und der berechneten Wasserspiegelschwankungen bei ausgewählten Messpunkten für den Lastfall Notschluss. Die ausgezogene Linie entspricht den gemessenen und die Punkte den berechneten Werten.

Für die Beurteilung des Abflussverhaltens in einem Fluss wie der Aare gilt es im stationären Zustand bei gegebener Gerinnebreite und gegebenem Gefälle zusätzlich die Sohlenrauigkeit zu bestimmen. Dabei wird ein vollturbulentes Abflussverhalten vorausgesetzt. Im vorliegenden Modell werden die Energieverluste aus der Sohlenrauigkeit nach dem Gesetz von Manning-Strickler berechnet. Mit der Geschwindigkeitsformel

$$u = k \cdot J^{1/2} \cdot R^{2/3} \quad \text{mit } R \equiv \text{Abflusstiefe } h$$

u : Strömungsgeschwindigkeit, k : Rauigkeitsbeiwert, J : Energieliniengefälle, R : hydraulischer Radius

resultiert aus der allgemein gültigen Sohlenschubspannungsformel $\tau = \rho \cdot g \cdot J \cdot R$, die Sohlenschubspannung nach Manning-Strickler:

$$\tau = \rho \cdot g \cdot \frac{u^2}{k^2 \cdot h^{1/3}}$$

τ : Sohlenschubspannung, ρ : Dichte Wasser, g : Erdbeschleunigung, u : Strömungsgeschwindigkeit, k : Rauigkeitsbeiwert, h : Abflusstiefe

Als Funktion der Fließgeschwindigkeit u und dem unbekanntem Rauigkeitsbeiwert k wird die Sohlenrauigkeit in den Bewegungsgleichungen berücksichtigt. Mit einem Rauigkeitsbeiwert von $k = 45 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ stimmt das gerechnete mit dem gemessenen Abflussverhalten gut überein.

Auf Grund verschiedener Einflussfaktoren der numerischen Diskretisierung, wie Gitterzellengröße oder numerische Diffusion, kann die Sohlenrauigkeit im numerischen Modell von der in natura zu erwartenden Sohlenrauigkeit abweichen.

Ausgehend von der erfolgreichen Modellkalibrierung für stationäre Zustände, galt es, das numerische Modell mittels instationärer Naturversuche zu verifizieren. Für die Beurteilung der Sensitivität des numerischen Modells wurden zwei unterschiedliche Schwallwellen untersucht:

Langsame Turbinendrosselung:

von $Q_{KW} = 265 \text{ m}^3/\text{s}$ auf $95 \text{ m}^3/\text{s}$ in 60 s und

Schneller Turbinennotschluss:

von $Q_{KW} = 265 \text{ m}^3/\text{s}$ auf $40 \text{ m}^3/\text{s}$ in 10 s.

Puls-Radar-Messungen im gesamten Stauraum erlaubten eine umfassende Verfolgung des Wellenverlaufes. Gleichzeitig wurden der Schliessvorgang der Turbine und die Abflussmengen über das Wehr und das Kraftwerk aufgezeichnet.

Der Vergleich der berechneten mit den gemessenen Daten für den Fall des Turbinennotschlusses (Bild 4) zeigt vor allem für den ersten Wellenberg eine sehr gute Übereinstimmung. Für die nachfolgenden Wellen resultiert ein Verzug in der Zeit und der Amplitude. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Gültigkeitsbereich für die Flachwassergleichungen überschritten wurde. Der kontinuierliche Anstieg des Wasserspiegels nach der Schwallwelle ist durch den Rückstau des Wehrs bedingt. Die stärkeren Abweichungen beim Flösserplatz und beim Pegel KG sind darauf zurückzuführen, dass der Schwall stark abgeschwächt, entgegen der Fließrichtung der Strömung verläuft und die innere Reibung (im numerischen Modell nicht berücksichtigt) des Wassers zum Tragen kommt. Ebenso ist zu vermuten, dass schräg angeströmte Gitterzellen zu Abweichungen bei der numerischen Berechnung führen können (Bild 3).

4. Stationäre Abflusszustände

Bei grossen Abflüssen besteht die Möglichkeit, dass das Kraftwerk wegen zu starker Rechenverlegung oder eines Lastabwurfes der

Turbinen den Durchfluss vollständig drosseln muss und der ganze Aareabfluss über das Wehr fliesst. Durch den, auf die Wehrbreite reduzierten Abflussquerschnitt besteht die Gefahr einer Ausuferung der Aare schon bei geringeren Abflussmengen als mit einem Kraftwerkbetrieb. Ohne Kraftwerkbetrieb könnten bereits ab einem Abfluss von $Q_{Aare} = 900 \text{ m}^3/\text{s}$ (Bild 5) vereinzelte und ab $Q_{Aare} = 1000 \text{ m}^3/\text{s}$ (Bild 6) grossflächige Ausuferungen am linken Ufer im Oberwasserkanal zum Kraftwerk auftreten.

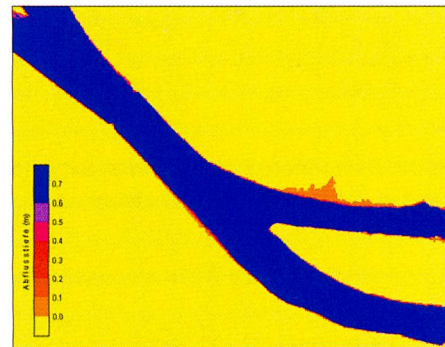


Bild 5. Berechnete Abflusstiefen bei einem Abfluss von $Q_{Aare} = 900 \text{ m}^3/\text{s}$. Entlang des Oberwasserkanals zum Kraftwerk treten vereinzelte Ausuferungen auf.

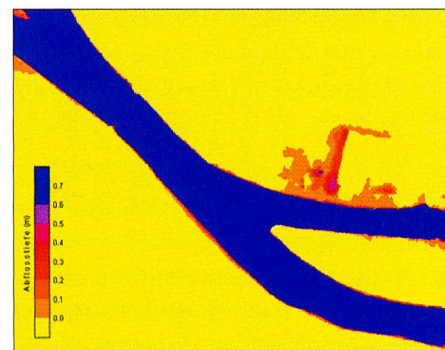


Bild 6. Berechnete Abflusstiefen bei einem Abfluss von $Q_{Aare} = 1000 \text{ m}^3/\text{s}$. Entlang des Oberwasserkanals zum Kraftwerk treten weitgehende Ausuferungen auf.

Bleibt das Kraftwerk in Betrieb, so liegt die maximale Abflussmenge ohne Ausuferungen zu erzeugen beim 1000-jährlichen HW von $Q_{Aare} = 1400 \text{ m}^3/\text{s}$. Bei einem grösseren Hochwasser treten erste Ausuferungen im Oberwasserkanal zum Kraftwerk und am rechten Aareufer auf.

Die Konzessionsbedingung verlangt, dass die Kote 365,50 m ü.M. beim Pegel KG nicht durch einen Aufstau des Wehrs überschritten wird. Das Wehr muss deshalb zwischen $750 \text{ m}^3/\text{s}$ und $850 \text{ m}^3/\text{s}$ vollständig geöffnet werden. Aus den stationären Berechnungen lässt sich nun der Verlauf der Pegel-Abfluss-Beziehungen (Bild 7) für den Betrieb beim KW Rüchli ableiten.

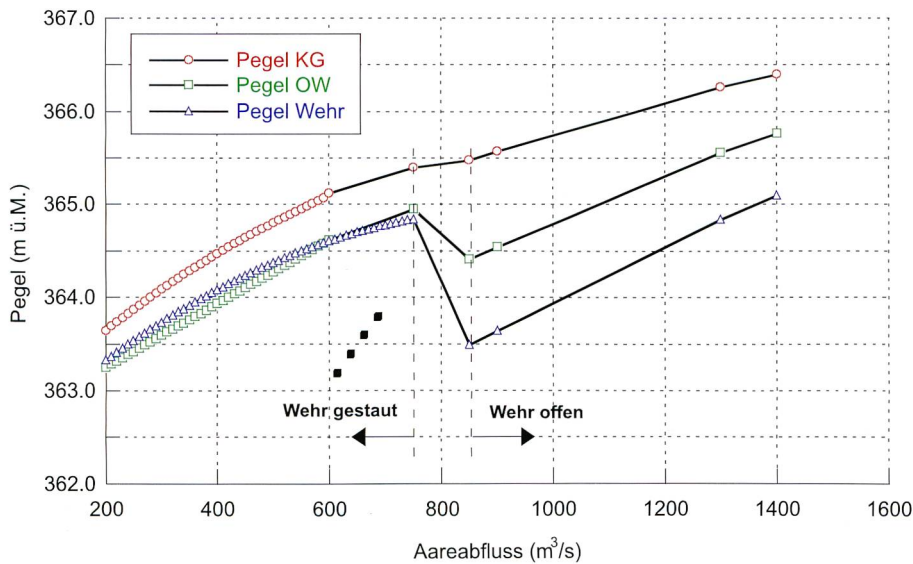


Bild 7. Berechnete Pegel-Abfluss-Beziehungen für das KW Rüchlig mit Kraftwerkbetrieb, falls bei 850 m³/s das Wehr voll geöffnet ist.

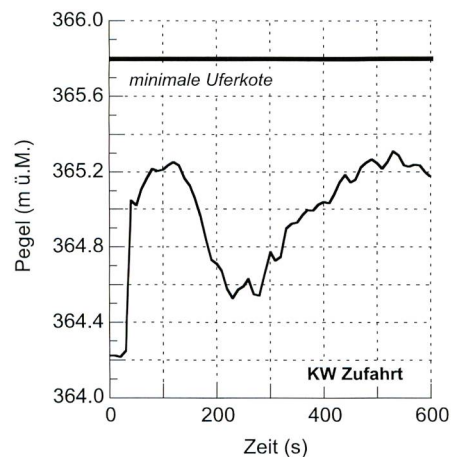
5. Instationäre Abflusszustände

5.1 Absperrschwall durch Turbinendrosselung

Ein Notschluss der Turbinen hätte beim KW Rüchlig einen Absperrschwall in den Stauraum zur Folge, da eine Schwallentlastung fehlt und kein effizienter Segelbetrieb aus maschinenbautechnischen Gründen möglich ist.

Auf Grund von Naturmessungen und rechnerischer Abschätzungen wurde als erster Lastfall ein Notschluss bei $Q_{Aare} = 500 \text{ m}^3/\text{s}$ festgelegt, mit einer Drosselung des Kraftwerkabflusses von $340 \text{ m}^3/\text{s}$ auf $0 \text{ m}^3/\text{s}$ innerhalb von 10 s.

Die Hydrographen in Bild 8 zeigen, dass vor dem Kraftwerk (Bild 9) mit einer Schwallwelle von über 1 m zu rechnen ist. Der Pegelanstieg vor dem Wehr (Bild 11) beträgt 0,65 m. Als ausuferungskritisch gilt vor allem die rechte Aareuferseite bei den Profilen $x = 300 \text{ m}$, $x = 430 \text{ m}$ und $x = 972 \text{ m}$ (Bild 3).



5.2 Entnahmesunk infolge Wehrsenkung

Um Ausuferungen infolge einer Schwallwelle am rechten Ufer vor dem Wehr zu vermeiden, kann als naheliegendste Massnahme gleichzeitig mit dem Notschluss das Wehr abgesenkt werden. Dadurch entsteht eine Sunkwelle, welche der Schwallwelle entgegenläuft und dieser eine tiefere Wasserspiegelhöhe vorgibt.

Für die Erzeugung einer Sunkwelle durch eine Öffnung des Hubklappenwehrs ist in erster Linie die Klappensenkung massgebend, da diese mit doppelter Geschwindigkeit gegenüber dem Schützenhub ausgeführt werden kann. Der anschliessende Schützenhub nach vollendeter Klappensenkung ist für die Beurteilung des Einflusses der Schwallwelle sekundär und wird nicht berücksichtigt.

Bei einem Notschluss bei $Q_{Aare} = 500 \text{ m}^3/\text{s}$ bleibt die Schwallwelle vor dem Kraftwerk durch die Wehrsenkung unbeeinflusst. Der Wasserspiegel im Oberwasser

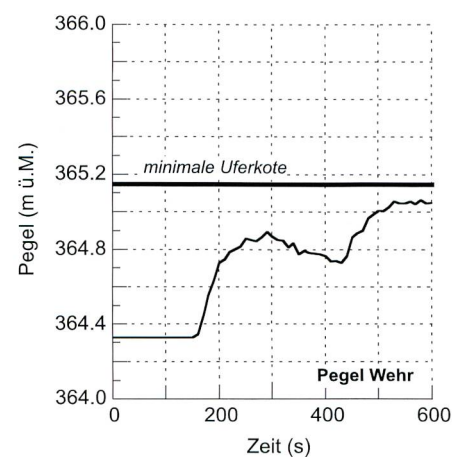


Bild 8. Hydrographen für die Messpunkte KW Zufahrt und Pegel Wehr nach einem Notschluss bei $Q_{Aare} = 500 \text{ m}^3/\text{s}$. Der Notschluss erfolgt bei 0 s.

Wehr wird deutlich durch den Entnahmesunk abgesenkt, sodass beim Pegel Wehr die Sunkerscheinung gegenüber der Schwallwelle deutlich dominiert. Die Sunkwelle beträgt ca. 50 cm.

Als ausuferungskritisch gilt nach wie vor die rechte Aareuferseite, wobei vor dem Wehr keine Ausuferungsgefahr mehr besteht. Die maximale Wasserspiegellage im Profil $x = 972 \text{ m}$ (Bild 12) zeigt, dass im Oberwasser zum Wehr die Sunkwelle die Schwallwelle kompensiert.

Bis 250 m vor dem Wehr bleibt die Wasserspiegellage infolge der Sunkwelle tiefer als die Ausgangslage; trotz überlagerter Schwallwelle. Das Zusammentreffen von Sunk und Schwall erfolgt beim Profil $x = 600 \text{ m}$ (Bild 13). Oberstrom davon entwickelt sich die Schwallwelle unabhängig von der Sunkwelle.

Für $Q_{Aare} = 500 \text{ m}^3/\text{s}$ hat sich gezeigt, dass eine frühzeitige Wehrabsenkung die Ausuferungsgefahr bei der kritischen Stelle vor dem Wehr deutlich entschärft. Um hingegen eine allfällige Ausuferung beim Profil $x = 430 \text{ m}$ zu reduzieren oder zu verhindern, ist eine Wehrabsenkung nur bedingt wirksam.

Mit zunehmendem Aareabfluss wird das Wehr sukzessive geöffnet. Aus der Konzessionsbedingung für den Pegel KG, dass eine Wasserspiegelhöhe von 365,50 m ü.M. durch einen Wehrestau nicht überschritten werden darf, folgt, dass das Wehr zwischen $Q_{Aare} = 750 \text{ m}^3/\text{s}$ und $Q_{Aare} = 850 \text{ m}^3/\text{s}$ voll zu öffnen ist.

Bei $Q_{Aare} = 750 \text{ m}^3/\text{s}$ ist die Schwallhöhe vor dem Kraftwerk mit ca. 90 cm infolge der grösseren Abflusstiefe kleiner als bei $Q_{Aare} = 500 \text{ m}^3/\text{s}$. Die maximale Wasserspiegelhöhe ist mit 365,80 m ü.M. jedoch höher und liegt im Bereich der minimalen Uferhöhe des Oberwasserkanals des Kraftwerks ($x = 728 \text{ m}$). Dies zeigt, dass neben der rechten Aareuferseite auch der Oberwasserkanal des Kraftwerks ausuferungsgefährdet ist.

Der Sunk vor dem Wehr von 20 cm resultiert aus der Absenkung der Wehrklappen 1, 2 und 5, da für $Q_{Aare} = 750 \text{ m}^3/\text{s}$ die Wehrfelder 3 und 4 gemäss Wehrreglement schon vorgängig geöffnet worden sind. Der nachfolgende Schwall beträgt ca. 30 cm, sodass bei einem Ausgangswasserspiegel von 364,84 m ü.M. beim Pegel Wehr, ein Freibord von nur 20 cm zur minimalen Uferhöhe von 365,15 m ü.M. verbleibt.

Eine mögliche Massnahme gegen eine Ausuferung sowohl im Oberwasserkanal des Kraftwerks als auch beim rechten Aareufer wäre eine vorzeitige, vollständige Absenkung des Wehrs. Mit zunehmender Wehröffnung nimmt die mögliche Entnahmesunktiefe ab, bis bei vollständig geöffnetem Wehr kein Sunk mehr produziert werden kann.

Die relative Sunkgeschwindigkeit ändert für verschiedene Abflussmengen nur geringfügig, sodass sich Sunk und Schwall immer am gleichen Ort treffen, im Oberwasser zum Wehr bei der Modellkoordinate $x = 600$ bis 640 m.

5.3 Vollständig geöffnetes Wehr

Infolge der kleineren Abflusstiefen bei voll geöffnetem Wehr ist im Falle eines Notschlusses mit leicht höheren Schwallwellen zu rechnen als bei eingestautem Wehr. Trotzdem kann davon ausgegangen werden, dass bei voll geöffnetem Wehr für die kritischen Standorte im Falle eines Notschlusses bis $Q_{Aare} = 750 \text{ m}^3/\text{s}$ keine oder nur noch eine geringe Gefahr für eine Ausuferung besteht. Es ist dabei jedoch zu beachten, dass durch die Absenkung der Wasserspiegellage eine kleinere Fallhöhe für die Energiegewinnung zur Verfügung steht.

Durch einen Notschluss bei einem Abfluss $Q_{Aare} = 1000 \text{ m}^3/\text{s}$ ist am rechten Aareufer und im Oberwasser zum Kraftwerk infolge der Schwallwelle stellenweise mit Ausuferungen zu rechnen. Die Schwallhöhe vor dem Kraftwerk (Bild 14) beträgt ca. 90 cm und führt zu einer maximalen Wasserspiegellage von $365,70 \text{ m ü.M.}$; 10 cm unter der minimalen Uferkote. Die Wasserspiegellage vor dem vollständig geöffneten Wehr steigt durch den Schwall auf über $364,50 \text{ m ü.M.}$. Generell ist zu sagen, dass eine längere Blockierung des Kraftwerks bei $Q_{Aare} = 1000 \text{ m}^3/\text{s}$ die grössere Ausuferungsgefahr darstellt als ein Schwall infolge eines Turbinennotschlusses. Eine weitere Absenkung des Wasserspiegels im Stauraum ist durch betriebliche Massnahmen nicht mehr möglich, da das Wehr bereits vollständig geöffnet ist und das Kraftwerk unter Volllast betrieben wird.

5.4 Drosselung des Kraftwerkabflusses

Eine weitere Massnahme zur Vermeidung von Ausuferungen wäre eine Drosselung des Kraftwerkabflusses, was die Schwallhöhe bei einem Notschluss reduziert und zusätzlich eine einfachere Geschwemmselbewirtschaftung ermöglicht.

Durch einen Notschluss bei einem auf $200 \text{ m}^3/\text{s}$ gedrosselten Kraftwerkabfluss ist bei $Q_{Aare} = 1000 \text{ m}^3/\text{s}$ mit Ausuferungen am rechten Aareufer zu rechnen. Eine stärkere Drosselung des Kraftwerkabflusses könnte bereits im stationären Zustand zu stellenweisen Ausuferungen führen.

Obschon durch die Drosselung des Kraftwerkabflusses eine deutlich geringere Schwallwelle bei einem Notschluss produziert wird, liegt die maximale Wasserspiegellage der Schwallwelle infolge des



Bild 9. Maschinenhaus des KW Rüchlig. Im Vordergrund die Zufahrtsbrücke zum Kraftwerk (KW-Zufahrt). Blick in Fliessrichtung.



Bild 10. Pegel Wehr in Bildmitte und Uferbereich. Blick gegen die Fliessrichtung vom Wehr aus. Unmittelbar am Ufer befindet sich ein Wohnquartier.

höheren Ausgangswasserspiegels auf gleicher Kote wie bei einem Notschluss bei Volllastbetrieb.

Eine Reduktion der Schwallhöhe durch eine Drosselung des Kraftwerkabflusses hat deshalb nur insofern Sinn, als dadurch die Geschwemmselbewirtschaftung vereinfacht würde.

Neben den betrieblichen Massnahmen und der Drosselung des Kraftwerkabflusses sind bauliche Eingriffe wie eine Ufererhöhung oder eine Sohlenabsenkung denkbar.

5.5 Lokale Absenkung der Sohle

Die Umlenkung der Strömung aus der Aare in den Oberwasserkanal zum Kraftwerk und kleine Fliessgeschwindigkeiten im Oberwasser zum Wehr führen zur Bildung einer Geschiebebank im Bereich der Verzweigung. Die wenigen Hochwasser reichen nicht aus, um die Geschiebebank vollständig abzutragen. Die Geschiebebank begünstigt einerseits die Strömungsumlenkung in den Oberwasserkanal zum Kraftwerk und reduziert andererseits die Einflussmöglichkeiten des Wehraufstaus. Wie Voruntersuchungen ge-

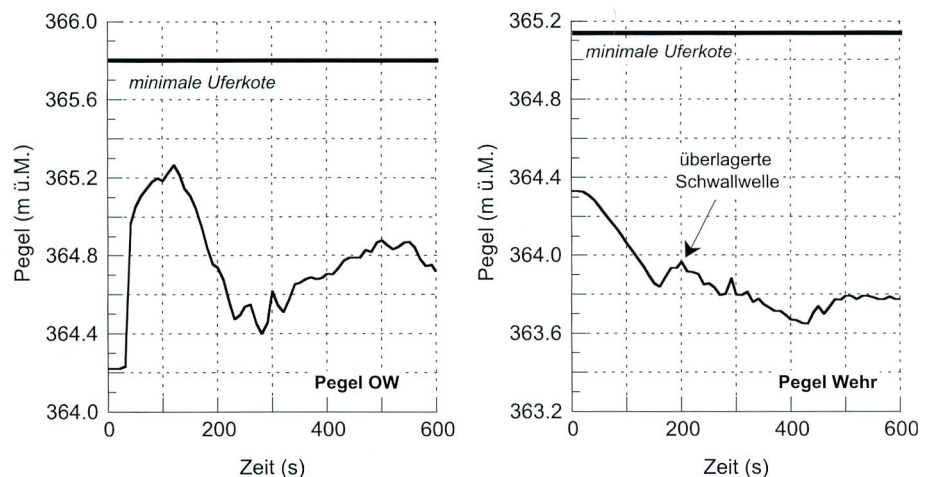


Bild 11. Hydrographen für Pegel OW und Pegel Wehr, nach einem Notschluss bei $Q_{Aare} = 500 \text{ m}^3/\text{s}$ mit Entnahmesunk. Der Notschluss erfolgt bei 0 s.

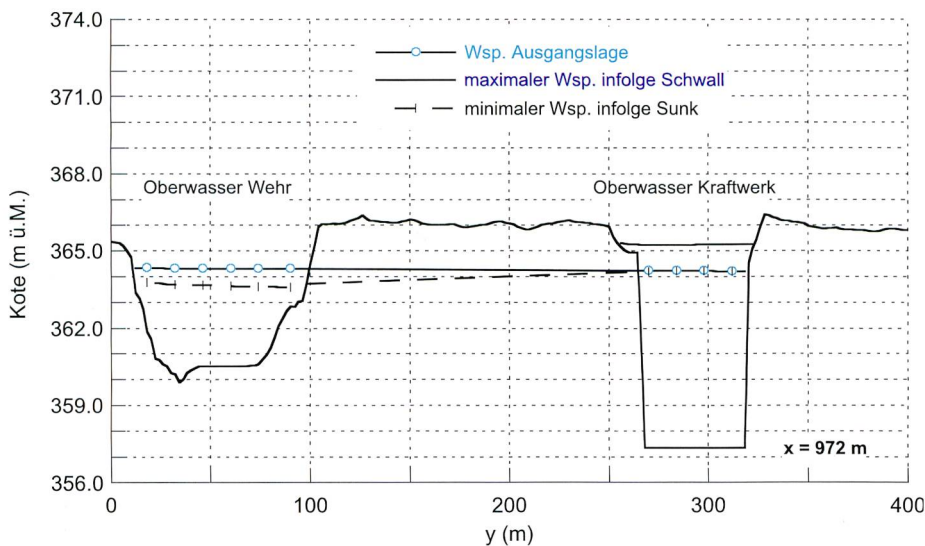


Bild 12. Wasserspiegellagen vor und nach dem Schwall/Sunk beim Profil $x = 972$ m, $Q_{Aare} = 500 \text{ m}^3/\text{s}$. Blick gegen die Fließrichtung.

zeigt haben, spielt die Geschiebebank bei aufgestautem Wehr nur eine untergeordnete Rolle für das Abflussverhalten. Bei voll geöffnetem Wehr jedoch wird die Wasserspiegellage im Bereich der Verzweigung durch die Geschiebebank beeinträchtigt, was wiederum die Wasserspiegellagen im Oberwasser zum Wehr und zum Kraftwerk beeinflusst.

Mittels Ausbaggerungen könnte die Wasserspiegellage im Bereich der Geschiebebank lokal abgesenkt und damit ein größeres Freibord für die ausuferungskritische Stelle am rechten Aareufer geschaffen werden. Die Sohle würde um ca. 0,5 m bis 1,0 m auf eine konstante Kote von 361,50 m ü.M. herabgesetzt. Als möglicher Endzustand wird die schraffierte Fläche in Bild 15 betrachtet.

Grundsätzlich hat die Sohlenabsenkung eine Änderung des Abflussregimes zur Folge, wobei die Strömung weniger stark in den Oberwasserkanal zum Kraftwerk gelenkt wird. Diese Abflussregimeänderung führt zu einer Absenkung des Wasserspiegels im Oberwasserkanal des Kraftwerks und damit

zu einer Reduktion der Fallhöhe. Die Schwallwelle verhält sich analog dem Fall ohne Sohlenabsenkung, jedoch mit einer stellenweise reduzierten Ausgangswasserspiegellage (Bild 16). Die Wasserspiegellage im Bereich der Sohlenabsenkung ist um 10 bis 20 cm reduziert. Es ist deshalb davon auszugehen, dass trotz einer Sohlenabsenkung von 0,5 m die minimale Uferkote von 365,50 m ü.M. beim Profil $x = 430$ m überschritten wird.

Der Pegel bei der oberen Konzessionsgrenze wird nur wenig durch die Sohlenabsenkung beeinflusst.

5.6 Ufererhöhung

Die verschiedenen Lastfälle zeigen, dass vor allem im Bereich des Profils $x = 430$ m betriebliche Massnahmen nicht ausreichen, um in jedem Fall eine Ausuferung zu verhindern. Als lokale bauliche Massnahme könnte mit einer Ufererhöhung die Ausuferung an den gefährdeten Uferpartien gezielt reduziert werden. Die Tabelle 1 gibt einen Überblick über

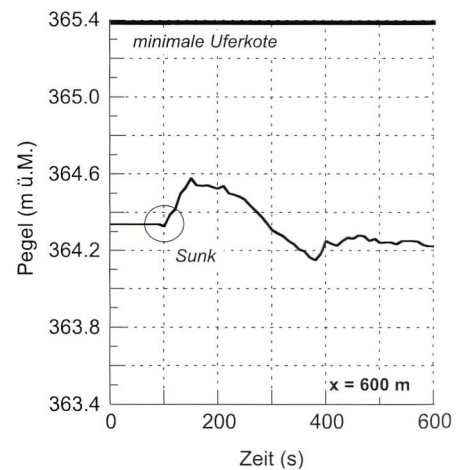


Bild 13. Zusammentreffen von Sunk und Schwall bei $x = 600$ m.

die maximalen Wasserspiegellagen der kritischen Lastfälle und zeigt, dass die Ausuferungen in der Grössenordnung von 10 cm liegen. Unter Berücksichtigung eines zusätzlichen Freibordes von 50 cm wäre eine Ufererhöhung von 60 cm vorzunehmen.

6. Schlussfolgerungen

Die Verwendung eines numerischen Modells (Hydro2de), basierend auf den tiefengemittelten Flachwassergleichungen, und die Eichung des Modells mittels Naturmessungen erlaubt eine einfache und gute Beurteilung der Hochwassersicherheit des KW Rüchlig. Trotz Überschreitung des theoretischen Gültigkeitsbereiches der Flachwassergleichungen resultieren im vorliegenden Fall aussagekräftige Resultate für die maximalen Wasserspiegellagen. Mit über 15 stationären Lastfällen und 6 instationären Lastfällen wird das Betriebsverhalten des KW Rüchlig, das Abflussregime der Aare und die ausuferungskritischen Stellen umfassend simuliert und dokumentiert. Die konzessionsbedingte Ab-

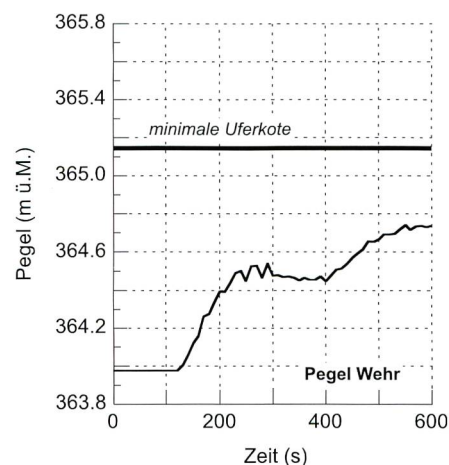
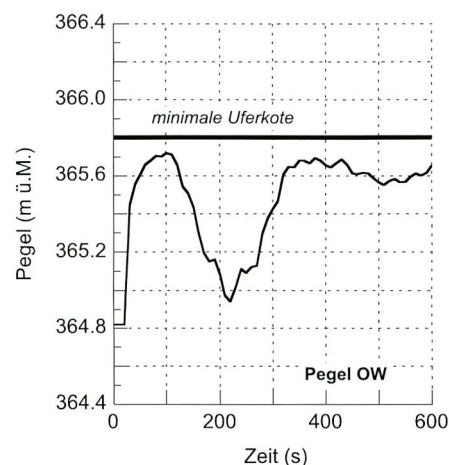


Bild 14. Hydrographen beim Pegel OW und beim Pegel Wehr nach einem Notschluss bei $Q_{Aare} = 1000 \text{ m}^3/\text{s}$. Der Notschluss erfolgt bei 0 s.

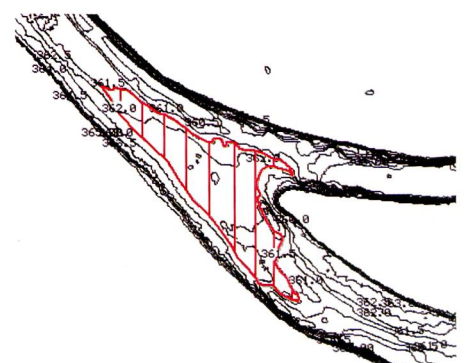


Bild 15. Abgesenkte Sohlentopografie im Bereich der Geschiebebank bei der Verzweigung zum Oberwasserkanal des Kraftwerks und zum Oberwasser des Wehrs.

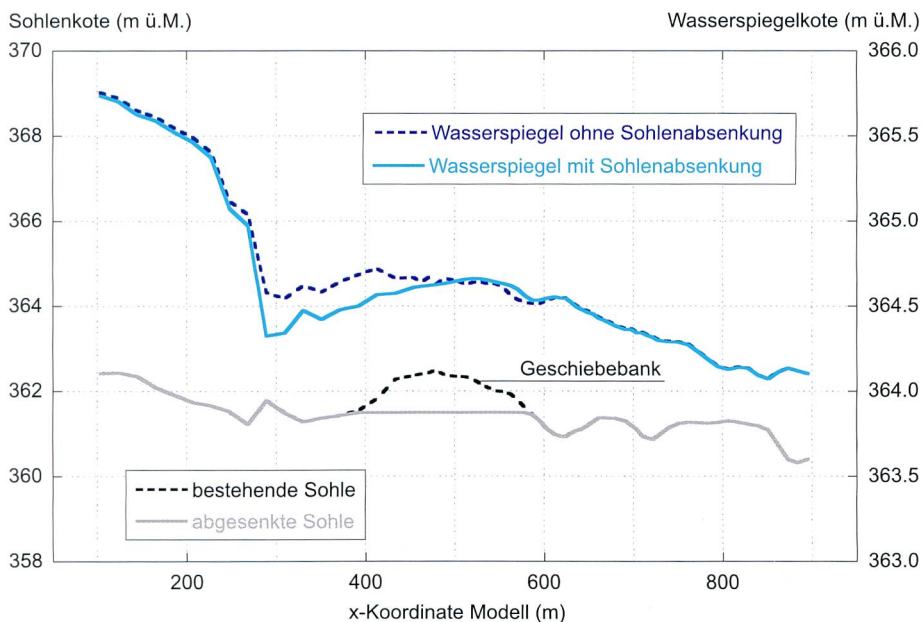


Bild 16. Längsschnitt der Wasserspiegel- und Sohlenkoten der Aare, mit und ohne Sohlenabsenkung bei der Verzweigung. Die Verengung bei der Kettenbrücke ($x = 250$ m) bewirkt einen Aufstau oberhalb und eine Senkkurve infolge der Querschnittsaufweitung unterhalb. Die Senkkurve wird anschliessend vom Rückstau aus dem Oberwasserkanal des Kraftwerks überlagert.

Lastfall	HW mit KW-Betrieb	HW ohne KW-Betrieb	Notschluss, Wehr blockiert	Notschluss mit Entnahmesunk	Notschluss, Wehr offen	Minimale Uferkote
Q_{Aare} (m ³ /s)	1400	900	500	750	1000	
Rechtes Aareufer ($x = 430$ m)	365,67	365,60	365,10	365,60	365,58	365,55
Oberwasser KW ($x = 728$ m)	365,76	365,66	365,25	365,80	365,72	365,80
Oberwasser Wehr ($x = 972$ m)	365,10	364,66	364,91	364,90	364,54	365,15

Tabelle 1. Wasserspiegelkoten der ausuferungskritischen Stellen für verschiedene Lastfälle. Die Wahrscheinlichkeit für Ausuferungen in die Stadt Aarau ist bei den rot markierten Lastfällen gross, bei den schraffierten Lastfällen mittel und bei den nicht markierten Lastfällen klein.

flussregelung führt zu einem dynamischen Systemverhalten mit unstemem Verlauf der Pegel-Abfluss-Beziehung im Stauraumgebiet des KW Rüchlig. Zwischen $Q_{Aare} = 750$ m³/s und 850 m³/s muss das Wehr vollständig geöffnet werden, um die Konzessionsbedingung beim Pegel KG einzuhalten. Bei einem normalen Betriebsverhalten kann gemäss den vorliegenden Berechnungen ein maximaler Aareabfluss von $Q_{Aare} = 1400$ m³/s schadlos abgeführt werden. Bei grösseren Abflussmengen sind erste Ausuferungen im Oberwasserkanal zum Kraftwerk und beim rechten Aareufer zu erwarten. Während Hochwassersituationen besteht eine erhöhte Gefahr, dass infolge der ausserordentlichen

Belastung der Kraftwerksanlage ein Zurückfahren oder ein vollständiges Abschalten der Turbinen erforderlich ist. Im Extremfall der vollständigen Kraftwerksabschaltung können bereits bei $Q_{Aare} = 900$ m³/s erste Ausuferungen im Oberwasserkanal zum Kraftwerk auftreten.

Im Falle einer Notabschaltung der Turbinen ist im Oberwasserkanal mit einer Schwallwelle von bis zu 1 m zu rechnen. Die untersuchten Lastfälle von Schwallwellen zeigen, dass für mittlere Hochwasser betriebliche Massnahmen weitgehend genügen, um grossflächige Ausuferungen zu vermeiden. Um jedoch die Ausuferungsgefahr infolge einer Schwallwelle bei einem grossen Hoch-

wasser zu reduzieren, sind hier nur bauliche Massnahmen Erfolg versprechend.

Dank

Diese Untersuchung konnte nur dank der grosszügigen Unterstützung und Mithilfe der Betreiberfirma (2002) Jura-Cement-Fabriken (JCF), Aarau-Wildegg, bzw. Nordostschweizerische Kraftwerke AG und der IUB Ingenieur-Unternehmung AG Bern durchgeführt werden.

Literaturverzeichnis

Beffa C. (1994). Praktische Lösungen der tiefen gemittelten Flachwassergleichungen, VAW-Mitteilung 133, VAW ETH Zürich 1994.

Bruder B. (1999). Ein Erdwall soll die Telli schützen. Aargauer Zeitung, 9.6.1999.

Frank J. (1957). Nichtstationäre Vorgänge in den Zuleitungs- und Ableitungskanälen von Wasserkraftwerken, Springer Verlag, Berlin.

Göbel N. (1984). Beitrag zur Hydromechanik von Schwall- und Sunkwellen, Dissertation Universität Karlsruhe, Mitteilung Nr. 171.

Gross H. (1995). Überflutung des Stauraumes Kraftwerk Rüchlig am 15. 6. 1995, wel, Heft 7/8 1995.

Hollenstein R., Egli S., Hermann F., Volkart P. (2000). Schwallberechnung für das KW Rüchlig – Eichung des numerischen Modells. Symposium in Graz, Betrieb und Überwachung wasserbaulicher Anlagen, Schriftenreihe zur Wasserwirtschaft Nr. 34, TU Graz.

Hollenstein R. (2001). Hochwassersituation und Schwallentwicklung beim KW Rüchlig – untersuchte Lastfälle. 3. JuWi-Treffen in Wien, Modellversuche oder computergestützte Simulation, Institut für konstruktiven Wasserbau TU Wien.

Huber A. (1976). Grenzen der Froude'schen Ähnlichkeit bei der Nachbildung flacher Wasserwellen im hydraulischen Modell, Versuchsanstalt für Wasserbau ETH Zürich, Mitteilung Nr. 21.

Press H., Schröder R. (1966). Hydromechanik im Wasserbau, Verlag Wilhelm Ernst und Sohn, Berlin. VAW Bericht 4150 (2001). Hochwassersituation und Schwallentwicklung beim KW Rüchlig – numerische Berechnungen von stationären und instationären Abflussberechnungen im Stauraum des KW Rüchlig.

Anschrift der Verfasser

Roland Hollenstein, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich, Gloriastrasse 37 – 39, ETH Zentrum, CH-8092 Zürich, hollen@vaw.baug.ethz.ch

Felix Hermann, AWEL, Walchetor, CH-8090 Zürich, felix.hermann@bd.zh.ch

Stefan Egli, IUB Ingenieur-Unternehmung AG Bern, Thunstrasse 2, CH-3000 Bern 6, stephan.egli@iub-bern.ch

Peter Volkart, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich, Gloriastrasse 37 – 39, ETH Zentrum, CH-8092 Zürich, volkart@vaw.baug.ethz.ch