Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 80 (1988)
Heft: 9

Artikel: Auswirkungen von Kraftwerkspeichern auf den extremen Hochwasserabfluss

Autor: Zeller, Jürg

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-940731

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 16.07.2025

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

Auswirkungen von Kraftwerkspeichern auf den extremen Hochwasserabfluss

Jürg Zeller

Zusammenfassung

Am Beispiel von drei Gebirgseinzugsgebieten mit Kraftwerken wird anhand der Frequenzanalyse nach Gumbel gezeigt, wie sich die Auftretenswahrscheinlichkeit extremer Hochwasser durch Gebirgsspeicher ändert. Im Oberlauf, wo sich diese Speicher befinden, ist die Abnahme der Auftretenswahrscheinlichkeit sehr ausgeprägt, während diese im Unterlauf, d. h. in unsern Hauptflüssen, gering bis kaum mehr spürbar ist. Auf Probleme der Gefahrenbeurteilung wird hingewiesen.

Résumé: L'influence de réservoirs d'usines hydro-électriques sur les crues intenses

Sur la base de l'analyse des fréquences de Gumbel, trois bassins versants situés en montagne ont été examinés. Il s'agissait de connaître l'influence exercée par un réservoir d'eau sur la probabilité que des crues intenses se manifestent. Une diminution de la probabilité est nettement marquée vers le tronçon supérieur du cours d'eau, là où se trouvent les réservoirs. Mais ce facteur n'est que minime, voire à peine perceptible, vers le tronçon inférieur du cours, c'est-à-dire sur nos rivières principales. Il est aussi question, dans cette étude, du domaine de l'analyse des risques.

Summary: Reservoirs and extreme floods

The influence of reservoirs of hydroelectric power plants on the probability of extreme floods has been studied. Gumbel's frequency analysis yields results for three catchment areas in our mountains. Decrease in probability of occurrence is well marked in the upper reaches, where we find the reservoirs; but small or scarcely noticeable in the lower reaches, i.e. in our main rivers. Problems of risk analysis are also mentioned.

1. Einleitung

Die Unwetterschäden von 1987 sind Anlass, über die Auswirkungen von Kraftwerkspeichern nachzudenken. Der Hinweis von *R. Bischof* und *J. Vichr* [1] über die sehr positive Wirkung der Bergeller Hochwasserrückhalteräume zielt in diese Richtung. Zwar sind diese Auswirkungen in Fachkreisen bestens bekannt, doch dürfte es dennoch von Interesse sein, die hochwasserhydrologische Sicht kurz darzulegen[1].

Mit Hilfe von drei Beispielen, die sich dank gutem Datenmaterial für eine derartige Untersuchung eignen, wird der Unterschied in der Auftretenswahrscheinlichkeit der Hochwasserabflüsse vor und nach dem Bau der Kraftwerkspeicher dargestellt. Die betrachteten Gewässer sind die *Sihl* als Voralpenfluss (Messstation Sihlhölzli/Zürich) und im inneralpinen Raum der *Hinterrhein* (Messstation Andeer) und die *Drance de Bagnes* (Messstation le Châble-Villette). Ohne Zweifel hängt die Beeinflussung des Abflussregimes im Hochwasserbereich ab von der Grösse bzw. dem momentanen Wasseraufnahmevermögen des Speichers im Verhältnis zur Grösse seines Einzugsgebietes. Ausbaugrösse und Kraftwerkbetrieb sind u. a. weitere Einflussgrössen. Auf die Publikation von *E. Walser* und *E. Zanker* [2] sowie von *A. Bezinge* [3] sei besonders hingewiesen. Einige Daten der untersuchten Flussgebiete finden sich in Tabelle 1.

Das langjährige Abflussregime für den Zustand vor und nach dem Speicherbau ist in Tabelle 2 wiedergegeben. Die Angaben basieren auf Daten der Dauerkurve der Abflusstagesmittel. Zugrundegelegt wurden die Abflüsse mit den frei gewählten Überschreitungsdauern von 100, 200 und 300 Tagen für den Zustand vor dem Speicherbau. Diese wurden verglichen mit den Überschreitungsdauern nach dem Speicherbau (unter Beibehaltung derselben Abflussmengen). Tabelle 2 zeigt eindrücklich die starke Verschiebung in Richtung kleinerer Abflüsse. Insbesondere wird der Niederwasserbereich zeitlich stark ausgedehnt und der Hochwasserbereich sehr stark verkürzt. Bei allen drei Gewässern wird das Nutzwasser unterhalb der Messstation zurückgegeben, wodurch diese starken Verschiebungen noch betont werden.

2. Veränderung grosser Hochwasserabflüsse

Als Hilfsmittel zur Darstellung der Abflussveränderung wird die Frequenzanalyse von Jahresreihen verwendet. Dargestellt sind in den Bildern 1 bis 3 die «Gumbelgeraden» für den Zustand vor und nach dem Kraftwerkbau. In Ergänzung dazu zeigt Tabelle 3 die extrem starke Verschiebung in Richtung viel grösserer Wiederkehrperioden (Jährlichkei-

[1] Diese Publikation entstand im Zusammenhang mit dem Studium der Hochwasserregulierung von Wildbächen mit Hilfe von Dosiersperren und Rückhalteräumen.

Tabelle 1. Daten der untersuchten Flussgebiete.

Fluss	Sihl	Hinterrhein	Drance de Bagnes	Alpenrhein	Rhône [3]
Messstation	Sihlhölzli/ Zürich	Andeer	Le Châble/ Villette	Schmitter/ St. Margrethen	Porte de Scex
Speicher	Sihlsee	Valle di Lei Sufers	Mauvoisin	sämtliche «Rheinspeicher» in den Kantonen Graubünden und St. Gallen sowie im Vorarlberg	sämtliche «Rhônespeicher» im Kanton Wallis
Einzugsgebiet bis Speicher (km^2)	156	266,5	188	680	1390
Einzugsgebiet bis Messstation	336	503	254	6119	5220
Speichervolumen (10^6 m^3)	92	216	180	756	1150
Speicheroberfläche auf Höhe Stauziel (km^2)	10,8	4,9	2,08	ca. 15,6	ca. 17,7
Energieproduktion Sommer (%)	27	46	40	?	47
Winter (%)	73	54	60	?	53

Tabelle 2. Veränderung der Überschreitungsdauer durch Kraftwerkspeicher an drei Beispielen mit Hilfe der Dauerkurve aus Abflusstagesmitteln.

	Überschreitungsdauer (Tage)		
Vor dem Speicherbau	100	200	300
Nach dem Speicherbau (gerundete Werte)			
– Sihl, Messstation Sihlhölzli/ Zürich	25	87	245
– Hinterrhein, Messstation Andeer	4	8	50
– Drance de Bagnes, Messstation le Châble-Villette	1	100	165

Tabelle 3. Gegenüberstellung der Abflussjährlichkeiten vor und nach dem Kraftwerkbau (Näherungswerte).

	Jährlichkeit in Jahren			
Vor dem Kraftwerkbau	2, 3	10	20	100
Nach dem Kraftwerkbau				
– Sihl (Sihlhölzli/ Zürich)	30	70	~500	(≫1000)
– Hinterrhein (Andeer)	~8	100	200 (?)	(>1000)
– Drance de Bagnes (le Châble-Villette)	>1000	≫1000	–	–

ten)[2]. So wird zum Beispiel ein 10jährliches Hochwasser vor dem Bau, also ein «hin und wieder» auftretendes Hochwasser, zu einem seltenen bis äusserst seltenen Ereignis. Die aussergewöhnlich stark dämpfende Wirkung ist, abgesehen von Speichergrösse und -bewirtschaftung, auch darauf zurückzuführen, dass diese Speicher unmittelbar auf diese Gewässer wirken und diese stauen. Ausserdem befinden sich wie erwähnt die Messstellen mit Ausnahme der Sihl nahe bei den Speichern. Als Gegenüberstellung dienen die Messstationen weit in Unterstrom des Rheins bzw. der Rhone kurz oberhalb ihrer Einmündung in den Boden- bzw. Genfersee (Bilder 4 und 5 und Tabelle 1). Obwohl die Messreihen dieser beiden Standorte viel zu kurz sind, um verbindliche Aussagen wagen zu dürfen, ist doch die recht geringe Dämpfung des Hochwasserabflusses erkennbar. Ja im Falle des Rheins ist eine solche offenbar kaum vorhanden. Je grösser demnach die Distanz zu den Speichern ist und je mehr durch Kraftwerke unbeeinflusste Gewässer dem Flusssystem angehören, um so schwächer wird die Wirkung der Speicher und damit die Dämpfung der Hochwasserabflüsse.

Die Bilder 1 bis 3 könnten zur Vermutung verleiten, die dämpfende Wirkung nehme mit zunehmender Jährlichkeit zu oder bleibe doch voll erhalten. Dem ist leider nicht unbedingt so. Bei äusserst extremen Zuflüssen kann der Hochwasser-Auffangraum eines Speichers bald erschöpft sein, so dass das Hochwasser nach Unterstrom weitergegeben werden muss. In den Frequenzdiagrammen wird sich deshalb die «Gumbelkurve» (nach dem Kraftwerkbau) der ursprünglichen Gumbelgeraden stark annähern. Diese Tendenz ist in Bild 4 (Rhone) angedeutet. Sie dürfte in Bild 1 (Sihl) etwa bei einer Jährlichkeit von 500 Jahren spürbar werden, während sie in Bild 2 (Hinterrhein) und Bild 3 (Drance de Bagnes) offenbar ausserhalb des zu berücksichtigenden Bereiches liegt.

3. Einige Hinweise

Die Beispiele zeigen den äusserst stark dämpfenden Einfluss von Kraftwerkspeichern auf den extremen Hochwasserabfluss des *unmittelbar betroffenen Gewässers*. Die Auftretenswahrscheinlichkeit eines solchen Hochwassers kann auf diese Weise stark verkleinert werden. Die Gefahrenrisiken reduzieren sich dadurch auf ein sehr kleines Restrisiko. Wie erwähnt, nimmt allerdings die Wirkung der Speicher mit zunehmender Grösse des Einzugsgebietes ab, so dass unsere Hauptflüsse nur noch beschränkt von dieser Wirkung profitieren.

[2] Eine Homogenitätsanalyse wurde wegen des Aufwandes nicht ausgeführt. Auch würde diese am vorliegenden Ergebnis nur wenig ändern.

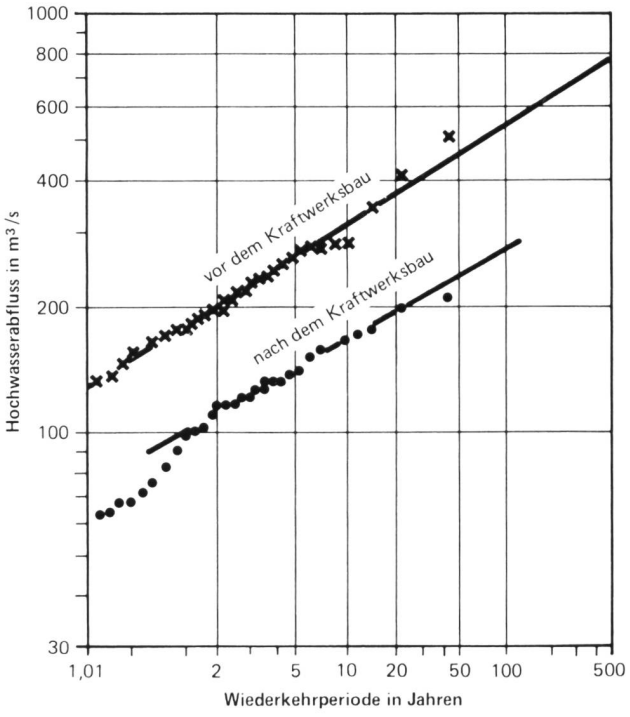

Bild 1. Sihl beim Sihlhölzli/Zürich.
Messperioden: vor dem Kraftwerkbau 1896–1936, nach dem Kraftwerkbau 1946–1986 (ohne Kriegsjahre). Frequenzanalyse nach Log-Gumbel.

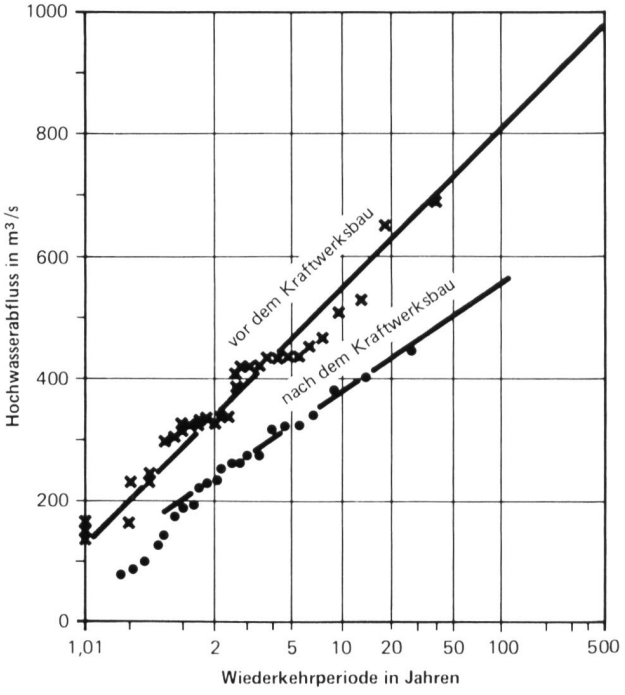

Bild 2. Hinterrhein bei Andeer.
Messperioden: vor dem Kraftwerkbau 1922–1959, nach dem Kraftwerkbau 1960–1985. Frequenzanalyse nach Gumbel.

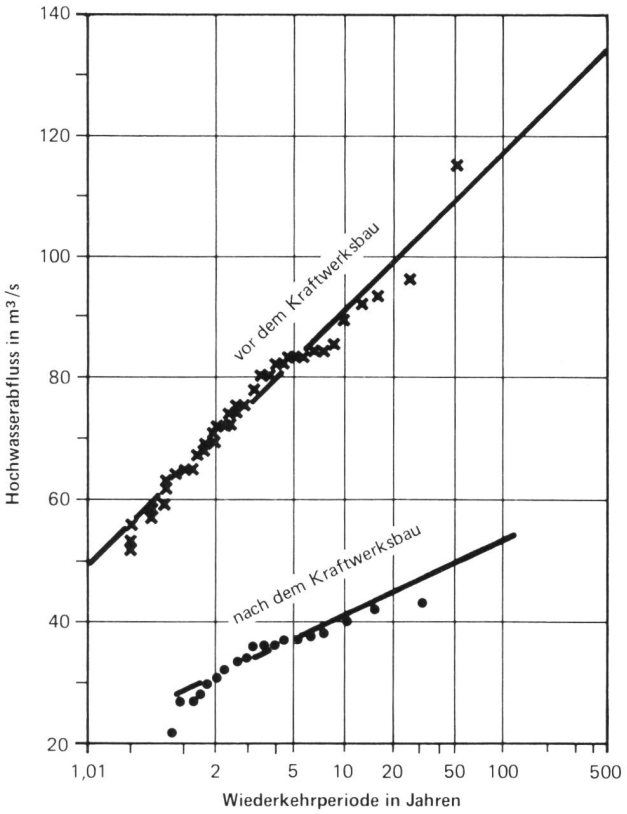

Bild 3. Drance de Bagnes bei Le Châble-Villette.

Messperioden: vor dem Kraftwerkbau 1909–1956, nach dem Kraftwerkbau 1957–1986. Frequenzanalyse nach Gumbel.

Die Hochwasserschutzwirkung ist von der *Speicherbewirtschaftung* abhängig. Wird diese entscheidend geändert (Änderung der Nutzung, höherer Ausbaugrad usw.), so wird dadurch die Auftretenswahrscheinlichkeit extremer Hochwasser mitbeeinflusst und damit auch die Schutzwirkung betroffen.

Raumplanerisch ist aus der Sicht der Sicherheit die Wirkung der Speicher sehr positiv. Sie erlaubt in manchen Fällen, die Einschränkungen hinsichtlich der Gefahrengebiete zu lockern. Es ist aber darauf zu achten, dass das Gefahrenrestrisiko bei der Gefahrenzonenplanung nicht zu klein angenommen wird. Einerseits ist dem Kraftwerk unbedingt genügend betrieblicher Spielraum zu belassen, und andererseits ist zu beachten, dass schadenbringende Hochwasser auch in Zukunft auftreten werden, allerdings mit dem Unterschied einer gegenüber früher geringeren Auftretenswahrscheinlichkeit. Es kann unter diesen Umständen unklug sein, potentielle Schadengebiete einer höhergradigen Nutzung zur Verfügung zu stellen.

Für die *Beurteilung von Hochwasser-Schadenereignissen* und für die Analyse der Schadensursachen ist es oft notwendig, die *Jährlichkeit* des Hochwasserereignisses anzugeben. Dies verlangt, dass die beobachteten Abflüsse in möglichst weit zurückreichende Messreihen eingeordnet werden. Wegen des Einflusses der Speicher sind diese Messdaten «verfälscht» und müssen, um sie einordnen zu können, korrigiert werden (die Daten gehören einer andern Grundgesamtheit an). Dies benötigt unter Umständen einen erheblichen Analysenaufwand und ist zudem eine heikle Arbeit.

Die massive Hochwasserretention hat auch Auswirkungen auf die *Gerinnemorphologie*. Ein vom Abfluss nur noch schwach genutztes Gerinne ändert sich. Die Vegetation lässt sich auf wasserfreien Uferpartien und Geschiebebänken nieder. Das Gerinne «wächst ein». Kommt dann doch eines der nun seltenen Hochwasser, wird diese Vegetation weggeräumt (grosser Geschwemmselanfall) oder, falls die

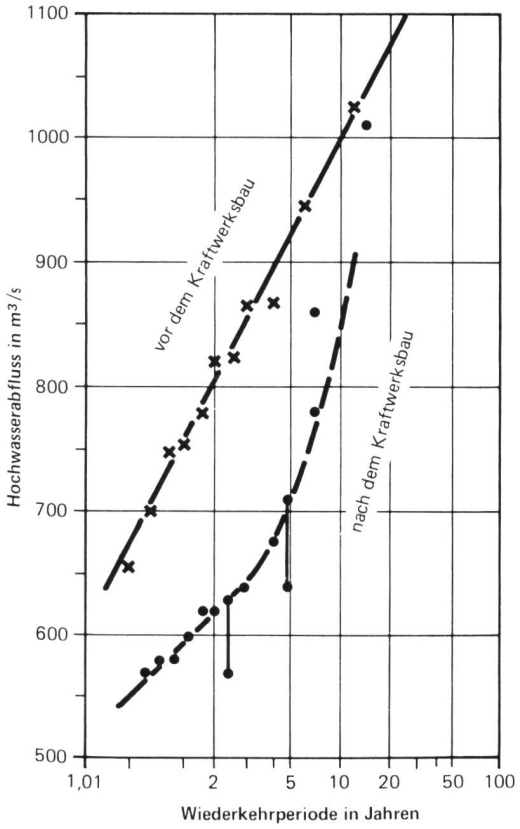

Bild 4, links. Rhône bei Port de Scex.

Messperiode vor dem Kraftwerkbau 1914–1924, nach dem Kraftwerkbau 1975–1987. Frequenzanalyse nach Gumbel (technische Daten siehe Tabelle 1).

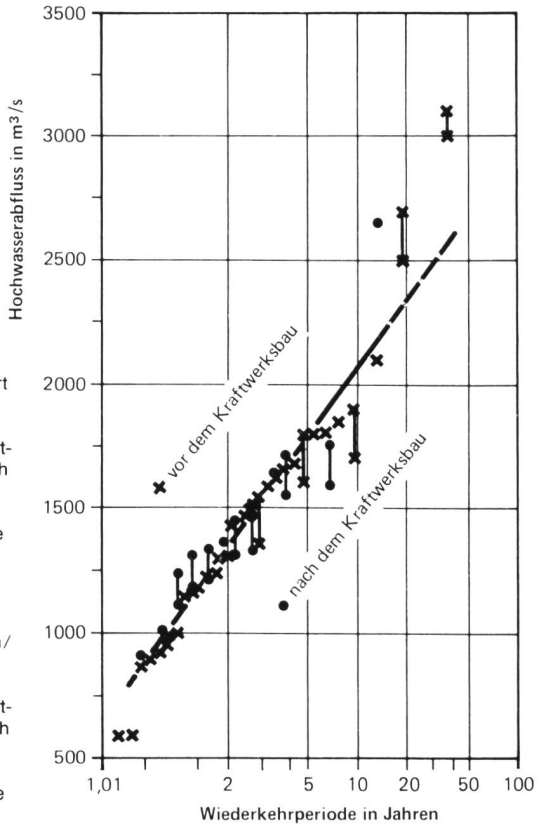

Bild 5, rechts. Rhein bei Schmitter/St. Margrethen/Diepoldsau.

Messperiode vor dem Kraftwerkbau 1919–1954, nach dem Kraftwerkbau 1976–1987. Frequenzanalyse nach Gumbel (technische Daten siehe Tabelle 1).

Vegetation genügend widerstandsfähig ist, entsteht wegen ungenügenden freien Durchflussquerschnitts eine höhere Wasserspiegellage. Solche Gerinne verlangen einen periodischen pfleglichen Unterhalt und dürfen keinesfalls verwildern.

Die *Geschiebeverhältnisse* sind ebenfalls zu beachten. Unterhalb des Speichers entsteht je nach Geschieberückhalt auf eine gewisse Gerinnestrecke das bekannte Geschiebemanko mit mehr oder weniger ausgeprägten Erosionserscheinungen. Weiter beliefern die verschiedenen Seitenzubringer, welche an sich unbeeinflusst sind, das Hauptgerinne in unveränderter Weise mit Geschiebe. In deren Einmündungsbereich entsteht dadurch eine vorübergehende oder auch bleibende Geschiebeakkumulation. Auf alle Fälle ändert sich das Geschieberegime. Allfällige negative Auswirkungen können unter Umständen erst nach Jahrzehnten spürbar werden, wie vermehrte Uferschäden, Hebung der Sohle in Flachstrecken, seltene, aber dafür konzentrierte Geschiebeschübe in den Vorfluter.

Es würde zu weit führen, auch Belange des Grundwassers, der Ökologie usw. zu streifen, weshalb darauf verzichtet wird.

Die positive Wirkung der Kraftwerkspeicher für die Verminderung der Hochwasserspitzen und damit der Hochwassergefahr ist offensichtlich und sehr zu begrüssen. Ein unter Umständen massiver Eingriff in die bisherigen naturgegebenen Gerinne- und Umgebungsverhältnisse ist aber in Kauf zu nehmen. Dem grossen Nutzen stehen auch Nachteile gegenüber. Viele dieser Nachteile sind mit geeigneten Gegenmassnahmen korrigierbar, andere dagegen nicht. Bei der Planung von Gebirgsspeichern oder grossen Rückhaltebecken für den Hochwasserschutz ist es wichtig, diese vielschichtigen Probleme sorgfältig zu prüfen, um gute und verantwortbare Lösungen zu gewährleisten.

Literatur

[1] *R. Bischof* und *J. Vichr* (1987): Die Hochwasserkatastrophe im Bergell fand nicht statt. «wasser, energie, luft» 11/12, S. 307/8.

[2] *E. Walser* und *E. Zanker* (1957): Niederschlags- und Abflussverhältnisse im Einzugsgebiet der Aare unter besonderer Berücksichtigung des Einflusses der Speicherbecken. «Wasser- und Energiewirtschaft» 7/9, 12 S.

[3] *A. Bezinge* (1985): Débits d'étiage d'hiver – production hydro-électrique et environnement. «wasser, energie, luft – eau, énergie, air» 1/2, S. 33– 40.

Adresse des Verfassers: *Jürg Zeller*, dipl. Bauing. ETH, Im Hubäcker 10, CH-8967 Widen.

Widerstandserniedrigung durch Reibungselemente

Albert Gyr

Einleitung

Strömungen von Flüssigkeiten und Gasen, die durch Wände begrenzt sind, werden durch diese gebremst. Dieser Widerstand ist um so kleiner, je glatter die Wand und je geringer die Zähigkeit des Fluids. Wird diese allgemeine Gesetzmässigkeit verletzt, so sprechen wir von einem Widerstandserniedrigungs-Effekt.

Seit Jahren ist bekannt, dass Zugaben von Kleinstmengen (ca. 20 ppm) von linearen Polymermolekülen Widerstandserniedrigungen in turbulenten Strömungen hervorrufen. Solche «Lösungen» von Molekülen mit sehr hohem Molekulargewicht weisen einen gegenüber dem Lösungsmittel bis zu 70% reduzierten Strömungswiderstand auf. Das Erstaunliche an diesem Effekt ist, dass der Strömungswiderstand erniedrigt wird, obschon die Zähigkeit der Flüssigkeit schwach zunimmt. Dies bedeutet, die zugegebenen Moleküle müssen in gezielter Art und Weise die Strömung so verändern, dass die gleiche Flüssigkeitsmenge mit kleinerem Energieaufwand bewegt werden kann. Dies ist möglich, sofern die Energie auf jene Wirbel umverteilt wird, die weniger Energie dissipieren. Diesen Prozess erklärt man sich durch lokale Rheologieänderungen. Die rheologischen Eigenschaften der Flüssigkeiten verändern sich, weil die Moleküle in der Strömung lokal gedehnt werden. In solchen Flüssigkeiten werden die kleineren Wirbelstrukturen zugunsten grösserer unterdrückt, was die Widerstandserniedrigung erklären könnte.

Aus Kostengründen beschränkt sich der Einsatz solcher Polymerzugaben vorläufig fast ausschliesslich auf Anwendungen der Ölindustrie. Es darf deshalb als Glücksfall betrachtet werden, dass es gelang, Widerstandserniedrigungen auch ohne Zugaben, einzig durch Modifizierung der Wände resp. deren Eigenschaften, zu erreichen. Dies ist auch der Grund, weshalb die Forschung in den letzten Jahren sich besonders diesen Phänomenen zuwandte. Das Interesse gilt dabei vor allem zwei Methoden:

1. Der Beeinflussung der wandnächsten Strömung durch sogenannte «Riblets», d.h. Rillen, die an den Wänden angebracht werden.
2. Der Beeinflussung der wandfernen Strömungsbereiche durch sogenannte Large-Eddy Breakup Devices (Lebus), dies sind von der Wand abstehende Profilelemente.

In diesen beiden Fällen liegt eine «Rauhigkeits-Anomalie» vor, da jede Abweichung von der glatten Wand vorerst einmal eine Widerstandserhöhung erzeugen müsste. Beide Effekte lassen sich nur im Rahmen einer verbesserten Turbulenztheorie erklären.

Strukturvorstellung

Die stationäre turbulente Strömung wurde als ein Zustand aufgefasst, dessen Geschwindigkeitsfeld eine mittlere Strömungsgeschwindigkeit besitzt, der Schwankungen überlagert sind. Diese Vorstellung führte zu einer statistischen Beschreibung der Turbulenz. In den letzten Jahren setzte sich aber die Erkenntnis durch, dass die turbulenten Strömungen bedeutend geordneter sind. Diese neuen Vorstellungen stützten sich auf Strömungsbilder, die aufzeigen, dass die turbulente Strömung Bewegungsabläufe enthält, die repetitiv auftreten und untereinander ähnlich sind. Diese typischen Bewegungsformen werden deshalb auch als kohärente Strukturen bezeichnet. In den meisten Fällen handelt es sich um Wirbel.

Eine einheitliche Beschreibung der turbulenten Strömungen in Form koexistierender und in Wechselwirkung miteinander stehender Strukturen liegt noch nicht vor, einzig über die Anordnung dieser Strukturen besteht eine allgemein anerkannte Vorstellung. Im Fall der wandbeschränkten turbulenten Strömungen wird davon ausgegangen, dass drei Strukturklassen vorliegen: einerseits sehr wandnahe Strukturen und andererseits solche, die der äusseren Strömung angehören. Einer dritten Strukturklasse wird die Wechselwirkung der beiden erstgenannten zugewiesen. Diese Strömungsstrukturen sind in Bild 1 schematisch dargestellt.

Die wandnahen Strukturen sind langgezogene Wirbelschleifen, deren Seitenarme in Strömungsrichtung ausgerichtet sind. Ihr Erscheinungsbild entspricht dementspre-