

Kolkentwicklung beim Limmatwehr Dietikon : Ursachenforschung der Hochwasserschäden im Frühjahr 1999 mittels hydraulischer Modellversuche

Autor(en): **Lais, Adriano / Volkart, Peter**

Objektyp: **Article**

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

Band (Jahr): **96 (2004)**

Heft 3-4

PDF erstellt am: **12.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-939556>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Kolkentwicklung beim Limmatwehr Dietikon

Ursachenforschung der Hochwasserschäden im Frühjahr 1999 mittels hydraulischer Modellversuche

■ Adriano Lais, Peter Volkart

1. Einleitung

1.1 150 Jahre Wasserkraftnutzung an der Limmat bei Dietikon

Im Jahr 1857 wurde in Dietikon mit dem Bau eines Wuhrs, eines Kanals sowie eines mechanischen Wasserkraftwerks für den Betrieb einer Baumwollweberei begonnen. Die Limmat verzweigte sich damals noch in vielen Schleifen. Die durch die Limmatkorrekturen bedingten wesentlich veränderten Abflussverhältnisse, aber auch die Inbetriebnahme eines kleinen Gleichstromgenerators erforderten ein Wehr, das in den Jahren 1889 bis 1893 erbaut wurde und die Limmat bei Dietikon bis zum erneuten Umbau des Werks im Jahr 1932 staute (Bild 1).

Das Ausleitwasserkraftwerk wurde im Oktober 1908 von den damals neu gegründeten Elektrizitätswerken des Kantons Zürich EKZ übernommen, die noch heute Konzessionsinhaber sind.

Heute nutzt das KW Dietikon das Limmatwasser über ein Bruttogefälle von 2,8 bis 4,5 m. Die Ausbauwassermenge beträgt 100 m³/s. Bei einer installierten Leistung

Zusammenfassung

Der vorliegende Artikel behandelt die Gefährdung des Ausleitkraftwerk-Dispositivs in Dietikon durch das Hochwasser im Frühjahr 1999. Das Hochwasser löste Erosionsprozesse aus und führte zu Schäden an Bauwerken. Wegen Unterspülungen rutschten Uferböschungen nach, die im Rahmen von Sofortmassnahmen stabilisiert werden mussten. Eine dauerhafte Sanierung, deren Ausführung im Frühjahr 2003 stattfand, wurde im hydraulischen Modell an der VAW optimiert. Diese Modelluntersuchungen haben insbesondere den Überlastfall berücksichtigt, sodass interessante Erkenntnisse über die Schadensprozesse gewonnen und Lehren daraus gezogen werden können.

von 2,9 MW werden jährlich 20 GWh elektrische Energie produziert, die in etwa gerade die Übertragungsverluste im Netz der EKZ decken.

1.2 Stauwehr, Wehrbedienung und Hochwasserregulierungskonzept

Die vier Wehröffnungen mit einer lichten Weite von je 14 m sind mit zweiteiligen Schützen verschliessbar (Bild 3). Zur Bedienung der Ober- und Unterschützen ist ein kombiniertes Windwerk installiert, das nach vollständigem Absenken der Oberschütze das gleichzeitige Heben von Ober- und Unterschütze gestattet. Die Oberschützen regulieren in überströmter Stellung den Stau und können bis zu einer abgespulten Kettenlänge von 160 cm abgesenkt werden, was einer Überfallmenge von 215 m³/s für das ganze Wehr entspricht. Bei grösserer Wassermenge werden die abgesenkten Ober- mit den Unterschützen zusammen hochgezogen, wobei sie unter- und überströmt werden. Ab einer abgespulten Kettenlänge von 320 cm werden die Schützen bis zu einem Abfluss von 400 m³/s unterströmt. Bei noch grösseren Abflüssen werden die Schützen vollständig gezogen und der Wehrdurchfluss erfolgt frei.

Bei Hochwasser sollen grundsätzlich jeweils alle vier Schützen um den gleichen

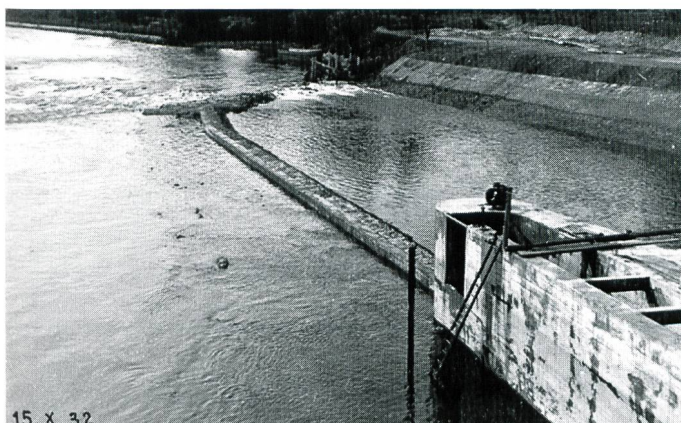


Bild 1. Oben links: Das in den Jahren 1889 bis 1893 erstellte, v-förmige Klappenwehr mit hochgezogenen Klappen und gesetzten Nadeln in der mittig angeordneten Flossgasse vom Unterwasser her betrachtet. Oben rechts: Sprengung des linken Flügels der Grundschwelle im Jahr 1932. Das gesprengte Material und der ehemalige Blocksatz formieren eine Schwelle. Links: Abbruch des Einlaufbauwerks zum Oberwasserkanal. Im Vordergrund auf der rechten Bildseite ist der neue Wehrsporn mit der Fischtreppe zu erkennen. An der Stelle des alten Grundwehrs sind die Blöcke des ehemaligen Blocksatzes unter Bildung einer Schwelle zurückgeblieben (Bildquelle: EKZ).

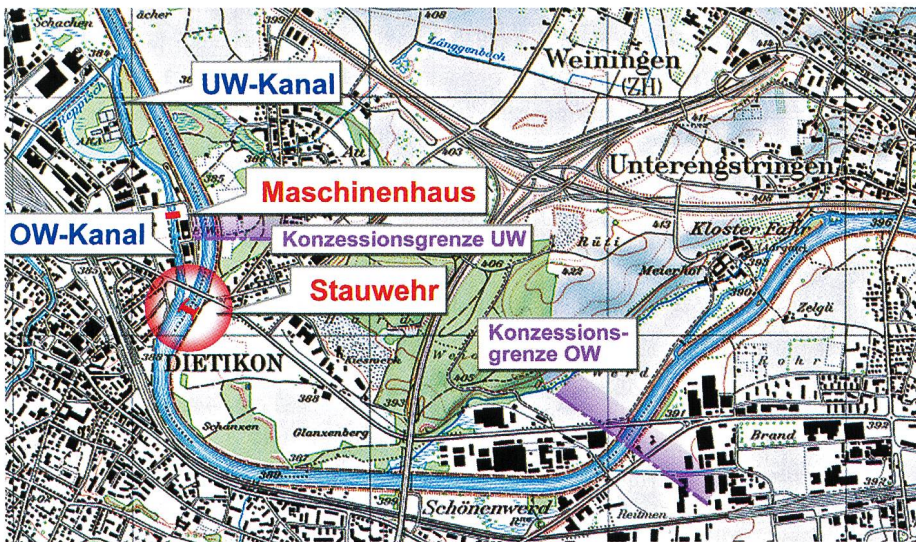


Bild 2. KW Dietikon mit Stauwehr, OW-Kanal, Maschinenhaus und UW-Kanal.
Die konzessionierte Limmatstrecke weist eine Länge von 2,78 km auf. Kartendaten: PK25 © 2000 Bundesamt für Landestopografie (DV1366.2).

Betrag überströmt werden. Der Stauspiegel wird bis zu einem Limmatablfluss von $370 \text{ m}^3/\text{s}$ konstant auf einer Kote von 385,30 m ü.M. einreguliert. Bei Überschreiten dieses Abflusses soll eine Absenkung auf 385,0 m ü.M. erfolgen. Zwischen 400 und $450 \text{ m}^3/\text{s}$ muss durch vollständiges Öffnen des Wehrs der Oberwasserspiegel auf 384,5 m ü.M. abgesenkt werden.

1.3 Hydrologie

Abflussmessstationen mit längeren Messperioden befinden sich an der Limmat in Zürich Unterhard (Abflussmessungen seit 1906) sowie in Baden (Abflussmessungen seit

1951). Da keine nennenswerten seitlichen Zuflüsse zwischen Zürich Unterhard und dem Wehr Dietikon zu verzeichnen sind, können die bei dieser Station gemessenen Abflüsse auch als repräsentativ für die Limmat bei Dietikon betrachtet werden. Das 100-jährliche Hochwasser beim Stauwehr Dietikon beträgt nach neuester statistischer Auswertung $640 \text{ m}^3/\text{s}$ und liegt damit $60 \text{ m}^3/\text{s}$ höher als vor der Hochwasserperiode im Jahr 1999.

Nach einer längeren Periode starker Niederschläge traten im Juni 1953 und Mai 1999 zwei Jahrhundert-Hochwasserereignisse auf (Bild 4). Die Limmat trat über die Ufer und überschwemmte das Vorland.

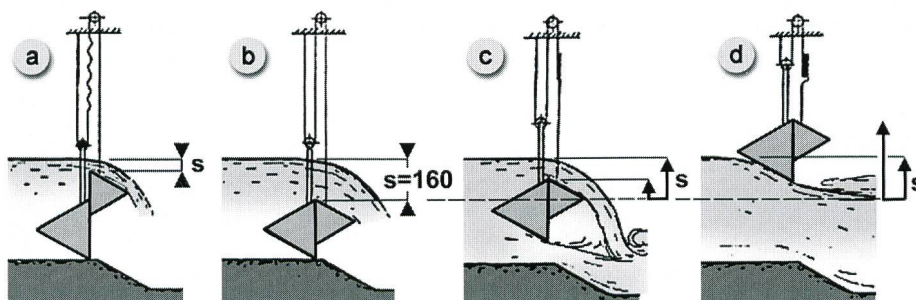


Bild 3. Typische Schützenstellungen s. a: Überströmen, b: maximales Überströmen bei einer abgespulten Kettenlänge von $s = 160 \text{ cm}$, c: kombiniertes Über- und Unterströmen für $160 < s < 320 \text{ cm}$ und d: Unterströmen. Ab $s = \text{ca. } 400 \text{ cm}$ herrscht freier Wehrdurchfluss.

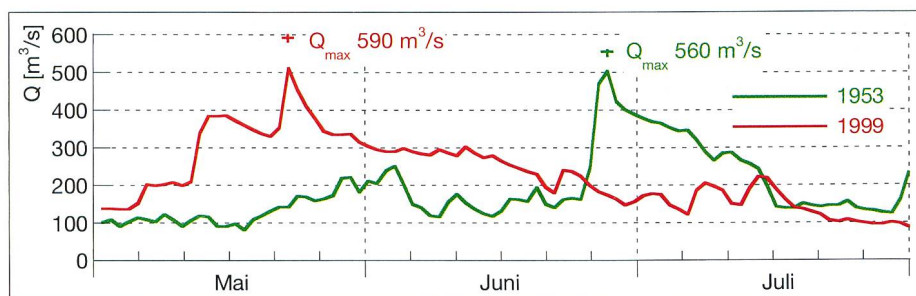


Bild 4. Tagesmittelganglinie der Limmat bei der Messstation Zürich Unterhard für die Hochwasserereignisse von 1953 und 1999.

2. Hochwasserschäden und deren Sanierung

Anlässlich der Zustandsermittlung der Wehranlage im Jahr 1993 wurden auch Inspektionen unter Wasser vorgenommen. Dabei stellte man im Ober- und im Unterwasser mehrere lokale Kolkbildungen fest, die zum Teil schon sehr tief waren und Gegenmassnahmen erforderten. In zwei Etappen (1994/95) füllte man die grösseren Kolke im Flussbett mit Granit-Flusssteinen auf und ergänzte an den Uferböschungen den Blockwurf (Bild 6).

Im Herbst 1998 wurden Ausspülungen des Blockwurfs im Bereich der Wehrschwelle im Oberwasser, starke Kolkbildung unterhalb Wehröffnungen 1 und 2 sowie im Bereich der Strassenbrücke und massive Unterspülungen der Uferschutzplatten sowie fehlender bzw. abgesackter Blockwurf am linken Ufer im Unterwasser festgestellt. Die 1995 noch völlig intakte Uferböschung war in diesem Bereich akut einsturzgefährdet. Die Unterspülungen wurden hinterfüllt und mit injizierten Gewebesäcken abgeschalt.

Die grossen Hochwasser im Mai 1999 verursachten weitere Kolke, ein Nachrutschen grösserer Teile des bereits eingebrachten Blockwurfs und Uferunterspülungen, sodass im Oberwasserkanal und im Unterwasser die Uferböschungen instabil zu werden drohten. Am linken Ufer im Unterwasser des Wehrs war ein grösserer Abschnitt der Böschungssicherung komplett unterspült. Die bestehende Spundwand hatte sich horizontal bis zu 0,8 m verformt und hing praktisch frei (Bild 5). In diesem Bereich tiefte sich das Flussbett bezüglich der ursprünglichen Sohlenlage im Jahr 1932 um 8 m ab. Umfangreiche Sofortmassnahmen waren zur Sanierung der Schäden erforderlich (Bild 6).

3. Hydraulisches Modell

Das Modell im Massstab 1:40 umfasst beim Wehr Dietikon den Abschnitt, der von der Rechtskurve der Limmat 290 m oberstrom der Wehranlage bis in die Linkskurve 187 m unterstrom reicht (Bild 2). Zur Gewährleistung einer korrekten Anströmung im Oberwasser ist auf dem ersten Modellabschnitt die Flusssohle in der Rechtskurve – und damit der Talweg des natürlichen Kurvenkolks – fest nachgebildet. Anschliessend wird, mit Ausnahme des ebenfalls befestigt ausgeführten Oberwasserkanals, für die Kolkversuche eine bewegliche Flusssohle vorgesehen (Bild 7). Bei der Nachbildung des Flussgrundmaterials wurden leichte Anpassungen in der Kornverteilungskurve bei den feinen Fraktionen vorgenommen, um Massstabeffekte zu mindern.

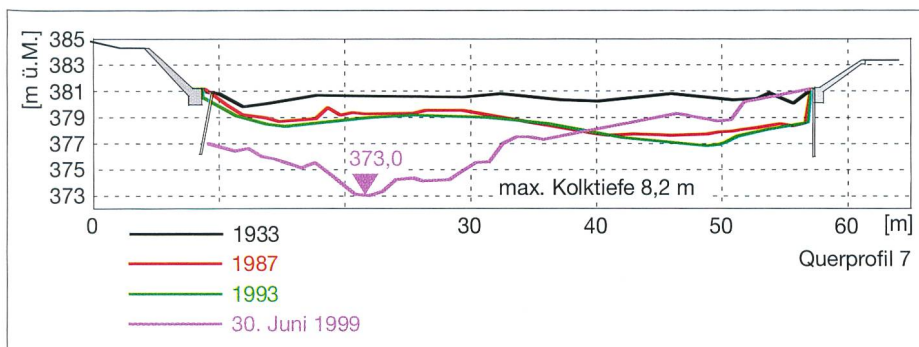


Bild 5. Kolkaufnahmen unterhalb des Stauwehrs in den Jahren 1933, 1987, 1993 und 1999 (Lage des Querprofils 7 siehe Bild 6).

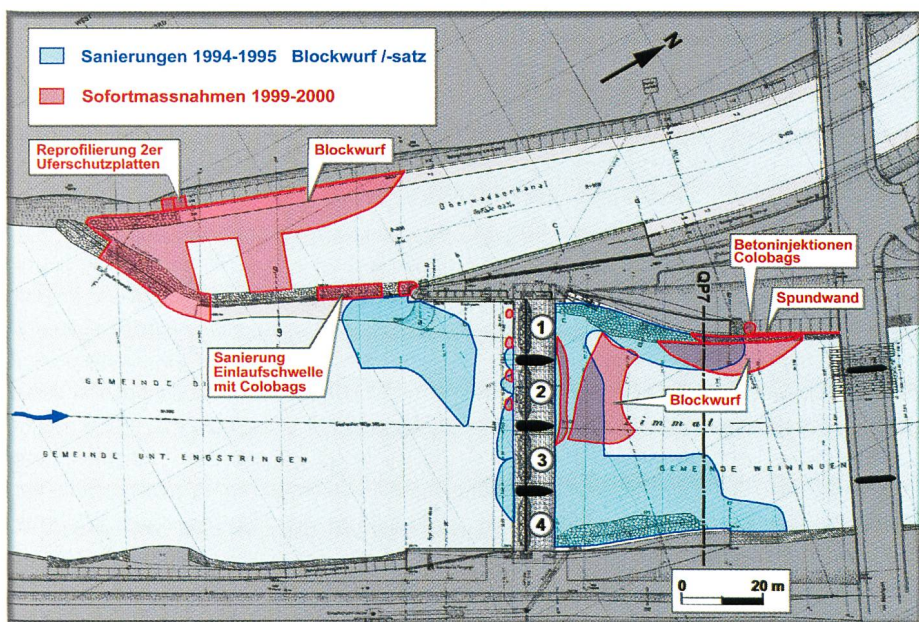


Bild 6. Sanierungen 1995 und Sofortmassnahmen nach dem Hochwasser im Jahr 1999 bei der Wehranlage Dietikon.

4. Experimentelle Kolkuntersuchung

4.1 Erosionsprozesse im Oberwasser der Wehranlage

Das Modell im Ausgangszustand wird nach der Vorversuchsphase, die hauptsächlich auf die Aussortierung des Flussgrundmaterials und damit auf die Bildung der natürlichen Deckschicht abzielte, mit dem grössten Tagesmittel der Hochwasserperiode 1999 von 520 m³/s so lange belastet, bis nach der Bildung von lokalen Kolken und Ablagerungen kein Geschiebe mehr verfrachtet wird und sich nahezu der Gleichgewichtszustand herausgebildet hat. Wie dem Bild 8 zu entnehmen ist, erfolgte der Sohlenangriff bei der Einlaufschwelle, entlang der Uferböschung und beim Wehrsporn. Der Kolk beim Wehrsporn ist in Natur anno 1995 anlässlich der Sanierung mit Bollensteinen aufgefüllt worden (Bild 6). Der Versuch widerspiegelt also die Situation wie sie in Natur angetroffen wurde. Hingegen haben sich die sehr tiefen und grossen Kolke bei der Einlaufschwelle und entlang dem linken Ufer in Natur nicht eingestellt, so-

dass das Modell die Situation vorerst unbefriedigend wiedergab. Wie die Kolkentwicklung und die Analyse zeigt, kann diese Abweichung zur Sohlentopografie in Natur nicht durch die längere Belastungsdauer im Modell erklärt werden (Versuchsdauer umgerechnet auf Natur: 5 Tage). Es stellte sich für die VAW heraus, dass vielmehr die Überreste der alten Wehranlage die Verhältnisse im Oberwasser beeinflussen. Bis zum Umbau des KW Dietikon in den heutigen Zustand anno 1932 befand sich auf der Höhe der Einlaufschwelle ein v-förmiges Klappenwehr (Bild 1). Es musste zuerst evaluiert werden, was von dieser alten Anlage heute noch vorhanden ist, denn bis dato lagen weder die alten Fotos von Bild 1 noch Pläne der alten Wehranlage vor. Erst die Modellversuche lösten die Suche nach einer vollständigen Dokumentation der Flusstopografie aus.

Die Überreste der alten Anlage konnten durch Unterwasserinspektionen im Dezember 2001 kartiert werden. Vom linken Flügel der alten V-Schwelle ragen 62 Holzpfähle mit einem Durchmesser von 30 cm zwischen Beton- und Steinblöcken 40 bis 80 cm hervor

(Bild 9). Der rechte Flügel der Grundschwelle ist durch Ablagerungen überdeckt. Vom ehemaligen Einlaufbauwerk ist das Sturzbett aus Beton erhalten. Zudem ist im Oberwasserkanal eine weitere Betonplatte mit einer Länge von 12 m vorhanden.

Die Überlagerung der konturierten Darstellung der Sohlenlage mit dem Situationsplan des alten Klappenwehrs, von dem wir nun über die Lage und Art der Überreste in Kenntnis gesetzt sind, enthüllt, dass die beiden tiefen Kolke im Modell in Bereichen entstanden sind, wo in Natur die Sohle entweder durch Blockwurf oder durch Betonplatten befestigt ist (Bild 10).

Für die Versuchsreihe, deren Ziel die Reproduktion der Sohlenlage nach dem Hochwasser 1999 ist, wurden die alte fragmentarische Wehranlage und die Kolk sicherungsmassnahmen der Sanierung 1995 eingebaut. Die hydraulische Belastung wurde schrittweise erhöht, bis schliesslich im Versuch OW 8 das grösste Tagesmittel der Hochwasserperiode 1999 von 520 m³/s abfloss. Die nach dem Versuch vermessene Sohle bildet jene in der Natur affin nach, sodass die Reproduktion zufrieden stellend gelang (Bild 11). Insbesondere veranschaulicht das modifizierte Modell die hemmende Wirkung der Grundschwelle auf die Tiefenerosion. Das bei der Sprengung des alten Wehrs sehr grobkörnig angefallene Material und der Blocksatz des ehemaligen Kolkschutzes bilden eine stabile Schwelle (Bild 1), die die Sohlenlage der Limmat ausgangs der Rechtskurve punktuell fixiert. Andererseits bewahren die zwei Betonplatten des Sturzbetts des ehemaligen Einlaufbauwerks vor weitaus grösseren Schäden am linksufrigen Damm des Oberwasserkanals und an der Einlaufschwelle. Der Sohlenangriff erfolgt lediglich zwischen den Betonplatten, die allerdings lokal unterspült wurden und nun unter Einwirkung des Eigengewichts zu brechen drohen. Die grossflächige Erosionserscheinung beim Wehrsporn wurde im Rahmen der Sanierungsarbeiten Mitte der 90er-Jahre mit Bollensteinen verfüllt und mit Flussstein-Granit flächendeckend abgepflastert (Bild 6). Diese Kolk sanierung hielt der hydromechanischen Belastung während der Hochwasserperiode 1999 stand und erfüllt also die Sohl sicherungsfunktion.

Kritisch hinsichtlich gefährdender Erosionsprozesse sind im Oberwasser Abflussverhältnisse bei vollständig geöffnetem Wehr, da grössere Strömungskräfte auf die Sohle einwirken als bei gestautem Abfluss. Der im Talweg in der Rechtskurven-Aussen seite vor der Wehranlage Dietikon konzentrierte Limmatabfloss strömt auf den Oberwasserkanal zu und wird bei eingestelltem Kraftwerksbetrieb während Hochwasserer-

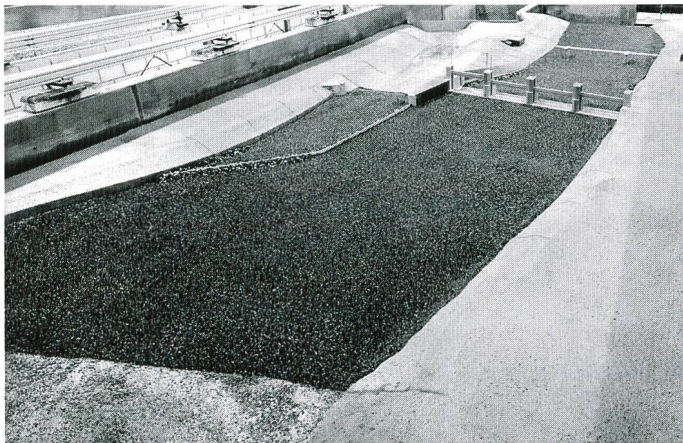


Bild 7. Blick auf das hydraulische Modell der VAW mit beweglicher Sohle. Die eingebauten Blockwürfe entlang der Einlaufschwelle und der links- und rechtsufrigen Böschung im Unterwasser des Wehrs repräsentieren den Zustand nach der Errichtung der Anlage im Jahr 1933.



Bild 8. Blick auf die tiefen Kolke bei der Einlaufschwelle, entlang der linken Uferböschung und beim Wehrsporn nach Inbetriebnahme des Modells. Diese Kolklöcher haben sich in Natur – mit Ausnahme des Kolks beim Wehrsporn – nicht gebildet. Mit dem anfänglich gewählten Modell-Dispositiv kann die Sohlenlage in Natur nicht nachgebildet werden.

eignissen zum Wehr hin gelenkt (Bild 12). Aufgrund der sehr grossen Geschwindigkeitsgradienten bildet sich dadurch in der Scherzone zum gering fließenden Wasser im Oberwasserkanal und der Hauptströmung eine Wirbelstrasse, die sich schräg über den Oberwasserkanal zur Wehrspornnase hin erstreckt. In dieser Zone wirken die grössten Belastungen auf die Sohle ein, die zu den massiven Materialverfrachtungen zwischen den Betonplatten im Oberwasserkanal, den Uferunterspülungen und den Schäden an der Einlaufschwelle geführt haben.

An der Wehrspornnase reisst der Hauptstrom ab. Die grossflächigen Erosionen früherer Ereignisse sind in diesem Bereich auf die Bildung von Hufeisen- und Tornadowirbel beim Wehrsporn und der Nachlaufwirbel zurückzuführen.



Bild 9. Unterwasseraufnahme der Überreste des linken Flügels des alten v-förmigen Klappenwehrs. Der Pfahl war ein Teil der Lagerung der 1,1 m hohen Stautafeln (vgl. Bild 1). Gut ersichtlich sind die Beton- und Steinblöcke des alten Grundwehrs (Bildquelle: Schwarz Taucherarbeiten AG, Dezember 2001).

Die Tiefenwirkung dieser Kolkprozesse kann also nicht in Zusammenhang mit eindimensionalen Abflussverhältnissen gebracht werden. Für das Aufreissen der natürlichen Deckschicht ($d_{mD} = 11,5 \text{ cm}$) in einem geraden Abschnitt der Limmat bei Dietikon ist zum Beispiel ein Abfluss von $600 \text{ m}^3/\text{s}$ erforderlich (vgl. dazu Bild 4). Vielmehr erhöhen die räumliche Situation und die scharfe Umlenkung der Strömung zum Wehr lokal die Turbulenzproduktion in freien Scherschichten. Dies führt zu Belastungsspitzen, die formbildende Prozesse auslösen.

4.2 Kolkentwicklung im Unterwasser der Wehranlage

Der Umbau des Kraftwerks Dietikon in den heutigen Zustand erfolgte ab Mitte des Jahres 1932. Vorgängig wurden bereits an der damaligen Versuchsanstalt für Wasser- und Erdbau der ETH Zürich von Oktober bis Dezember 1931 Modellversuche durchgeführt. Zweck dieser Versuche war die Optimierung der Form der Wehrschwelle hinsichtlich der im Unterwasser des Wehrs zu erwartenden Kolk-tiefen. Das Teilmodell des Wehrs im Massstab 1:40 umfasste seinerzeit zwei Pfeiler mit einer ganzen und zwei halben Wehröffnungen (Bild 13). Man ging davon aus, dass zur Regulierung der Staukote alle Schützen jeweils gleichmässig bewegt werden.

Zur Bestimmung der Kornverteilung des Sohlenmaterials wurde vorausgesetzt, dass sich die Limmatsohle bis zum untersuchten Maximalabfluss von $650 \text{ m}^3/\text{s}$ im Beharrungszustand befindet und eine allfällige Kolkbildung somit allein auf das Vorhandensein des Stauwehrs zurückzuführen sei.

Insgesamt wurden sieben Versuchsreihen mit jeweils unterschiedlicher Schwellenform durchgeführt. Es zeigte sich, dass der

Einfluss der Form der Wehrschwelle auf die Kolk-tiefe vergleichsweise gering war. Im Rahmen dieser Untersuchung wurde deshalb für einen bestimmten Lastfall jeweils die grösste ermittelte Kolk-tiefe berücksichtigt. Der tiefste Kolkpunkt mit einer Kote von $378,9 \text{ m}$ ü.M. (Kolk-tiefe $2,30 \text{ m}$) ergab sich für einen Wehr-durchfluss von $300 \text{ m}^3/\text{s}$, gleichmässig verteilt auf alle vier Wehröffnungen. Im Modell wurde auch der Revisionsfall mit nur drei betriebsbereiten Schützen untersucht, wobei sich in diesem Fall kein wesentlich tieferer Kolk ergab ($Q = 400 \text{ m}^3/\text{s}$ durch drei Öffnungen, Kolk-tiefe $2,65 \text{ m}$).

Der Vergleich zwischen der im Modell von 1931 ermittelten Kote des tiefsten Kolkpunkts mit den Sohlenaufnahmen von 1999 legt dar (Bild 5), dass sich in Natur ein dreimal so tiefer Kolk gebildet hat. Die Modellversuche von 1931 können also nicht ohne weiteres für die Erklärung des Kolks in der Natur verwendet werden. Vielmehr ist eine eingehende Betrachtung der massgebenden Randbedingungen, welche die Entwicklung des Kolks bestimmen, notwendig. Im Zuge der Ursachenforschung wurden die Werkrapporte von mehreren Hochwasserereignissen der jüngsten Vergangenheit herangezogen. Die Durchsicht zeigt, dass oft nur eine Schütze in unterströmter Stellung über Tage hinweg in dieser Position belassen wurde, während die drei anderen Schützen den Stau automatisch in überströmter Stellung regulierten (Bild 14). Es ergibt sich dadurch ein grösserer Durchfluss durch eine Wehröffnung als bei einer gleichmässigen Verteilung des Abflusses auf alle Wehrfelder. Der grössere spezifische Durchfluss, für den das kurze Tosbecken in der Projektierung anno 1931 nicht ausgelegt wurde, führte letztlich zu einer deutlich grösseren Erosion!

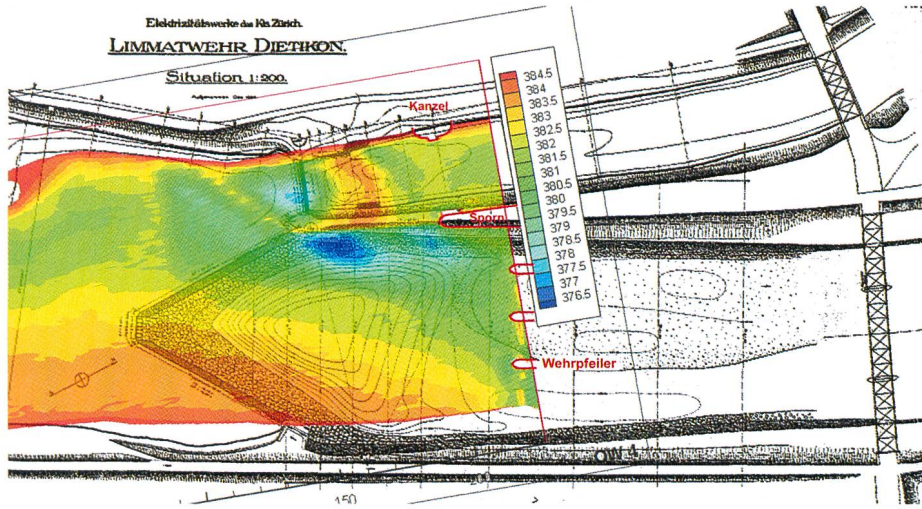


Bild 10. Überlagerung des Konturplots der Sohlenlage nach Inbetriebnahme des Modells (vgl. Bild 8) mit dem Situationsplan des alten Klappenwehrs. Die Kolke bildeten sich im Modell dort, wo in Natur Fragmente des alten Klappenwehrs und des Einlaufbauwerks liegen.

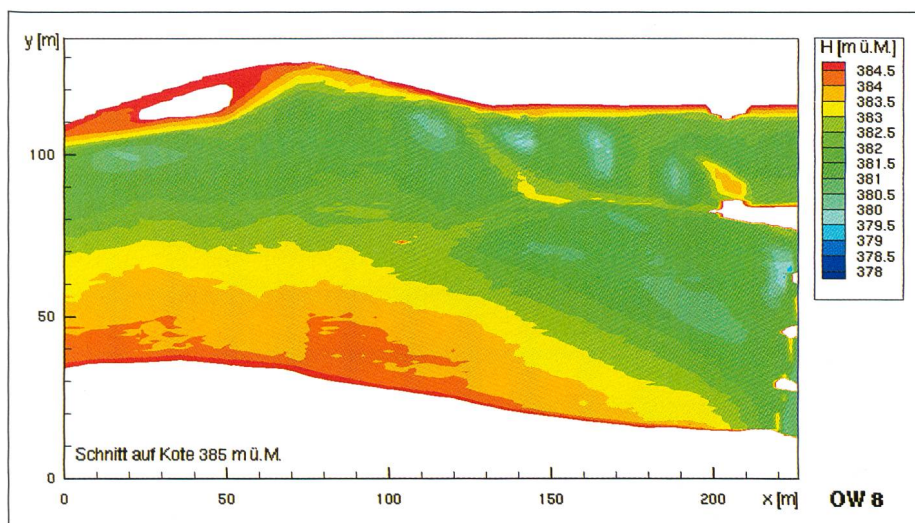


Bild 11. Konturplot der Limmatsohle nach dem Hochwasser 1999. Besonders beschädigt war auf einer Länge von 60 m das linke Ufer im Oberwasserkanal, wo der Blockwurf am Böschungsfuss abgerutscht und die darüber liegenden Uferschutzplatten teilweise zerstört waren. In diesem Bereich war die Böschung akut einsturzgefährdet (vgl. Bild 6).

Als Ausgangszustand für die Reproduktion der Sohlenlage nach dem Hochwasser 1999 wird die nach der Instandstellung im Juli 1995 vermessene Sohle im hydraulischen Modell eingebaut. Zur Evaluation der massgebenden Lastfälle werden die Werkrapporte des KW Dietikon in der Zeitperiode von 1996 bis 1999 nach Wehrstellungen gesichtet, bei denen die Hochwasser führende Limmat konzentriert durch ein oder zwei Wehrfelder abgeleitet wurde (die Suche wird auf Tage eingeschränkt, wo die Limmat mehr als 200 m³/s abführte). Dies war an Tagen im Juli 1996 und 1997, September 1998 sowie während des Hochwassers 1999 der Fall.

Exemplarisch wird der Kolkvorgang vom 26. bis 29. Mai und 4. bis 13. Juni 1999 während der abklingenden Hochwasserwelle (vgl. dazu Bild 4) beschrieben. Nach dem freien Wehrdurchfluss während Pfingsten (22.–25. Mai) wurde das Limmatwasser konzentriert durch die beiden mittleren Wehrfelder abgeleitet (Bild 15, links oben). Die Schützen der seitlichen Wehrfelder waren angehoben und nur leicht überströmt. Bedingt durch den im Vergleich zu den Schützenstellungen relativ tiefen Unterwasserstand setzte der Erosionsprozess ein und der Kolk wurde in der Gerinneachse 6,9 m tief.

Der Unterwasserstand beeinflusst also als eine wesentliche hydraulische Grösse die Form des Ausflusstahls und damit die Tiefenwirkung des Kolkprozesses im Unterwasser des Wehrs. Gebildet hat sich ein frei nach oben gerichteter Ausflusstahl mit Deckwalze und kurzem welligem Übergang zum strömenden Abfluss (Bild 16, links).

Damit stellte sich die Strahlform ein, mit der z.B. Eggenberger/Müller [1944] systematisch die Kolkbildung bei Unterströmen einer Schütze untersucht haben.

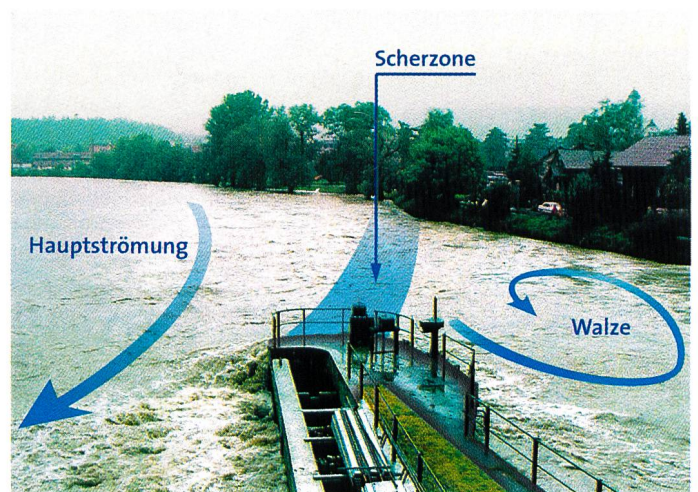


Bild 12. Abflusssituation an Pfingsten 1999, freier Wehrdurchfluss von 520 m³/s. Links: Blick in Strömungsrichtung. In Bildmitte ist die Scherzone schwach zu erkennen. Rechts: Blick flussaufwärts. Aufgrund der starken Wirbelbildung wirken grosse hydromechanische Belastungen auf den Untergrund ein (Bildquelle: Edy Toscano AG).

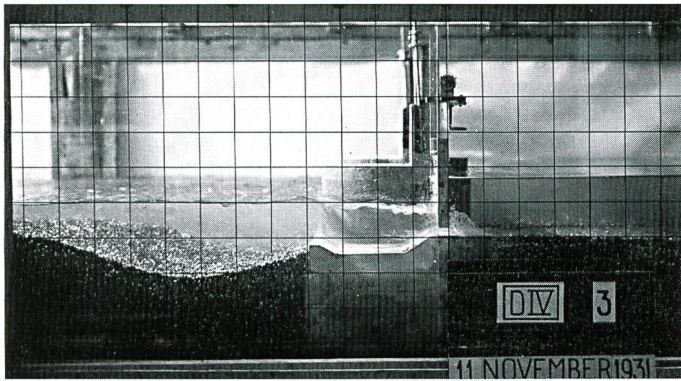


Bild 13. Ansicht des Teilmodells des Wehrs im Massstab 1:40 der VAW-Untersuchung aus dem Jahr 1931. Maximale Kolkentiefe von 2,30 m (378,9 m ü.M.) bei gleichmässig auf alle vier Wehröffnungen verteiltem Wehrdurchfluss von $Q = 300 \text{ m}^3/\text{s}$. Die Schützen werden unterströmt.

Bild 14. Konzentrierter Abfluss durch Wehrfeld 2 am 12. Mai 1999 (Bildquelle: Edy Toscano AG).

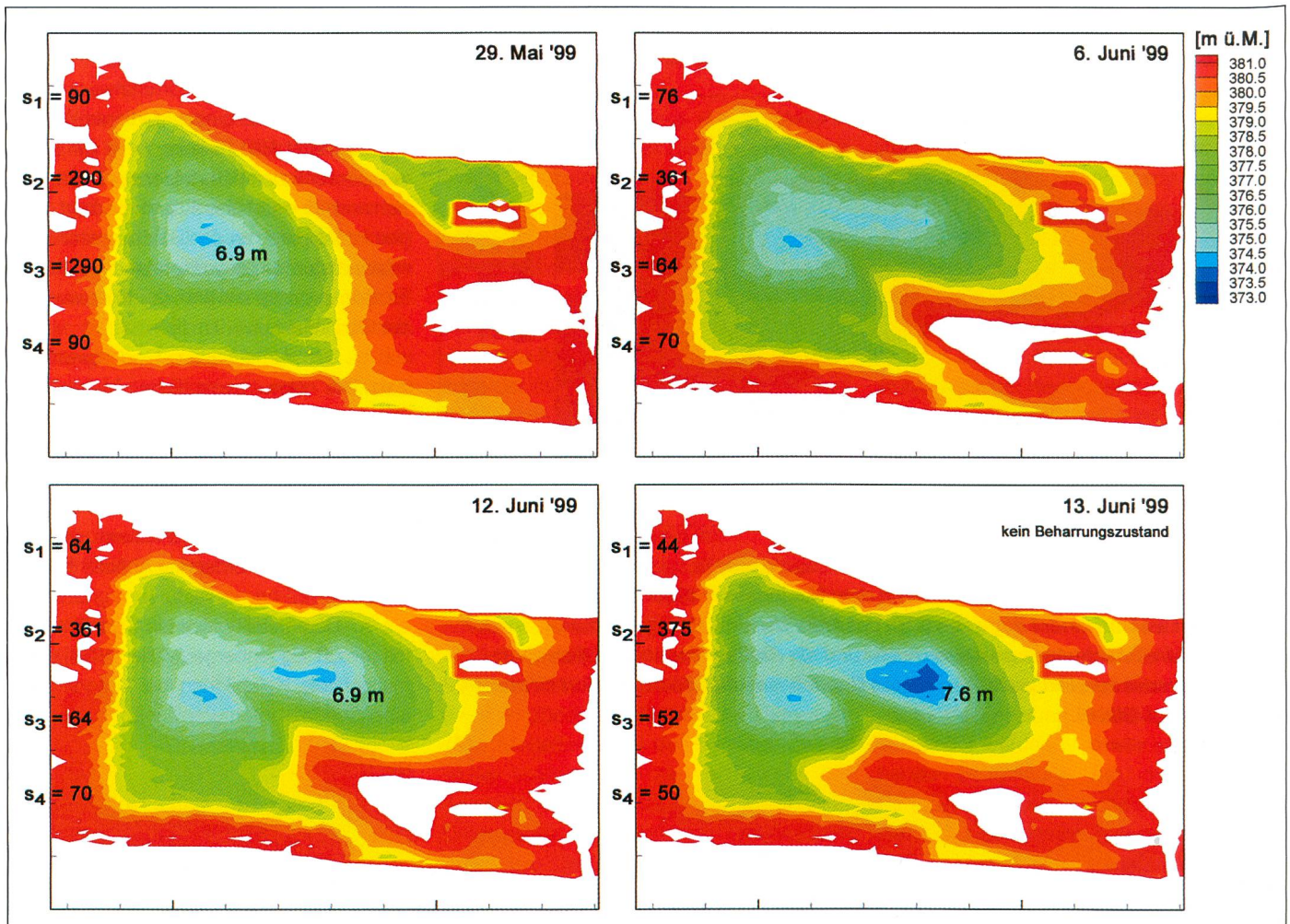


Bild 15. Kolkentwicklung vom 26. Mai bis 13. Juni 1999 infolge asymmetrischen Wehrbetriebs (Schützenstellungen s siehe Bild 3).

Die Situation im Unterwasser des Wehrs am 29. Mai wurde durch intensive Materialverfrachtungen erwirkt und war bereits weit fortgeschritten. Die bis dato durchgeführten systematischen wie reproduktiven Versuche zeigen, dass ein über die ganze Gerinnebreite sehr tiefer Kolk nur durch das Zusammenwachsen von mehreren lokalen Kolken entstehen kann. Folglich ist die Sohlenform vom 29. Mai nicht nur auf den Wehrbetrieb vom 26. bis 29. Mai zurückzuführen!

Vom 4. bis 13. Juni – die Limmat führte weniger als $300 \text{ m}^3/\text{s}$ und das Kraftwerk war wieder in Betrieb – regulierten die Schützen in Wehrfeld 1, 3 und 4 den Stau in überströmter Stellung und die Schütze in Wehrfeld 2 war in unterströmter Stellung blockiert. Schliesslich waren am 13. Juni die Oberschützen praktisch vollständig hochgezogen (Überfallhöhe ca. 50 cm) und der Wehrdurchfluss wurde beinahe ausschliesslich durch Wehrfeld 2 abgeleitet (Bild 15). Im Gegensatz zu oben be-

schriebener Strahlform wird bei diesem Wehrbetrieb – bedingt durch den sehr tiefen Unterwasserstand und die konzentrierte Ableitung durch ein Wehrfeld – der Ausflusstahl an der Wasseroberfläche eingeschichtet. Der Strahl richtet sich folglich nach unten (Bild 16, rechts), bläst die Deckwalze aus dem Tosbecken und bildet markante, stehende Oberflächenwellen in der Nachlaufströmung (ondulierender Wassersprung, Bild 17). Die Grenze für die Bildung des bedeckt gewellten

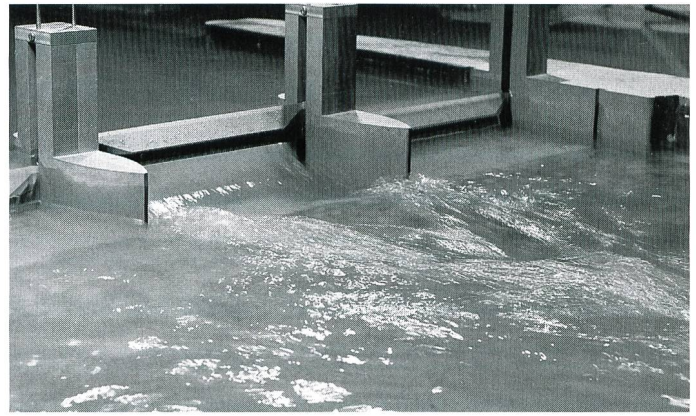


Bild 16. Links: Nach oben gerichteter Ausflusstrahl mit Deckwalze und kurzer welliger Übergang zum strömenden Abfluss. Rechts: Abflussverhältnisse vom 4. bis 13. Juni 1999: frei nach unten gerichteter Ausflusstrahl und kreuzende Stosswellen. In der Nachlaufströmung (Bild 17) bildet sich ein ondulierender Wassersprung. Solch «kleine» Wassermengen werden normalerweise durch Überströmen und nicht konzentriert durch ein Wehrfeld abgeleitet.

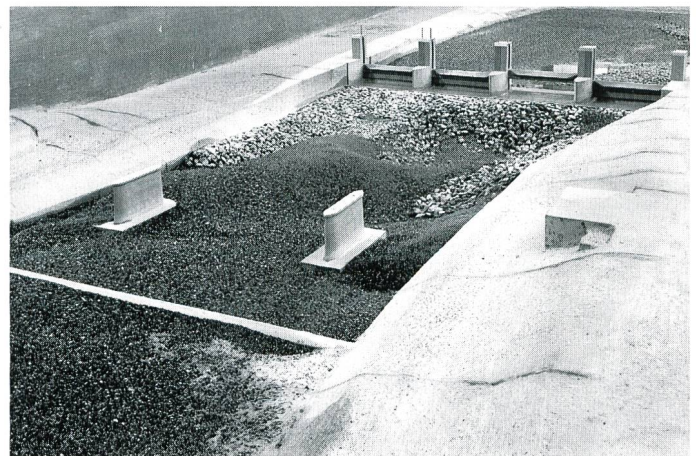
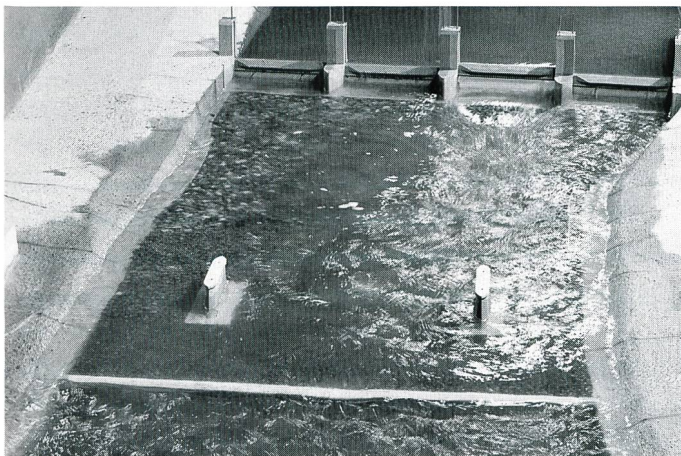


Bild 17. Ondulierender Wassersprung in der Nachlaufströmung von Wehrfeld 2 (links) sowie Sohlenlage (rechts) am 13. Juni 1999. In den Kolk rutschte die Blockschüttung nach.

Strahls wurde also unterschritten, was zu einer grösseren Kolkentiefe in einem grösseren Abstand zur Endschwelle führte. Da nach dem 13. Juni die Regulierung des Staus wieder durch einen symmetrischen Wehrbetrieb erfolgte und sich damit die hydraulischen Bedingungen wesentlich änderten, wurde die Kolkbildung vor allem in der Längsausdehnung unterbrochen. Zu diesem Zeitpunkt war also noch kein Gleichgewichtszustand erreicht!

Die Nachbildung der Ereignisse ergab einen praktisch identischen Kolk wie in Natur. Dem Bild 17 ist die Momentaufnahme der Sohlentopografie am 13. Juni 1999 zu entnehmen. Der Kolk hat sich maximal abgetieft und kam im Fortlauf des – im Bild ebenfalls gut ersichtlich – weit geöffneten zweiten Wehrfelds zu liegen. In die Kolkwanne rutschten die im Zuge der Sanierung 1994/95 geschütteten Blöcke nach, und die linke Uferböschung wurde destabilisiert.

5. Schlussfolgerungen

Wirbelstrukturen in Scherschichten, die Zonen von schnell und gering fließendem Wasser trennen, können sohlenbildende Pro-

zesse auslösen, die bereits bei Abflüssen kleiner als der Dimensionierungsdurchfluss für ein Bauwerk oder das Dimensionierungshochwasser für eine Hochwasserschutzmassnahme eintreten können. In der Projektierungsphase oder der Gefahrenbeurteilung kann das geübte Auge des Fachmanns solche Zonen ausscheiden. Sind das Dispositiv gefährdende Erosionsprozesse zu erwarten, die jedoch mit eindimensionalen Abflussbetrachtungen nicht erfassbar sind und sich einer numerischen Simulation weitgehend entziehen, bietet sich wegen der komplexen hydraulischen Verhältnisse der hydraulische Modellversuch an.

Ein ungünstiger Wehrbetrieb, bei dem ein Wehrfeld viel stärker beaufschlagt wird als die restlichen, erhöht lokal das Erosionspotenzial im Nachlauf des konzentrierten Ausflusstrahls. Insbesondere bei unterströmten Schützen, denen kein oder nur ein kurzes Tosbecken folgt, trifft der Ausflusstrahl mit grosser Bewegungsenergie auf das Flussbett. Falls bei der Projektierung ein solcher Lastfall nicht berücksichtigt wurde und bauliche Massnahmen zur Verhinderung des Kolks im Unterwasser fehlen, muss mit Aus-

kolkungen gerechnet werden, die das Bauwerk gefährden. Es empfiehlt sich deswegen, in regelmässigen Zeitabständen den Zustand der Sohle im Unterwasser einer Wehranlage aufzunehmen, um allfällige Kolkerscheinungen frühzeitig zu erkennen. Die Entwicklung dieser kann mit geeigneten Kolkformeln beschrieben werden.

Literaturhinweis

Eggenberger W., Müller R. (1944): Experimentelle und theoretische Untersuchung über das Kolkproblem, Mitteilungen aus der Versuchsanstalt für Wasserbau der ETH Zürich, Nr. 5.

Anschrift der Verfasser

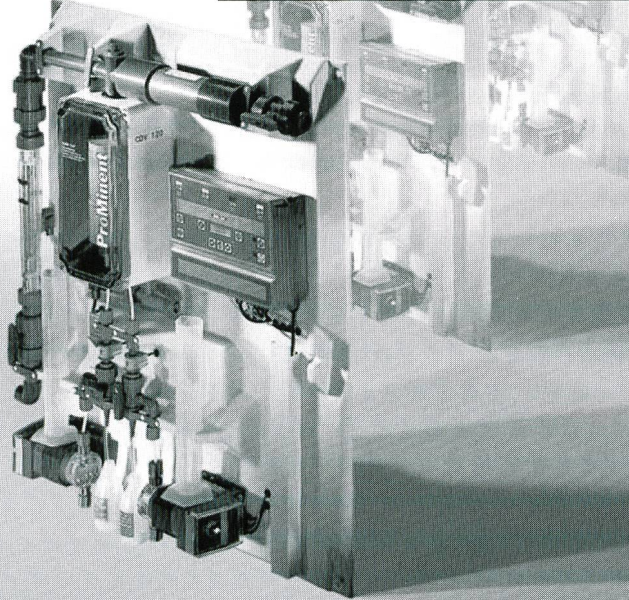
Adriano Lais, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zentrum, CH-8092 Zürich; lais@vaw.baug.ethz.ch

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



MIT BELLO ZON® CHLORDIOXID-ANLAGEN
KOSTENGÜNSTIGER DESINFIZIEREN

BETRIEBSGEWINN



- **Prozesskostensenkung:** Wassereinsparung, da hervorragend ausspülbar sowie geringster Chemikalienverbrauch.
- **Optimale mikrobiologische Wirksamkeit auch bei hohen pH-Werten** im Gegensatz zu Peressigsäure und Chlor.
- **Keine Geschmacksbeeinflussung**, da keine Bildung von chlorierten Nebenprodukten.
- **Höchste Umweltverträglichkeit** durch niedrigste Anwendungskonzentrationen und geringe AOX-Bildung – somit minimale Abwasserbelastung.

ProMinent[®]

ProMinent Dosiertechnik AG • Trockenloostrasse 85 • 8105 Regensdorf • Tel. 01 870 61 11 • Fax 01 841 09 73 • www.prominent.ch

H_d_04 SACCHI

Modernste Technik, robust und absolut problemlos im Einsatz: Als weltweit grösster Hersteller von Tauch-Motorpumpen bietet FLYGT die überzeugende Pumpen-Kompetenz für alle Anforderungen. Mit Förderleistungen von 120 bis 150'000 l/min.

Zusammen mit dem ausgezeichneten Service von HEUSSER ein hundertprozentiges Qualitätsversprechen.



HEUSSER

Carl Heusser AG
Alte Steinhauserstrasse 23
6330 Cham
Tel. 041 747 22 00
Fax 041 741 47 64
www.heusser.ch
info@heusser.ch

Rte de Grammont
1844 Villeneuve
Tel. 021 960 10 61
Fax 021 960 19 47

Power-Pumpen und der ausgezeichnete HEUSSER-Service.

