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

**Herausgeber:** Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband

**Band:** 91 (1999)

**Heft:** 11-12

**Artikel:** Optimierung der Verfahren zur Ableitung des Wassers bei Hochwasser im Sihlsee

**Autor:** Joos, Bernard / Breitegger, Walter / Vetterli, Willy H.

**DOI:** https://doi.org/10.5169/seals-940095

**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:** 03.07.2025

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

# Optimierung der Verfahren zur Ableitung des Wassers bei Hochwasser im Sihlsee

■ *Bernard Joos, Walter Breitegger, Willy H. Vetterli*

## 1. Einleitung

Die Schweizerischen Bundesbahnen betreiben seit 1937 das hydroelektrische Kraftwerk Etzel, in der schwyzerischen Gemeinde Altendorf, am oberen Zürichsee. Die sieben Turbinen mit einer Gesamtleistung von 136 MW wandeln die Schwerkraftenergie des Wassers aus dem 480 m höher gelegenen Sihlsee in Traktionsenergie $16^2/_3$ Hz um. Die installierte Schluckwassermenge der Turbinen beträgt 34 $m^3/s$, und das Volumen des jährlich turbinierten Wassers beläuft sich auf 220 Mio $m^3$. Im Schnitt liefert die Anlage pro Jahr ca. 240 GWh für die Traktion der SBB-Züge in der Region Zürich sowie auch der Züge von fünf Privatbahnen in der Ostschweiz.

Der Sihlsee, mit einem Nutzinhalt von 92 Mio $m^3$, ist mit seinen 10,9 $km^2$ flächenmässig der grösste künstliche See der Schweiz. Er wird von zwei unterschiedlichen Bauwerken abgeschlossen: von der 34 m hohen und 127 m langen Gewichtsstaumauer «In den Schlagen» und dem näher bei Einsiedeln gelegenen 15 m hohen, 155 m langen Erddamm «Hüendermatt». Der tiefste Punkt dieses Dammes am oberen Rand seines Lehmkernes legt die kritische Kote für den maximalen Seeanstieg als Folge von Hochwassern fest. Diese kritische Stelle befindet sich 98 cm oberhalb des Stauzieles, das bei 889,34 m ü. M. liegt.

Aus dem 156 $km^2$ grossen Einzugsgebiet liefert die Minster (63 $km^2$) ca. 40 % und die Sihl (32 $km^2$) ca. 20 % der natürlichen Zuflüsse. Mit dem Grossbach (11 $km^2$), dem Eubach (10 $km^2$) und manchen sekundären Zuflüssen führen sie dem Sihlsee jährlich 236 Mio $m^3$ zu (siehe Bild 1). Die mittlere Höhe des Einzugsgebietes liegt auf knapp 1200 m ü. M., der höchste Punkt ist der Druesberg im Hoch-Ybrig (2282 m ü. M.). Es sind keine Gletscher vorhanden. Diese Charakteristiken des Einzugsgbietes sind Anlass zu einer relativ frühen Schneeschmelze. Generell beginnt der See sich bereits im März aufzufüllen. Da die gesamten Zuflüsse den See mehr als zweieinhalbmal jährlich füllen, dauert somit die Zeit hoher Seestände sehr lange. Von Ende Mai bis Mitte Dezember besteht die Möglichkeit eines ausserordentlichen Ereignisses, das zu einer Betätigung der Ablassorgane führen könnte.

In Erfüllung seiner Oberaufsichtspflicht verlangt das Bundesamt für Wasserwirtschaft (BWW) vom Betreiber, dass das Vorgehen für die Hochwasserentlastung an die heutigen Sicherheitskriterien und -auffassungen angepasst wird. Das entsprechende Reglement wurde so gestaltet, dass damit das 1988 vom eidgenössischen Experten neu definierte 1000jährliche Hochwasser gefahrlos abgeleitet werden kann. Im weiteren wurde berücksichtigt, dass auch das «maximal mögliche Hochwasser», im folgenden «Sintflut» genannt (Modell BWW), noch beherrscht werden könnte, ohne dass der Seespiegel die oben erwähnte kritische Höhe erreicht.

Es ist darauf hinzuweisen, dass keine Wasserfassungen in Nebentälern und keine Zulaufstollen zum Sihlsee bestehen. Alle Zuflüsse gehören zum direkten Einzugsgebiet und fliessen ohne Ableitung und ohne Kontrolle in den See. Dieser Umstand unterscheidet den Sihlsee wesentlich von manchen alpinen Stauseen. Im Falle eines ausserordentlichen Hochwassers sind beim Sihlsee die Zuflüsse weder durch die Ausserbetriebsetzung allfälliger Wasserfassungen kontrollierbar noch durch die Schluckfähigkeit eines Zulaufstollens begrenzt. Die anfallenden Niederschläge wirken sich im vollen Ausmass und ohne Verzögerung auf den Stausee aus. Die einzige Möglichkeit, ein Hochwasser zu beherrschen, ist das richtige Bedienen der Ablassschützen.

## 2. Die aussergewöhnlichen Hochwasser und ihre möglichen Konsequenzen

### 2.1 Geschichtliche Hintergründe des Referenzhochwassers

Das letzte vor Beginn der Bauarbeiten am Sihlsee als bedeutungsvoll einzustufende Hochwasser ereignete sich im Juni 1910. Seine Dauer wurde auf 54 Stunden geschätzt und sein Wasservolumen auf 22 Mio $m^3$. Nach 25 Stunden erreichte dieses Hochwasser eine Spitzenwassermenge von 270 $m^3/s$ (siehe Bild 2).

Es wurde damals angenommen, dass es sich um ein Jahrhunderthochwasser handelte. Deshalb wurde es als Referenz für die Dimensionierung der Wasserentlastungsorgane des Sihlsees und für die Gestaltung des sogenannten Wehrreglementes verwendet. Basierend darauf wurde angenommen, dass ein Ereignis mit diesen Ausmassen mit grösster Zuverlässigkeit gemeistert werden würde. Aus diesem Grunde wurden die Werte dieses Hochwassers 1936 offiziell als Grundlage für die Sicherheitsüberlegungen eingeführt [1].

Vierzig Jahre später musste erkannt werden, dass dieses Hochwasser kein aussergewöhnliches Ereignis darstellte. Aus den, während mehrerer Jahrzehnte gesammelten, Messungen konnte ein realistische-

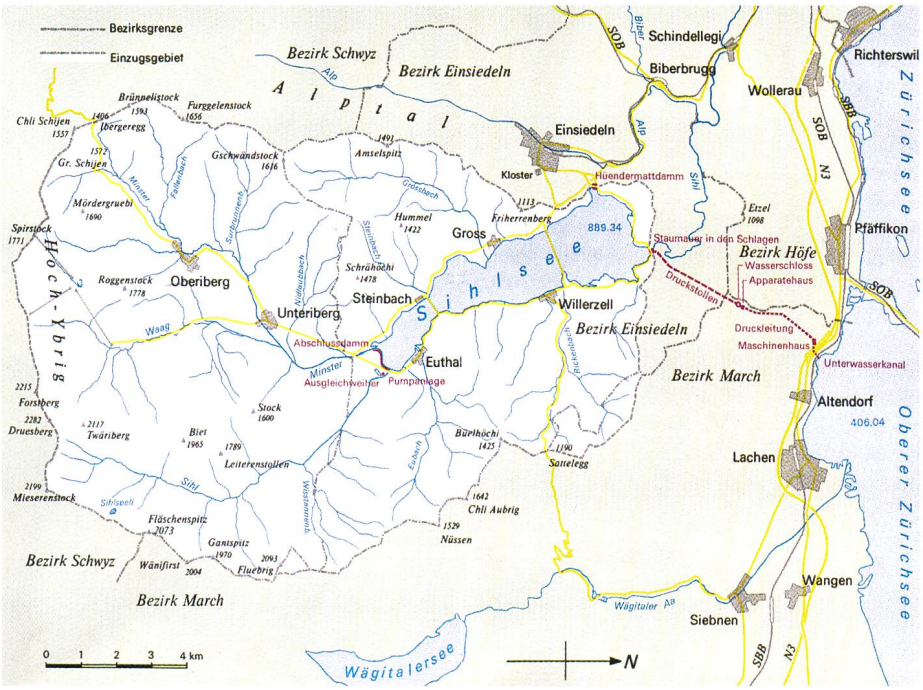


*Bild 1. Einzugsgebiet des Sihlsees.*

res Jahrhunderthochwasser extrapoliert werden. Bei dieser Gelegenheit, und angesichts der allgemeinen Entwicklung der Sensibilität gegenüber Fragen der Sicherheit, hielt man es für angezeigt, die Charakteristiken eines Jahrtausendhochwassers abzuschätzen und das Reglement für das Ablassen des Wassers entsprechend anzupassen [2]. Das neue Referenzhochwasser für den Sihlseezufluss sah ein Volumen von 32 Mio $m^3$ und eine maximale Zuflussmenge von 400 $m^3/s$ vor. Die Konzentrationszeit wurde mit 30 Stunden und die Gesamtdauer des Ereignisses mit 60 Stunden festgelegt. Das Wehrreglement wurde 1976 entsprechend angepasst. Dieses Hochwasser ist nachstehend unter der Bezeichnung C400 angeführt (siehe Bild 2 und Tabelle 1).

Im Jahre 1988 ergab eine neue Studie der Hydrologie des Einzugsgebietes, dass das zwölf Jahre vorher definierte Hochwasser seinerseits nicht so selten war wie angenommen [3]. Seine Wiederkehrzeit entspricht eher einem Jahrhundert- als einem Jahrtausendhochwasser. Deshalb wurde das massgebende Hochwasser etwas angepasst. Während sein Volumen von 32 Mio $m^3$ beibehalten wurde, wurde die Konzentrationszeit auf 20 Stunden begrenzt, die Gesamtdauer auf 40 Stunden reduziert und seine Spitzenwassermenge auf 620 $m^3/s$ erhöht. Dieses Hochwasser erscheint unter dem Kürzel M620 (siehe Bild 2 und Tabelle 1). Verglichen mit dem Jahrhunderthochwasser C400 wurde die Geschwindigkeit des Wasseranstiegs im Sihlsee 2,3mal erhöht.

## 2.2 Die verschiedenen Hochwasser, die untersucht wurden…

Abgesehen von den beiden erwähnten Hochwassern, und um sich zu vergewissern, dass sogar Hochwasser mit einem noch schnelleren wie auch unwahrscheinlicheren Ansteigen des Seespiegels die Abflusskapazität im Fluss talseits des Stausees nicht übersteigen, wurden zwei zusätzliche Ereignisse definiert. Diese Hochwasser sind wegen ihrer extremen Charakteristiken eher theoretisch als realistisch. Die Wahrscheinlichkeit ihres Eintreffens ist besonders tief. Es wurde entschieden, eine Geschwindigkeit des Ansteigens des Wasserzuflusses anzunehmen, die mit jener sehr intensiver historischer Hochwasser kürzerer Dauer vergleichbar ist, während das Volumen und die Spitzenabflussmenge der Hochwasser C400 resp. M620 beibehalten wurden. Auf diese Weise wurden das «scharfe» Jahrhunderthochwasser C400R und das «scharfe» Jahrtausenhochwasser M620R, mit Konzentrationszeiten von 10 respektive 16 Stunden, ebenfalls dem harten Eignungstest der Sicherheitsbestimmungen unterzogen (siehe Bild 2 und Tabelle 1).

Ein weiteres Hochwasser, aus den beobachteten Hochwassern dieses Jahrhunderts abgeleitet und kleiner als das Jahrhunderthochwasser, wurde ebenfalls analysiert. Mit einer Spitzenabflussmenge von 250 $m^3/s$ und einem Volumen von 15 Mio $m^3$ stellt dies ein Hochwasser mittlerer Grösse dar, welchem das neue Wehrreglement ebenfalls Rechnung tragen muss. Dieses «reelle» Hochwasser bekam die Bezeichnung R250.

## 2.3 …die widersprüchlichen Ansprüche, denen das Wehrreglement genügen muss…

Die Sihl verläuft unterhalb des Sihlsees auf einer Strecke von ca. 40 km parallel zum Zürichsee, bevor sie in Zürich den Hauptbahnhof unterquert und dann in die Limmat mündet. Zwischen dem Sihlsee und der Stadt Zürich wird die Sihl nur von zwei grösseren Zuflüssen, der «Alp» und der «Biber», gespiesen. Diese beiden Bäche, die bei normalem Wetter harmlos sind, können bei Gewittern sehr schnell und stark ansschwellen, besonders die Alp. Diese beiden Zuflüsse – im Zusammenhang mit der geographischen Lage des Sihlsees zur Stadt Zürich – verlangen, dass dem Vorgehen für die Wasserableitung aus dem Sihlsee bei Hochwasser ganz besondere Aufmerksamkeit geschenkt wird.

Die Wasserableitung im Falle eines extremen hydrologischen Ereignisses muss so harmonisch wie möglich und innerhalb zweier ganz wichtiger Einschränkungen geschehen. Einerseits darf der Seespiegel nur bis zu einer gewissen Grenze ansteigen, wegen der durch den Kern des Hüendermattdammes vorgegebenen absoluten Limite. Dies bedeutet im Falle eines grossen Hochwassers, dass eine bedeutende Wassermenge so rasch als möglich in die Sihl abgeleitet werden muss, um in jedem Fall den Seespiegel unter Kontrolle zu halten. Andererseits verlangt der Kanton Zürich, dass alle Änderungen in der Abflussmenge der Sihl progressiv und nicht brüsk erfolgen, um Wasserschwälle zu vermeiden, welche in dieser sehr urbanen Umgebung zerstörerische Auswirkungen hätten. Es geht darum, zwischen diesen widersprüchlichen Anforderungen die Weisungen für die Hochwasserableitung einzubetten.

Es sei in Erinnerung gerufen, dass die Existenz des Stausees bezüglich max. Abflussmenge bereits eine deutliche Verbesserung gegenüber dem natürlichen Zustand des Flusses bei Hochwasser darstellt, und

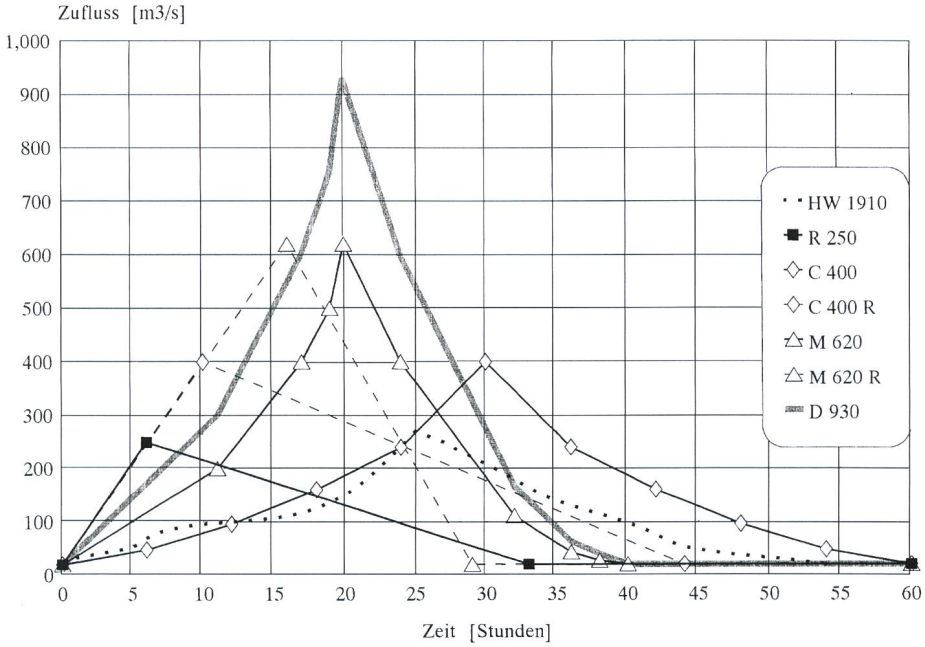


***Bild 2. Hochwasser-Abflussganglinien beim Sihlsee.***

| Hochwasser | Max. Zufluss [$m^3/s$] | Volumen [Mio $m^3$] | Konzentrationszeit [Stunden] | Totale Dauer [Stunden] | Bemerkung |
|---|---|---|---|---|---|
| R250 | 250 | 15 | 6 | 33 | «Reelles» Hochwasser |
| C400 | 400 | 32 | 30 | 60 | Jahrhunderthochwasser |
| C400 R | 400 | 32 | 10 | 44 | «Scharfes» Jahrhundert-HW |
| M620 | 620 | 32 | 20 | 40 | Jahrtausendhochwasser |
| M620 R | 620 | 32 | 16 | 29 | «Scharfes» Jahrtausend-HW |
| D930 | 930 | 48 | 20 | 40 | «Sintflut» = 1,5 × M620 |

***Tabelle 1. Hauptsächlichste Charakteristiken der untersuchten Hochwasser.***

dies unabhängig des Vorgehens für die Hochwasserentlastung. Der Rückgriff auf ein forciertes Turbinieren zur Verminderung der Wasserabgabe in die Sihl ist kaum von Nutzen. Die maximale Wassermenge, die turbiniert werden kann (angenommen, alle Maschinen seien funktionsbereit), ist bei weitem nicht gross genug, um das Ausmass eines Jahrtausendhochwassers signifikant dämpfen zu können.

### 2.4 ...und ihre Auswirkungen auf die Bedienung der Einrichtungen zur Ableitung des Wassers

Der Hüendermattdamm hat keinerlei Einrichtung zur Ableitung von Wasser. Diese sind auf die Staumauer «In den Schlagen» konzentriert, in der Form von drei Überlaufschützen, jede 10 m breit. Mit einer Höhe von 2,45 m ermöglichen sie bei gesenktem Zustand und Seespiegel auf Stauziel bis zu 256 $m^3/s$ abzuleiten. Der Grundablass mit einem Öffnungsquerschnitt von 9,6 $m^2$ ermöglicht seinerseits bei vollem See einen Wasserdurchlass von 163 $m^3/s$. Seit Inbetriebnahme der Anlage konnten die Hochwasser immer alleine mit Hilfe der Überlaufschützen gemeistert werden. Der Grundablass hatte seine Sicherheitsaufgabe bei einem massiven Zufluss von Wasser in den Sihlsee noch nie zu erfüllen.

Die Bestimmung neuer Charakteristiken für das kritische Hochwasser, verbunden mit den obenerwähnten grossen Zwängen, hat zu einer vorsichtigen Ablösung dieser Praxis geführt [4]. Die Beschränkung auf die Überlaufschützen hätte es in der Tat bei einem extremen Hochwasser nicht ermöglicht, genügend Wasser abzulassen, um die Sicherheit des Damms zu garantieren. Angesichts der Tatsache, dass die Staumauer jederzeit leicht erreichbar ist, wurde ein Mitwirken des Grundablasses zur Hochwasserentlastung ins Reglement einbezogen. Die Überlaufschützen haben weiterhin Priorität, einzig bei aussergewöhnlich grossen Hochwassern soll das Öffnen des Grundablasses erfolgen, der übrigens erst betätigt wird, wenn die Überlaufschützen vollständig geöffnet sind.

Findet bei nicht vollem Stausee ein Hochwasserereignis statt, muss vermieden werden, dass der Betreiber mit dem Öffnen der Überlaufschützen wartet, bis der See das Stauziel erreicht hat. Wenn die Schützen erst zu diesem Zeitpunkt geöffnet würden, bestünde die Gefahr einer zu brüsken Zunahme der in den Fluss abgeleiteten Wassermenge. Würde die Öffnungsgeschwindigkeit der Überlaufschützen schrittweise begrenzt, wäre bei extremsten Ereignissen die Struktur des Hüendermattdammes gefährdet.

Der zu betretende Weg war, die beiden Entscheidungskriterien, Wasserstand des Sees und Schnelligkeit der Änderung der Abflussmenge, voneinander soweit als möglich zu trennen. Diese Philosophie führt dazu, Wasser abzulassen, bevor der Seestand seinen maximalen Stand erreicht. Ein solches vorbeugendes Vorgehen erlaubt es, die beiden Entscheidungskriterien ohne allzugrosse Schwierigkeiten voneinander zu trennen.

Ausser der Frage der Öffnungsregeln der Schützen bei Überschreiten der maximalen Stauhöhe ging es auch darum, zu bestimmen, von welchem Moment an und in welchem Rhythmus begonnen werden muss, die Schützen vorsorglich zu öffnen, unter Berücksichtigung der beiden gegenläufigen Zwänge. Mit dieser Methode der vorbeugenden Schützenöffnung kam eine dritte Bedingung ins Spiel: unnötige Verluste von Wasser im Falle von kleineren und mittleren Hochwassern so weit wie möglich zu vermeiden bzw. das Wehrreglement so zu konzipieren, dass diese Verluste so klein wie möglich bleiben.

## 3. Die Suche nach dem optimalen Vorgehen beim Ableiten von Wasser

### 3.1 Definition der zu optimierenden Variablen

Um die Arbeit für das Personal etwas zu vereinfachen, wurden zur Regelung der vorbeugenden Öffnung der Schützen zwei einfache Entscheidungskriterien gewählt. Einerseits wurde entschieden, dass unter einem gewissen Referenzniveau (HSEE) die Entleerungsorgane ungeachtet der Intensität des Zuflusses in den See geschlossen bleiben. Andererseits muss das Öffnen der Schützen einzig von der massgebenden Steiggeschwindigkeit des Seespiegels abhängig sein, wenn dieses Niveau überschritten ist. Diese Geschwindigkeit (DHSEE) wurde als konstant und unabhängig vom Seeniveau angenommen.

Für die Analyse und die Optimierung des Ablassvorgehens wurde ein dritter Parameter definiert: die Änderungsgeschwindigkeit der in die Sihl abgelassenen Wassermenge (ABLA). Diese Komponente hat ebenfalls einen starken Einfluss auf das Ansteigen des Seespiegels.

Um die optimale Kombination dieser drei Parameter herauszufinden, wurde eine Serie von numerischen Simulationen für die fünf ersten Hochwasser gemäss Tabelle 1 vorgenommen. Die «Sintflut», ein Ereignis, das im Prinzip einmalig und in höchstem Masse aussergewöhnlich ist, wurde im Rahmen der Vorgehensoptimierung beim vorbeugenden Ablassen von Wasser nicht berücksichtigt. Für die Simulationen wurden den zu optimierenden Variablen die folgenden Werte zugeordnet :

- HSEE: alle 20 cm zwischen 888,00 und 889,20 m ü. M.;
- DHSEE: 1, 2 und 3 cm pro halbe Stunde;
- ABLA: 10, 20 und 30 $m^3/s$ pro halbe Stunde.

Um den Einfluss der Anfangsseehöhe auf den Verlauf des Ereignisses zu berücksichtigen, wurden für den Seespiegel zu Beginn des Hochwassers verschiedene Höhen zwischen 886,34 m ü. M. (Maximalstand minus 3 m) und 889,34 m ü. M. (voller See) angenommen. Das zur Verfügung stehende Volumen im See ist im ersten Fall 33 Mio $m^3$, also grösser als das Volumen des Jahrtausendhochwassers. Es wurde angenommen, dass das Kraftwerk während des Hochwassers keine Energie erzeugt (turbinierte Wassermenge = 0).

### 3.2 Die Optimierungsbedingungen und -ziele

Die vorbeugende Öffnung der Ablassschützen führt zu einer gewissen Wahrscheinlichkeit, dass im Falle kleinerer Hochwasser, bei relativ tiefen Seeständen, am Anfang des Ereignisses Wasser unnötig früh abgelassen wird.

Dieser Wasserverlust soll so klein wie möglich gehalten werden. Für grössere Zuflüsse oder höhere Seestände spielt das vorbeugende Betätigen der Schützen eine untergeordnete Rolle, weil der See im Verlauf des Hochwassers so oder so gefüllt wird.

Damit die Interessen der Unterlieger, der Bausubstanz und des Betreibers im richtigen Ausmass betrachtet werden, müssen drei Bedingungen und Ziele definiert werden. Diese beherrschen das Optimierungsprozedere und lauten:

- Der See darf nicht höher als 98 cm über die Staukote ansteigen (Höchstniveau bedingt durch die strukturelle Sicherheit des Hüendermattdamms): Diese Bedingung stellt eine absolute Grenze dar.
- Die Variationsgeschwindigkeit der Abflussmenge an die Sihl, die so tief wie möglich gehalten werden soll (starke Optimierungsvariable): Diese Geschwindigkeit darf höchstens 80 $m^3/s$ pro Stunde betragen, um keine untragbaren Schwallwirkungen im Unterlauf der Sihl zu erzeugen.
- Der Wasserverlust infolge einer vorbeugenden Schützenöffnung bei nicht vollem See (schwache Optimierungsvariable): Der Verlust muss so klein wie möglich sein, es wird jedoch keine quantitative Grenze gesetzt.

## 3.3 Die Auswirkungen der vorbeugenden Öffnung der Ablaufschützen auf das Abflussverhalten der Sihl...

Das Verhalten des Flusses wurde mit einem sehr einfachen Indikator, der für jede Kombination von HSEE, DHSEE und ABLA angewendet wurde, global berücksichtigt. Dieser wird mit DQMAX bezeichnet und zeigt die maximale Variationsgeschwindigkeit der Wassermenge in der Sihl beim Ableiten von Wasser für diese Kombination, unabhängig vom Hochwassertyp oder vom Seestand am Anfang des Ereignisses.

Das Bild 3 zeigt die maximale Variationsgechwindigkeit der abgelassenen Wassermenge in Abhängigkeit von verschiedenen Öffnungsschnelligkeiten ABLA der Schützen. Erkennbar ist ein sehr deutlicher Rückgang, wenn ABLA von 10 auf 20 $m^3/s$ pro halbe Stunde wechselt. Andererseits werden bei einer HSEE von mehr als 888,80 m ü.M. die Variationen der Wassermenge der Sihl sehr gross.

Diese letztere Marke zeigt ungefähr die Limite an, die bei der vorsorglichen Öffnung der Überläufe angestrebt werden muss, wenn zu grosse Variationen bei der Menge des abgelassenen Wassers vermieden werden sollen. Unterhalb dieser Marke hängt die maximale Variation der Sihl nur unwesentlich vom Referenzniveau der Schützenöffnung ab.

## 3.4 ...und auf die Wasserverluste des Sihlsees

Ein zweiter einfacher Indikator, der gesamthaft den Grad der Nicht-Auffüllung des Sees am Ende des Hochwassers angibt, wurde ebenfalls definiert. Dieser Indikator steht in direktem Zusammenhang mit den Wasserverlusten, die durch eine unnötig frühe Öffnung der Überlaufschützen entstehen. Bei jeder Berechnung wurde das grösste Seeniveau am Ende des Ereignisses festgehalten. War es tiefer als das maximale Stauniveau, wurde diese Differenz (restliches Freibord) in einer Variablen berücksichtigt, die für die Bedürfnisse der Berechnungen als MANCO bezeichnet wurde. Im gegenteiligen Fall wurde MANCO mit Null festgelegt.

Bei kleinen Hochwassern sind Wasserverluste unausweichlich, diese bleiben indessen in annehmbaren Ausmassen. Um auf einfache Weise den Grad der Nicht-Auffüllung in bezug zu HSEE, DHSEE und ABLA zu setzen, wurden alle MANCO-Variablen, die einer gegebenen Kombination dieser drei Parameter entsprechen, unabhängig vom Hochwasser und vom Seeniveau am Anfang des Ereignisses, addiert. Dies ergibt 35 Summanden (5 Hochwasser × 7 Seestände). Das

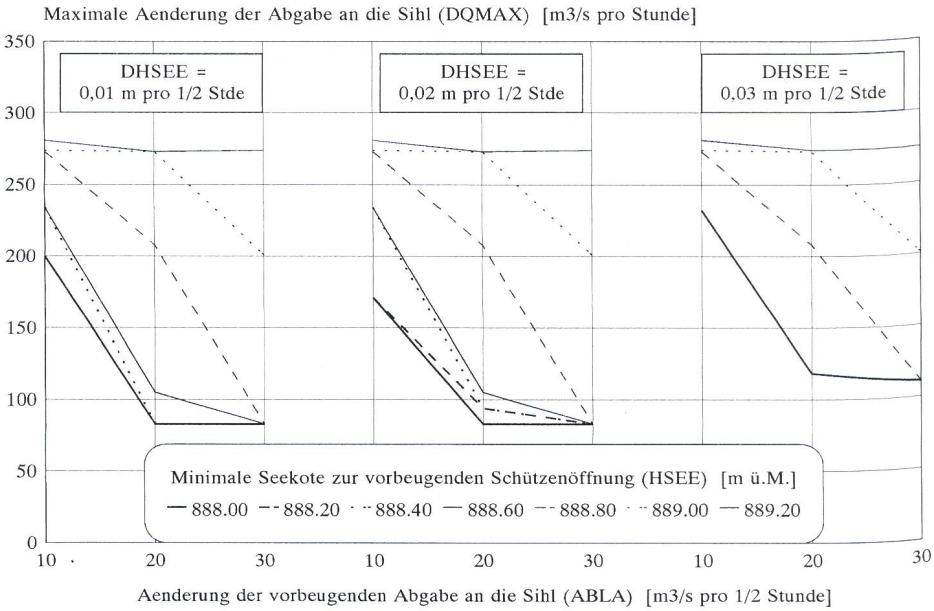


***Bild 3. Maximale Änderung der Abgabe an die Sihl.***

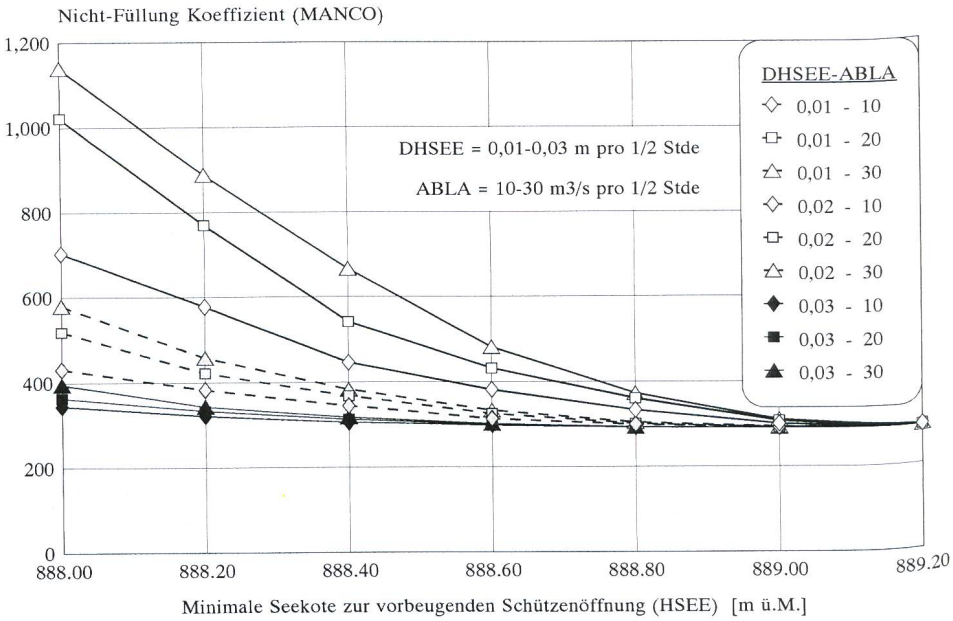


***Bild 4. Nicht-Füllung-Koeffizient.***

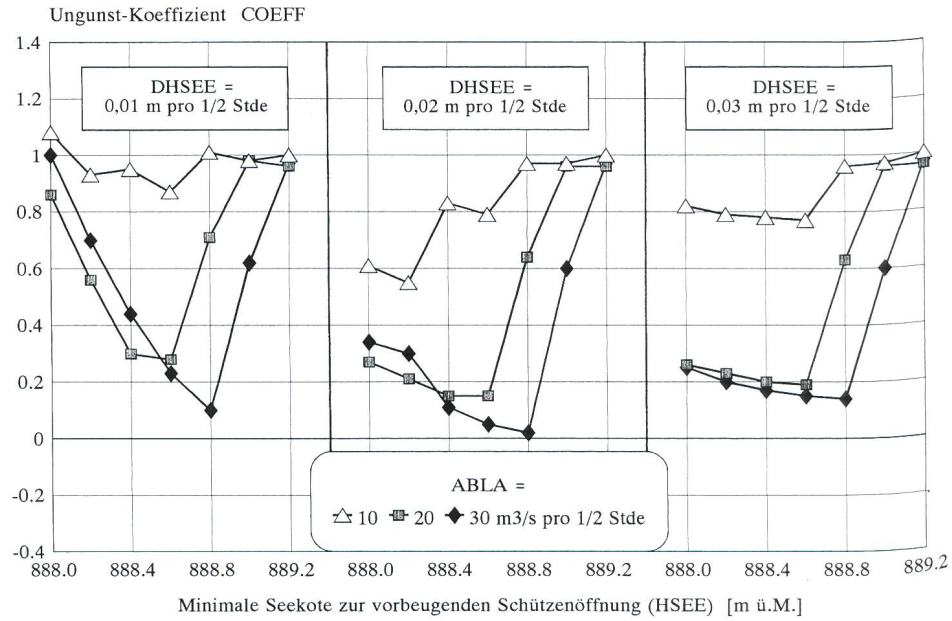


***Bild 5. Normierter gesamter Ungunst-Koeffizient.***

Bild 4 zeigt den Rückgang von MANCO, wenn HSEE steigt, bei gleichbleibenden DHSEE und ABLA. Über einer Höhe von ca. 888,80 m ü. M. ist der Einfluss des Referenzniveaus des Sees HSEE nicht mehr sehr gross. Man sieht ebenfalls, dass MANCO weniger abhängig ist vom Kriterium der Variation der Schützenöffnung als von jenem der Geschwindigkeit des Seespiegelanstiegs.

### 3.5 Die optimalen Vorgabewerte

Um die Optimierung der verschiedenen Parameter im dreidimensionalen Raum (HSEE, DHSEE, ABLA) auf der Grundlage von zwei Indikatoren (MANCO und DQMAX) zu vereinfachen, wurde ein allgemein gültiger, normierter und dimensionsloser Optimierungskoeffizient eingeführt. Um auf die relative Wichtigkeit der zwei Optimierungsbedingungen Rücksicht zu nehmen, wurde den diesbezüglichen Komponenten ein Gewicht von 2 zu 1 zugeschrieben. Der Koeffizient ist wie folgt definiert:

$$COEFF = 2 \times \frac{DQMAX}{DQMAX_{max}} + \frac{MANCO}{MANCO_{max}}$$

Die Definition vom COEFF berücksichtigt, dass, je grösser sein Wert wird, desto ungünstiger die entsprechende Parameterkombination ausfällt. In dem Sinn wirkt der Koeffizient als ein «Ungunst-Indikator». Bild 5 stellt die Polarität gut dar, welche aus den beiden, weiter oben erwähnten, unvereinbaren Zwängen entsteht. Für die tiefen Werte von HSEE ist der Koeffizient der Nicht-Füllung des Sees bedeutend, aber die Variation der in die Sihl abgelassenen Wassermenge bleibt schwach. Bei den hohen HSEE-Werten ist das Umgekehrte der Fall. Irgendwo zwischen diesen beiden Extremen, dort wo COEFF einen Minimalwert erreicht, ist die Kombination nahe dem Optimum. Das ist der Fall bei der folgenden Dreierkombination:

- HSEE = 888,80 m ü. M.;
- DHSEE = 2 cm pro halbe Stunde;
- ABLA = 30 $m^3/s$ pro halbe Stunde.

Trotz seiner Einfachheit widerspiegelt der Optimierungskoeffizient die Realität gut. Er ist relativ robust und stabil. Eine andere relative Gewichtung der Parameter DQMAX und MANCO (1 zu 1 oder sogar 1 zu 2, z. B.) hätte nicht zu einer anderen optimalen Kombination geführt.

Um zu vermeiden, dass bei vorsorglicher Öffnung der Schützen zuviel Wasser verlorengeht, ist es wichtiger, die Steiggeschwindigkeit des Sees zu kontrollieren als dessen momentanes Niveau. So ist auch klar vorgeschrieben, dass die Schützen wieder geschlossen werden müssen, sobald DHSEE unter den Wert von 2 cm pro halbe Stunde fällt, und dies ebenfalls in Schritten von 30 $m^3/s$ pro halbe Stunde. Es muss auch beachtet werden, dass während der Anwendung der Präventivmassnahme, und bei jeder Seehöhe, der Öffnungsgrad der Überlaufschützen ständig ändert: Entweder vergrössert er sich, wenn der See mehr als 2 cm pro halbe Stunde steigt, oder er verkleinert sich, wenn er weniger stark steigt. Die Folge dieser Massnahme ist, dass die Steiggeschwindigkeit des Sees im Mittel bei 4 cm pro Stunde wirkungsvoll blockiert ist und unter Kontrolle bleibt, solange das Verfahren der vorsorglichen Öffnung der Schützen befolgt wird. Das erlaubt dem See eine gute Füllung bei kleinen Hochwassern, ohne Risiko für die Sihl, wenn sehr viel Wasser anfällt.

Die Vorschriften der Schützenöffnung für den Fall, dass der See über seine maximale Stauhöhe hinaus (889,34 m ü. M.) ansteigt, wurden einzig auf das Seeniveau abgestützt, unabhängig von dessen Steiggeschwindigkeit. Um die optimalen Öffnungsvorschriften herauszufinden, wurde einzig den Zwängen Rechnung getragen, welche mit der Sicherheit des Hüendermattdamms einerseits und den vom Kanton Zürich vorgeschriebenen Grenzen bezüglich der Sihl andererseits zusammenhängen. Die Aufgabe der mit der Öffnung der Schützen beauftragten Mitarbeiter besteht einfach darin, zu entscheiden, welches Vorgehen zu wählen ist, und dessen Vorschriften zu befolgen: Entweder das Vorgehen der vorsorglichen Öffnung, die einzig von der Steiggeschwindigkeit des Sees abhängig ist, oder das normale Vorgehen, wo die Öffnung der Schützen einzig vom Niveau des Seespiegels abhängig ist.

Der Übergang von einem Vorgehen der Schützenöffnung zum andern wurde auf eine einfache Art gelöst. Im Falle, wo die Schützen vorsorglich betätigt werden und sich im teilweise geöffneten Zustand befinden, wenn der See das Stauziel erreicht, ist es wichtig, keinen Unterbruch im Ableiten des Wassers in die Sihl zu verursachen beim Wechsel von einem Öffnungsvorgehen zum andern. Um einen sanften Übergang zu gewährleisten, wurde entschieden, das vorsorgliche Vorgehen fortzuführen, bis die Soll-Öffnung aus der Anwendung des normalen Vorgehens den tatsächlichen Grad der Öffnung übersteigt. Erst in diesem Moment kann (und muss) das vorsorgliche Vorgehen zugunsten des andern aufgegeben werden, welches dann bis zum Ende des Hochwassers angewendet wird.

## 4. Einige Beispiele von Hochwasserkontrollen

Der Einfluss der vorbeugenden Öffnung der Überlaufschützen auf den Ablauf einiger charakteristischer Hochwasser wird auf den Bildern 6 bis 8 aufgezeigt. Es wurde dazu angenommen, dass der See am Anfang der Hochwasser ca. 1 bis 1,5 m unterhalb seines Stauziels liegt, was der üblichen Seebewirtschaftung entspricht. Die Begrenzung der Steiggeschwindigkeit des Seeniveaus kann klar festgestellt werden, wenn seine Steiggeschwindigkeit höher ist als 2 cm pro halbe Stunde.

Bei den kleineren Hochwassern hat die vorsorgliche Öffnung die Wirkung eines Bremsstosses, der es erlaubt, die Steiggeschwindigkeit des Sees in den Griff zu bekommen, und damit garantiert, dass das Hochwasser gemeistert werden kann, was auch immer geschehen wird. Bei grösseren Ereignissen wird die Steiggeschwindigkeit des Sees begrenzt, was bewirkt, dass schon vor Erreichen des Vollstaus vorsorglich eine grosse Menge Wasser abgeleitet und der Abfluss in der Sihl angehoben wird. Bei gewissen Hochwassern genügt die Anwendung des vorsorglichen Verfahrens.

Bei kleineren Hochwassern bringt die vorbeugende Öffnung der Schützen kleine Änderungen der Abgabe an die Sihl. Hingegen wird diese dadurch bei grösseren Ereignissen deutlich vermindert: Sowohl ihr Spitzenwert (ca. 100 $m^3/s$) als auch der Anstieg der Wassermenge in die Sihl werden durch Anwendung dieses Verfahrens stark reduziert. Im Falle des Jahrtausendhochwassers ist die Dämpfung des Abflussanstiegs besonders ersichtlich. Der Einfluss auf die vom See erreichte Höchstkote ist generell geringer (5 bis 10 cm).

In jedem Fall ist die Sicherheit des Hüendermattdamms gewährleistet, sogar bei der ungünstigsten Hypothese einer sehr unwahrscheinlichen «Sintflut», wenn der See zu Beginn des Unwetters bereits voll ist. Der Seespiegel bliebe dabei immer noch mindestens 11 cm unterhalb des tiefsten Kronenpunktes des Dammkernes. Beim deutlich häufigeren (!) Auftreten des Jahrtausendhochwassers wäre dieser Abstand 60 cm.

Was die Sihl betrifft, wäre sie höchsten Veränderungen der Wasserführung in der Grössenordnung von 85 $m^3/s$ pro Stunde unterworfen, und dies, wenn am Anfang des Hochwassers der See voll oder fast voll ist. Nach einer dem Abflussverhalten des Wassers in der Sihl gewidmeten Studie [5] gefährdet dieser Wert weder den Fluss noch seine Anstösser. In dieser Hinsicht, und entgegen dem, was intuitiv angenommen werden könnte, ist das Jahrhunderthochwasser leicht aggressiver für den Fluss als das Jahrtausendhochwasser.

Der grösste Wasserverlust erreicht im Falle einer vorsorglichen und sich später als unnötig erweisenden Öffnung der Schützen

bei einem Unwetter kleineren Ausmasses (Hochwasser in der Grössenordnung von R250) etwa 30 000 $m^3$. Dies ist der Preis, der bezahlt werden muss, um die Gewissheit zu haben, dass selbst grösste Hochwasser ohne Risiken, weder für die Unterlieger noch für die Sihl oder die Staueinrichtungen, bewältigt werden können.

## 5. Zusammenfassung

Der Betreiber des Kraftwerks Etzel sah sich vor das heikle Problem gestellt, sein Vorgehen zur Ableitung des Sihlseewassers entsprechend den heutigen hydrologischen Erkenntnissen an die heutigen Sicherheitskriterien anzupassen. Die Charakteristiken des Jahrtausendhochwassers (sowohl sein grösster Wasseranfall als auch sein Volumen) sind in der Tat deutlich grösser als dies in den 30er Jahren bei der Dimensionierung der Einrichtungen für das Ableiten des Wassers angenommen wurde. Es gelang, sich auf die Erarbeitung eines neuen Wehrreglements zu konzentrieren, indem einerseits von allen Möglichkeiten, welche die Ableiteinrichtungen bieten, und andererseits von den Analysekapazitäten, welche die heutigen elektronischen Mittel bieten, Gebrauch gemacht wurde. Damit konnten bauliche Anpassungen vermieden werden.

Entsprechend der vorliegenden Sachzwänge wurden die Entscheidungskriterien optimiert, welche für das Öffnen der Sicherheitseinrichtungen massgebend sind. Es ergab sich ein Vorgehen in zwei Teilen für das Ableiten des Seewassers, je nachdem, ob der See bei Beginn des Hochwassers seine maximale Höhe schon erreicht hat oder nicht. Im letzteren Fall ist es angezeigt, eine vorsorgliche Öffnung der Überlaufschützen vorzuschreiben. Diese beiden Vorgehensweisen bei der Öffnung der Schützen unterscheiden sich fundamental voneinander in folgendem Sinne:

- Beim normalen Vorgehen (wenn der See seine maximale Stauhöhe überschritten hat) richtet sich die Öffnung der Schützen einzig nach der Höhe des Seespiegels.
- Beim vorsorglichen Vorgehen ist, wenn der See einmal eine bestimmte Referenzhöhe erreicht hat, für die Öffnung der Schützen einzig die Geschwindigkeit massgebend, mit welcher der Seespiegel ansteigt.

Die Unterteilung in diese beiden Vorgehensweisen erleichtert die Aufgabe des mit der Bedienung der Sicherheitseinrichtungen bei Hochwasser beauftragten Personals, indem die Vorgaben auf einem einzigen Kriterium beruhen (Steiggeschwindigkeit des Sees oder erreichtes Seeniveau). Der Übergang von einer Vorgehensweise zur andern gründet auf einem sehr einfachen Kriterium und erfolgt ohne brüske Änderungen des Abflusses in der Sihl. Kontrollsimulationen dieses Vorgehens zeigen, dass alle Vorgaben eingehalten werden können.

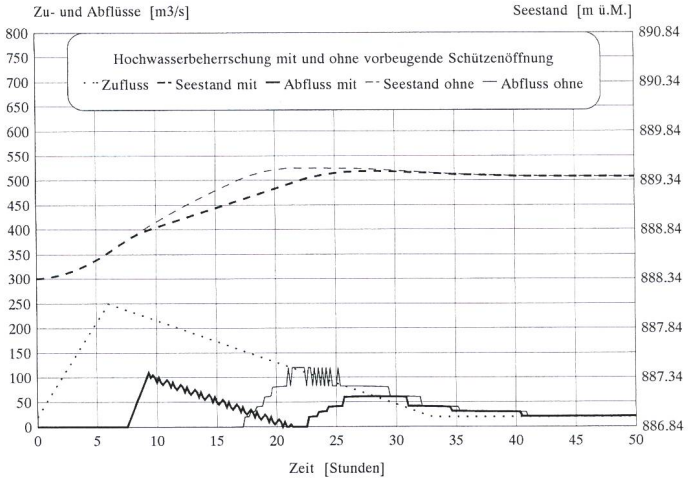


**Bild 6. «Reelles» Hochwasser R250.**

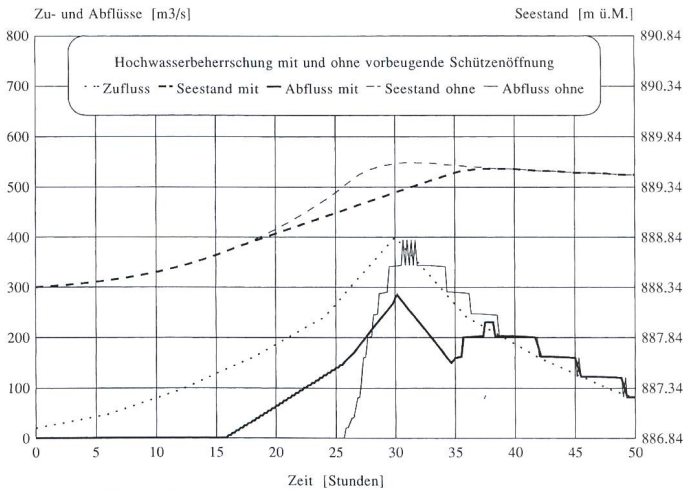


**Bild 7. Hundertjährliches Hochwasser C400.**

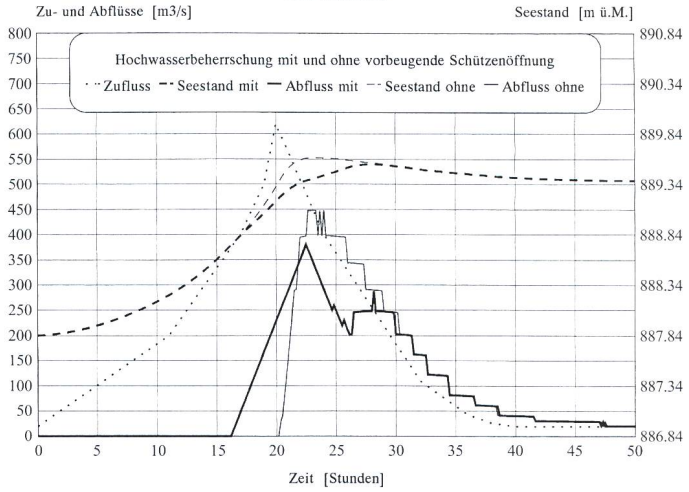


**Bild 8. Tausendjährliches Hochwasser M620.**


Referenzen

[1] Genehmigungsbeschluss der Regierungen der Kantone Zürich, Schwyz und Zug über die Werkanlagen des Etzelwerks. November 1936.

[2] NOK – Sihlsee, Untersuchung betreffend ein neues Wehrreglement. Baden, 1976.

[3] *G. Lombardi* – Stauanlage Sihlsee, Dritter Expertenbericht. Locarno, März 1988.

[4] *B. Joos* – Sihlsee, Wehrreglement 1994, Begleitender Bericht. Zollikofen, Mai 1994.

[5] Basler & Hofmann – Wellen in der Sihl, verursacht durch Überlaufwasser aus dem Sihlsee, Zürich, Februar 1996.



Adressen der Verfasser

Dr. *Bernard Joos,* Direktion Energie SBB, CH-3052 Zollikofen.

*Walter Breitegger,* Betriebsleiter Etzelwerk AG, CH-8852 Altendorf.

*Willy H. Vetterli,* Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft des Kantons Zürich, Walchetor, CH-8090 Zürich.