

**Zeitschrift:** Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria  
**Herausgeber:** Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband  
**Band:** 99 (2007)  
**Heft:** 4

**Artikel:** Systemanalyse mit Retentionsberechnungen für den Grimselsee und seine Zuflüsse  
**Autor:** Eder, Carl-Arthur  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-940155>

### **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:** 11.01.2026

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

# Systemanalyse mit Retentionsberechnungen für den Grimselsee und seine Zuflüsse

■ Carl-Arthur Eder

## Zusammenfassung

Die Kraftwerke Oberhasli AG, KWO AG, wollen ihre Anlagen in mehreren Etappen sanieren und ausbauen. Eine Etappe beinhaltet eine Vergrösserung des Grimselsees. Durch eine Erhöhung der Mauern um 23 m kann die Energieproduktion im Winter von bisher 40% auf 55% und im Sommer von 60% auf 45% umgelagert werden.

Mittels des Modellierungsprogramms Routing System II werden Informationen betreffend das hydrologische und hydraulische Verhalten im betroffenen Einzugsgebiet des Grimselsees erarbeitet. Für die Phase der Bauarbeiten erfolgt die Modellierung mit einem 20-jährigen Hochwasser. Aus den Resultaten leiten sich Massnahmen und Empfehlungen zum Schutz der Baustelle ab. Insbesondere wird gezeigt, wie die Betriebsweise optimiert werden kann, damit die Hochwasserwelle in der Aare so klein wie möglich gehalten werden kann. Analoge Simulationen werden für den Zeitpunkt nach Abschluss der Bauarbeiten für ein maximal denkbare Hochwasser, PMF, durchgeführt. Auch in dieser Situation wird gezeigt, welche Betriebsweise als die optimale bezeichnet werden kann.

## 1. Einleitung

Die KWO AG (Kraftwerke Oberhasli AG) verfügt über Konzessionen, die sie zur Nutzung des Wassers im Einzugsgebiet der Grimsel und des Susten berechtigen. In sechs Stauseen und einem natürlichen See werden vor allem die Hasli-Aare und teilweise das Gadmer- und Gentalwasser sowie das Urbachwasser mit ihren Zuflüssen gespeichert, und seine potenzielle Energie wird in neun Kraftwerken in elektrische Energie umgewandelt. Die Kraftwerke produzieren Band- und Spitzenenergie und übernehmen auch die Frequenzhaltung des Kantons Bern.

## Abstract

The Kraftwerke Oberhasli AG, KWO AG, wants to rehabilitate and extend the existing infrastructure in several phases. One third phase contains the increase of the Lake Grimsel. By heightening the dam by 23 m, the energy production will change from 40% to 55% in winter and from 60% to 45% in summer.

Information concerning the hydrologic and hydraulic behaviour of the involved catchments are elaborated by using the computer programme Routing System II. The modelling for the period of construction is based on a 20 year flood. Based on the modelling results measurements and requirements are elaborated for the flood protection of the construction site and its installations. In particular is showed, how the operation of production can be optimized, so that the flood into the Aare will be as small as possible. Analogous simulations are executed for the period after finalisation of the heightening and the case of a PMF flood showing of the optimized operation of production.

## Résumé

Les Forces motrices de Oberhasli SA, KWO SA, sont en train de réhabiliter et de développer leurs installations en plusieurs étapes. Grâce à une surélévation des barrages de 23 m la production énergétique va passer en hiver de 40% à 55% et en été de 60% à 45%.

Des informations concernant le comportement hydrologique et hydraulique du bassin versant touché sont élaborées à l'aide du logiciel Routing System II. Pour la période de construction la modélisation est basée sur une crue de 20 ans. Basé sur des résultats, des recommandations et des mesures sont élaborées en vue de la protection contre les inondations du chantier. En particulier est montré, comment on peut optimiser le mode d'exploitation pour minimiser la crue de l'Aare que possible. Des calculs analogues de simulation sera effectués pour la phase après la finitions de l'ouvrage pour une crue de PMF. Même pour cette situation est montrée, quel sera le mode d'exploitation optimale.

Mit dem Ausbauprojekt «KWO plus» sollen in fünf Etappen die Anlagen der Kraftwerke Oberhasli AG saniert und ausgebaut werden. Das Ziel ist eine flexiblere Handhabung bei der Produktion von Spitzenenergie und Regulierung, vermehrte Umlagerung und Erhöhung der Reserven sowie Erhöhung der Leistung und somit der Energieproduktion.

Die dritte Etappe dieses Ausbauprojektes (Bild 1) strebt eine Verbesserung der bedarfsgerechten Produktion an. Die KWO AG ist im Sommer mit Wasser sehr gut bedient. 90% des Wassers fliessen im Sommer. Das Speichervolumen der sieben Stauseen ist heute so bemessen, dass die neun KWO AG-Kraftwerke 60% des Grimsel-Stromes im Sommer produzieren. Damit eine saisonal ausgegli-

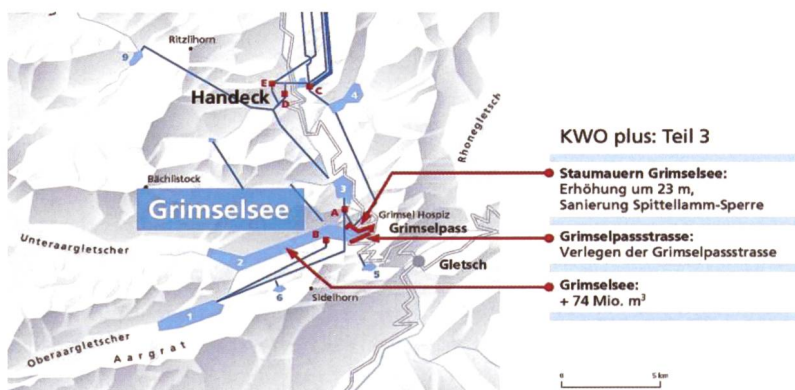
chenere Energieproduktion möglich wird, möchte die KWO AG das Stauvolumen des grössten Speichers, des Grimselsees, vergrössern. Mit einer Erhöhung der Mauern um 23 m würde rund 75 Mio. m<sup>3</sup> mehr Wasser speicherbar, was schliesslich zu einer Umlagerung der Produktionsverteilung auf rund 55% der Energie im Winter und 45% der Energie im Sommer führen würde, die Umlagerung entspricht 230 GWh Energie pro Jahr. Die Produktion der KWO AG würde dadurch bedarfsgerechter, die KWO AG würde dank ausgeglichenem Wasserangebot, ganzjährig über flexible Einsatzmöglichkeiten der Kraftwerke, verfügen. Selbst wenn durch die Klimaveränderung in warmen Wintern mehr Wasser fliessen würde, nützte das Speichervolumen des erweiterten Grimselsees: Die Umlagerung

**Saisonal ausgeglichene Produktion**

Erhöhung des Speichervolumens des Grimselsees



- **Energiegewinn: 10 GWh/a**
- **Energieumlagerung: ca. 230 GWh (KWO total 55% Winter-Energie)**
- **Investition: CHF 200 Mio.**

**Bild 1. KWO AG; Ausbau Etappe 3.**

wäre nicht mehr so strikt an die Jahreszeiten gebunden.

Im Rahmen der laufenden Planung sollen mittels numerischer Simulation das hydraulische Verhalten im betroffenen Einzugsgebiet des Grimselsees eruiert, und damit folgende Fragen geklärt werden:

- Welches sind die Konsequenzen für die Erhöhung der Grimselstaumauern betreffend die Dimensionierung der Hochwasserentlastung?
- Welche Massnahmen müssen getroffen werden, damit die Baustellen und deren Infrastruktur optimal vor Überflutung geschützt sind?

Es ist mit einer vier- bis fünfjährigen Bauphase zu rechnen.

## 2. Aufgabenstellung, Zielsetzung

Um die Zielsetzung der dritten Etappe des Ausbauprojektes «KWO plus» (Verbesserung der bedarfsgerechten Produktion) erreichen zu können, spielen neben den rein technischen und baulichen auch betriebliche Massnahmen, welche vertiefte Kenntnisse voraussetzen, eine entscheidende Rolle.

Das Ziel dieses Berichtes ist es, zu den im Nachfolgenden beschriebenen Situationen der Ausbauetappe 3 Entscheidungsgrundlagen für die KWO AG zu erarbeiten und ein Benutzerhandbuch für das Computerprogramm Routing System II zu erstellen.

Die vorliegende Diplomarbeit behandelt die folgenden Aspekte vertieft und liefert entsprechende «Werkzeuge» und Resultate:

- Bereitstellen eines Benutzerhandbuches zur Anwendung des Com-

puterprogramms Routing System II zu Händen der KWO AG, damit diese in einer späteren Phase unabhängig weitere Simulationsrechnungen durchführen kann;

- Erarbeiten/Anpassen und Überprüfen der Modellierung zur Berechnung des hydraulischen Verhaltens im betroffenen Einzugsgebiet des Grimselsees. Dies beinhaltet eine Analyse der vorhandenen Anlagen der KWO AG, die Sammlung der relevanten Daten, die Modellierung und Kalibrierung des Systems, sowie die Überprüfung des Modells mit Plausibilitätsrechnungen. Der Modellierungsumfang umfasst
  - in 1. Priorität das Einzugsgebiet des Grimselsees bis zum Räterichsbodensee und die angrenzenden Regelemente, wie Grundablass, Hochwasserentlastung und Turbinen, wobei gewisse einschränkende Massnahmen genau definiert werden.
  - In 2. Priorität wird das Einzugsgebiet bis und mit Handeck für die Modellierung berücksichtigt.
- Basierend auf den Resultaten der oben erwähnten Modellrechnungen, unter der Annahme eines 20-jährigen Hochwassers, werden Entscheidungsgrundlagen zu baulichen Aspekten erarbeitet:
  - Formulieren von Empfehlungen als Massnahmen zum Schutz der Baustelleninstallation vor Überflutung. Dieser Punkt stellt eines der Schlüsselemente dieser Arbeit dar und ist von sehr grosser Bedeutung für die KWO AG betreffend die vorbereiteten Massnahmen;
  - Berechnung des Verhaltens der ge-

planten neuen Hochwasserentlastung auf der Seeuferegg-Sperre unter der Annahme eines maximal denkbaren Hochwasserereignisses PMF mit Hilfe des Computerprogramms Routing System II und der entsprechenden Modellierung.

## 3. Grundlagen und Benutzerdaten

Die Grundlagen dieser Arbeit stammen einerseits von der KWO AG und andererseits von der EPFL, wo das Computerprogramm Routing System II entwickelt wurde. Routing System II ermöglicht die Simulation der Entstehung und Fortpflanzung von Hochwasserwellen in komplexen hydraulischen Systemen.

Die verwendeten Daten basieren auf Informationen, Daten und mathematischen Beziehungen, die von der KWO AG zur Verfügung gestellt wurden. Da die Daten unvollständig waren, mussten vereinzelt für spezielle extreme Situationen Annahmen getroffen werden. Alle verwendeten Daten sind in Excel-Dateien zusammengestellt. Ab diesen Files wurden die einzelnen modellierten Elemente gespeichert.

## 4. Routing System II, Anleitung und Benutzerhandbuch

### 4.1 Modellierung der Fortpflanzung eines Hochwassers in einem hydraulischen System – Grundsätzliches

Das in vorliegender Diplomarbeit verwendete Computerprogramm Routing System II ist eine neue und erweiterte Version des Computerprogramms Routing System, welches wie sein Vorgänger am Laboratoire de constructions hydrauliques (LCH) der EPFL entwickelt wurde. Routing System II ist ein Werkzeug für die Planung und für die Definition von optimalen Betriebsweisen von komplexen hydraulischen Anlagen wie Wasserkraftanlagen und Hochwasserschutzsystemen. Zudem erlaubt es eine gesamtheitliche und vernetzte Betrachtungsweise.

Das Programm ermöglicht die Simulation der Entstehung und Dämpfung von Hochwasserabflüssen in Einzugsgebieten unter der Berücksichtigung der Einflüsse von allfälligen hydraulischen Bauwerken. Routing System II integriert in einer Umgebung hydrologische Niederschlags-Abflussmodelle, die Hochwasserdämpfung in Abflussgerinnen, die Berücksichtigung von Wasserfassungen, Ableitungen und Regulierorganen, den

Hochwasserrückhalt in Speichern sowie den Beitrag von seitlichen Zuflüssen. Grundablass, Hochwasserentlastung, Turbinen und Pumpen sind wichtige Elemente, die im Routing System II auch modelliert werden können. Dieses Computerprogramm leistet einen willkommenen Beitrag für die Praxis, es ist leistungsfähig, einfach handhabbar und ausbaubar.

## 4.2 Kurzbeschreibung von Routing System II

Die numerische Simulation von Abflüssen in komplexen hydraulischen Systemen kann beträchtlich vereinfacht werden, indem die einzelnen Bestandteile durch hydraulische Funktionen charakterisiert werden. Grundsätzlich kann ein hydraulisches Netzwerk durch verschiedene Funktionen beschrieben werden, wie die Entstehung, der Transport, die Speicherung, die Aufteilung, die Zusammenführung und die Regulierung von Abflüssen.

Das Computerprogramm «Routing System» wurde zur Simulation der Entstehung und der Fortpflanzung von Hochwasserwellen in komplexen hydraulischen Systemen entwickelt, welche aus einer Kombination von Einzugsgebieten, Wasserefassungen, Stauanlagen, Triebwassersystemen und weiteren hydraulischen Bauwerken bestehen können. Alle Anlage-teile können grundsätzlich durch die elementaren hydraulischen Funktionen wie Ableitung, Rückhalt in Speichern oder Abfluss in Fliessgewässern im nachzubildenden Netzwerk beschrieben werden. Diese Funktionen, durch Symbole dargestellt, können frei in einem Bildschirmfenster zusammengefügt werden.

Die gesamtheitliche Betrachtung eines hydraulischen Systems ist in vielen Fällen unumgänglich. Routing System II erleichtert komplexe Analysen dank seiner graphischen Benutzeroberfläche und einer Programmarchitektur, welche ausserdem für weitere Neuentwicklungen des Anwenders vollkommen offen ist.

## 4.3 Das Benutzerhandbuch zu Routing System II

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Benutzerhandbuch Routing System II erstellt, um neue Anwender des Computerprogramms Routing System II möglichst rasch mit den Eigenschaften und der praktischen Benutzung des Programms vertraut zu machen.

## 5. Überprüfung der Plausibilität

In einer ersten Phase war es wichtig, die Nachvollziehbarkeit der Resultate abzu-

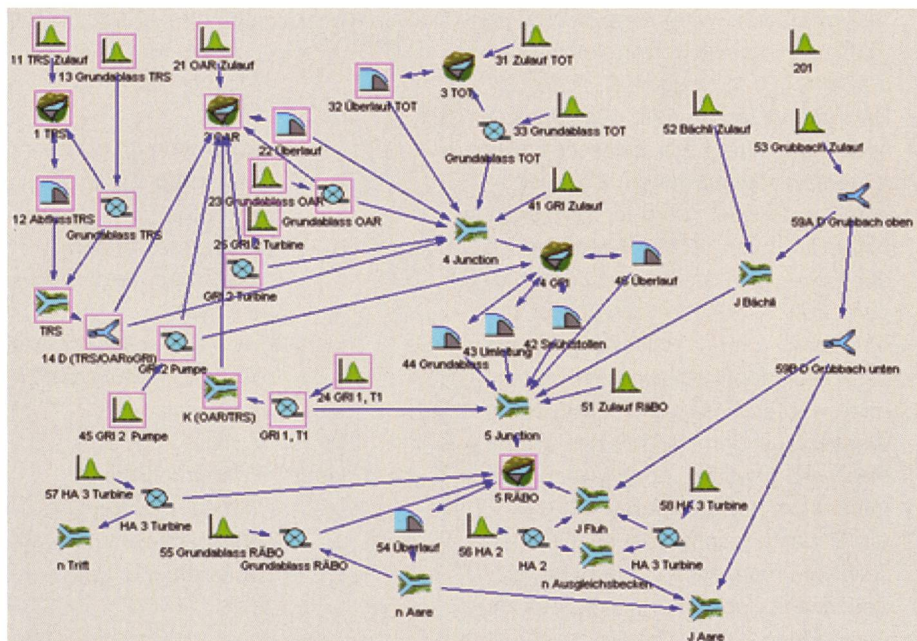


Bild 2. Basis-Modell für die Simulationsrechnungen mit  $Q_{20}$

klären. Zu diesem Zweck wurde ein vereinfachtes Anlagekonzept für den Grimselsee und den Rätichsbodensee modelliert. Mit neun Varianten wurden zwei verschiedene Situationen simuliert:

- Prüfung der Wasserspiegelschwankungen des Rätichsbodensees bei verschiedenen Wasserspiegeln zu Beginn der Berechnungen sowie
- Prüfung der Wasserspiegelschwankungen des Grimselsees bei verschiedenen Zuständen seiner Ablassorgane.

Die mittels Routing System II berechneten Wasserspiegel, Volumen, Zu- und Abfluss-Volumenströme usw. können aufgrund der Kontrollrechnungen und im Vergleich zwischen den einzelnen Varianten als plausibel betrachtet werden. Somit kann sinngemäss mit der Modellierung grösserer Systeme fortgefahren werden. Die Durchführung von Plausibilitätsüberprüfungen dienen nicht nur zur Kontrolle, sondern stellen einen Beitrag zur Vertiefung der Kenntnisse des Anwenders dar. Bei der Benützung von umfangreicheren Computerprogrammen ist die Durchführung von Plausibilitätsrechnungen sehr zu empfehlen.

## 6. Modelle, deren Abgrenzungen und spezifische Annahmen

### 6.1 Allgemeines

Im Rahmen der vorliegenden Diplomarbeit wurden die folgenden Situationen modelliert:

- Grimselsee während der Bauphase zur Erhöhung der Staumauern bei einem Hochwasserereignis von  $Q_{20}$ ;

- Grimselsee mit erhöhtem Stauziel und einem Zufluss von PMF;
- Gesamtes Einzugsgebiet des Grimselsees bis zu den Zentralen Handeck für beliebigen Zufluss.

### 6.2 Grimselsee während der Bauphase zur Erhöhung der Staumauern bei einem Hochwasserereignis von $Q_{20}$

#### 6.2.1 Ausgangslage

Hier handelt es sich um eine spezielle Situation. Die Bauarbeiten werden sich voraussichtlich über zirka vier Jahre erstrecken, was die Benutzung des Grimselsees für die Stromproduktion während einer Periode von fünf Kalenderjahren wesentlich einschränkt. Möglicherweise wird die Stromproduktion sogar zeitweise vollumfänglich verunmöglicht, weil nicht nur an den Sperren gearbeitet wird, sondern es sind auch grössere Aktivitäten im Seebecken vorgesehen.

#### 6.2.2 Modellabgrenzungen

Das Modell umfasst sowohl das gesamte Einzugsgebiet des Grimselsees als auch den Rätichsbodensee mit seinen natürlichen und künstlichen Abflüssen bis und mit Aare unmittelbar nach Handeck, siehe Bild 2. Anlagenteile, die während der ganzen Bauzeit nicht zum Einsatz vorgesehen sind, sind daher im Modell nicht berücksichtigt.

#### 6.2.3 Spezifische Annahmen

Folgende spezifischen Annahmen wurden getroffen:

- Zum Schutz der Baustelleninfrastruktur

tur vor Überschwemmung wurde die maximal zulässige Kote im Grimselsee auf 1872 m ü.M. festgelegt.

- Bei tiefem Wasserstand des Grimselsees und einem Hochwasser muss mit entsprechend hohem Sedimentsanteil gerechnet werden. Die Sedimente können sich bis in den Bereich der Fassungen ausbreiten und ablagern. Zum Schutz der Fassungen, der Transport- und Druckleitungen und der Maschinen (Turbinen und Pumpen) darf während solchen Ereignissen Wasser aus dem Grimselsee weder turbinert, gepumpt noch in den Gellmersee umgeleitet werden.
- Als Entlastungsorgane des Grimselsees kommen der Grundablass, der Spülstollen und der Umleitstollen zur Anwendung.
- Als maximaler Hochwasserfall für die Phase der Bauperiode ist für jedes Einzugsgebiet mit einem Hochwasser  $Q_{20}$ , welches einmal innert 20 Jahren eintritt, zu rechnen.

#### 6.2.4 Berechnung der Spitzenwerte für $Q_{20}$ und Erzeugung der $Q_{20}$ -Hydrogramme

Basierend auf dem Hydrogramm für ein 1000-jähriges Hochwasser  $Q_{1000}$  und den 21-jährigen Aufzeichnungen der täglichen Zuflussvolumen wurde nach dem Gesetz von Gumbel und einem Spitzenkoeffizienten  $c_p = 1,7$  ein Spitzenwert  $Q_{20, Spitze} = 100 \text{ m}^3/\text{s}$  für den Zufluss zum Grimselsee berechnet und gleichzeitig wurde das zugehörige Hydrogramm erzeugt, siehe Bilder 3 und 4.

$$F(Q) = \exp\left(-\exp\left(-\left(\frac{Q-a}{b}\right)\right)\right) \quad (1)$$

$$u = \frac{Q-a}{b} = -\ln(-\ln(F(Q))) \quad (2)$$

$$T = \frac{1}{1-F(Q)} \quad (3)$$

Mit		
a	[-]	Parameter für den Massstab, paramètre d'échelle
b	[-]	Parameter für den Massstab, paramètre d'échelle
F(Q)	[Jahr <sup>-1</sup> ]	Wahrscheinlichkeit des Nicht-Eintreffens des Ereignisses
Q	[m <sup>3</sup> /s]	Abfluss
T	[Jahr]	Wiederkehrdauer
u	[-]	Verkleinerungs-Variable nach Gumbel (variable réduite de Gumbel)

$$c_p = \frac{Q_{20, Spitze}}{Q_{20, Tagesdurchschnitt}} \quad (4)$$

mit

$c_p$	[-]	Spitzen-Koeffizient
$Q_{20, Spitze}$	[m <sup>3</sup> /s]	Abfluss, Spitzenwert eines 20-jährigen Hochwassers

Für die weiteren Zuflüsse, die im Modell zu berücksichtigen sind, erfolgten die Berechnungen in analoger Weise, siehe Bild 4.

#### 6.2.5 Abschätzung des Sedimenttransportes

Bei einem Hochwasser  $Q_{20}$  ist zusätzlich zum ermittelten Wert  $Q_{20}$  noch mit entsprechend erhöhtem Sedimenttransport zu rechnen. Durch Multiplikation von  $Q_{20}$  mit einem noch zu bestimmenden Faktor kann der totale Volumenstrom erzeugt werden. Über die Jahrzehnte lagerten sich die Se-

dimente auf dem Grund des Grimselsees ab, als Folge der geringen Strömungsgeschwindigkeiten im See. Bei abgesenktem Seebecken strömt ein Hochwasser direkt über diese Ablagerungen und reisst so viel Sediment mit, wie nicht durch die Schubkräfte zurückgehalten wird. Dabei frisst sich der Fluss ein neues Bett. Je tiefer das Seeniveau ist, umso näher bei der Talsperre findet dieser Vorgang sein Ende.

Somit stellt sich die Frage, wie gross der Anteil an Geschiebe ist und welche Konsequenzen dadurch zu erwarten sind. Nun gilt es, den Anteil des Geschiebes zu berechnen. Je nach Resultat ist zumindest ein Schätzwert zu bestimmen. Das Resultat oder der Schätzwert bilden die Basis für die Begründung von allfälligen Massnahmen.

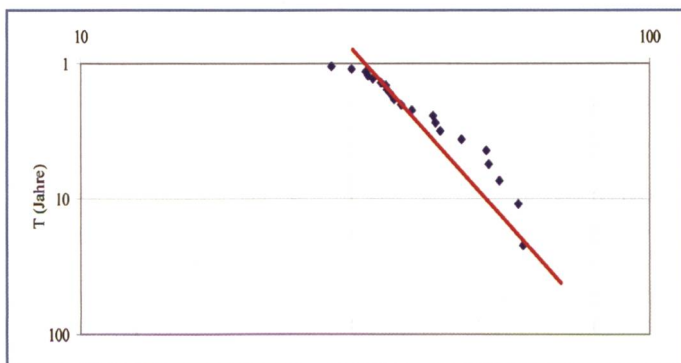
Es darf davon ausgegangen werden, dass im Bereich über 1800 m ü.M. kein Schwemmholz zu erwarten ist und daher nur der Sedimenttransport zu betrachten ist.

Für den Zufluss des Grimselsees wurde der Volumenstrom des Geschiebetransportes in Funktion der Flussneigung  $J_f$  (0,01 bis 0,08), der mittleren Korngrösse  $d$  (0,001 mm bis 0,5 m), der Flussbreite  $B$  (5 m bis 20 m) und des Strickler-Koeffizienten  $K_s$  (25 m<sup>1/3</sup>/s und 30 m<sup>1/3</sup>/s) berechnet. Abschätzungen für den gesamten Sedimenttransport wurden nach der Methode von Schoklitsch und der Methode von Ackers & White durchgeführt.

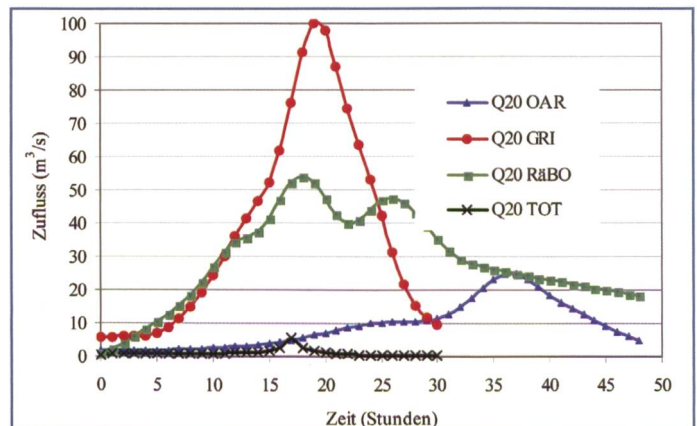
*Graphische Darstellung, Analyse und Kommentierung der Resultate nach Schoklitsch und Ackers & White*

Basierend auf den Berechnungsergebnissen können folgende Aussagen gemacht werden:

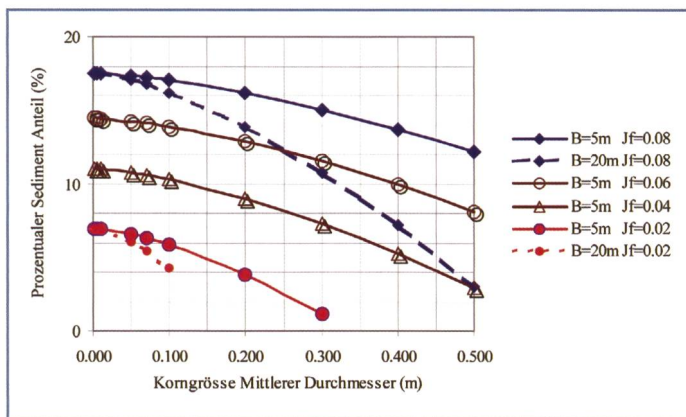
- Die Variation des Strickler-Koeffizienten  $K_s$  hat nur marginalen Einfluss auf das Geschiebevolumen.
- Die Variation der Flussbettbreite  $B$  hat



**Bild 3. Berechnung des Tagesmittelwertes  $Q_{20, Tagesmittelwert}$  durch Anwendung des Gesetzes von Gumbel auf eine Serie von maximalen Jahres-Tagesmittelwerten für den Zufluss des Grimselsees in der Periode 1980 bis 2001.**



**Bild 4.  $Q_{20}$ -Hydrogramme des Grimsel- (GRI), Oberaar- (OAR), Räterichsboden- (RÄBO) und Totensees (TOT)**



**Bild 5. Prozentualer Sedimentanteil von Korngrößen zwischen 0,001 m und 0,5 m, einer Flussbettbreite von 5 m und 20 m und in Funktion der Flussbettneigung  $J_f$ .**

nur einen geringen Einfluss auf das Geschiebevolumen, der Einfluss wird grösser und das Geschiebevolumen nimmt zu, je grösser die Korngrösse und je kleiner die Flussbettbreite ist.

- Markant variiert das Geschiebevolumen in Funktion der Flussneigung und der Korngrösse.
- Für feine Korngrößen (kleiner als 1 mm) erfolgt kein weiterer erkennbarer Anstieg des Geschiebevolumens.
- Die Methode nach Ackers & White erwies sich auch für die feinen Korngrößen und die kleinste Flussbettneigung von 0,01 als wenig geeignet, da die erforderliche Froudzahl, ( $Fr > 0,8$ ) für alle berechneten Varianten erheblich überschritten wurde.

In Bild 5 wird der prozentuale Anteil des Sedimenttransportes bei einem konstanten Strickler-Koeffizienten  $K_s = 30 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  in Abhängigkeit der mittleren Korngrösse zwischen 0,001 m und 0,5 mm, in Abhängigkeit der Flussneigung zwischen 2% und 8% und Flussbettbreiten von 20 m und 5 m graphisch dargestellt.

Basierend auf den vorgängigen Aussagen und aufgrund lückenhafter Angaben betreffend die mittleren Korngrößen  $d$  für das Gebiet des Grimselsees, wird für den Zufluss zum Grimsensee mit einem Sedimentanteil und Geschiebeanteil von 20% für den Fall  $Q_{20}$  gerechnet. Dieser Wert ist eher konservativ. Das Hydrogramm des Grimselsees (Bild 4) wird für die Simulationen für den Fall  $Q_{20}$  um 20% erhöht und erreicht so einen Spitzenwert von  $120 \text{ m}^3/\text{s}$ .

#### 6.2.6 Beschreibung der berechneten Varianten für ein Hochwasserereignis von $Q_{20}$

Bei der Auswahl und Definition der Varianten, die für den Fall  $Q_{20}$  berechnet wurden,

ging es darum, das mögliche Spektrum der Situationen, die im definierten System im ungünstigsten Fall eintreffen können auszuloten. Zusätzlich galt es eine Betriebsweise zur Minimierung der Spitze der in die Aare abgeleiteten Flutwelle zu finden. Dabei war zu beachten, dass der Wasserspiegel des Grimselsees die Kote von 1872 m ü.M. nie erreichen darf. Im Besonderen wurden Situationen überprüft, bei denen zum Beispiel einzelne oder mehrere Abflussorgane des Grimselsees versagten (Varianten 201–208). Wie an anderer Stelle bereits erwähnt sind keine Pumpen oder Turbinen in Betrieb (zum Schutz dieser Anlagekomponenten vor Erosionsschäden durch den erhöhten Anteil an Sedimenten). Die Varianten Nr. 201 bis Nr. 208 sollen das Verhalten aller Möglichkeiten, die durch die unterschiedlichen Zustände (offen / zu) der Ablassorgane denkbar sind, zeigen. Die Variante Nr. 212 dient für Aussagen für eine optimale Betriebsführung während eines Hochwasserereignisses. Bei dieser Variante wurde der Abflussvolumenstrom durch die Abflussorgane des Grimselsees in mehreren Schritten, ausgehend von der maximalen Leistung, bis auf Null reduziert. Beim Räterichsbodensee wurde der Grundablass nach 5,5 Stunden geschlossen. Die Anfangszustände sind für die einzelnen Varianten in Tabelle 1 zusammengestellt.

#### 6.3 Grimsensee mit erhöhtem Stauziel und einem Zufluss von PMF

Weiter wurde ein maximal denkbare Hochwasser PMF untersucht, und zwar zu einem Zeitpunkt nach Abschluss der Bauarbeiten der Erhöhung der Sperren des Grimselsees. Im Vergleich zum  $Q_{20}$ -Modell wurden für diesen Fall die Modellgrenzen entsprechend erweitert. Das bedeutet unter anderem, dass zusätzlich sowohl die Speisung des Grimselsees ab Bächli als

auch das System des Gelmersees integriert wurden. Für die Zuflüsse wurden die entsprechenden Hydrogramme der Situation PMF benutzt. Bei der Auswahl und Definition der Varianten, welche für den Fall PMF zu berechnen sind, ging es darum, sowohl das Verhalten der neuen Hochwasserentlastung auf der Seeuferegg-Sperre zu untersuchen, wie auch Informationen zum Verhalten der Wasserspiegel und der Abflussvolumen des Grimsel- und des Räterichsbodensees und des Volumenstromes in der Aare bei Handeck zu erhalten. Drei Zustände wurden simuliert. In der ersten Variante, Nr. 301, wurde angenommen, dass alle Speicherbecken zu Beginn bereits ihr Stauziel erreicht haben und die Abflüsse sowohl durch die ab Beginn geöffneten Abflussorgane strömen wie auch über die Hochwasserentlastungsorgane erfolgen können. In der zweiten Variante, Nr. 302, kann die Entlastung nur über die Hochwasserentlastungen erfolgen. In der dritten Variante, Nr. 303, galt es zu bestimmen, ab welchem Wasserspiegel die Speicherbecken in der Lage sind, alle zu strömenden Volumen zu speichern.

## 7. Resultate der Simulationsrechnungen

### 7.1 Resultate der Berechnungen für ein Hochwasser von $Q_{20}$ während der Bauzeit

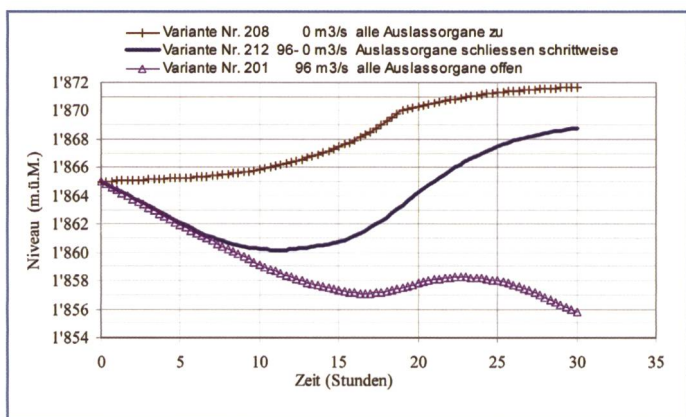
Die Resultate der Berechnungen wurden in Diagrammen für den Grimsensee, den Räterichsbodensee und die Aare bei Handeck dargestellt. Um einen gesamtheitlichen Überblick zu erhalten, wurden die Resultate der verschiedenen Varianten in Diagrammen zusammengefasst. Die Bilder 6 bis 8 stellen die wesentlichen Resultate dar. Sie werden im Folgenden kurz erläutert.

Bild 6 zeigt den Verlauf des Was-

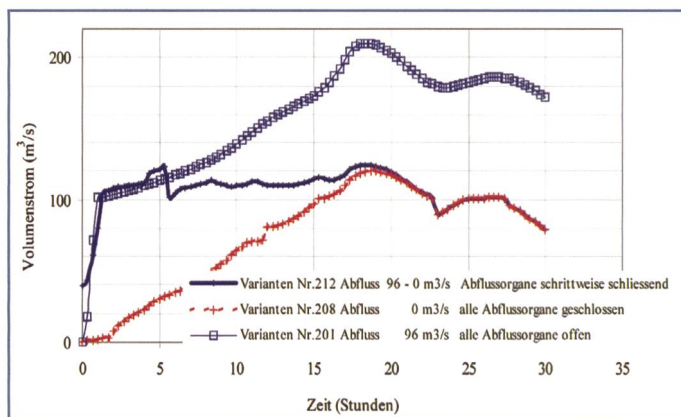
Variante	GRI Anfangs- Wasserspiegel m.ü.M.	RäBO Anfangs- Wasserspiegel m.ü.M.	GRI Spültollen	GRI Umleittollen	GRI Grundablass	RäBO Grundablass
201	1865	1767	offen	offen	offen	zu
202	1865	1767	zu	offen	offen	zu
203	1865	1767	zu	zu	offen	zu
204	1865	1767	offen	zu	offen	zu
205	1865	1767	offen	offen	zu	zu
206	1865	1767	zu	offen	zu	zu
207	1865	1767	offen	zu	zu	zu
208	1865	1767	zu	zu	zu	zu
212	1865	1767	Anfangs offen, später zu	Anfangs offen, später zu	Anfangs offen, später zu	Anfangs offen, später zu

**Tabelle 1. Anfangswerte für die Varianten Nr. 201 bis 208 und 212.**

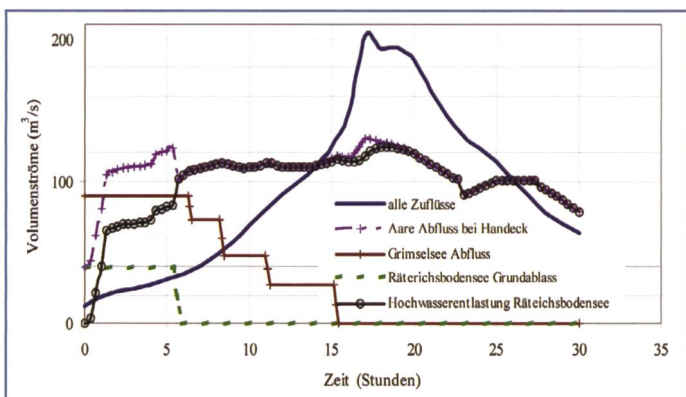
GRI Grimsensee  
RäBO Räterichsbodensee



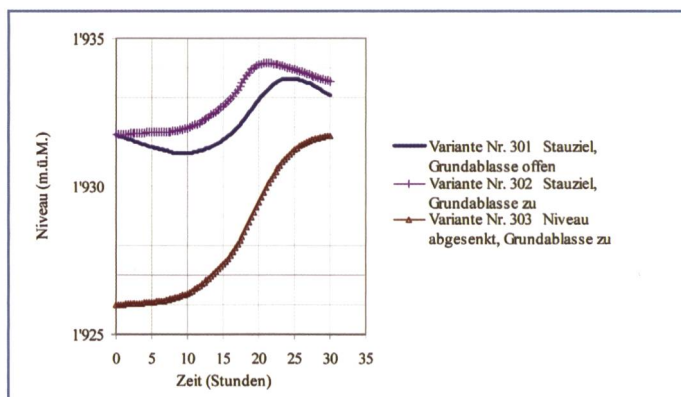
**Bild 6. Grimselsee, Wasserspiegelkurve für  $Q_{20}$  der Varianten Nr. 201, 208 und 212.**



**Bild 7. Abflussvolumenstrom für  $Q_{20}$  aus dem Räterichsbodensee, Vergleich der Varianten 201, 208 und 212.**



**Bild 8. Variante 212, Optimierte Betriebsführung bei  $Q_{20}$  zur Minimierung der Abflussmenge der Aare bei Handeck.**



**Bild 9. Grimselsee, Wasserspiegelverlauf bei PMF für die Varianten 301 bis 303.**

serspiegels im Grimselsee. Je grösser der abgeleitete Volumenstrom ist, umso tiefer ist der Wasserspiegel am Ende der Betrachtungsdauer. In der Erläuterung zu Bild 6 ist neben der Variantennummer auch die Abflussleistung vermerkt. Da die drei Abflussorgane stark unterschiedliche Leistungen aufweisen, sind die Resultate auch entsprechend unterschiedlich.

Bei der Variante 212 fällt der starke Anstieg nach 12 Stunden auf. Begründet wird dieser Effekt mit der Tatsache, dass die einzelnen Ablassorgane schrittweise geschlossen werden und ab 15,25 Stunden alle Organe geschlossen sind. Bild 8 zeigt unter anderem die Abflussleistung der Abflussorgane in Funktion der Zeit. Die Wasserspiegelkurve der Variante 212 zeigt, dass sich diese aufgrund des gewählten Betriebsverlaufes dafür eignet, um unmittelbar vor einem Hochwasser die Speicherreserven zu vergrössern, so dass die Spitze eines Hochwassers gebrochen werden kann, siehe Bild 6.

Die Simulationen zeigen: je grösser das Abflussvolumen des Grimselsees ist, umso grösser ist der Wasserspiegelanstieg des Räterichsbodensees und umso grösser ist die Abflussleistung der Aare bei Handeck.

Die Simulationsergebnisse der Va-

riante 212 erfordern eine vertiefte Erläuterung. Der anfänglich starke Anstieg des Abflussvolumenstromes aus dem Räterichsbodensee ist mit dem grossen Abflussvolumenstrom des Grimselsees begründet, alle drei Organe sind offen. Der Abfluss der Aare zeigt, dass das gestaffelte Schliessen der Ablassorgane, gemäss Variante 212 zu einem gleichmässigeren Abfluss führt. Die Summe aller Zuflüsse beträgt ca. 205 m<sup>3</sup>/s, und der maximale Abfluss der Variante 212 beträgt ca. 130 m<sup>3</sup>/s. Dieser Wert beträgt nur 2/3 des Wertes aller Zuflüsse. Wird berücksichtigt, dass dies bei vollem Räterichsbodensee und bei einem Anstieg des Grimselsee-Wasserspiegels um nur 3,5 m erreicht werden kann, so kann von einer markanten Dämpfung gesprochen werden.

Die Bilder 7 und 8 zeigen deutlich den Dämpfungseffekt der Variante 212. Es ist zu beachten, dass der Anstieg der Variante 208 nur durch die direkten Zuflüsse zum Räterichsbodensee erfolgt, da in dieser Variante kein Wasser vom Grimselsee abgeleitet wird. Also hat das anfängliche Ableiten vom Grimselsee zum Räterichsbodensee keine negativen Folgen und erhöht die verbleibende Abflussspitze nicht.

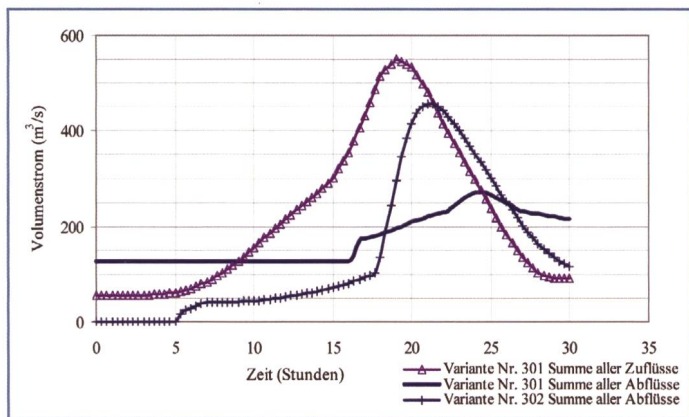
Die Variante 212 hat aus der Sicht

der Aare bei Handeck die gleichen Abflussspitzen zur Folge, wie wenn mit der Variante 208 gefahren würde. Der grosse Unterschied liegt darin, dass der Wasserspiegel des Grimselsees in Variante 212 nur um ca. 3,5 m steigt, im Gegensatz zu einem Anstieg von ca. 6,5 m bei der Variante 208.

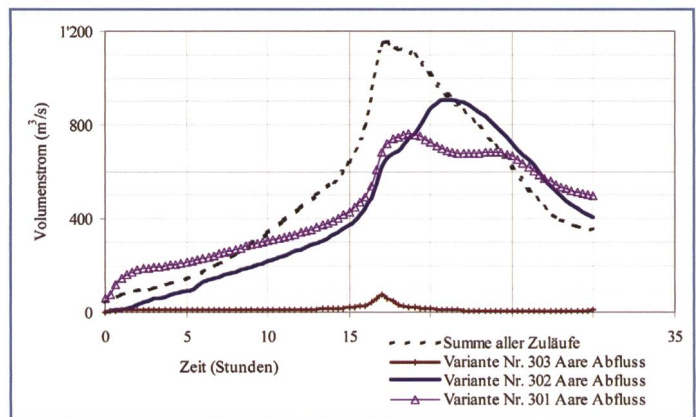
Bild 8 zeigt für die Variante 212 die Abflussvolumenströme der Abflussorgane des Grimsel- und des Räterichsbodensees, den Volumenstrom über die Hochwasserentlastung des Räterichsbodensees, die Summe aller Zuflüsse und den Volumenstrom der Aare bei Handeck in Funktion der Zeit. Die Figur zeigt auch hier den Dämpfungseffekt ganz deutlich.

## 7.2 Resultate der Berechnungen für ein Hochwasser von PMF nach der Erhöhung des Stauzieles des Grimselsees

Sowohl im Grimselsee wie auch im Räterichsbodensee wird der maximale Wasserspiegel in der Situation, bei der das Wasser nur über die Hochwasserentlastung abfliessen kann, erreicht und überschritten. Die Begründung liegt darin, dass ein Abfluss durch die Grundablassorgane eine entlastende Wirkung hat. Die unterschiedlichen Speicherkapazitäten der beiden



**Bild 10. Grimsensee, Volumenströme der Zu- und Abflüsse bei PMF für die Varianten 301 und 302.**



**Bild 11. Volumenströme des Totals der Zuläufe und der Abfluss der Aare bei Handeck bei PMF für die Varianten 301–303.**

betrachteten Speicherbecken kommen deutlich zum Ausdruck. Der Grimsensee hat, im Vergleich zum Räterichsbodensee, eine Speicherkapazität, die 6,7-mal grösser ist. Der Grimsensee ist in der Lage, mit einem Wasserspiegelanstieg von nur 5,7 m das gesamte anfallende Volumen aufzufangen. Im Räterichsbodensee erfolgt ein Wasserspiegelanstieg um 52 m für die vollständige Speicherung des zuströmenden Volumens. Bild 9 zeigt die Situation für den Grimsensee.

Bild 10 zeigt für die verschiedenen Varianten das Verhalten der abfliessenden Volumenströme zum und aus dem Grimsensee.

Der Volumenstrom vom Oberaarsee hat einen relativ geringen Einfluss auf das Total der Volumenströme. Durch das Offenhalten der Ablassorgane über die ganze Zeitperiode gelingt es, die Abflussspitze von 456 m³/s um über 40% auf 272 m³/s zu dämpfen. Nur bei entsprechender vorsorglicher Absenkung des Wasserspiegels wäre man in der Lage, das vollständig anfallende Volumen zu speichern um jeglichen Abfluss zu vermeiden, was sicher einen günstigen Einfluss auf das Verhalten des Räterichsbodensees hätte.

Nur bei entsprechender vorsorglicher Absenkung des Wasserspiegels des Grimselsees und des Räterichsbodensees wäre man in der Lage, das vollständig anfallende Volumen zu speichern, um jeglichen Abfluss zu vermeiden, was in der gesamten Bilanz der Aare von Nutzen sein könnte. Gemeint sind hier der Einfluss der Aare zwischen Meiringen und der Agglomeration Bern. Die erforderliche Absenkung des Räterichsbodensees würde über 50 m betragen, was als unrealistisch bezeichnet werden muss. Denkbar wäre eine Absenkung des Grimselsees, damit möglichst wenig Wasser zum Räterichsbodensee strömt und ein gleichzeitiges Entlasten des Räterichsbodensees mittels

seines Grundablasses.

Bild 11 zeigt die Abflussvolumenströme der Aare bei Handeck für die verschiedenen Varianten im Vergleich zu dem totalen zufließenden Volumenstrom. Deutlich erkennbar ist die Reduktion der maximal denkbaren Abflussspitze von 1097 m³/s um 31% auf 761 m³/s (Variante 301). Zusätzliche Dämpfung des Volumenstromes in der Aare bei Handeck kann durch Speicherung in vorgelagerten Speicherbecken erzielt werden. Bei einer vollständigen Rückhaltung des Hochwassers könnte der Volumenstrom praktisch vollständig eliminiert werden. Dies bedingt eine vorsorgliche Absenkung der Speicherbecken. Dies wurde vorgängig bereits erläutert.

## 8. Interpretation und empfohlene Massnahmen

Aus den Resultaten der Simulationsberechnungen leiten sich Empfehlungen zu Massnahmen ab, die aber drei grundsätzliche Anforderungen zu erfüllen haben:

- Verhinderung der Verstopfung von Abflussorganen;
- Schutz der Baustelle und ihrer Infrastruktureinrichtungen;
- Optimale Stromproduktion während der ganzen Periode.

Die Empfehlungen nachfolgend aufgelistet, sind:

- Festlegung des maximalen Stauziels in der Bauphase auf Kote 1865 m ü.M.
- Soweit wie möglich, soll der Betriebswasserspiegel innerhalb der Spannweite zwischen den Koten 1850 und 1865 m ü.M. pendeln, wobei der obere Bereich anzustreben ist.
- Ab Eintreten von erhöhtem Sedimentanteil muss jeglicher Turbinen- und/oder Pumpbetrieb ab Grimsensee und Räterichsbodensee eingestellt werden.
- Ab Eintreten von erhöhtem Sedimentanteil muss jegliche Speisung des Gel-

mersees ab dem Grimsensee unterbrochen bleiben.

- In Erwartung eines Hochwassers können folgende Betriebsarten gewählt werden:
  1. Wahl: Betrieb der Turbinen von GRI (vom Oberaarsee zum Grimsensee)
  2. Wahl: Betrieb der Turbine T1 von GRI 1 (vom Oberaarsee zum Räterichsbodensee).
- Vorsorgliche Absenkung des GRI Wasserspiegels zu Beginn eines Hochwassers auf ein Niveau von 1855–1860 m ü.M..
- Vorsorgliche Wasserspiegelerhöhung bei entleertem See, soweit die aktuelle Bauphase es zulässt.
- Bei Beginn eines Hochwassers sollen die Abflussorgane des Grimselsees degressiv in Betrieb sein.
- Es soll ein Alarmierungskonzept erstellt werden, darin ist den folgenden Themen ist besondere Beachtung zu schenken: meteorologische Vorhersage, zu erwartendes Hochwasser (Zeit und Volumenströme), Wasserspiegelschwankungen (Zeit und Höhen), erforderliche Massnahmen, Rückmeldungen, Meldestellen und Erfassung der betroffenen Personen.
- Vor Beginn der Arbeiten im 1. Jahr soll der Grimsensee im Bereich der Abflussorgane ausgebaggert werden, das Profil genau vermessen werden, und die Abflussorgane sind in ca. 5 m Höhe zu überdachen.
- Nach Abschluss der Arbeiten soll der Grimsensee im Bereich der Abflussorgane noch einmal ausgebaggert werden.
- Generell ist für jede Bauphase ein Stauziel zu definieren.
- Wahl einer Betriebsweise, die es ermöglicht, dass Reservevolumen rechtzeitig bereitgestellt werden können.
- Generell ist ein eingeschränkter Be-

trieb der direkt betroffenen Anlageteile möglich.

- Allgemeiner Betrieb nach Abschluss der Bauarbeiten.
- Sobald extrem grosse Hochwasser für die nächsten Tage zu erwarten sind, müssen umgehend angepasste Massnahmen, wie vorsorgliches Absenken des Wasserspiegels des Grimsel- und des Räterichsbodensees, zur Entlastung eingeleitet werden.

## 9. Weitere mögliche Schritte, offene Fragen

- Das Computerprogramm Routing System II weist einige kleinere Unvollkommenheiten auf, die bei einer Revision oder Ergänzung zu eliminieren sind, was entsprechende Ergänzungen im Benutzerhandbuch erforderlich macht.
- Je nach Bedürfnissen der KWO AG bedarf das Anlagemodell eine entsprechende Erweiterung betreffend seinen Systemgrenzen und Verfeinerungen auf dem Gebiet der Regulierung.
- Wünschbar wäre eine direkte Überlagerung von Daten der meteorologischen Vorhersage auf den aktuellen Zustand, um einen zeitverzugslosen optimaleren Betrieb berechnen zu können.
- Für die Berechnung der Wasserhöhe in Flussläufen in Funktion der Zeit ist das Computerprogramm Routing System II nicht vorgesehen. Dazu sind andere Programme geeignet, z.B. das HEC-RAS.

## 10. Schlussfolgerungen

Das Computerprogramm Routing System II hat sich für die notwendigen Berech-

nungen im Rahmen dieser Diplomarbeit für das äusserst komplexe Anlagensystem der KWO AG im Einzugsgebiet der Grimsel bis und mit Handeck bestens bewährt. Es gelang, die erforderlichen Situationen zu modellieren und aussagekräftige Resultate zu generieren. Das modellierte Anlagenschema ist in der Lage, für beliebige Betriebszustände Simulationsberechnungen durchzuführen. Mit geringem Aufwand können auch zukünftige Veränderungen modelliert werden. Dies gilt auch betreffend etwaigen Erweiterungen der Systemgrenzen, z.B. Mattentalp, Trift und Susten. Das erarbeitete Benutzerhandbuch ist eine Anleitung und ein Nachschlagewerk sowohl für neue Anwender als auch für bisherige Benutzer.

Die Simulationsrechnungen für ein Hochwasser von der Intensität  $Q_{20}$  zeigen, dass ein gering reduzierter Betrieb, der auf die Besonderheiten während der Periode der Erweiterungs- und Sanierungsarbeiten Rücksicht nimmt, möglich ist. Dabei ist besonders zu beachten, dass die pro Phase zu definierenden, maximalen Niveaus nicht überschritten werden dürfen und dass die in diesem Bericht vorgeschlagenen Empfehlungen und Massnahmen sinngemäss umgesetzt werden. So kann davon ausgegangen werden, dass während der Bauphase keine erhöhte Gefahr weder für die an den Bauarbeiten beteiligten Mitarbeiter noch für Dritte besteht.

Die Simulationsrechnungen für ein Hochwasser von der Intensität PMF zeigen, dass die Speicherbecken wesentlich zur Dämpfung der Abflussspitze beitragen und dass mit optimierter Betriebsführung frühzeitiges Öffnen der Abflussorgane eine weitere signifikante Dämpfung erzeugt werden kann.

## Literaturverzeichnis

- Blanckaert, K., 2004, Transport de sédiments et morphologie des cours, Sous-Module 5.2, Cours polycopié
- Dubois, J. & Boillat J.-L., 2000, Routing System – Modélisation du routage de crues dans des systèmes hydrauliques à surface libre, Communications No. 9, Laboratoire de constructions hydrauliques, LCH-EPFL, Lausanne
- Graf, W.H. & Altinakar, M.S., 2000 (deuxième édition corrigée), Hydraulique fluviale – Ecoulement et phénomènes de transport dans les canaux à géométrie simple. Traité de Génie Civil de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Volume 16, Presse Polytechniques et Universitaires Romandes
- Musy, A., 2003, Hydrologie Appliquée, Cours polycopier
- HEC-RAS 3.1 ist ein Programm der amerikanischen Armee für die Berechnung von Abflüssen in natürlichen Gewässern, [www.hec.usace.army.mil](http://www.hec.usace.army.mil)

Bei diesem Artikel handelt es sich um die Zusammenfassung der Diplomarbeit des Verfassers Carl-Arthur Eder, die er (unter der Begleitung der Herren Prof. Dr. Anton Schleiss, EPFL; Dr. Giovanni De Cesare, EPFL; Dr. Jérôme Dubois, EPFL, und Max Ursin, KWO, im Rahmen des Nachdiplomstudiums MAS in Hydraulischen Anlagen, Ausgabe 2003–2005, am Laboratoire de constructions hydrauliques LCH der EPFL in Lausanne durchgeführt hat.

## Anschrift des Verfassers:

Carl-Arthur Eder, Bundesamt für Energie  
Sektion Talsperren, Postfach, CH-3003 Bern  
[carl-arthur.eder@bfe.admin.ch](mailto:carl-arthur.eder@bfe.admin.ch)



HSR  
HOCHSCHULE FÜR TECHNIK  
RAPPERSWIL

MASCHINENTECHNIK

Institut für Anlagen- und Sicherheitstechnik  
Prof. Jürg Meier  
Oberseestrasse 10  
T ++41 (0)55 222 43 51  
F ++41 (0)55 222 43 59

SITEC  
[juerg.meier@hsr.ch](mailto:juerg.meier@hsr.ch)  
CH-8640 Rapperswil  
++41 (0)79 372 16 66  
[www.sitec.hsr.ch](http://www.sitec.hsr.ch)



Unsere Lösungen fliegen:  
Wir liefern: z.Bsp. patentierte Entsanderanlagen  
Wir leisten: unabhängig, auf dem Stand der Technik  
Wir bilden aus: praxisorientiert **MSE** MASTER OF SCIENCE IN ENGINEERING

Entwicklung Engineering Prüfingenieure **SITEC**

## NACHFOLGER GESUCHT

Unser Auftraggeber ist im Bereich Spezial-Tiefbau seit Jahren erfolgreich tätig. Er sucht durch uns einen Nachfolger bzw. einen Käufer für sein Unternehmen.

Es handelt sich um einen Kleinbetrieb mit 5 Angestellten, welcher von seinem Sitz in der Zentralschweiz aus in der ganzen Schweiz Auftraggeber resp. Kunden hat. Das Unternehmen hat sich in einem Nischenmarkt durch qualitativ hochstehende Dienstleistungen einen ausgezeichneten Ruf erworben.

Einem Fachmann aus der Baubranche oder Bau nahen Bereich ergibt sich eine ausgezeichnete Möglichkeit, sich unternehmerisch zu entfalten. Eine sorgfältige Übergabe des Know How und des Kundenstammes während einer begrenzten Zeit ist durch den Unternehmer gewährleistet.

Bei Interesse verlangen Sie bitte Unterlagen beim Beauftragten:

Züllig & Partner Treuhand AG, Bahnhofstrasse 9, 6340 Baar, Herr Erich Züllig.  
Tel. 041-769 60 70, Fax 041-769 60 75, E-Mail: [e.zuellig@zuellig-partner.ch](mailto:e.zuellig@zuellig-partner.ch)