

Technische Grundlagen zur Regulierung des**Vierwaldstättersees (ANHANG zum Wehrreglement)****1 Reguliervorschrift****1.1 Einleitung und Regulierkonzept**

Die neue Reguliervorschrift beschreibt eine eindeutige Beziehung zwischen Seestand und Reussabfluss und eignet sich für eine automatische Steuerung des Seitenwehres.

Die neue Reguliervorschrift basiert auf dem Konzept des Proportional-Integral-Differential-Reglers (PID-Regler), welches bei der Wasserstandsregulierung in Flusstauhaltungen verbreitet ist (Kühne 1975). Dieses allgemein gehaltene Reglerkonzept ermöglicht bei geeigneter Wahl der Parameter ein weitgehend natürliches Pegelregime des Sees innerhalb definierter Toleranzgrenzen. Der PID-Regler setzt sich aus drei Komponenten zusammen:

- (1) Der Proportionalanteil stellt das „statische Moment“ des Reglers dar und definiert eine funktionale (ev. saisonal geprägte) Beziehung zwischen Seestand und Reussabfluss.
- (2) Der Integralanteil bewirkt die mittel- und langfristige Einhaltung von definierten Toleranzgrenzen auch bei extremen Seezuflüssen. Er ermöglicht die Einhaltung von Mindestwasserständen und korrigiert länger anhaltende Seehochstände.
- (3) Der Differentialanteil ist dasjenige Element, welches direkt auf Änderungen im Seezufluss reagiert und damit eine schnelle Anpassung des Seeausflusses im Falle von Hochwasser ermöglicht.

Der am Wehr einzustellende Abfluss berechnet sich aus der Summe der Reglerkomponenten. Die Wahl der Reglerparameter wird im folgenden erläutert.

1.2 Proportionalanteil

Der Proportionalregler orientiert sich am unregulierten Seeausfluss. Bestimmungsgrösse für den Proportionalanteil ist der Abfluss über ein freies Wehr.¹ Die allgemeine Wehrformel nach Poleni (z.B. in Vischer und Huber 1993) lautet

$$Q = c_w b_w (z - z_w)^{3/2} \quad (1)$$

mit Q = Wehrabfluss, c_w = Wehrkoeffizient, b_w = Wehrbreite, z = Wasserspiegel im See und z_w = Höhe der Wehrkrone (Wehrkote). Der Wehrkoeffizient für ein breitt Kroniges Wehr beträgt $c_w = 1.70$.¹ Wehrbreite

¹ Dabei handelt es sich um ein fiktives Wehr, dessen Dimensionen aufgrund von Zielkriterien aus den Gebieten Hochwasserschutz, Naturschutz und Landschaftsschutz optimiert wurden. Die Reguliervorschrift für die Reusswehrranlage bildet den Abfluss über dieses fiktive Wehr nach.

b_w und Wehrkote z_w werden derart gewählt, dass die beobachteten, mittleren jährlichen Seestände durch die neue Regulierung nicht verändert werden (\rightarrow Zielbereich Vegetation See). Für einen mittleren Seeausfluss von $110 \text{ m}^3/\text{s}$ (LHG 1988) soll der Seestand bei 433.60 m ü. M. liegen. Mit der Gleichung (1) erhält man aus dieser Forderung eine eindeutige Beziehung zwischen Wehrbreite b_w und Wehrkote z_w .

Es gelten folgende Werte:

(1) Wehrbreite $b_w = 140 \text{ m}$

(2) zugehörige Wehrkote $z_w = 433.00 \text{ m ü. M.}$

Durch saisonale Variation der Wehrkote lassen sich die mittleren jahreszeitlichen Seestände beeinflussen.

Schneereiche Winter: Nach einem schneereichen Winter sind die Zuflüsse im Frühjahr während der Schneeschmelze erhöht und lassen den See ansteigen. Entsprechend sind auch die beobachteten Jahresmaxima der Seestände tendenziell höher. Um dies zu berücksichtigen, wird im Frühjahr die Wehrkote abgesenkt. Am 1. März wird die Schneehöhe bei der Station Trüebsee des Eidg. Institutes für Schnee- und Lawinenforschung (SLF) registriert. Je nach Schneehöhe wird die Wehrkote zur Berechnung des Proportionalanteiles bis am 1. Mai kontinuierlich abgesenkt, gemäss folgender Vorschrift

$$dz_w = \max(h_s - 1.0 \text{ m}, 0.0) \times 0.15 \quad (2)$$

mit $dz_w =$ Absenkung der Wehrkote am 1. Mai, $h_s =$ Schneehöhe der Station Trüebsee am 1. März sowie der Maximumfunktion

$$\max(a, b) = \begin{cases} a & \text{falls } a \geq b \\ b & \text{falls } a < b \end{cases}$$

Für Schneehöhen unter 1.0 m bleibt die Wehrkote unverändert. Für Schneehöhen grösser als 1.0 m erfolgt eine lineare Absenkung.²

Abflusserhöhung im Winter: In den Monaten November und Dezember stellt die Wasserführung in der Reuss für die laichenden Fische (Seeforelle) eine kritische Grösse dar. Auch in den übrigen Wintermonaten soll der Abfluss in der Reuss nicht unter ein Mindestmass fallen. Durch eine Anhebung der Wehrkote zwischen Sommer und Herbst um 0.1 m und anschliessender Absenkung kann der Abfluss in den Wintermonaten November bis Februar um $1.0 \text{ m}^3/\text{s}$ erhöht werden. Die Anhebung der Wehrkote erfolgt kontinuierlich gemäss nachstehender Abbildung.

¹ Der Wehrkoeffizient ist abhängig vom Wehrtyp (schmal- oder breitkronig). Für unsere Betrachtung ist diese Unterscheidung jedoch nicht von Belang.

² Beispiel: Für eine Schneehöhe von 3.0 m beträgt die Absenkung $dz_w = 0.3 \text{ m}$

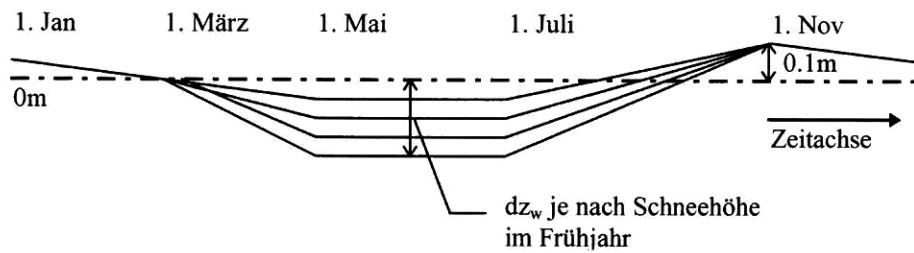


Abbildung 1 - Relative saisonale Absenkung und Anhebung der Wehrkote

1.3 Integralanteil

Der Integralregler vergleicht den aktuellen Seestand mit einem vorgegebenen Sollwert und verändert je nach festgestellter Abweichung den Wehrabfluss. Die Veränderung des Abflusses beträgt

$$Q_{I,neu} - Q_{I,alt} = k_I (z - z_{soll}) \Delta t \quad (3)$$

mit $Q_{I,neu}$ = Integralabfluss zum neuen Zeitpunkt, $Q_{I,alt}$ = Integralabfluss zum alten Zeitpunkt, z = Seestand, z_{soll} = Sollpegel, k_I = Integralfaktor und Δt = Zeitdifferenz zwischen neuem und altem Zeitpunkt. Die freien Parameter sind der Sollpegel z_{soll} , die Zeitdifferenz Δt und der Integralfaktor k_I .

An Stelle der Einhaltung eines festen Sollpegels ist ein möglichst natürliches Pegelregime erwünscht, das von den Seezufüssen geprägt wird. Innerhalb eines Toleranzbereiches soll sich der Seestand aufgrund der Proportionalregelung frei bewegen können. Der Toleranzbereich hat eine untere Grenze bei 433.45 m und eine obere Grenze bei 434.00 m. Diese beiden Werte definieren somit die Sollpegel z_{soll} . Fällt der Seestand unter resp. über diese Marken, wird der Integralregler aktiviert. Die Pegelabweichung wird dabei berechnet aus der Differenz des aktuellen Pegelstandes mit dem unter- bzw. überschrittenen Grenzpegel (siehe Abbildung unten).

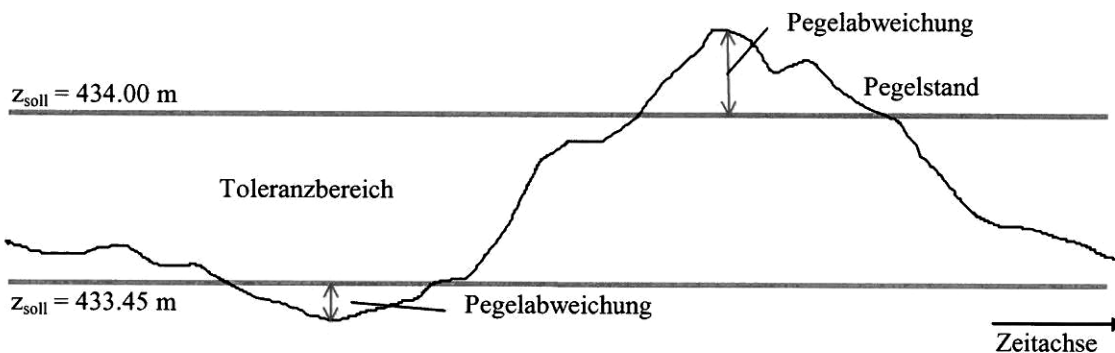


Abbildung 2 - Ermittlung der Pegelabweichung für den Integralregler

Für Pegelstände innerhalb des Toleranzbereiches wird der Integralanteil schrittweise auf Null reduziert mit der Vorschrift

$$Q_{I,neu} = Q_{I,alt} \times 0.67 \quad (4)$$

Die Zeitdifferenz des Reglers Δt beeinflusst die Reaktionszeit auf Änderungen im Seestand. Die Anpassung des Integralreglers erfolgt zweimal pro Tag.

Die Wahl von k_I wirkt sich proportional auf Änderungen im Seeabfluss aus. Grosse Werte von k_I führen zu einer schnelleren Anpassung des Seestandes, jedoch auch zu verstärkten Schwankungen im Reusabfluss.

Für den Integralfaktor k_I folgende Werte:

(1) $k_I = 2 \text{ m}^2/\text{s}$ pro Tag für Seepegel unter 433.45 m ü. M.

(2) $k_I = 4 \text{ m}^2/\text{s}$ pro Tag für Seepegel über 434.00 m ü. M.

1.4 Differentialanteil

Der Differentialregler erlaubt ein schnelles Reagieren auf Zuflussänderungen im Hochwasserfall. Er nutzt den Umstand, dass der Verlauf des Seestandes direkte Rückschlüsse auf das Verhältnis zwischen Seezufluss Q_z und Seeausfluss Q_a ermöglicht. Grundlage dazu bildet die Kontinuitätsgleichung

$$A z' = Q_z(t) - Q_a(t) \quad (5)$$

mit $A = \text{Seefläche (114 km}^2\text{)}$ und $z' = \text{Änderung des Seestandes pro Zeiteinheit}$. Der Differentialanteil des Reglers wird wie folgt berechnet

$$Q_{D,\text{neu}} - Q_{D,\text{alt}} = k_D (z'_{\text{neu}} - z'_{\text{alt}}) \quad (6)$$

mit z'_{neu} und $z'_{\text{alt}} = \text{Pegeländerung pro Zeiteinheit zum neuen resp. alten Zeitpunkt}$ und $k_D = \text{Differentialkoeffizient}$. Der Differentialkoeffizient hängt von der Seefläche ab und wird zu

$$k_D = A \times 0.8 \quad (7)$$

gewählt. Der Differentialregler vermag sehr rasch auf Änderungen im Seestand zu reagieren. Da dies nur bei hohen Seeständen erwünscht ist, wird der Differentialanteil des Reglers nur bei Seeständen über 434.00 m berücksichtigt.

1.5 Berücksichtigung von Hochwasser der Kleinen Emme

Mit einer Drosselung des Abflusses über das Reusswehr während Emmehochwasser kann der Reusabfluss ober- und unterhalb der Emmemündung vermindert und damit ein Beitrag zum Hochwasserschutz geleistet werden. Die Abflussdrosselung erfolgt durch Schliessen des Seitenwehres und des Kraftwerkes.

2 Abflussaufteilung

2.1 Wahl des Abflussorgans

Die Reguliervorschrift bestimmt in Funktion des Seestandes den Abfluss, welcher am Reusswehr realisiert werden soll. Der Abfluss am Reusswehr wird mit den folgenden Organen festgelegt:

- (1) Stirnwehr (Nadelwehr: Wehrkote 431.12 m, Breite variabel, max. 32 m)
- (2) Längswehr (Nadelwehr: Wehrkote 431.50 m, Breite variabel, max. 85 m)
- (3) Seitenwehr (hydraulisches Wehr, Wehrkote variabel, min. 428.0 m, Breite 12.5 m)
- (4) Turbinen Kraftwerk Mühleplatz (max. 58 m³/s)

Stirn- und Längswehr dienen zur Grobregelung. Seitenwehr und Kraftwerk dienen zur Feinregelung. Für das Öffnen und Schliessen des Wehres wird dasjenige Organ gewählt, welches die grösste Nutzverfügbarkeit aufweist. Die Nutzverfügbarkeit für ein Organ o_j unter verschiedenen Bedingungen kann aus folgender Beziehung bestimmt werden (Chapuis 1998)

$$\mu_{C_v}(o_j) = \prod_{i=1}^n \mu_{C_i}(o_j) + [1 - \mu_{C_i}(o_j)](1 - \alpha_i) \quad (10)$$

mit μ_{C_i} = Erfülltheitsgrad der Bedingung i , n = Anzahl von Bedingungen und α_i = Gewichtungsfaktor der Bedingung i .

2.2 Verfügbarkeit und Nebenbedingungen

Zur Ermittlung der Nutzverfügbarkeit werden folgende Bedingungen berücksichtigt:

Nr.	Kriterium	Wertebereich	Gewichtung
1	Verfügbarkeit	{0, 1}	1.0
2	Restwasser über das Stirnwehr	{0, 1}	1.0
3	Viel Abfluss über die Turbinen	{0, 1}	0.6
4	Wenig Manipulationen am Nadelwehr	{0, 1}	0.5
5	Wenig Abfluss über das Seitenwehr bei Wehrabflüssen unter 200 m ³ /s	{0 - 1}	0.4
6	Nadelwehrbedienung an Arbeitstagen	{0, 0.5, 1}	0.3
7	Wenig Abfluss über Nadelwehr im Zeitraum März - April	{0, 1}	0.3
8	Wenig Pegelsenkungen in der Reuss	{0, 1}	0.2
9	Geringe Abflussschwankungen in der Restwasserstrecke im Zeitraum März - Juni	{0, 1}	0.2

Die Verfügbarkeit eines Organs stellt ein hartes Kriterium dar (Gewichtung 1). Ein Organ ist entweder verfügbar ($\mu_{C_i} = 1$) oder nicht verfügbar ($\mu_{C_i} = 0$).

Die Verfügbarkeit für Öffnen und Schliessen wird durch folgende Bedingungen bestimmt:

<i>Organ</i>	<i>öffnen</i>	<i>schliessen</i>
Seitenwehr	Klappe nicht oben	Klappe nicht unten
Kraftwerk	Turbinen nicht vollständig geöffnet	Turbinen nicht geschlossen und Nadelwehr geschlossen
Stirnwehr	Stirnwehrradeln gesetzt und Seepegel < 433.8 m ü. M.	Stirnwehrradeln gezogen und Seepegel < 433.5 m ü. M.
Längswehr	Längswehrradeln gesetzt und Seepegel < 434.1 m ü. M.	Längswehrradeln gezogen und Seepegel < 434.0 m ü. M.

Die Einhaltung der Restwasserbestimmung (Regierungsrat Kt. Luzern 1995) stellt ebenfalls ein hartes Kriterium dar.

<i>Dotierwassermenge</i>	<i>Stellung Nadelwehr</i>	<i>Periode</i>
mind. 12 m ³ /s	Nadelwehr geschlossen (Leckwasser)	Oktober bis April
mind. 20 m ³ /s	Ein Fach teilweise geöffnet	Mai, August, September
mind. 35 m ³ /s	Mindestens 2 ½ Fächer geöffnet	Juni, Juli

Bei den übrigen Bedingungen handelt es sich um „weiche Kriterien“. Deren Einhaltung wird im Sinne einer optimalen Bedienung des Reusswehres angestrebt, kann jedoch nicht in jedem Fall garantiert werden. Die Zuweisung der Erfülltheitsgrade und der Gewichtung stellt deshalb ein Optimierungsproblem dar. Die angegebenen Werte sind als Richtwerte zu verstehen.

3 Quellen und Literatur

- Chapuis J. 1998. Modellierung und neues Konzept für die Regelung von Laufwasserkraftwerken. Diss. ETH Nr. 12765.
- Kühne A. 1975. Flusstaueregelung. Grundsätzliche Betrachtung mit systemtheoretischen Methoden. Mitteilung der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich, Nr. 13.
- Landeshydrologie und -geologie (LHG) 1988. Hochwasserabflüsse in schweizerischen Gewässern. Mitteilung Nr. 8, Bern.
- Regierungsrat des Kt. Luzern 1995. Wasserrechtswesen: Neubau Kraftwerk Mühlenplatz der Stadt Luzern, Konzessionsentscheid gemäss § 56 Wasserbaugesetz (WBG). Sitzung vom 24. November 1995, Protokoll-Nr. 3109.
- Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) 1998. Reusswehr Luzern. Hydraulische Modellversuche zur Erhöhung der Abflusskapazität des Reusswehres. Bericht Nr. 4107. Im Auftrag des Kantons Luzern, der Stadt Luzern und der anderen Uferkantone des Vierwaldstättersees.
- Vischer D., Huber A. 1993. Wasserbau. 5. Auflage. Springer, Berlin.
- ARGE aquaplus beffa bpp 2001. Regulierung Vierwaldstättersee, Zielformulierungen. Im Auftrag des TBA Kt. Luzern und der Stabstelle Wasserbau.