

Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 106 (2014)
Heft: 4

Artikel: Pumpspeicherkraftwerk Lagobianco : hydraulische Auslegung
Autor: Wickenhäuser, Martin / Hachem, Fadi / Ribero, Juliano
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-939757>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

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. [Voir Informations légales.](#)

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. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 17.05.2025

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

Pumpspeicherkraftwerk Lagobianco

Hydraulische Auslegung

Martin Wickenhäuser, Fadi Hachem, Juliano Ribero, Luciano Lardi

Zusammenfassung

Die Repower AG plant im Südosten der Schweiz das Pumpspeicherkraftwerk (PSKW) Lagobianco zwischen den beiden bestehenden Seen Lago Bianco und Lago di Poschiavo. Mit einer Bruttofallhöhe von etwa 1250 m, einem Turbinendurchfluss von 95 m³/s bzw. Pumpendurchfluss von 74 m³/s und damit einer installierten Gesamtleistung von 1050 MW stellt das Projekt in mehrfacher Hinsicht aussergewöhnliche technische Herausforderungen an die Planung.

Im vorliegenden Beitrag werden für die hydraulischen Hauptelemente des PSKW Lagobianco die angewandten Kriterien für die hydraulische Auslegung und Bemessung beschrieben. Zudem wird auf die orts- und projektbedingten Besonderheiten eingegangen.

1. Einleitung

Das PSKW Lagobianco nutzt das Gefälle zwischen den zwei vorhandenen Seen, dem Lago Bianco auf dem Berninapass und dem Lago di Poschiavo im Talboden. Der Lago Bianco, derzeit bereits durch zwei Staumauern abgeschlossen, soll der Anlage als Oberbecken dienen; nach Erhöhung des Stauspiegels um 4.35 m beträgt der maximale Betriebsspiegel neu 2239.00 m ü.M., das Senkziel verbleibt wie bisher bei 2207.00 m ü.M. Das Unterbecken bildet der Lago di Poschiavo, der zwischen 961.50 m ü.M. und 954.00 m ü.M. bewirtschaftet werden soll.

Die hydraulischen Hauptelemente des PSKW Lagobianco sind in Bild 1 dargestellt. Sie umfassen, neben dem oberen und unteren Speicher, als wesentli-

che Komponenten oberwasserseitig das Ein- und Auslaufbauwerk im Lago Bianco, einen etwa 18.1 km langen Druckstollen, ein oberwasserseitiges Wasserschloss, einen ca. 2.4 km langen, geneigten und gepanzerten Druckschacht sowie die Verteilrohrleitungen zu den 6 Maschinensätzen in der Kavernenzentrale; unterwasserseitig die Verteilrohrleitungen, das in Halbwerte aufgeteilte Unterwassersystem (UW-System) mit zwei UW-Stollen und entsprechenden Wasserschlossern sowie zwei Ein- und Auslaufbauwerke am Lago di Poschiavo. Die Zentrale ist als Kavernenkraftwerk mit Maschinen- und Transformatorenkaverne sowie verschiedenen Zufahrts- und Zugangsstollen vorgesehen. Mit einem Turbinendurchfluss von $Q_{T,max} = 95 \text{ m}^3/\text{s}$ ($6 \times 15.8 \text{ m}^3/\text{s}$) bzw.

einem Pumpendurchfluss von $Q_{P,max} = 74 \text{ m}^3/\text{s}$ ($6 \times 12.3 \text{ m}^3/\text{s}$) und einer Bruttofallhöhe von etwa 1250 m beträgt die installierte Gesamtleistung 1050 MW. Zusätzlich wird Wasser bei den zwei neu geplanten Wasserfassungen Palü und Cancian gefasst und über einen Vertikalschacht (Innendurchmesser 1.5 m) bzw. über eine Grossschrägbohrung in den Druckstollen eingeleitet.

Hintergrund des PSKW Lagobianco und weiterführende technische Angaben sind in Peyer et al. (2013) und Hachem und Wickenhäuser (2013) beschrieben.

Nachfolgend werden die hydraulischen Hauptelemente des PSKW Lagobianco generell beschrieben. Für jedes Hauptelement werden die jeweils zu berücksichtigenden Randbedingungen aufgeführt, die angewandten Entwurfskriterien und weitere relevante Aspekte beschrieben sowie orts- und projektbedingte Besonderheiten kommentiert. Auf spezielle Eigenheiten der verschiedenen Bauwerke wird ebenfalls eingegangen.

2. Betrachtete Hauptelemente des geplanten PSKW

2.1 Ein- und Auslaufbauwerk Lago Bianco

Das Ein- und Auslaufbauwerk Lago Bianco (EAB LB) befindet sich im Nordteil des Lago Bianco unweit des Cambrena-Deltas und schliesst über einen Zulaufkanal an den tiefsten Teil des Sees an. Die Wahl der Lage des EAB LB wird einerseits durch die erforderliche Tiefe (kein Luft-einzug bei Betrieb mit tiefem Seestand), andererseits durch den Verlauf des Felsuntergrundes (problemlose Fundationsverhältnisse) sowie durch die angestrebte Nähe zum Zugangsstollen beim Cambrena-Delta bestimmt. Das EAB LB dient im Turbinenbetrieb als Einlaufbauwerk und im Pumpbetrieb als Auslaufbauwerk des Triebwassersystems und wurde für beide hydraulischen Betriebsarten entworfen und optimiert, denn die Bemessung eines

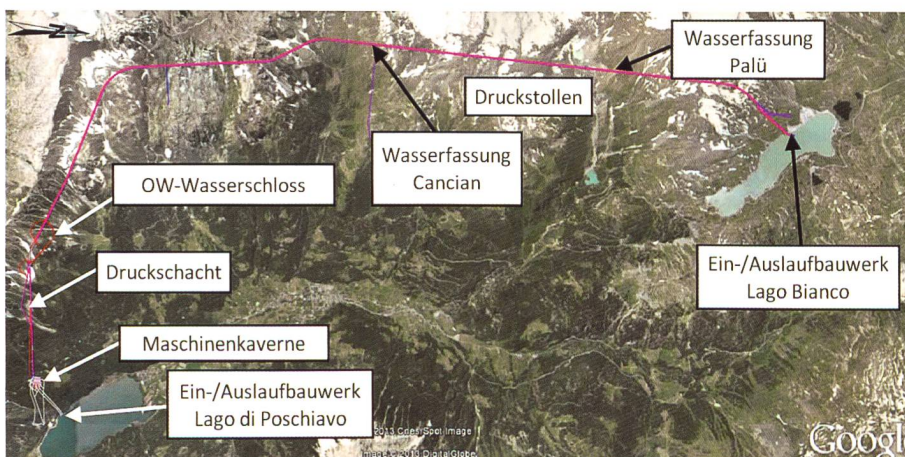


Bild 1. Die hydraulischen Hauptelemente des PSKW Lagobianco.

Ein- und Auslaufbauwerks unterscheidet sich grundlegend von der eines einfachen Einlauf- oder Auslaufbauwerks. Für den Entwurf des Ein- und Auslaufbauwerks sind im Wesentlichen massgebend:

- die Lage und Ausrichtung des EAB im See,
- die Strömungsgeschwindigkeit im Zu- und Ausströmungskanal (kein Feinmaterialeintrag),
- die Überdeckungshöhe (kein Lufteintrag),
- die Strömungsgeschwindigkeit in der Rechenebene (Minimierung der Druckverluste),
- optimale hydraulische Bauwerksgeometrie mit homogen über den Querschnitt verteilten Zu- und Ausströmungsverhältnissen (Minimierung der Druckverluste).

Die grossräumigen Strömungsverhältnisse im Lago Bianco wurden, in Abhängigkeit der Lage wie auch der Ausrichtung des Bauwerks, in einem numerischen 3D-Programm (Flow 3D) modelliert. Der kritische Lastfall ist dabei der minimale Seestand, da sich hier die Bathymetrie am stärksten auf die Strömungsprozesse auswirkt.

Die übergeordneten Anforderungen sind dabei: a) symmetrische Zu- und Abströmungsverhältnisse, b) geringe hydrodynamische Beanspruchung des Seebodens und der Uferzonen im Pumpbetrieb und c) stabile Strömungsverhältnisse über die Zeit.

Die Ergebnisse der Simulation zeigen die zeitliche Entwicklung der lokalen und grossräumigen Strömungsverhältnisse. Bild 4 zeigt beispielhaft die absoluten Strömungsgeschwindigkeiten rund zwei Stunden nach Pumpenstart für zwei unterschiedliche Ausrichtungen der Achse des EAB LB. Die maximalen grossräumigen Wassergeschwindigkeiten, insbesondere in den Uferbereichen, liegen bei optimaler Position und Ausrichtung in der Grössenordnung von 0.3 m/s. Dadurch bleibt die hydrodynamische Belastung auf die Uferbereiche gering.

Ebenso zeigt sich eine stabile, symmetrische Zuströmung im Zulaufkanal im Turbinenbetrieb. Die Geschwindigkeiten im Zulaufkanal sind gering und liegen in der Grössenordnung von 0.25 m/s.

Im Gegensatz zu Wasserfassungen mit reinem Turbinenbetrieb wirkt das Bauwerk im Pumpbetrieb hydraulisch wie ein Diffusor. Der Entwurf hat dabei zum Ziel, Strömungsinstabilität im Bauwerk, d.h. Zonen mit Ablösungen oder Rückströmungen, zu vermeiden.

Die geometrischen Hauptparameter sind der Öffnungswinkel 2θ , die Bauwerkslänge sowie die Öffnungshöhen am Anfang und am Ende des Verzugs. Dabei gibt der Kennwert der Druckrückgewinnung KD die Wirksamkeit des Diffusors an. Das genaue Vorgehen der Entwicklung der Bauwerksgeometrie ist in Renau et al. (1967), Deniz et al. (1990) und Blevins (1984) dargestellt.

Zudem muss eine minimale Überdeckungshöhe gewährleistet werden, um lufteinziehende Einlaufwirbel zu vermeiden. Die minimale Überdeckungshöhe, z.B. nach Hecker (1987), wird dabei entlang des Einlaufbauwerks für diskrete Querschnitte in Längsrichtung der Fassung nachgewiesen. Die maximalen Geschwindigkeiten treten in der Rechenebene mit $v=1.0$ m/s auf. Dies führt zu

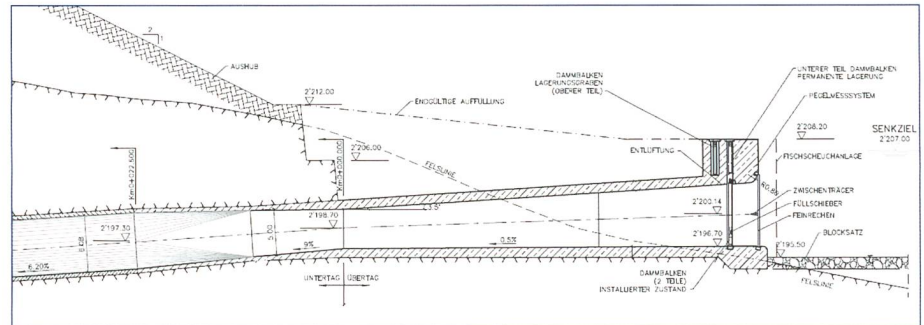


Bild 2. Längsschnitt des Ein- und Auslaufbauwerks Lago Bianco.

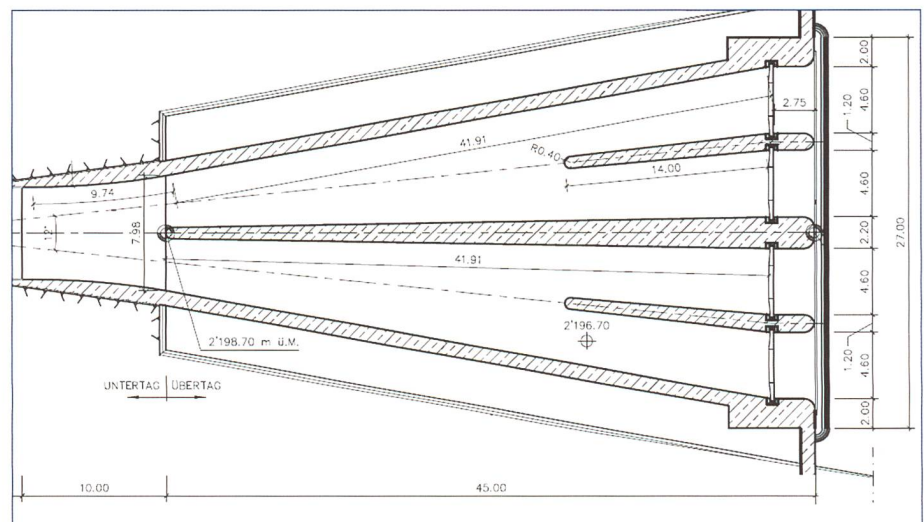


Bild 3. Situation des Ein- und Auslaufbauwerks Lago Bianco.

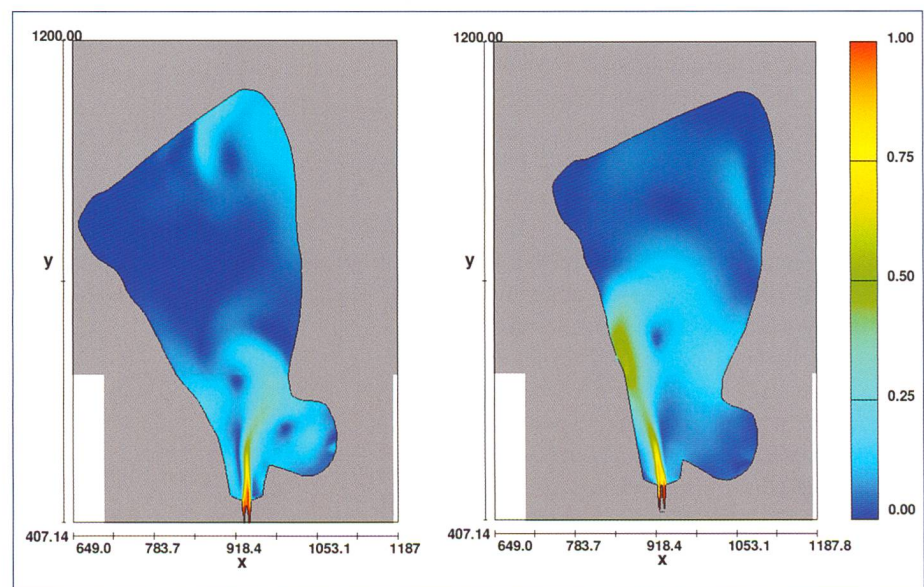


Bild 4. Numerische Simulation (FLOW 3D) der Strömungsverhältnisse beim EAB LB im Pumpbetrieb (angegebene Geschwindigkeiten in m/s) in Abhängigkeit der Ausrichtung des Bauwerks.

sehr geringen Einlauf-Froudezahlen von weniger als $Fr=0.15$. Gemäss Möller (2013) ist die Auftretenswahrscheinlichkeit von lufteinziehenden Wirbeln bei diesen tiefen Einlauf-Froudezahlen äusserst gering. Schliesslich wirkt sich die günstige Disposition des symmetrischen Zulaufkanals bei niedrigem Seespiegel positiv aus.

2.2 Das Oberwasser-Triebwassersystem

2.2.1 Durchmesseroptimierung des OW-Triebwasserwegs

Hauptaufgabe der Optimierung der Gesamtanlage ist die Durchmesseroptimierung des gesamten Triebwasserwegs. Die Optimierung erfolgt dabei am Gesamtsystem mit dem Ziel a) der Bestimmung der optimalen installierten Gesamtleistung und der optimalen Druckstollen- und Druckschachtdurchmesser unter Berücksichtigung der Investitionskosten und b) der Bestimmung der günstigsten horizontalen und vertikalen Linienführung des Druckschachts unter Berücksichtigung der geologischen Verhältnisse und des Ausführungs- und Zugangskonzeptes. Dazu wurden zunächst auf der gesamten Länge konstante Innendurchmesser für den Druckstollen (unter Betrachtung verschiedener Ausbauarten und damit Reibungskoeffizienten) und den Druckschacht angenommen. Die optimalen Innendurchmesser ergaben sich beim betonausgekleideten Druckstollen zu $D = 6.3\text{ m}$ und für den stahlgepanzten Druckschacht zu $D = 4.0\text{ m}$. Im Anschluss wurde eine optimierte Durchmesserabstufung des Druckstollens und des Druckschachts hinsichtlich bautechnischer Aspekte und Baukosten durchgeführt. Dies führte beim Druckstollen zu einem Innendurchmesser von $D = 6.4\text{ m}$ und beim Druckschacht zu einer schrittweisen Durchmesserabstufung von oben nach unten von 4.2 bis 3.8 m . Die max. Wassergeschwindigkeit beträgt ca. 3.0 m/s im Druckstollen, zwischen 6.9 und 8.0 m/s im Druckschacht und 8.0 m/s in der Oberwasser-Verteilrohrleitung (OW-Verteilrohrleitung) bei maximaler Turbinenleistung, bzw. 2.3 m/s im Druckstollen, zwischen 5.3 und 6.5 m/s im Druckschacht und 6.5 m/s bei maximaler Pumpenleistung in der OW-Verteilrohrleitung. Der Gesamtdruckverlust beträgt dabei 3.7% (46.6 m) der Auslegungsbruttotoffallhöhe von 1260 m Wassersäule (m WS) bzw. 2.4% (30.5 m) der Auslegungsbruttotofförderhöhe von 1269 m WS.

Der mittlere Zykluswirkungsgrad der Anlage (BFE, 2008) über eine Jahres-

produktion liegt zwischen 75% und 79% unter Berücksichtigung des Wirkungsgrades der Triebwasserwege, aller elektrotechnischer Komponenten sowie der Eigenbedarfsversorgung.

2.2.2 Bemessungslastfälle und verwendete Software

Grundlage der statischen Bemessung der Wasserwege hinsichtlich maximalem und minimalem Innendruck ist die Erarbeitung der massgebenden hydrostatischen und dynamischen Betriebslastfälle (Transienten). Diese umfassen den stationären und instationären Turbinen- und Pumpenbetrieb, insbesondere kombinierte Lastfälle (Betriebswechsel). Zudem müssen die Aussendruckverhältnisse, hervorgerufen durch den Bergwasserspiegel, mitberücksichtigt werden. Die Lastfälle werden eingestuft in ordentliche, ausserordentliche und extreme Lastfälle. Dabei wird der zeitliche Verlauf der dynamischen Druckverhältnisse im gesamten Wasserweg betrachtet.

Die Berechnungen wurden mit folgenden Stellzeiten, unter Berücksichtigung eines hydraulischen Wandlers, durchgeführt:

- Turbinendüsen
Öffnungszeit 20 s (linear)
- Turbinendüsen Schliesszeit (Schnellschluss) 20 s (linear)
- Pumpenkugelschieber
Öffnungszeit 20 s (linear)
- Pumpenkugelschieber
Schliesszeit 20 s (linear) und 25 s (gestuft)
- Volllast Turbinenbetrieb bis Volllast Pumpenbetrieb 50 s (linear)
- Volllast Pumpenbetrieb bis Volllast Turbinenbetrieb 45 s (gestuft)

Die Berechnungen der Transienten des OW-Systems wurden mit der Software Hytran V3.7.6 (<http://www.hytran.net/>) und SIMSEN (<http://www.simsen.epfl.ch>), die des UW-Systems mit der Software SUDUE (Eigenentwicklung von Lahmeyer International) durchgeführt.

Im Rahmen der Erarbeitung des Bauprojekts wurde ein «Technischer Dialog» mit Herstellern von hydraulischen Maschinen geführt. Das Ziel dieses Technischen Dialogs bestand darin, relevante Aspekte mit massgeblichem Einfluss auf den Gesamtentwurf im Vorfeld aufzuzeigen, abzustimmen und deren Anwendung im Entwurf der Anlage zu klären. Unter anderem sollte abgeklärt werden, ob hinsichtlich der Auslegung der Wasserschlösser und hinsichtlich der dynamischen Druckverhältnisse grundlegende Probleme erkannt werden. Dabei wurden sowohl die Transientenrechnungen des OW- als auch des UW-Triebwassersystems mit Vergleichsrechnungen plausibilisiert.

2.2.3 Vertikale Linienführung des Druckstollens

Hinsichtlich der Wahl der vertikalen Linienführung kommt, neben den Aspekten Geologie, Entwässerungskonzept, Höhenlage der Zugangsstollen oder Bauausführung, den transienten Verhältnissen eine besondere Bedeutung zu. Massgebende Parameter sind dabei: a) der Durchmesser des vertikalen Verbindungsschachtes des Druckstollen-Wasserschlosses und dessen Drossel bei der Abzweigung, b) der Durchmesser des vertikalen Fallschachtes beziehungsweise der Schräggrossbohrung der Zwischenwasserfassung Palü und Cancian, c) die Länge und der Durchmesser der horizontalen Verbin-

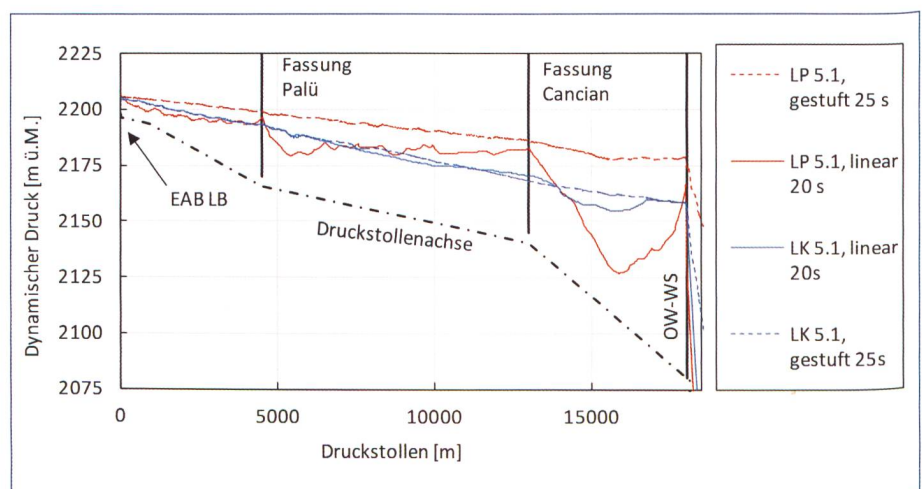


Bild 5. Minimaler Druckverlauf im Druckstollen bei Lastfall LP 5.1 Lastabwurf aus Volllast Pumpenbetrieb bei Senkziel LB (ordentlicher Lastfall) und LK 5.1 Anfahren auf Volllast Pumpenbetrieb mit Betriebswechsel auf Volllast Turbinenbetrieb zum ungünstigsten Zeitpunkt bei Senkziel LB (ausserordentlicher Lastfall).

dungsstollen zwischen Druckstollen und den Verbindungen der Zwischenfassungen und schliesslich d) die minimal und maximal zulässigen dynamischen Druckverhältnisse im Druckstollen.

Etwaige, über die Zwischenfassungen Palü und Cancian eingetragene Luft wird in den horizontalen Verbindungsstollen durch bauliche Entlüftungseinrichtungen (*Wickenhäuser* und *Minor*, 2008) aufgefangen und ausgetragen, bevor sie in den Druckstollen gelangt.

2.2.4 Druckverlauf im Druckstollen

Seitens Planer und Bauherr wurde gemeinsam entschieden, dass der Druck bei ordentlichen Lastfällen nicht unter 10 m WS bzw. nicht unter 0 m WS bei ausserordentlichen Fällen sinken darf. Zudem darf

es zu keinem Auslaufen bzw. Überlaufen der Verbindungen der Wasserfassungen kommen.

Der minimale, dynamische Druckverlauf im Druckstollen ist beispielhaft für den Lastfall «Lastabwurf aus Volllast Pumpenbetrieb» sowie «Anfahren auf Volllast Pumpenbetrieb mit Betriebswechsel auf Volllast Turbinenbetrieb zum ungünstigsten Zeitpunkt bei Senkziel LB» in *Bild 5* dargestellt. Im Nahbereich des EAB LB kann der definierte Minimaldruck aufgrund der Höhenlage des EAB LB nicht für alle ordentlichen Lastfälle eingehalten werden. Aufgrund der geringen Eintrittswahrscheinlichkeit der Lastfälle bei minimalem Seespiegel wird hier ein minimaler Druck von 7–5 m WS akzeptiert. Der maximale Druckverlauf im Druckstol-

len für die Lastfälle «Lastabwurf aus Volllast Pumpenbetrieb bei Stauziel LB» und «Anfahren auf Volllast Turbinenbetrieb mit Betriebswechsel auf Volllast Pumpenbetrieb mit Lastabwurf bei Stauziel LB» ist in *Bild 6* dargestellt. Bei einem linearen Schliessgesetz der Pumpenkugelschieber von 20 s (theoretisches Schliessgesetz) sind die Lastfälle mit Lastabwurf der Pumpen massgebend für den maximalen Druckanstieg im Druckschacht und Druckstollen.

Deutlich wird der massgebende Einfluss des Schliessgesetzes der Pumpenkugelschieber auf den dynamischen Druck beim Vergleich der roten Kurve mit einer Schliesszeit von 20 s linear und der blauen Kurve mit einer gestuften Schliesszeit in 25 s. Zudem zeigt sich der deutliche Einfluss der Zwischenfassungen. Diese wirken hydraulisch als Zwischenwasserschlosser, bei denen ein Teil der Druckwelle reflektiert wird.

Bei den dynamischen Drücken muss zwischen den hochfrequenten und den niederfrequenten Druckschwankungen unterschieden werden. In *Bild 7* sind die hochfrequenten Druckschwankungen sowie die quasistationären Druckschwankungen im Druckstollen am Anschluss des Verbindungsstollens zur Wasserfassung Cancian über die Zeit, beispielhaft für einen ausserordentlichen Lastfall, aufgezeigt.

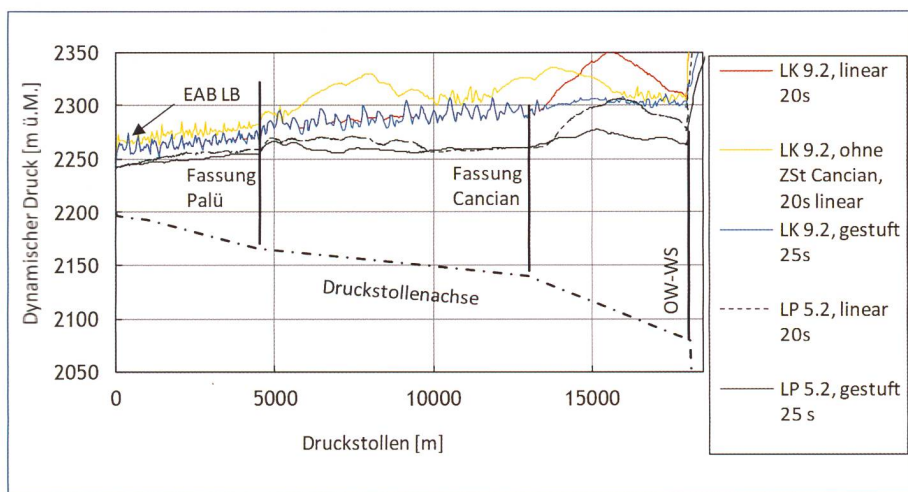


Bild 6. Maximaler Druckverlauf im Druckstollen bei Lastfall LP 5.2 Lastabwurf aus Volllast Pumpenbetrieb bei Stauziel LB (Ordentlicher Lastfall) und LK 9.2. Betriebswechsel auf Volllast Pumpenbetrieb mit Lastabwurf bei Stauziel LB (Ausserordentlicher Lastfall).

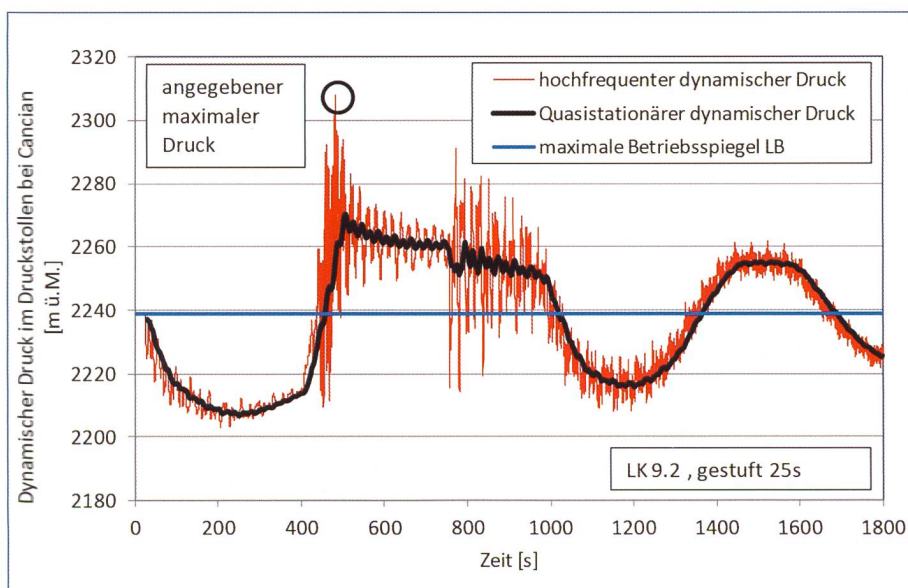


Bild 7. Hochfrequente Druckschwankungen sowie quasistationäre Druckschwankungen im Druckstollen am Anschluss zur Wasserfassung Cancian für Lastfall LK 9.2. (Betriebswechsel auf Volllast Pumpenbetrieb mit anschliessendem Lastabwurf bei Stauziel LB, ausserordentlicher Lastfall).

2.2.5 Druckschacht und OW-Verteilrohrleitung

Der maximale dynamische Innendruck ist neben dem Aussenwasserdruck massgebend für die Bemessung der Druckschachtpanzerung. Daher kommt den Berechnungsannahmen wie Stellzeiten, Maschinencharakteristika, Kennlinien der Kugelschieber usw. eine besondere Bedeutung zu.

Bild 8 zeigt den Druckverlauf im Druckschacht in Abhängigkeit des Schliessgesetzes der Pumpenkugelschieber für die massgebenden Lastfälle «Lastabwurf aus Volllast Pumpenbetrieb bei Stauziel LB» und «Betriebswechsel auf Volllast Pumpenbetrieb mit Lastabwurf bei Stauziel LB». Der dynamische Druckanstieg ergibt sich zu 18% bezogen auf den maximalen Ruhe- (oder «statischer Druck»). Im Rahmen des Ausführungsprojekts werden die definitiven Stellzeiten, Maschinencharakteristika und Kennlinien der Pumpenkugelschieber aufeinander abgestimmt und optimiert. Dabei wird davon ausgegangen, dass der dynamische Druckanstieg für alle Lastfälle auf rund 15% begrenzt werden kann.

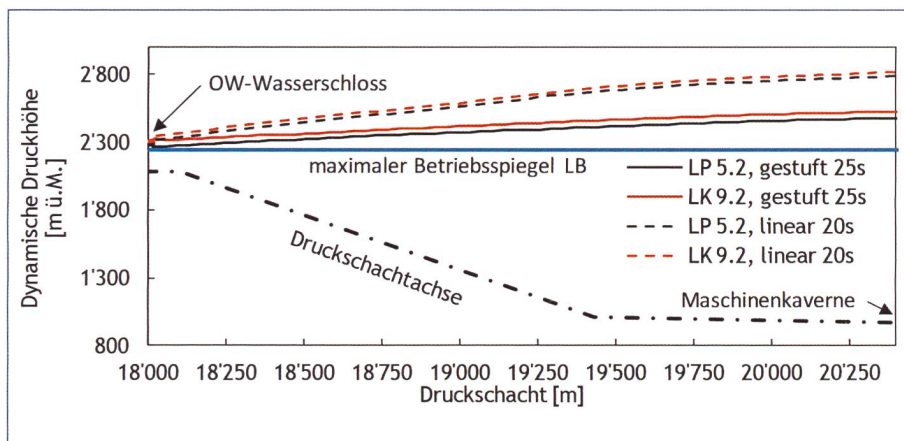


Bild 8. Druckverlauf im Druckschacht in Abhängigkeit des Schliessgesetzes der Pumpenkugelschieber für die massgebenden Lastfälle «LP 5.2 Lastabwurf aus Volllast Pumpenbetrieb bei Stauziel LB» (ordentlicher Lastfall) und «LK 9.2 Betriebswechsel auf Volllast Pumpenbetrieb mit Lastabwurf bei Stauziel LB» (ausserordentlicher Lastfall).

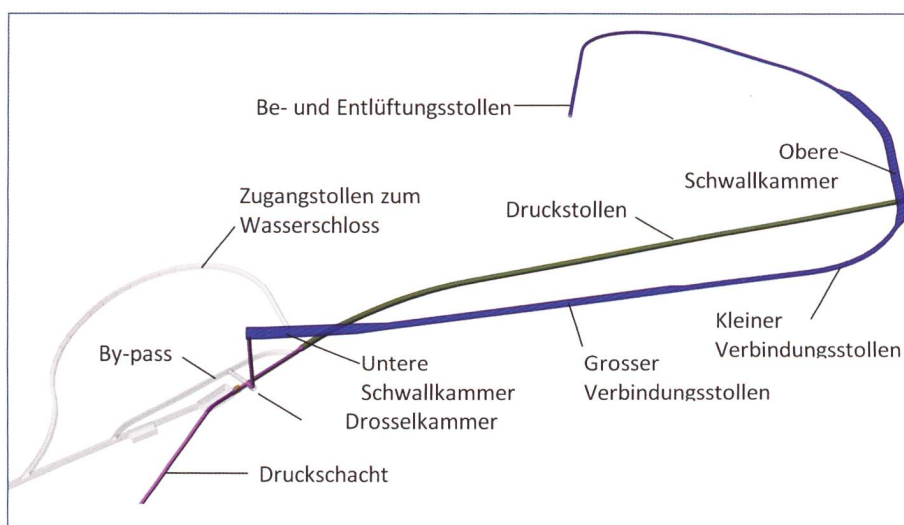


Bild 9. 3D-Ansicht des OW-Wasserschlosses (blau), Druckstollens (grün), Druckschachtes (violett), Zugangstollensystems (grau).

Die Geometrie der 90°-Krümmer der Verteilrohrleitung entspricht dem Typ «Escher Wyss». Dieser zeichnet sich durch geringe Druckverluste aus. Neben den minimalen Druckverlusten handelt es sich bei der Geometrie um eine standardisierte Ausführung mit bekannten Spannungsverteilungen. Die Druckverluste der Krümmer wurden nach *Dolder* (1966) bzw. nach *Gardel* und *Rechsteiner* (1970) berechnet.

2.3 OW-Wasserschloss

Das Wasserschloss hat im Wesentlichen die Aufgabe, den Druckschacht hydraulisch vom Druckstollen zu trennen. Dabei angestrebt werden die Begrenzung der kurzweiligen Druckschwankungen im Druckstollen, die Beschleunigung der Wassermassen (Verringerung der Zeitspanne für die Beschleunigung bzw. die Verzögerung der Wassersäule) und die Gewährleistung der Maschinenregelung (Stabilität im Regelkreis).

Bei Schaltvorgängen wandern die erzeugten Druckwellen vom Druckschacht bis zum Wasserschloss, wo ein Grossteil der Wellen in den Druckschacht reflektiert wird, während ein Teil sich in den Druckstollen fortpflanzt.

2.3.1 Geometrie

Im Variantenstudium wurden die verschiedenen Wasserschlosskonzepte hinsichtlich ihrer technischen Ausführbarkeit evaluiert. Für die jeweiligen Konzepte wurden unter Berücksichtigung der massgebenden Lastfälle die minimalen Abmessungen ermittelt und hinsichtlich folgender Aspekte verglichen: a) optimale hydraulische Funktion innerhalb des gesamten Wasserwegesystems; b) Ausführbarkeit und geringes Ausführungsrisiko; c) minimale Baukosten und Bauzeit sowie d) geringer betrieblicher Wartungsaufwand. Aufgrund der unmöglichen Zugänglichkeit von aussen zum Wasserschlosskopf fiel

ein einfaches Konzept mit einer vertikalen Ausführung von oben mit dem Raise-Boring-Verfahren ausser Betracht, da dieses technisch sehr aufwendig ist (zusätzlicher Zugangsstollen zum Schachtkopf nötig).

Das Wasserschloss ist als 2-Kammer-Wasserschloss konzipiert, bei dem der jeweilige Schwallraum im Bereich des höchsten bzw. niedrigsten Wasserspiegels konzentriert ist (siehe *Bild 9*). Die untere Schwallkammer ist mit dem Druckstollen über einen Vertikalschacht mit einem Innendurchmesser von 4.5 m verbunden.

Die untere und die obere Schwallkammer sind durch einen Verbindungstollen (mit variablem Querschnitt) verbunden. Die Neigung des Verbindungstollens ist mit 15% konstant. Am oberen Ende der oberen Schwallkammer schliesst der Be- und Entlüftungstollen an, der ins Freie reicht. Dieser stellt den notwendigen Luftaustausch sicher, der bei den Wasserspiegelschwankungen entsteht.

2.3.2 Thoma-Kriterium und Wasserschloss-Querschnitt

Gemäss *D. Thoma* (1910) gilt das Stabilitätskriterium in Form einer minimalen freien horizontalen Oberfläche, um eine positive Dämpfung von Spiegelschwankungen sicherzustellen, die bei der Maschinenregelung entsteht. Die Einhaltung der Thoma-Fläche alleine garantiert jedoch noch nicht, dass das System in allen Fällen stabil ist. Gemäss *Evangelisti* (1951) ist bei einem Längenverhältnis von Druckstollen zu Druckschacht von weniger als 9:1 eine Korrektur notwendig. Dabei fordert das Stabilitätskriterium gemäss *Jaeger* (1985, 1960) eine um 50% grössere minimale freie Oberfläche. Im Fall *Lagobianco* ist das Längenverhältnis 7.5:1, und die Korrektur nach *Jäger* (1958) wird angewendet.

2.3.3 Maximaler und minimaler Wasserspiegel und Dämpfung des Systems

Für die hydraulische Auslegung des Wasserschlosses gelten folgende Entwurfskriterien: a) Die obere und die untere Wasserschlosskammer müssen oberhalb bzw. unterhalb des maximalen bzw. minimalen Wasserspiegels des Lago Bianco liegen. b) Der Wasserspiegel darf die maximal und minimal zulässigen Wasserspiegel im Wasserschloss nicht über- bzw. unterschreiten. c) Der Sicherheitszuschlag gegen Überlaufen bzw. Leerlaufen beträgt für ordentliche Lastfälle 10% des Arbeitsvolumens (Volumen zwischen den maxi-

malen Wasserspiegellagen eines Lastfalls) und für ausserordentliche Lastfälle 5% des Arbeitsvolumens. d) Die Amplitude der Spiegelschwankungen soll ohne Eingreifen der Regler um mindestens 30% (Dämpfung) in jeder Periode abnehmen.

2.3.4 Berechnungsergebnisse

Für die Bemessung des OW-Wasserschlosses sind die kombinierten Lastfälle mit Betriebswechsel bei maximalem bzw.

minimalem Seespiegel im Lago Bianco massgebend, da sich die Wasserspiegelschwankungen im Wasserschloss, erzeugt durch die beiden Schaltvorgänge, überlagern. Die genauen Schliesszeiten sind dabei von geringer Bedeutung. Der maximale Aufschwung erfolgt beim Betriebswechsel von Vollast Turbinenbetrieb auf Vollast Pumpenbetrieb bei Stauziel LB (Bild 10), der maximale Abschwung beim Betriebswechsel von Vollast Pumpenbe-

trieb auf Vollast Turbinenbetrieb bei Senkziel LB (Bild 11).

2.4 Unterwassersystem und Unterwasserwasserschloss

Die UW-Triebwasserwege (Bild 12) umfassen für jedes der beiden Halbwerke (je 3 Maschinensätze) Kanäle, Kammern und Stollen zur Durchleitung des Triebwassers zwischen der Maschinenkaverne und den beiden Ein-/Auslaufbauwerken am Lago di Poschiavo.

Die Gesamtlänge des UW-Stollens (rund 600 m), die Seespiegelschwankungen im unteren Speicherbecken Lago di Poschiavo von bis zu 7.5 m sowie die schnellen Umschaltvorgänge machen ein Wasserschloss notwendig. Dabei sind die Einbautiefe der Pumpe (Saughöhe) und die Höhenlage der Turbinenachse (Freihangmass) für die Auslegung des UW-Wasserschlosses massgebend. Sie müssen so bemessen sein, dass für alle relevanten Betriebszustände die trägheitsbedingten Wasserspiegelschwankungen innerhalb der betriebstechnisch zulässigen Grenzen verlaufen. Der derzeitige Planungsstand sieht ein Freihangmass von 2.60 m für die höchsten Wasserspiegellagen der ordentlichen Lastfälle vor. Bei kurzzeitig auftretenden, extremen Wasserspiegellagen (ausserordentliche Lastfälle) wird dabei ein geringeres Freihangmass akzeptiert.

Dementsprechend erfolgt die Dimensionierung des Wasserschlosses unter Berücksichtigung wirtschaftlicher und konstruktiver Zwangspunkte nach den extremen Wasserspiegellagen, d.h. dem höchstmöglichen Aufschwung und dem tiefstmöglichen Abschwung. Zur Begrenzung der extremen Wasserspiegellagen in den UW-Wasserschlossern wurde ein Innendurchmesser der UW-Stollen von 7.50 m vorgesehen. Dabei beträgt die Wassergeschwindigkeit bei Ausbauturbinenleistung 1.1 m/s.

2.4.1 Turbinenablaufkanal und Transversalkammern

Auf der Unterwasserseite jedes in der Maschinenkaverne installierten Maschinensatzes ist ein Turbinenablaufkanal vorgesehen. Jeweils drei Turbinenablaufkanäle münden in eine der beiden Transversalkammern. Beide Transversalkammern führen am unterwasserseitigen Ende über eine Verzugsstrecke und einen Vertikal-schacht zu den UW-Stollen und den Pumpenzulaufsystemen.

Der Turbinenablaufkanal dient dazu, das von der Peltonturbine kommende Triebwasser im Freispiegelab-

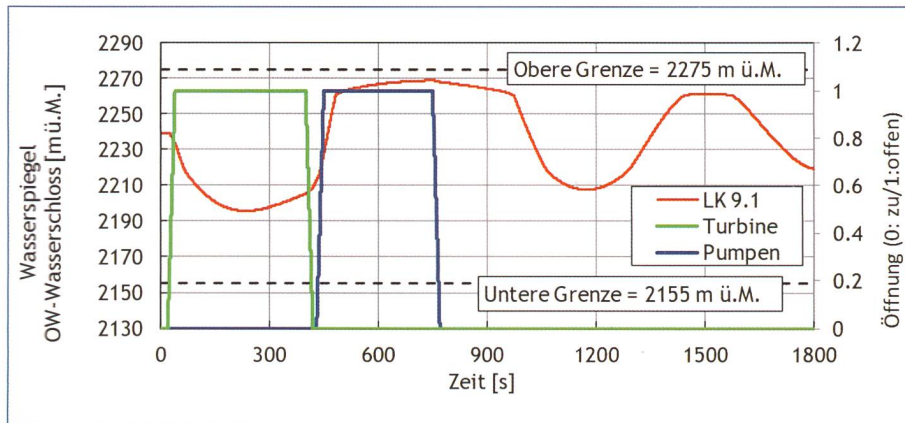


Bild 10. Maximaler Aufschwung im Oberwasserschloss bei Lastfall LK 9.1: Anfahren auf Vollast Turbinenbetrieb mit Betriebswechsel auf Vollast Pumpenbetrieb bei Stauziel LB (ausserordentlicher Lastfall).

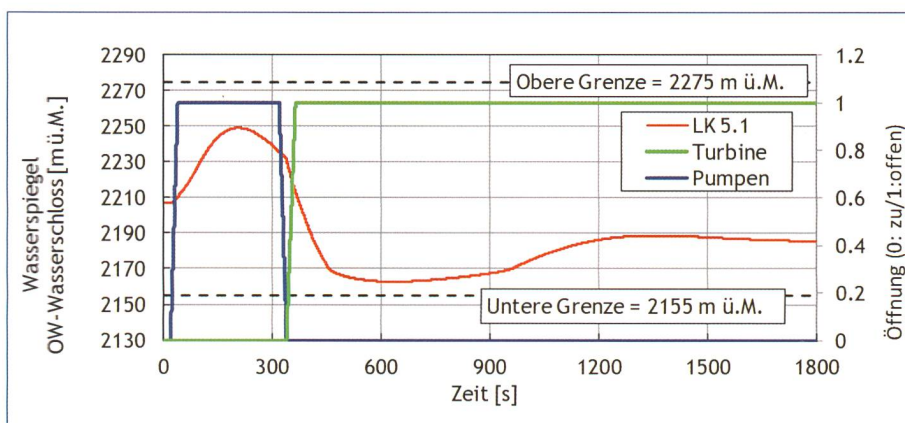


Bild 11. Maximaler Abschwung im Oberwasserschloss im Lastfall LK 5.1: Anfahren auf Vollast Pumpenbetrieb mit Betriebswechsel auf Vollast Turbinenbetrieb bei Senkziel LB (ausserordentlicher Lastfall).

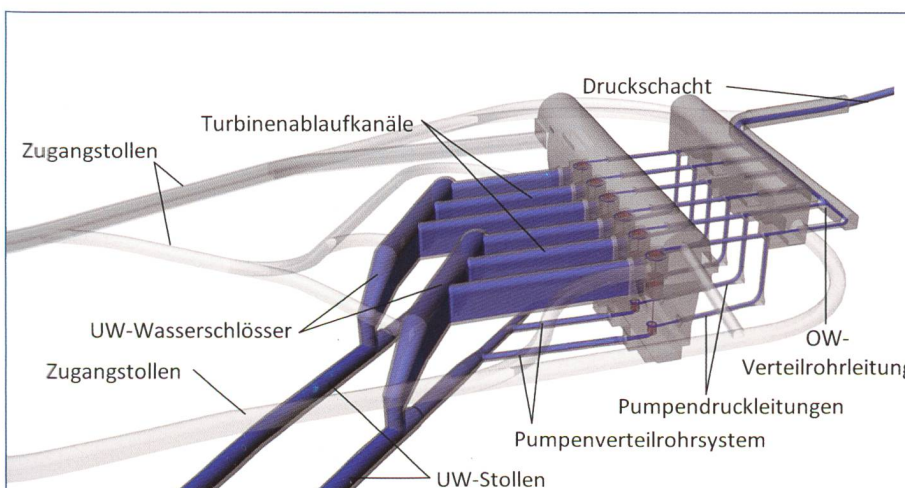


Bild 12. 3D-Ansicht des UW-Triebwasserwegs (in Blau).

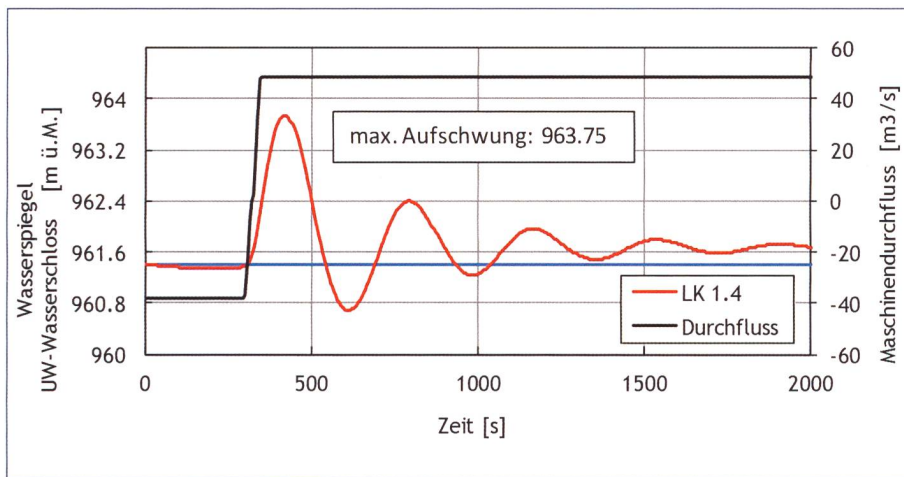


Bild 13. Wasserspiegellagenverlauf und Durchflussganglinien im UW-Wasserschloss (Halbwerk 2). Maximaler Aufschwung im Lastfall LK 4.1 Betriebswechsel: Volllast Pumpenbetrieb auf Volllast Turbinenbetrieb bei Hmin/Stauziel im LdP (ordentlicher Lastfall).

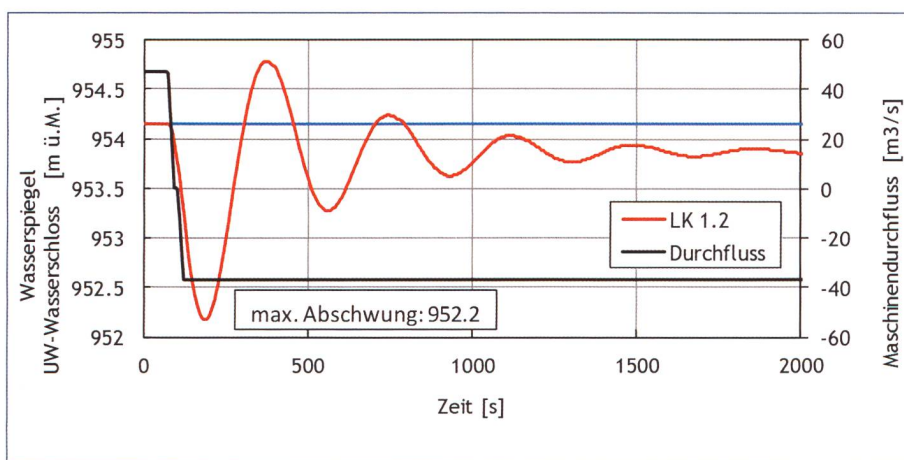


Bild 14. Wasserspiegellagenverlauf und Durchflussganglinien UW-Wasserschloss für den Lastfall LK 1.2 Betriebswechsel Volllast Turbinenbetrieb auf Volllast Pumpenbetrieb bei Stauziel LB (ordentlicher Lastfall).

fluss in die Transversalkammer überzu-
leiten. Zur Sicherstellung eines effektiven
Luftaustragungsprozesses innerhalb des
Turbinenablaufkanals ist eine Stabilisie-
rung des auftretenden Wechselsprungs
bei tiefen Wasserspiegellagen notwendig.
Die Luftaustragungsrechnungen wur-
den gemäss dem von Arch (2008) vorge-
schlagenen Bemessungsansatz durchge-
führt; die bei dem vorgeschlagenen Ansatz
resultierende Entgasungslänge wird un-
terstromseitig des Wechselsprungs ange-
setzt. Das Entwurfskriterium für die Ent-
gasungslänge wurde so angesetzt, dass die
Entgasung der ungelösten Luft innerhalb
des Turbinenablaufkanals stattfindet. Mit
ihren freien Oberflächen bilden die Trans-
versalkammern gleichzeitig eine zusätz-
liche, rechnerisch nicht berücksichtigte
Ausgasungsstrecke für das Triebwasser.

Die freie Wasseroberfläche in den
Turbinenablaufkanälen und Transversal-
kammern dient dabei als UW-Wasser-
schloss.

2.4.2 Berechnungsergebnisse

Die kombinierten Lastfälle mit Betriebs-
wechsel bei maximalem bzw. minimalem
Seespiegel des Lago di Poschiavo (LdP)
sind ebenfalls für die Bemessung des UW-
Wasserschlosses massgebend. Der maxi-
male Aufschwung erfolgt beim Betriebs-
wechsel von Volllast Pumpenbetrieb auf
Volllast Turbinenbetrieb bei Stauziel (LdP),
der maximale Abschwung beim Betriebs-
wechsel von Volllast Turbinenbetrieb auf
Volllast Pumpenbetrieb bei Senkziel (LdP).
Die maximalen Wasserspiegellagen ga-
rantieren die geforderte minimale Saug-
höhe der Pumpen von rund 27.0 m sowie
das maximale Freihangmass von 2.60 m.
Die Ergebnisse des minimalen Druckver-
laufs in den UW-Stollen zeigen, dass keine
Gefahr eines Lufteinzugs aus dem Schüt-
zenschacht in den UW-Stollen besteht.

2.5 Ein- und Auslaufbauwerke Lago di Poschiavo

Die Ein- und Auslaufbauwerke am Lago

di Poschiavo dienen, je nach Betriebszu-
stand, der Entnahme und der Rückgabe
des Betriebswassers. Die Abmessungen
der Bauwerke entsprechen den dafür
massgebenden hydraulischen Voraus-
setzungen, werden jedoch in erster Linie
durch die zur Verfügung stehenden Raum-
verhältnisse zwischen dem See und dem
Bahntrasse der Rhätischen Bahn (RhB)
sowie durch ökologische Gesichtspunkte
begrenzt.

Analog zum Entwurf der zwei UW-
Stollen sind zwei Ein- und Auslaufbau-
werke geplant. Jedes Bauwerk besteht im
Wesentlichen aus dem Abflussquerschnitt
(mit Anschluss an den UW-Stollen), einem
Schützenschacht und einem seeseitigen
Schwanenhals mit zwei Vertikalkrümmern
und einem horizontal gerichteten Austritts-
querschnitt in Beton (siehe Bild 15). Die
Fließgeschwindigkeit im Rechenquer-
schnitt beträgt $v = 1.1 \text{ m/s}$.

Hauptgesichtspunkte der ökologi-
schen Anforderungen sind die induzierten
lokalen und grossräumigen Seeströmun-
gen während des Turbinen- und Pump-
betriebs. Die induzierten Seeströmungen
sowie deren Einfluss auf die Schichtung im
LdP wurden mithilfe von CFD-Berechnun-
gen simuliert (LCH-EPFL/IUB, 2012). Mit-
hilfe der Simulationen wurde die Ausrich-
tung, die Höhenlage und die Austrittsge-
schwindigkeit des Bauwerks so gewählt,
dass die aus ökologischen Gesichtspun-
kten gesetzten Randbedingungen bezüg-
lich der Schichtung im LdP eingehalten
werden.

3. Fazit

Beim PSKW Lagobianco handelt es sich
um ein Bauvorhaben mit grosser Aus-
dehnung (Längenausdehnung ca. 25 km,
Höhenunterschied von ca. 1250 m) und
Dimensionen (Druckstollen L 18.1 km, D
6.4 m, Druckschacht L 2.4 km, D 4.2 m),
welches in mehrfacher Hinsicht ausserge-
wöhnliche technische Herausforderungen
mit sich bringt.

Im vorliegenden Artikel wird auf
die hydraulische Auslegung der Hauptan-
lagen eingegangen, wobei die angewand-
ten Kriterien und Randbedingungen sowie
die verwendeten Werkzeuge beschrieben
werden. Zudem wird darauf hingewiesen,
dass ein «Technischer Dialog» mit Her-
stellern von hydraulischen Maschinen mit
dem Ziel geführt wurde, relevante Aspekte
mit massgeblichem Einfluss auf den Ge-
samtentwurf im Vorfeld aufzuzeigen, ab-
zustimmen und deren Anwendung im Ent-
wurf der Anlage zu klären.

Die vielfachen, sich in hydrau-

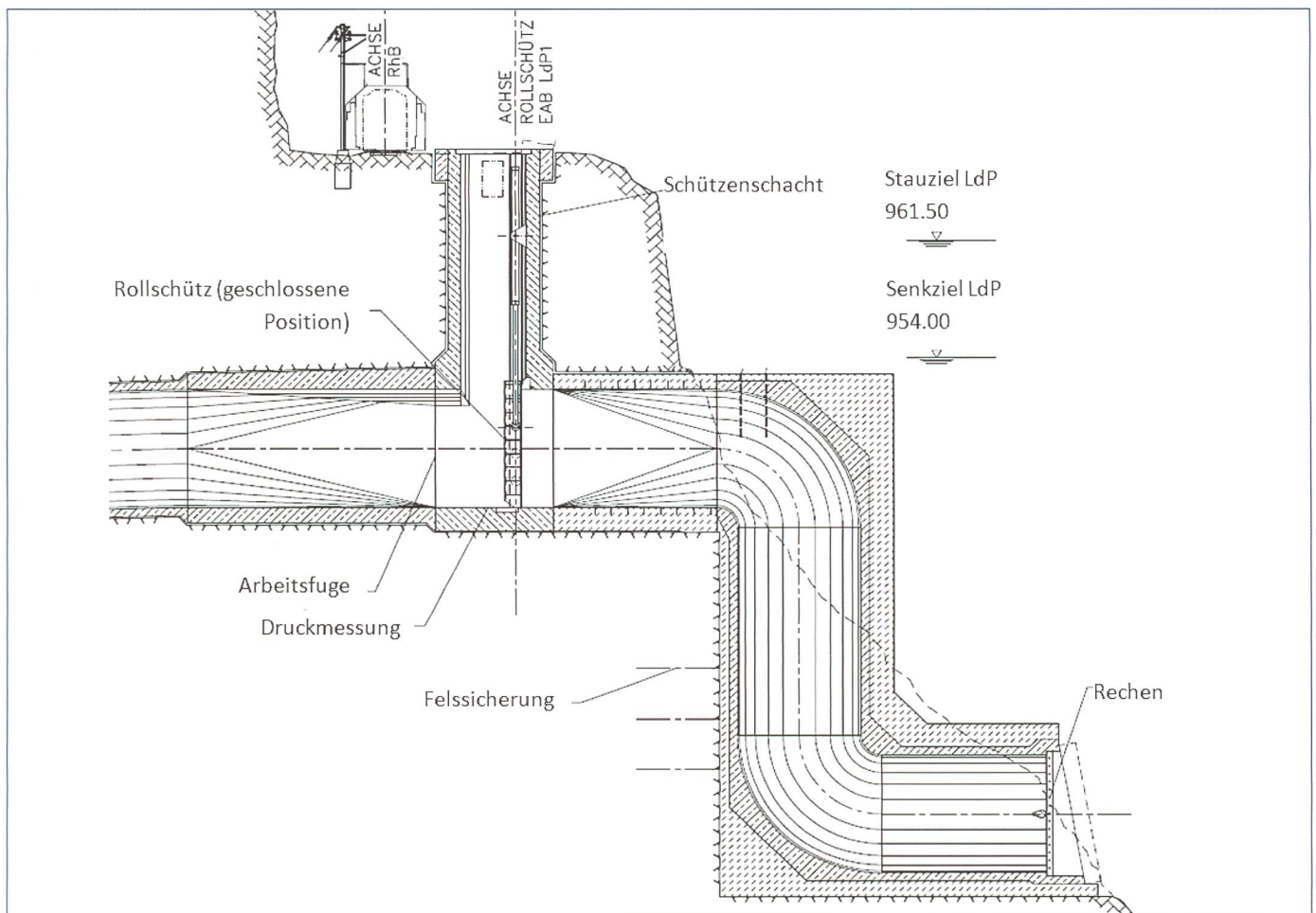


Bild 15. Längsschnitt des Ein- und Auslaufbauwerks am Lago di Poschiavo.

lischer Hinsicht stellten, aussergewöhnlichen Herausforderungen konnten mithilfe theoretisch-analytischer und computergestützter Berechnungsmethoden zufriedenstellend behandelt werden. Die jeweiligen Bemessungskriterien wurden dabei im Vorfeld definiert. Die darauf basierende Dimensionierung und die Berechnung der verschiedenen Hauptanlagenelemente konnten mit plausiblen Abmessungen nachgewiesen werden.

Vor der Ausschreibungsphase der Bauarbeiten sind, zur definitiven Absicherung und weiteren Optimierung, zusätzliche hydraulische Modellversuche für die definitiven Abmessungen der sensibelsten Bauwerke vorgesehen.

Literaturangaben

- Arch, A. (2008): Luftein- und Austragungsprozesse bei Anlagen mit Peltonturbinen im Gegen-druckbetrieb, Dissertation, Technische Universität Graz.
- BFE (2008): Bestimmung von Wirkungsgraden bei Pumpspeicherung in Wasserkraftanlagen, Bundesamt für Energie, Sektion Energieversorgung.
- Blevins, R. D. (1984): Applied Fluid Dynamics Handbook. Van Nostrand Reinhold Company.
- Evangelisti, G. (1951): Impianti Speciali Idraulici,

- Volume II, Casa Editrice Prof. Riccardo Patron Deniz, S., Bossard, M., Speerli, J., Volkart, P. (1990): Saugrohre bei Flusskraftwerken. VAW Mitteilung 106, ETH Zürich.
- Dolder, G. (1966): Répartiteur Escher Wyss à renforcements intérieurs sans flexion. Bulletin Escher Wyss 1966/2.
- Hachem, F.E., Wickenhäuser, M. (2013): Design of the 1000 MW Lagobianco pumped-storage scheme. Hydropower and Dams, Issue Five, 2013.
- Hecker, G.E. (1987): Swirling Flow Problems at Intakes, BALKEMA, Rotterdam, The Netherlands, (pp. 139–155).
- Jaeger, C. (1960): A Review of Surge-Tank Stability Criteria. J. Basic Eng., Trans. ASME. pp. 765–783.
- Gardel, A., Rechsteiner, G.F. (1970): Les pertes de charge dans les branchements en T de conduites de section circulaire. Bulletin Technique de la Suisse Romande, 25:363,391.
- Jaeger, C. (1958): Contribution to the Stability Theory of Systems of Surge Tanks. Trans. ASME. Vol. 80 pp. 1574–1584.
- LCH-EPFL/IUB (2012): Einfluss und Beurteilung des Betriebs des PSW Lagobianco auf den Lago di Poschiavo hinsichtlich Veränderung der Schichtung, Temperatur und Fliessgeschwindigkeit. Technischer Bericht.
- Möller, G. (2013): Vortex-induced air entrain-

ment rate at intakes. Mitteilung 220, VAW ETH Zurich.

- Peyer, D., Schmidmeister, M., Lardi, L., Schellenberg, S. (2013): Pumpspeicher-Kraftwerk Lagobianco: Projekt, Erhöhung der Stau-mauern und Marktumfeld. «Wasser Energie Luft», 3–2013.
- Renau, L.R., Johnston, Kline S.J. (1967): Performance and design of straight, two-dimensional diffusers. Journal of basic engineering.
- Thoma, D. (1910): Beiträge zur Theorie der Wasserschlösser bei selbsttätig geregelten Turbinenanlagen. München: Oldenbourg.
- Wickenhäuser, M., Minor, H.-E. (2008): Planung und Bemessung von Entlüftungseinrichtungen für Druckstollen. «Wasser Energie Luft», 4: 301–306.

Anschrift der Verfasser

- Dr. Martin Wickenhäuser, Dr. Fadi Hachem, Julian Ribero
Stucky SA, Rue du Lac 33, CH-1020 Renens
mwickenhaeuser@stucky.ch
Luciano Lardi
Repower AG, Via da Clalt 307,
CH-7742 Poschiavo
luciano.lardi@repower.com



terra vermessungen ag
Tel.: 043 500 10 77
terra@terra.ch
www.terra.ch

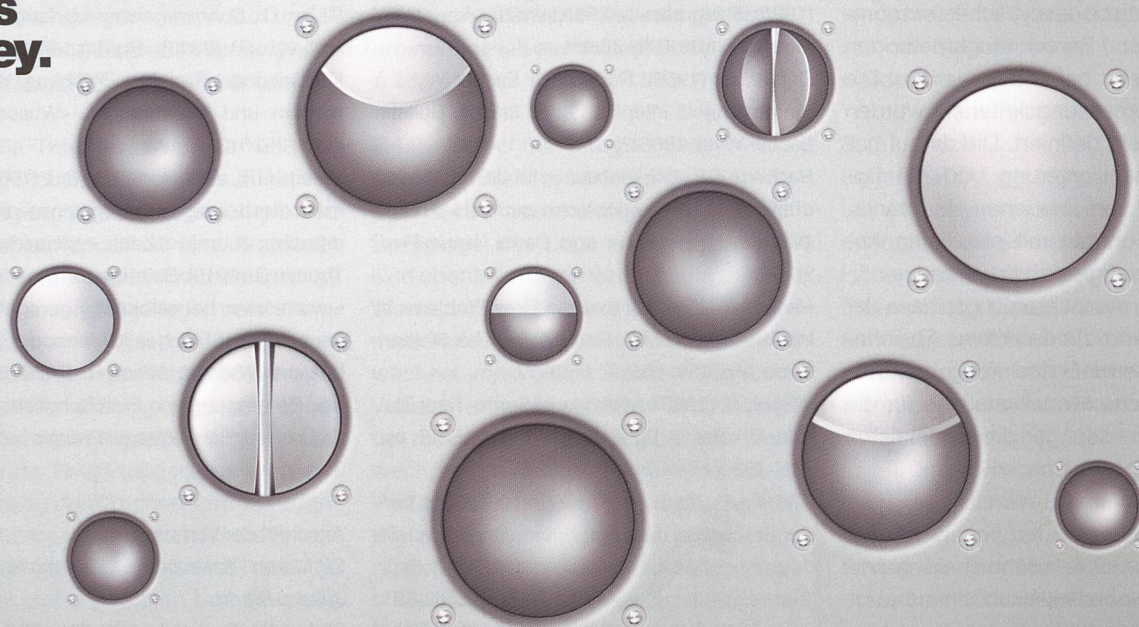
Unsere Referenz – Rundum zufriedene Kunden



HYDROGRAPHIE | STRÖMUNGSMESSUNG | SEEGRUNDKARTIERUNG

**That's
theWey.**

SISTAG
50
YEARS



Die Flexibilität von Wey ist erwiesen. Sie basiert auf einem Produktportfolio, welches über die Jahre hinweg stetig gewachsen und optimiert worden ist. Einerseits! Andererseits nutzen die besten Produkte nichts, wenn man sie nicht richtig einzusetzen weiss. Oder wenn sie nicht auf verändernde Ansprüche vor Ort oder auf individuelle Bedürfnisse und Einsatzzwecke adaptiert werden können. Wey kann das. In typisch schweizerischer Manier. Und in höchster Qualität.

**Eine typische Schweizer Spezialität
von Wey: Produktvielfalt und Flexibilität.**

WEY[®]
VALVE INNOVATION MANAGEMENT

+
SWISS
PERFORM