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 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: 23.08.2025

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 wesentliche 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 Halbwerke aufgeteilte Unterwassersystem (UW-System) mit zwei UW-Stollen und entsprechenden Wasserschlössern 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 m³/s (6 × 15.8 m³/s) bzw. einem Pumpendurchfluss von $Q_{P,max}$ = 74 m³/s (6 × 12.3 m³/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.

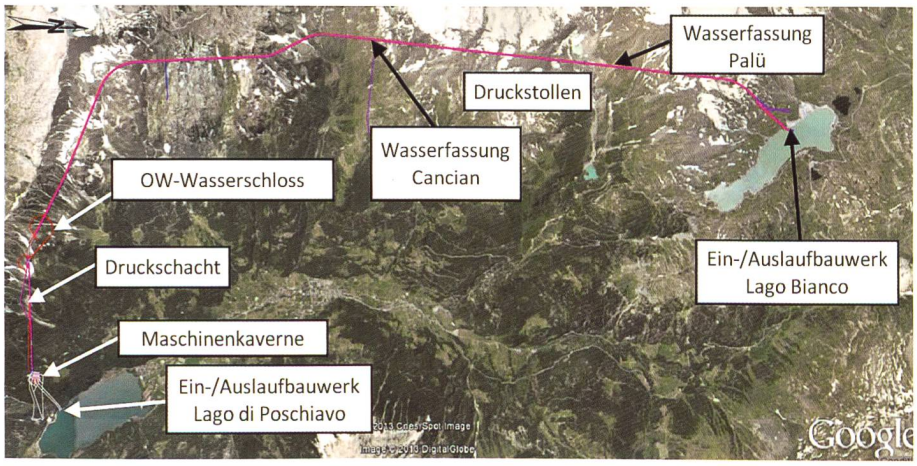


Bild 1. Die hydraulischen Hauptelemente des PSKW Lagobianco.

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 Lufteinzug 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

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

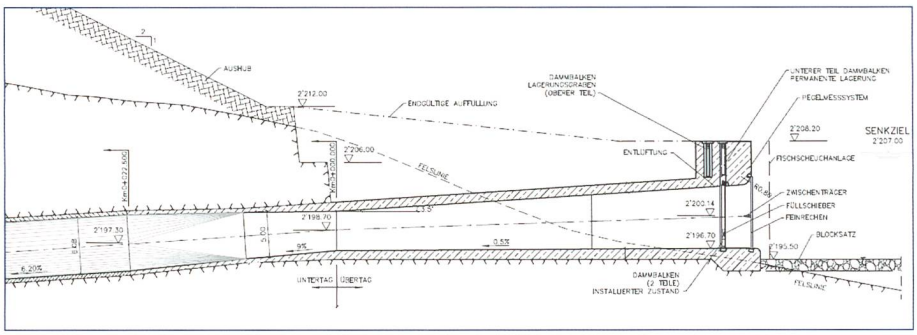


Bild 2. Längsschnitt des Ein- und Auslaufbauwerks Lago Bianco.

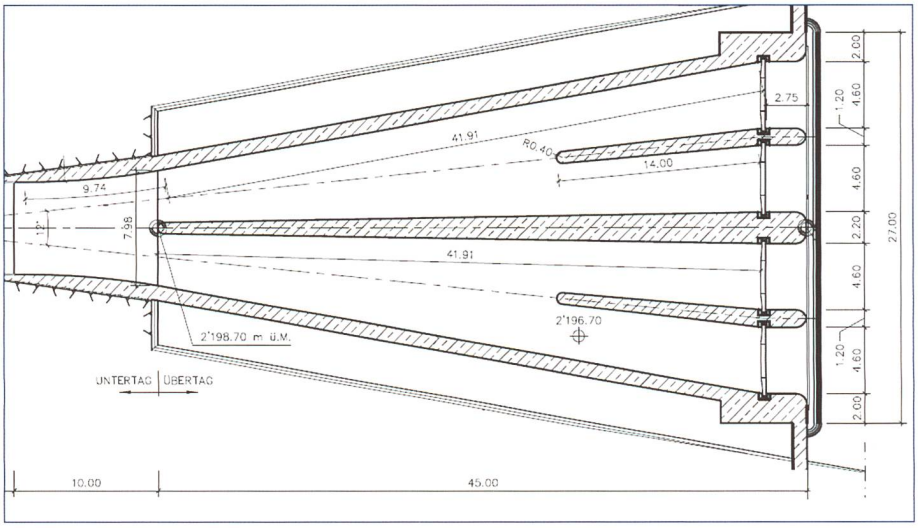


Bild 3. Situation des Ein- und Auslaufbauwerks Lago Bianco.

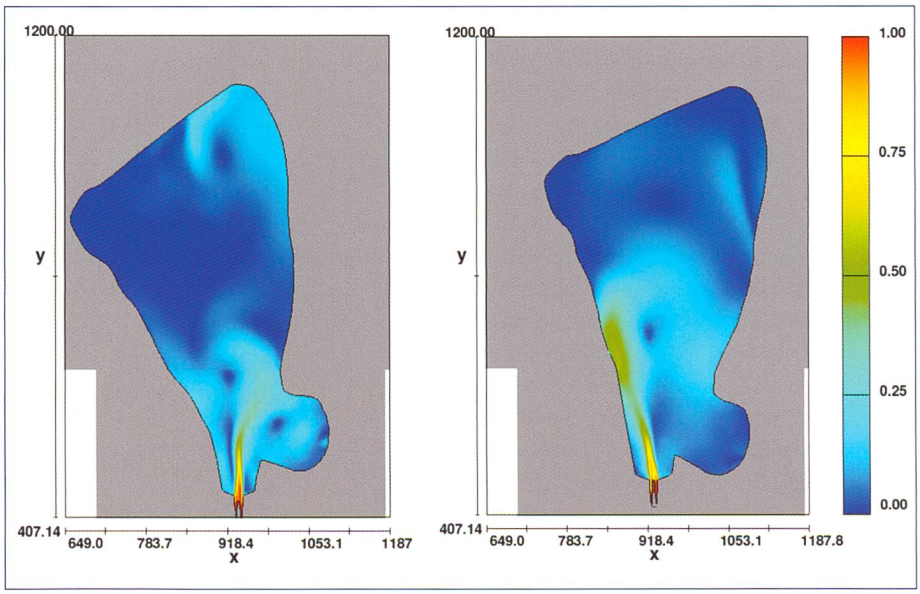


Bild 4. Numerische Simulation (FLOW 3D) der Strömungsverhältnisse beim EAB LB im Pumpenbetrieb (angegebene Geschwindigkeiten in m/s) in Abhängigkeit der Ausrichtung des Bauwerks.

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 m und für den stahlgepanzerten Druckschacht zu D = 4.0 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 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 Auslegungsbruttofallhöhe von 1260 m Wassersäule (m WS) bzw. 2.4% (30.5 m) der Auslegungsbruttoförderhöhe von 1269 m WS.

Der mittlere Zykluswirkungsgrad der Anlage (BFE, 2008) über eine Jahresproduktion 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 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 Zwischenwasserfassungen Palü und Cancian, c) die Länge und der Durchmesser der horizontalen Verbin-

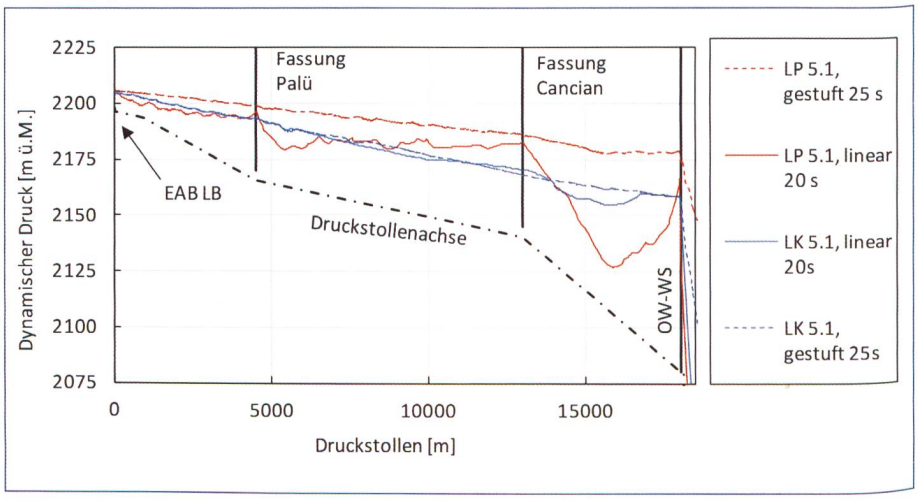


Bild 5. Minimaler Druckverlauf im Druckstollen bei Lastfall LP 5.1 Lastabwurf aus Volllast Pumpenbetrieb bei Senkziel LB (ordentlicher Lastfall) und LK 5.1 Anfahren auf Volllast Pumpenbetrieb mit Betriebswechsel auf Volllast Turbinenbetrieb zum ungünstigsten Zeitpunkt bei Senkziel LB (ausserordentlicher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

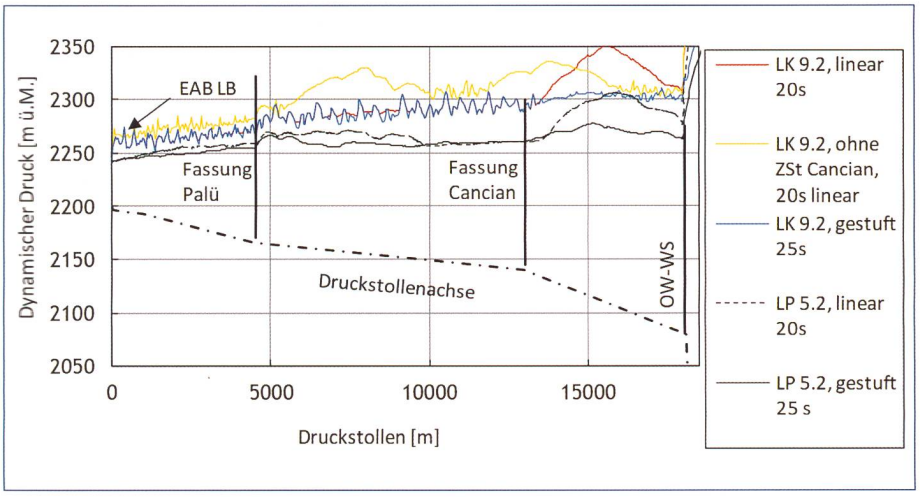


Bild 6. Maximaler Druckverlauf im Druckstollen bei Lastfall LP 5.2 Lastabwurf aus Volllast Pumpenbetrieb bei Stauziel LB (Ordentlicher Lastfall) und LK 9.2. Betriebswechsel auf Volllast Pumpenbetrieb mit Lastabwurf bei Stauziel LB (Ausserordentlicher Lastfall).

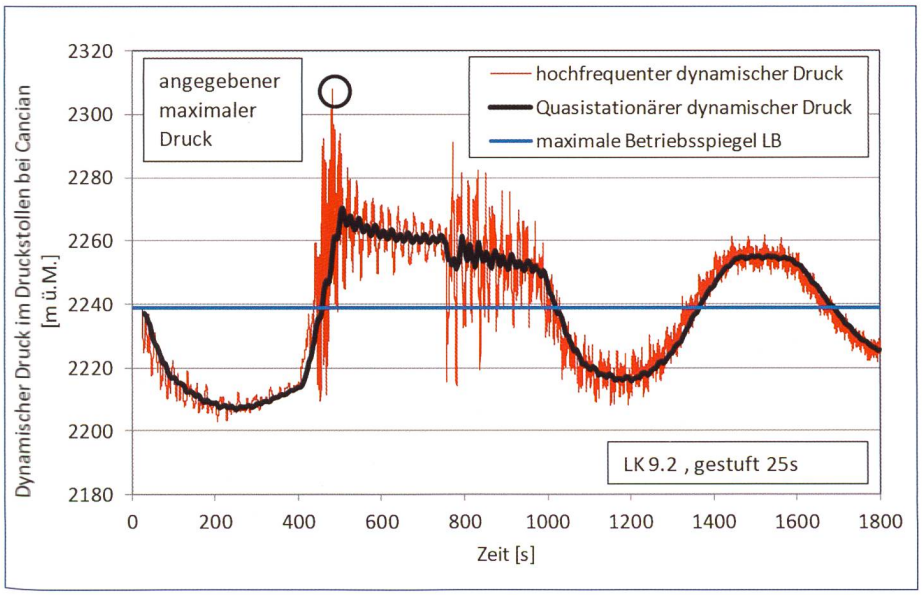


Bild 7. Hochfrequente Druckschwankungen sowie quasistationäre Druckschwankungen im Druckstollen am Anschluss zur Wasserfassung Cancian für Lastfall LK 9.2. (Betriebswechsel auf Volllast Pumpenbetrieb mit anschliessendem Lastabwurf bei Stauziel LB, ausserordentlicher Lastfall).

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 Ruhedruck (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.

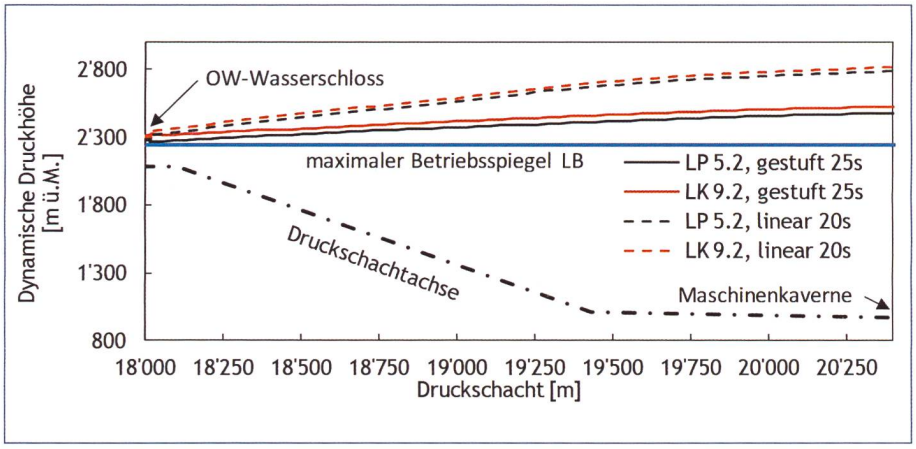


Bild 8. Druckverlauf im Druckschacht in Abhängigkeit des Schliessgesetzes der Pumpenkugelschieber für die massgebenden Lastfälle «LP 5.2 Lastabwurf aus Volllast Pumpenbetrieb bei Stauziel LB» (ordentlicher Lastfall) und «LK 9.2 Betriebswechsel auf Volllast Pumpenbetrieb mit Lastabwurf bei Stauziel LB»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

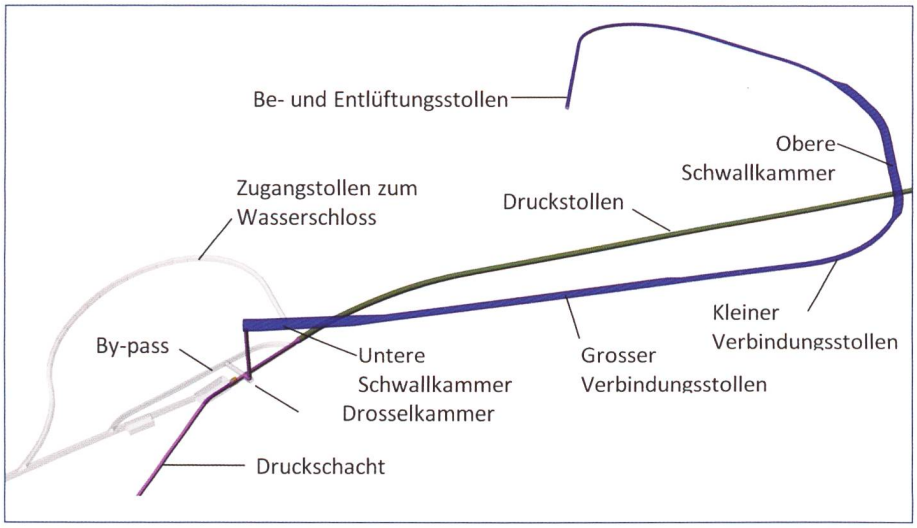


Bild 9. 3D-Ansicht des OW-Wasserschlosses (blau), Druckstollens (grün), Druckschachtes (violett), Zugangsstollensystems (grau).

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 kurzwelligen 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 Verbindungsstollen (mit variablem Querschnitt) verbunden. Die Neigung des Verbindungsstollens ist mit 15% konstant. Am oberen Ende der oberen Schwallkammer schliesst der Be- und Entlüftungsstollen 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 Volllast Turbinenbetrieb auf Volllast Pumpenbetrieb bei Stauziel LB *(Bild 10)*, der maximale Abschwung beim Betriebswechsel von Volllast Pumpenbetrieb auf Volllast Turbinenbetrieb bei Senkziel LB *(Bild 11)*.

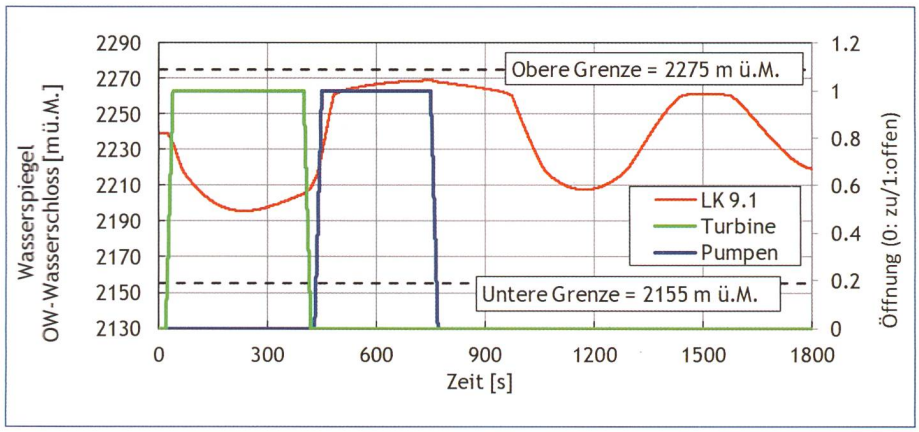


Bild 10. Maximaler Aufschwung im Oberwasserschloss bei Lastfall LK 9.1: Anfahren auf Volllast Turbinenbetrieb mit Betriebswechsel auf Volllast Pumpenbetrieb bei Stauziel LB (ausserordentlicher Lastfall).

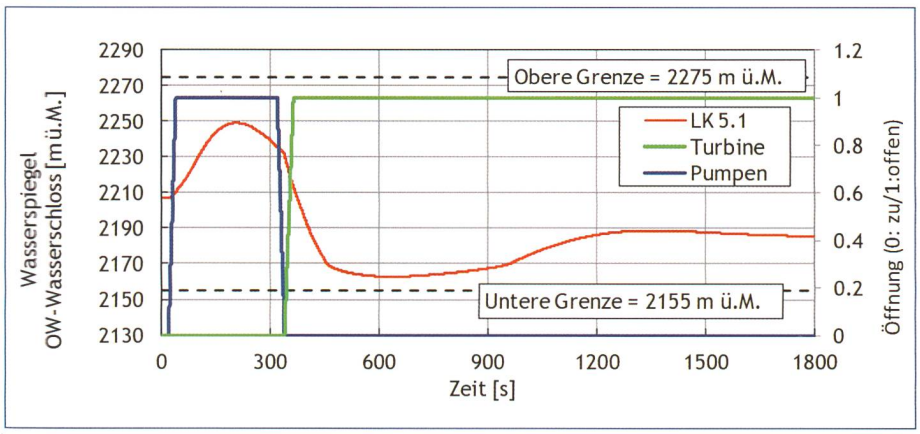


Bild 11. Maximaler Abschwung im Oberwasserschloss im Lastfall LK 5.1: Anfahren auf Volllast Pumpenbetrieb mit Betriebswechsel auf Volllast Turbinenbetrieb bei Senkziel LB (ausserordentlicher Lastfall).

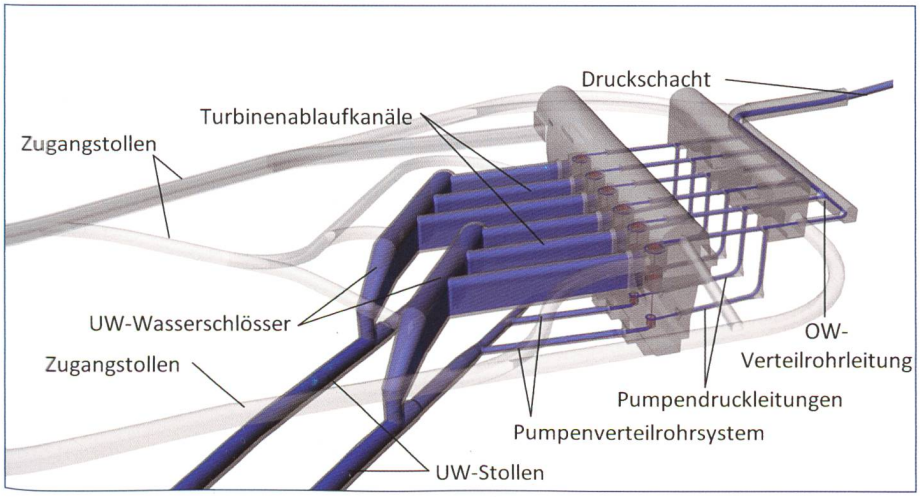


Bild 12. 3D-Ansicht des UW-Triebwasserwegs (in Blau).

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-Wasserschlössern 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 Vertikalschacht zu den UW-Stollen und den Pumpenzulaufsystemen.

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

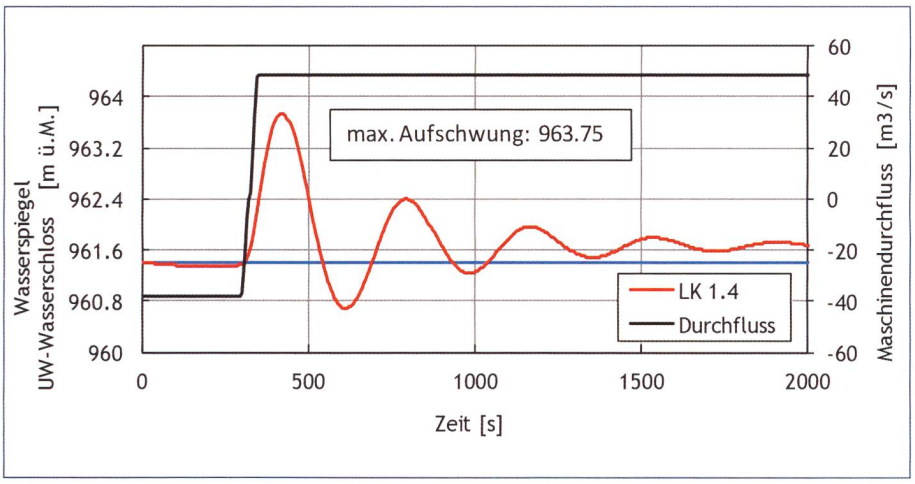


Bild 13. Wasserspiegellagenverlauf und Durchflussganglinien im UW-Wasserschloss (Halbwerk 2). Maximaler Aufschwung im Lastfall LK 4.1 Betriebswechsel: Volllast Pumpenbetrieb auf Volllast Turbinenbetrieb bei Hmin/Stauziel im LdP (ordentlicher Lastfall).

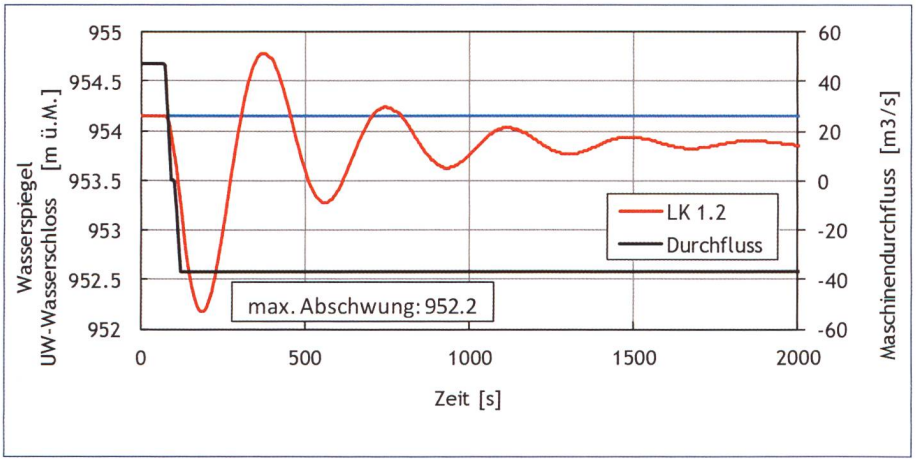


Bild 14. Wasserspiegellagenverlauf und Durchflussganglinien UW-Wasserschloss für den Lastfall LK 1.2 Betriebswechsel Volllast Turbinenbetrieb auf Volllast Pumpenbetrieb bei Stauziel LB (ordentlicher Lastfall).

fluss in die Transversalkammer überzuleiten. Zur Sicherstellung eines effektiven Luftaustragungsprozesses innerhalb des Turbinenablaufkanals ist eine Stabilisierung des auftretenden Wechselsprungs bei tiefen Wasserspiegellagen notwendig. Die Luftaustragungsberechnungen wurden gemäss dem von *Arch* (2008) vorgeschlagenen Bemessungsansatz durchgeführt; die bei dem vorgeschlagenen Ansatz resultierende Entgasungslänge wird unterstromseitig des Wechselsprungs angesetzt. Das Entwurfskriterium für die Entgasungslänge wurde so angesetzt, dass die Entgasung der ungelösten Luft innerhalb des Turbinenablaufkanals stattfindet. Mit ihren freien Oberflächen bilden die Transversalkammern gleichzeitig eine zusätzliche, rechnerisch nicht berücksichtigte Ausgasungsstrecke für das Triebwasser.

Die freie Wasseroberfläche in den Turbinenablaufkanälen und Transversalkammern dient dabei als UW-Wasserschloss.

2.4.2 Berechnungsergebnisse

Die kombinierten Lastfälle mit Betriebswechsel bei maximalem bzw. minimalem Seespiegel des Lago di Poschiavo (LdP) sind ebenfalls für die Bemessung des UW-Wasserschlosses massgebend. Der maximale Aufschwung erfolgt beim Betriebswechsel von Volllast Pumpenbetrieb auf Volllast Turbinenbetrieb bei Stauziel (LdP), der maximale Abschwung beim Betriebswechsel von Volllast Turbinenbetrieb auf Volllast Pumpenbetrieb bei Senkziel (LdP). Die maximalen Wasserspiegellagen garantieren die geforderte minimale Saughöhe der Pumpen von rund 27.0 m sowie das maximale Freihangmass von 2.60 m. Die Ergebnisse des minimalen Druckverlaufs in den UW-Stollen zeigen, dass keine Gefahr eines Lufteinzugs aus dem Schützenschacht in den UW-Stollen besteht.

2.5 Ein- und Auslaufbauwerke Lago di Poschiavo

Die Ein- und Auslaufbauwerke am Lago di Poschiavo dienen, je nach Betriebszustand, der Entnahme und der Rückgabe des Betriebswassers. Die Abmessungen der Bauwerke entsprechen den dafür massgebenden hydraulischen Voraussetzungen, werden jedoch in erster Linie durch die zur Verfügung stehenden Raumverhältnisse zwischen dem See und dem Bahntrassee der Rhätischen Bahn (RhB) sowie durch ökologische Gesichtspunkte begrenzt.

Analog zum Entwurf der zwei UW-Stollen sind zwei Ein- und Auslaufbauwerke 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 Austrittsquerschnitt in Beton (siehe Bild 15). Die Fliessgeschwindigkeit im Rechenquerschnitt beträgt v = 1.1 m/s.

Hauptgesichtspunkte der ökologischen Anforderungen sind die induzierten lokalen und grossräumigen Seeströmungen während des Turbinen- und Pumpbetriebs. Die induzierten Seeströmungen sowie deren Einfluss auf die Schichtung im LdP wurden mithilfe von CFD-Berechnungen simuliert (*LCH-EPFL/IUB*, 2012). Mithilfe der Simulationen wurde die Ausrichtung, die Höhenlage und die Austrittsgeschwindigkeit des Bauwerks so gewählt, dass die aus ökologischen Gesichtspunkten gesetzten Randbedingungen bezüglich der Schichtung im LdP eingehalten werden.

3. Fazit

Beim PSKW Lagobianco handelt es sich um ein Bauvorhaben mit grosser Ausdehnung (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 aussergewöhnliche technische Herausforderungen mit sich bringt.

Im vorliegenden Artikel wird auf die hydraulische Auslegung der Hauptanlagen eingegangen, wobei die angewandten Kriterien und Randbedingungen sowie die verwendeten Werkzeuge beschrieben werden. Zudem wird darauf hingewiesen, dass ein «Technischer Dialog» mit Herstellern von hydraulischen Maschinen mit dem Ziel geführt wurde, relevante Aspekte mit massgeblichem Einfluss auf den Gesamtentwurf im Vorfeld aufzuzeigen, abzustimmen und deren Anwendung im Entwurf der Anlage zu klären.

Die vielfachen, sich in hydrau-

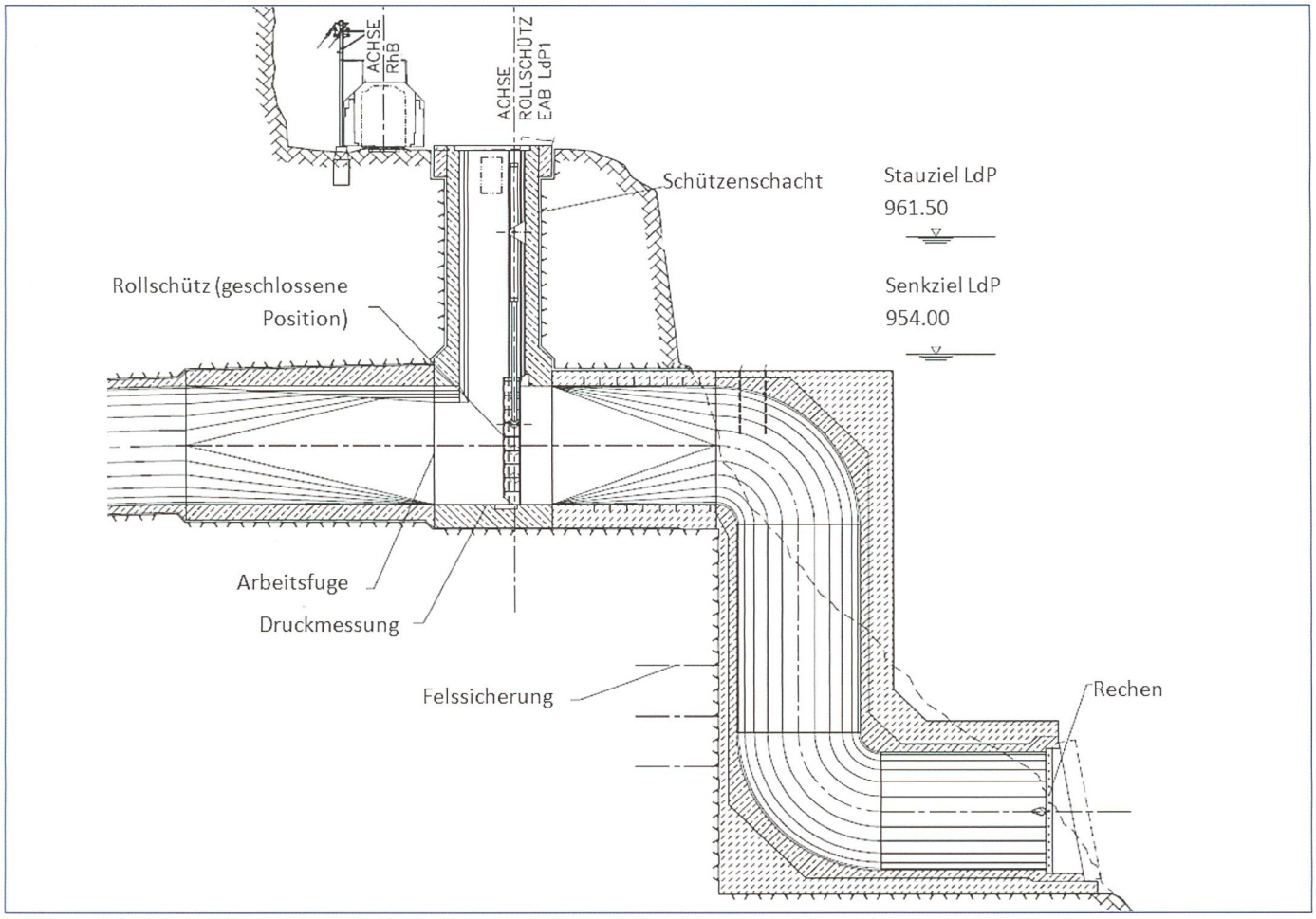


Bild 15. Längsschnitt des Ein- und Auslaufbauwerks am Lago di Poschiavo.

lischer Hinsicht stellenden, 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 Hauptanlageelemente 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 Gegendruckbetrieb, 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 Pàtron

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 Té des 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 entrainment rate at intakes. Mitteilung 220, VAW ETH Zurich.

Peyer, D., Schmidmeister, M., Lardi, L., Schellenberg, S. (2013): Pumpspeicher-Kraftwerk Lagobianco: Projekt, Erhöhung der Staumauern 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, Juliano 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

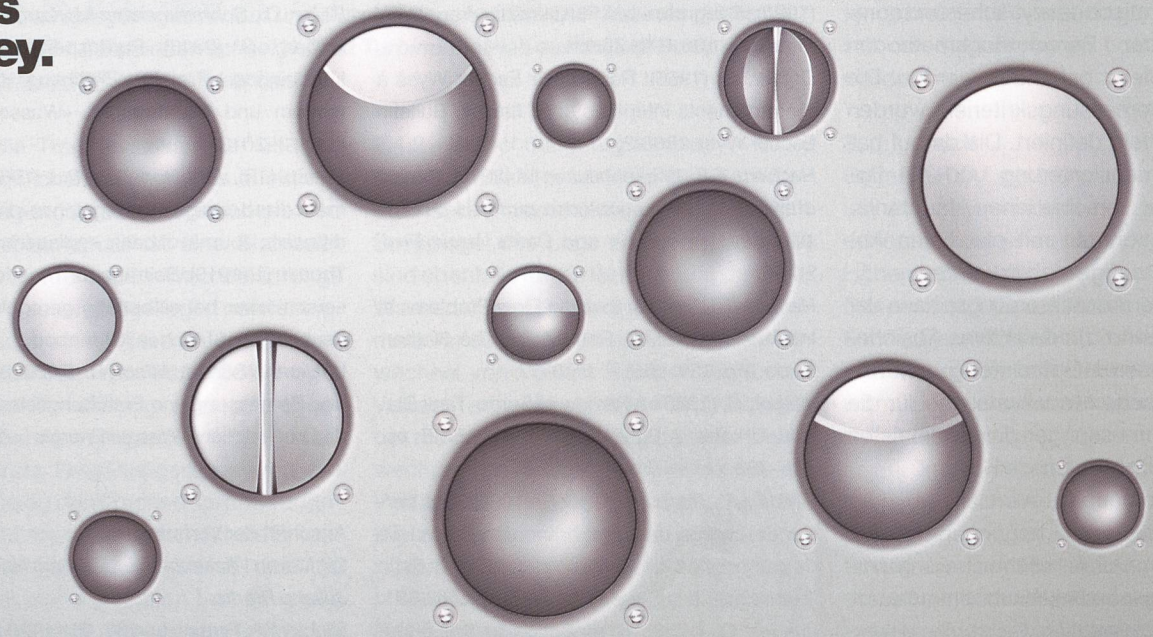
Unsere **Referenz** – Rundum **zufriedene Kund**

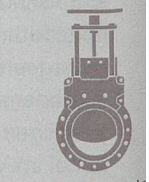
terra vermessungen ag
Tel.: 043 500 10 77
terra@terra.ch
www.terra.ch

HYDROGRAPHIE | STRÖMUNGSMESSUNG | SEEGRUNDKARTIERU

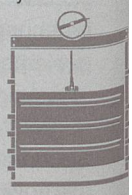
That's the Wey.

SISTAG 50+ YEARS



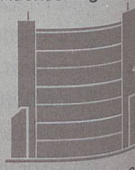


Wey Plattenschie



Wey Kanal-
absperrorgane

Wey Absperr- u
Rückschlagklapp



Wey Wasserwirtsc
und Hochwassersc

Die Flexibilität von Wey ist erwiesen. Sie basiert auf einem Produkteportfolio, welches über die Jahre hinweg stetig gewachsen und optimiert worden ist. Einerseits! Andererseits nützen 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: Produktevielfalt und Flexibilität.

wey®
VALVE INNOVATION_MANAGEMENT

SWISS PERFORM

SISTAG AG, Alte Kantonsstrasse 7, 6274 Eschenbach, Switzerland, Tel +41 41 449 9944, weyvalve.ch