

Pumpspeicherwerke



Warum Pumpspeicherwerke?

Mit dem Pariser Abkommen wird das globale Ziel verfolgt, die Treibhausgasemissionen zu reduzieren, um den Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur auf deutlich unter 2° C über dem vorindustriellen Niveau zu halten und die Bemühungen fortzusetzen, den Temperaturanstieg auf 1,5° C über dem vorindustriellen Niveau zu begrenzen.

Zu den kommerziell genutzten erneuerbaren Energiequellen gehören derzeit vor allem Wasserkraft, Windkraft, Photovoltaik, Biomasse und Geothermie. Sie werden auch als „erneuerbare Energien“ bezeichnet und deckten im Jahr 2017 mehr als 20 Prozent des weltweiten Gesamtenergieverbrauchs.

Um die globalen Klimaziele zu erreichen, müssen fossile Brennstoffe durch erneuerbare Energien ersetzt werden.

Während die Verbrennung fossiler Brennstoffe in der Regel eine verlässliche Grundlast erzeugt, haben die meisten erneuerbaren Energien, insbesondere Wind und Photovoltaik, ein gemeinsames Merkmal: Sie sind unstetig und schwankend, ihre Verfügbarkeit ist unbeständig. Dies bedingt eine weltweite Erhöhung von zusätzlichen Speichermöglichkeiten sowie Kapazitäten zur Netzstabilisierung.

Technologien zur Energiespeicherung

Die technisch ausgereifteste und effizienteste Technologie zur Speicherung von Energie in großem Maßstab sind sogenannte Pumpspeicherkraftwerke (PSW). Die Pumpspeichertechnologie wird seit fast 100 Jahren erfolgreich eingesetzt und wurde kontinuierlich technisch verbessert.

Moderne Pumpspeicherkraftwerke verfügen über ausreichendes Potenzial, um einen Erzeuger- bzw. Lieferbetrieb mit maximaler Leistung für bis zu 12 Stunden zu fahren. Darüber hinaus können PSW aufgrund ihrer schnellen Reaktionsfähigkeit zur Netzstabilisierung eingesetzt werden.

Dezentrale und kleinere Energiespeicher (wie Power-to-Gas [P2G], Batterien, intelligente Netze u. ä.) befinden sich noch in einem frühen technologischen und wirtschaftlichen Entwicklungsstadium. Außerdem erfordern Stromnetze, in denen es große Erzeuger und Verbraucher gibt, eine große Reservekapazität zur Netzstabilisierung. Die Anlagen müssen in der Lage sein, auf momentane Lastschwankungen einzelner Großerzeuger und Verbraucher zu reagieren, indem sie schnell hohe Kapazitäten bereitstellen.



PSW werden zunehmend für eine effiziente, stabile und sichere Energieversorgung benötigt.



Langfristig gesehen werden PSW die wirtschaftlichste und flexibelste Technologie bleiben, um Energie zu speichern. Der Gesamtwirkungsgrad oder „Wälzwirkungsgrad“ (Zyklus Pumpen-Turbinieren) moderner PSW liegt im Bereich von 80 Prozent.



PSW reduzieren die erforderliche Reservekapazität und den Teillastbetrieb konventioneller Kraftwerke und verringern somit den Ausstoß von Treibhausgasen.



PSW Herdecke, Deutschland,
Koepchenwerk, 140 MW (1924–1930)

Zuverlässige und stabile Energieversorgung

Die traditionelle Anwendung eines PSW besteht darin, in nachfrageschwachen Zeiten überschüssige Energie zu speichern und Energie in das Netz zurückzugeben, wenn sie in Spitzenlastzeiten benötigt wird. Darüber hinaus können PSWs eine Vielzahl von Zusatzfunktionen übernehmen:

PSWs bieten eine „Reserve an Regelleistung“ mit hoher Flexibilität und kurzen Reaktionszeiten zur Netzstabilisierung. Im Pumpbetrieb können PSW überschüssige Energie aus dem Netz aufnehmen und bei Bedarf jederzeit Energie ins Netz abgeben. Ein solcher Lastausgleich stabilisiert die Netze und erhöht somit die Zuverlässigkeit des Stromnetzes.

PSWs eignen sich zur Spannungsregelung durch Bereitstellung oder Aufnahme von Blindleistung auf allen Wirkleistungsebenen, auch im Leerlauf ohne Last im sogenannten Phasenschieberbetrieb.

PSWs können zur Bereitstellung von Schwarzstartfähigkeit im Falle eines großflächigen Netzausfalls eingesetzt werden. Sie sind für diesen Zweck besonders zuverlässig und effektiv, da sie über einen großen Leistungsbereich geregelt werden können.

PSWs sind für diesen Zweck besonders zuverlässig und effektiv, da sie über einen großen Leistungsbereich geregelt werden können.

Unsere Erfahrung in Planung, Bau und Betrieb

Seit fast 100 Jahren ist Tractebel mit der Planung und dem Bau von PSW vertraut. Über viele Jahrzehnte hinweg hat Tractebel Pionierarbeit bei technischen Innovationen von PSW geleistet.

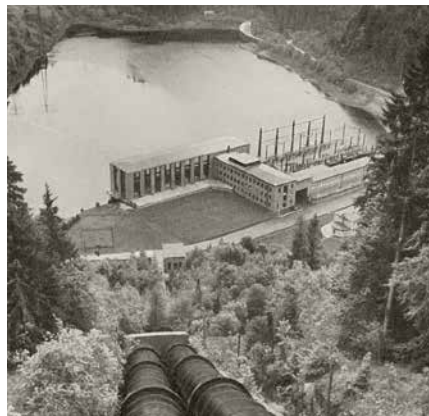
Das Koepchenwerk wurde 1927–1930 mit vier ternären 35 MW Maschinensätzen (getrennte Pumpe und Turbine) erbaut und war eines der ersten PSWs in Deutschland. 1994 wurde das alte Kraftwerk dann durch eine Pumpturbine mit 153 MW Leistung ersetzt. Tractebel erbrachte Ingenieurleistungen sowohl für die ursprüngliche Anlage als auch für das neue Pumpspeicherkraftwerk.

Als das Kraftwerk Vianden in Luxemburg 1964 erbaut wurde, war es mit 9 ternären Maschinensätzen mit einer Turbinenleistung von jeweils 100 MW das weltweit größte seiner Art. Die Ingenieure von Tractebel erbrachten die Planung, Ausschreibung und die Bau- und Inbetriebnahme-Überwachung. Die Anlagenerweiterungen mit einem 10. Maschinensatz (+200 MW, 1970–1976) und einer 11. Einheit (+200 MW, 2006–2016) wurden ebenfalls über alle Projektphasen mit Ingenieurleistungen von Tractebel durchgeführt.

Das PSW Goldisthal in Thüringen, Deutschland, mit 1.060 MW Gesamtleistung ging 2004 in Betrieb. Von den vier Maschinensätzen sind zwei mit doppelt gespeisten Asynchronmotor-Generatoren ausgestattet und damit die ersten drehzahlgeregelten Pumpturbinen Europas. Seit 1991 erbrachte Tractebel alle wesentlichen Ingenieurleistungen, einschließlich konzeptioneller Planung, Bauüberwachung, Inbetriebnahme und Betreuung während der Garantiezeit.



*Vorarlberg Illwerke, Österreich,
172 MW (1927–1948)*



*Schluchseewerk, Deutschland, 3 Phasen,
470 MW (1927–1953)*



*PSW Waldshut, Deutschland
168 MW (1940–1953)*

Modernste PSW-Technik durch Tractebel Kompetenz

Seit vielen Jahrzehnten ist Tractebel führend bei den wichtigsten Innovationen in der Pumpspeichertechnik. Im Folgenden wird der aktuelle Stand der PSW-Technologie dargestellt. Bei der Planung werden die neuesten Technologien an die Anforderungen des Kunden angepasst.

Ternäre Maschinensätze und reversible Pumpturbinen-Technologie

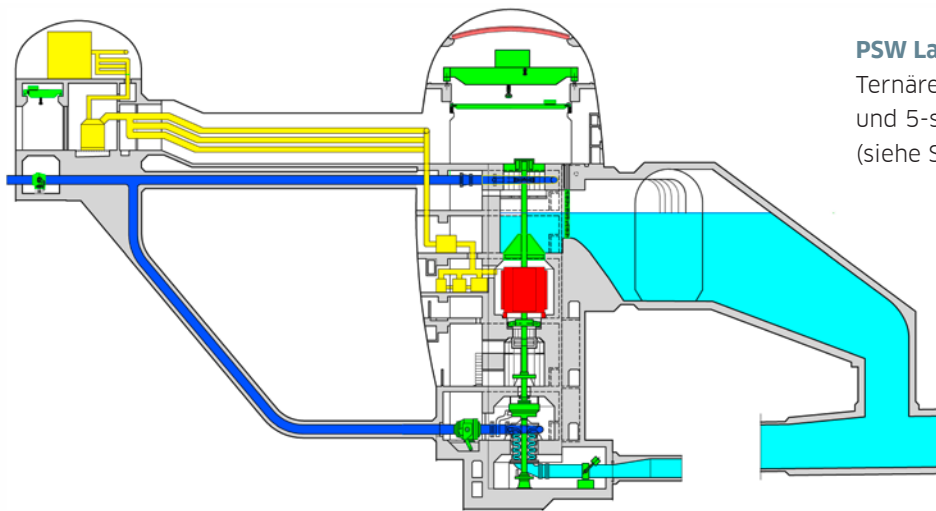
Prinzipiell gibt es folgende konstruktive Bauformen für Pumpspeicherkraftwerke:

Ternäre Aggregate bestehen aus den folgenden fünf Hauptkomponenten: Turbine (Typ Francis oder Pelton), Kupplung, Motor-Generator, hydraulischer Drehmomentwandler und Pumpeneinheit. Die Hauptvorteile eines „ternären Maschinensatzes“ sind ein schneller Wechsel

zwischen Turbinen – in den Pumpenbetrieb und umgekehrt – sowie kurze Anlaufzeiten in beiden Betriebsarten.

Reversible Pumpturbinen können, wie ihr Name schon sagt, ihre Drehrichtung umkehren. Ihre Laufräder sind so konstruiert, dass sie als Pumpe und bei einer Änderung der Drehrichtung als Turbine arbeiten. Der Motor-Generator und die Pumpturbine sind direkt miteinander verbunden.

Beide Technologien sind weit verbreitet, wobei die letztere einen etwas geringeren Wirkungsgrad aufweist, aber größere Vorteile bei den Investitions- und Betriebskosten bietet. Während der Maschinensatz aus fünf Hauptkomponenten besteht, hat die Pumpturbine nur zwei Komponenten.



PSW Lagobianco, Schweiz

Ternäre Anlage mit Pelton-Einheit und 5-stufiger Speicherpumpe (siehe Seite 9)



PSW Vianden, Luxemburg, Maschinensätze 1-9, 900 MW (1956-1965)



PSW Säckingen, Deutschland, 360 MW (1960-1967)



PSW Vianden, Luxemburg, Maschinensatz 10, 900 MW (1964-1974)

Drehzahlregelte Technik und hydraulischer Kurzschluss

Für die Leistungsregelung eines PSW gibt es zwei verschiedene Auslegungen:

Synchronmotor-Generatoren sind mit der Netzfrequenz synchronisiert. Ihre Drehzahl ist deshalb im Betrieb konstant. Der Bereich einer Leistungsregelung ist sehr gering. Um die Leistung eines Synchronmotor-Generators (sowohl im Turbinen- als auch im Pumpenbetrieb) zu regeln, kann die Betriebsart „hydraulischer Kurzschluss“ angewendet werden. Diese Betriebsart ist nur mit ternären Aggregaten möglich, da Pumpe und Turbine gleichzeitig betrieben werden. Während des hydraulischen Kurzschlussbetriebs wird das Wasser von der Pumpe ganz oder teilweise über die Turbine gefördert. Im hydraulischen Kurzschlussbetrieb ist von einer Verringerung des Anlagewirkungsgrades auszugehen.

Ein drehzahlvariabler Motor-Generator (doppelt gespeister Asynchron-Motor-Generator oder Synchron-Motor-Generator mit Vollumrichter) kann sowohl in Verbindung mit Pumpturbinen als auch mit ternären Aggregaten eingesetzt werden (bisher jedoch nicht realisiert). Aufgrund der Drehzahlregelung kann dann der Maschinensatz auch im Pumpbetrieb in einem weiten Leistungsbereich betrieben werden.

Doppelt gespeister Asynchron-Motor-Generator mit AC-Erregung (VSC, Voltage Source Converter)

Der Umrichter speist die dreiphasige Rotorwicklung mit variabler Spannung und Frequenz. Diese Lösung ist am besten geeignet für Großanlagen, da der Umrichter für die Schlupfleistung des Rotors ausgelegt sein muss.

Synchron-Motor-Generator mit Vollumrichter (VSC, Voltage Source Converter)

Bei dieser Anordnung ist der Umrichter an die Statorwicklungen angeschlossen und muss so ausgelegt sein, dass er die volle Leistung des Motor-Generators dauerhaft tragen kann (=Vollumrichter). Neben ökonomischen Gründen ist die Leistung solcher Einheiten auf die Größe der auf dem Markt erhältlichen Umrichter begrenzt.

Vorteile der drehzahlvariablen Pumpturbinen

Mit drehzahlvariablen Pumpturbinen kann ein höherer Gesamtwirkungsgrad im Turbinenbetrieb (insbesondere im Teillastbetrieb) erzielt werden. Im Pumpenbetrieb kann die Leistung entsprechend der aktuellen hydraulischen und netztechnischen Notwendigkeit angepasst werden. Darüber hinaus eignen sich drehzahlgeregelte Maschinensätze zur Frequenz- und Leistungsregelung des Netzes (Primärregelung), indem sie die schnellen Regelungsmöglichkeiten durch Umrichter nutzen.



PSW Turlough Hill, Irland,
290 MW (1967–1973)



PSW Wehr, Deutschland, Hornbergstufe
1.000 MW (1970–1976)



PSW Goldisthal, Deutschland,
1.060 MW (1991–2004)

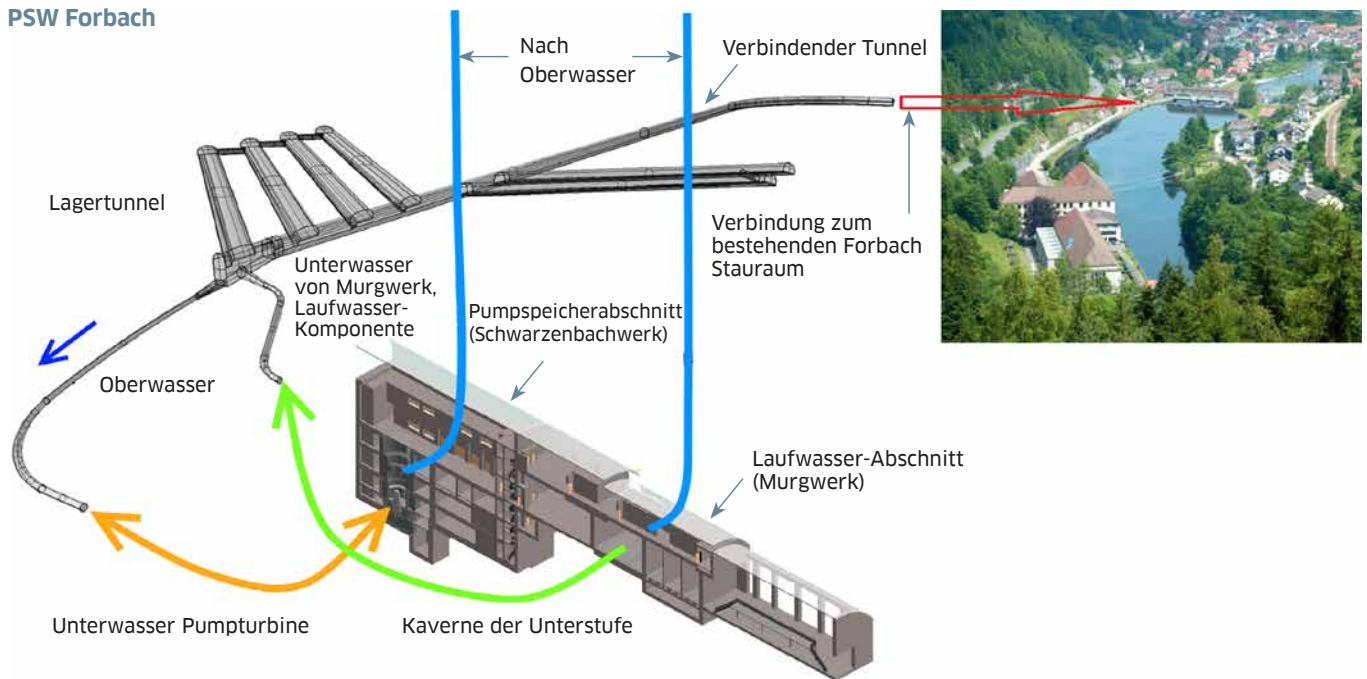
Innovative Technologie im heutigen Design

Unterirdische Kavernenspeicher

Um die Auswirkungen auf das Landschaftsbild und die Natur so gering wie möglich zu halten, werden zunehmend unterirdische Kavernenspeicher als zusätzliches Speichervolumen für Unterbecken konzipiert. Für das Projekt Erweiterung und Sanierung PSW Forbach (siehe Abbildung Seite 9) in Deutschland hat Tractebel eine unterirdische Speicherkaverne entworfen.

Der Kavernenspeicher hat vier „Speicherstollen“, zwei Stollen mit einer Länge von 340 m und zwei mit einer Länge von 210 m. In der Mitte verbindet ein Verbindungsstollen mit einer Länge von rund 1.000 m die Triebwasserstollen der Maschinenkaverne mit dem bestehenden oberirdischen Speicherbecken und den Speicherstollen.

PSW Forbach



PSW Guangzhou, China, Phase II,
1.224 MW (1994–2000)



PSW Siah Bishe, Iran, Phase 2,
1.000 MW (2003–2011)



PSW Waldeck 1, Deutschland,
70 MW (2004–2009)

Planungstool zur Identifizierung geeigneter Standorte

Tractebel hat ein auf einem geografischen Informationssystem (GIS) basierendes Planungstool entwickelt, mit dem große Gebiete auf geeignete PSW-Standorte untersucht werden können. Die von der Untersuchung abgedeckten Gebiete können in ihrer Größe variieren, von Ländern, Bundesstaaten, Landkreisen oder anderen Gebieten bis über Bereiche von tausenden Quadratkilometern.

Die Besonderheit unseres Planungstools ist die individuelle Anpassung auf spezifische vom Kunden gewünschte Kriterien, wie z. B.: installierte Leistung, Beschränkung der Investitionskosten, geologische Zwänge, maximale Entfernung zum nächsten Netzanschluss, ökologische und soziale Einschränkungen, usw.

Der Auswahlprozess für die Suche umfasst drei grundsätzliche Schritte:

1. Geländeanalyse
2. Standortanalyse
3. Rangfolge der Standorte und Sensitivitätsanalyse

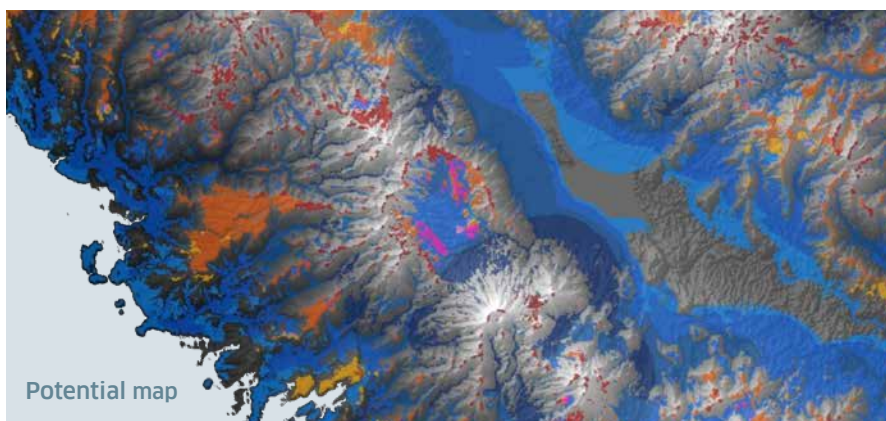
Im ersten Schritt, der **Geländeanalyse**, werden vorgegebene Gebiete dahingehend überprüft, um Standorte zu identifizieren, die den Bau von Ober- und Unterbecken innerhalb einer vorgegebenen maximalen horizontalen Entfernung (z. B. 5.000 m) ermöglichen und gleichzeitig einen vorgegebenen minimalen Höhenunterschied (z. B. 300 m) aufweisen. Darüber hinaus kann unser Planungstool prüfen, ob das Gelände für den Bau von Speicherbecken und Dämmen geeignet ist. Bei der Errichtung von Speicherbecken ist der Bau im sogenannten „Massenausgleich“ oberstes Ziel. Hierbei entspricht die Menge des

Aushubs in etwa der Menge der Aufschüttung; während bei Dämmen eine maximale Höhe festgelegt werden kann, die es ermöglicht, ein gewünschtes Speichervolumen für das vorherrschende Gelände zu optimieren.

Der zweite Schritt ist die **Standortanalyse**, bei der die Ergebnisse des vorherigen Schritts weiter verfeinert werden. Ziel dieser Analyse ist es, Standorte auszuschließen, die eine Reihe vordefinierter Kriterien nicht erfüllen, z. B. das Vorhandensein von Siedlungen, bedeutender Infrastruktur und Schutzgebieten. Andere standort-, projekt- und kundenspezifische Einschränkungen können ebenfalls in die Analyse einbezogen werden.

Unter Berücksichtigung der verbleibenden Standorte werden in diesem Schritt mögliche Kombinationen von Ober- und Unterwasserbecken definiert, die auch als „Paare“ bezeichnet werden. Auf alle identifizierten Paare wird ein standardisiertes Anlagenlayout angewandt, das nur die wichtigsten Anlagenkomponenten umfasst, um die installierte Anlagenkapazität abzuschätzen. Um die Paare in Bezug auf Kosten und CAPEX vergleichbar zu machen, werden Indikatoren wie z. B. Einheitspreise Euro pro kW berechnet.

Im letzten Schritt wird eine **Rangliste** der ermittelten Paare erstellt, die auf drei weiteren Kriterien beruht: technische, sozio-ökonomische und ökologische. Ergänzende Kriterien wie Hydrologie, Straßenzugang und Entfernung zu Netzanschlusspunkten können ebenfalls in die Rangliste aufgenommen werden. Um die Rangfolge der Varianten definitiv festzulegen wird eine **Sensitivitätsanalyse** durchgeführt.



Oberbecken → Unterbecken → Beide Typen



PSW Vianden, Luxemburg,
Maschinensatz 11 (2006–2016)

Untersuchte Projekte

Grundlage für die erfolgreiche Realisierung und den Betrieb eines Pumpspeicherkraftwerks ist eine solide und technisch versierte Planung. Einige Referenzen zu PSW-Großprojekten, bei welchen Tractebel die Entwurfs- und/oder Ausführungsplanung erstellte, sind im Folgenden näher erläutert:

PSW Limberg III, Österreich

Die Errichtung des PSW Limberg III ist als Erweiterung der Kraftwerksgruppe Glockner-Kaprun geplant. Diese besteht aus den Kraftwerken Kaprun-Hauptstufe und -Oberstufe mit einer installierten Gesamtleistung von 353 MW, sowie dem 2011 in Betrieb genommenen PSW Limberg II mit einer Leistung von 480 MW.

Mit PSW Limberg III werden die vorhandenen Jahresspeicher Mooserboden als Oberbecken und Wasserfallboden als Unterbecken zusätzlich zum bestehenden Kraftwerk Kaprun-Oberstufe und dem PSW Limberg II im Pumpturbinenbetrieb zur Stromerzeugung genutzt und so 30 % mehr Strom erzeugt. Daher müssen keine neuen Speicherbecken errichtet werden. Die neu zu errichtenden baulichen, maschinellen und elektrischen Kraftwerkseinrichtungen sind in einem unterirdischen Kavernen-, Stollen- und Bauwerkssystem angeordnet.

PSW Atdorf, Deutschland

Obwohl die Geschichte des Projekts bis in die 1970er Jahre zurückreicht, wurden bis heute keine Schritte zur Realisierung der Anlage unternommen. Die Wasserwege bestehen aus einem 700 m langen vertikalen Druckschacht vom Oberbecken bis zur Krafthauskaverne (Pumpturbinen, Gesamtleistung max. 1.400 MW) und von dort aus einem 8 km langen Druckstollen zum Unterbecken.

Leistungen:

- Alternative Studien (2007 – 2008)
- Überwachung und Auswertung von geotechnischen Untersuchungen (2008 – 2009)
- Detaillierte Planung (2010)

Auftraggeber:

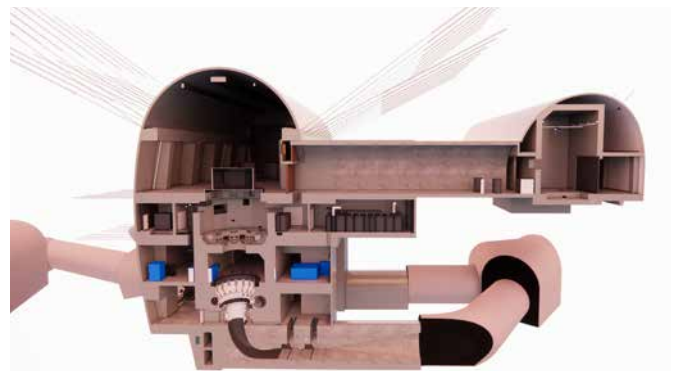
Schluchsee AG, Laufenburg, Deutschland

Leistungen:

- Ausschreibungsplanung der Tunnelsysteme inklusive Festlegung der Vortriebsklassen und der Kavernen mit BIM.
- Erstellung von umfangreichen Leistungsverzeichnissen, Baubeschreibung, detailliertem Bauablaufplan, Sicherheits- und Gesundheitsschutzplan sowie Ausschreibungsdokumente.

Auftraggeber:

VERBUND Hydro Power GmbH, Wien, Österreich



Untersuchte Projekte

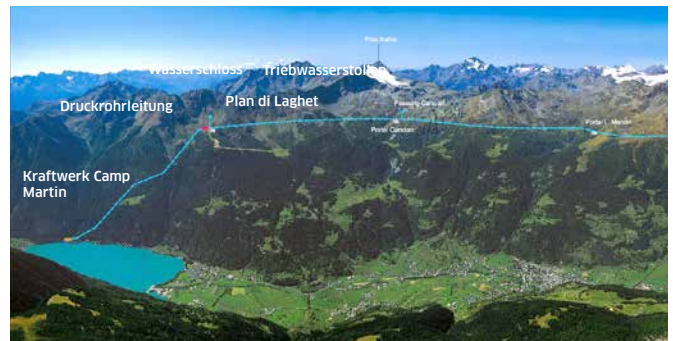
PSW Lagobianco, Schweiz

Das PSW Lagobianco wird den bestehenden Lago Bianco „Weißer See“ in der Nähe des Berninapasses als Oberbecken nutzen. Die Anlage besteht aus einem rund 18 km langen Druckstollen und einem 2,5 km langen Druckschacht. Die Maschinensätze sind mit Pelton-Turbinen und fünfstufigen Speicherpumpen in vertikaler Anordnung ausgestattet. Bei einem Abfluss von rund 95 m³/s und einer Fallhöhe von 1.270 Metern ergibt sich eine installierte Leistung von 1.050 MW (siehe Seite 4).

Leistungen:

- Entwurfsplanung für die behördliche Genehmigung
- Ausschreibungsplanung und Erstellen der Ausschreibungsdokuments

Auftraggeber: Repower AG, Poschiavo, Schweiz



PSW Forbach, Deutschland

Das PSW Forbach ist eines der ältesten kombinierten Pumpspeicher- und Laufwasserkraftwerken Europas. Es wurde 1914 und 1926 errichtet und ist seither fast ununterbrochen in Betrieb.

Die Planung sieht deutliche Erweiterungen vor:

- Errichtung einer Oberstufe mit reversiblen 225 MW Pumpturbine, Unterstufe mit reversibler 50 MW Pumpturbine; für die Oberstufe eine neue Maschinenkaverne und neues Oberbecken.
- 19 MW Laufwasserkraftwerk der unteren Stufe.

Die bahnbrechende Innovation (siehe Seite 6) des Projekts besteht darin, die zu realisierende Speicherkapazität in den Untergrund zu verlagern und die Speicherkaverne mit dem bestehenden offenen oberirdischen Speicherbecken zu verbinden.

Leistungen:

- Machbarkeitsstudien für Erweiterung und Sanierung
- Konzeptentwurf, Entwurf zur behördlichen Genehmigung
- Planungen für Raumordnungsverfahren und Genehmigungen

Auftraggeber:

EnBW Energie Baden-Württemberg AG, Karlsruhe, Deutschland



Engineering für eine klimaneutrale Zukunft

Tractebel bietet seinen Kunden ein umfassendes Angebot an Ingenieur- und Beratungsleistungen während des gesamten Lebenszyklus ihrer Projekte, einschließlich Planung und Projektmanagement. Als eines der weltweit führenden Ingenieur- und Beratungsunternehmen mit mehr als 150 Jahren Erfahrung ist es unsere Aufgabe, die Welt von morgen aktiv zu gestalten. Mit rund 4.800 ideenreichen Fachleuten und einer Präsenz in mehr als 70 Ländern bieten wir unseren Kunden multidisziplinäre Lösungen in den Bereichen Energie, Wasser und städtischer Infrastruktur.

Seit Dezember 2014 gehört die Tractebel Engineering GmbH (ehemals Lahmeyer International) zu Tractebel und ist damit Teil des internationalen ENGIE Konzerns mit Hauptsitz in Paris.

Tractebel Engineering GmbH

Friedberger Str. 173
61118 Bad Vilbel, Deutschland

Tel.: +49 6101 55-0

Fax: +49 6101 55-2222

info-de@tractebel.engie.com

www.tractebel-engie.de

blog-tractebel.lahmeyer.de

