

Markus Heinemann

ILF Beratende Ingenieure ZT GesmbH



Der Ausbau des Pumpspeicherwerks Vianden

Capacity increase of the Vianden pumped storage plant

Kurzfassung

Mit dem Ausbau der erneuerbaren Energien steigt auch die Bedeutung von Pumpspeicherwerken (PSW) in Europa. Momentan wird das PSW Vianden, eines der leistungsstärksten PSW Europas, vom Betreiber SEO um eine 11. Maschine (Turbinenleistung 195 MW, Pumpleistung 190 MW) erweitert. Das Projekt umfasst verschiedene Stollen- und Kavernenbauwerke, maschinentechnische und elektrotechnische Ausrüstung sowie verschiedene Maßnahmen an Ober- und Unterbecken zur Vergrößerung des vorhandenen Stauraums.

Die Baumaßnahmen im Rahmen des Teilloses „Los 1 – Bauliche Anlagen“ wurden an die Arbeitsgemeinschaft „Erweiterung PSW Vianden, Los 1“ (ARGE der Firmen Züblin/Jäger/Strabag) vergeben. ILF Beratende Ingenieure wurde von der ARGE mit der Ausführungsplanung der Rohbaumaßnahmen für die unterirdischen Bauwerke beauftragt.

Die Anlage besteht im Wesentlichen aus der Maschinenhauskaverne mit angrenzender Transformatorenkaverne, dem ca. 250 m langen Oberwasserdruckstollen mit 290 m hohem vertikalem Schacht, dem ca. 480 m langen Unterwasserstollen sowie mehreren Zufahrts- und Verbindungsstollen. Die Maschinenhauskaverne ist auf den unteren Ebenen als wasserundurchlässige Konstruktion nach WU-Richtlinie ausgeführt; auf den oberen Ebenen handelt es sich um einen Skelettbau mit massiven Bauteilabmessungen. Die Oberwasserwege erhalten eine mit selbstverdichtendem Beton hinterfüllte Stahlpanzerung, der Ausbau des Unterwasserstollens erfolgt mit einer Stahlbetoninnenschale.

Während der Bauzeit werden insgesamt ca. 26.000 m³ Stahlbeton und 2.850 t Bewehrungsstahl unter Tage verbaut. Mit Ausbruch und Sicherung der Hohlräume und Stollen wurde im April 2010 begonnen. Ende März 2011 wurde mit der Betonage begonnen. Inbetriebsetzung und Probetrieb sind für April bis Oktober 2013 geplant.

Summary

In the wake of the rising importance of renewable energies in Europe, pumped storage plants are becoming more and more important. At the moment, the Vianden pumped storage plant, one of the most efficient plants of this kind in Europe is being upgraded by its operator SEO by an 11th machine unit (turbine capacity 195 MW, pump capacity 190 MW). The project includes several tunnels and caverns, buildings, mechanical equipment and electrical equipment as well as various measures to increase the available capacity of the upper and lower reservoirs.

The „Erweiterung PSW Vianden, Los 1“ consortium (formed by the companies Züblin/Jäger/Strabag) was awarded the contract for the construction works. ILF Beratende Ingenieure was commissioned by the consortium to prepare

the structural analyses and drawings (detailed design) which are required for the construction of the underground structures. The main parts of the projected pumped storage plant are: the underground powerhouse with an adjoining cavern housing the power transformers; the 250-m-long headrace tunnel with a 290-m-long vertical shaft; the approx. 480-m-long tailrace tunnel; several access tunnels and connecting tunnels. On the lower levels of the powerhouse cavern, the concrete structure was designed as an impermeable structure; on the upper levels, the frame construction has structural members with widths larger than 80 cm. The headrace tunnel and the vertical shaft are lined with steel; the annular ring is backfilled with self-compacting concrete. The inner lining of the tailrace tunnel is constructed with reinforced concrete.

During construction, a total amount of approx. 26,000 m³ of reinforced concrete and 2,850 t of reinforcing steel will be installed underground. The excavation and installation of the temporary support of the caverns and tunnels was started in April 2010. The concrete works were launched at the end of March 2011. Commissioning and trial run are scheduled to take place between April to October 2013.

1. EINFÜHRUNG

Mit dem Ausbau der erneuerbaren Energien steigt auch die Bedeutung von Pumpspeicherwerken (PSW) in Europa. In diesen Anlagen wird elektrische Energie in Form von potenzieller Energie (Lageenergie) gespeichert: Mittels strombetriebener Pumpen wird Wasser in ein höher gelegenes Speicherbecken gepumpt; wird dieses entleert, so treibt das abfließende Wasser Turbinen zur Stromgewinnung an. Durch den Einsatz von Pumpspeicherwerke können Spitzenzeiten im Stromverbrauch abgedeckt und Schwankungen im Stromnetz verhindert werden.

2. ÜBERBLICK ÜBER DIE BESTEHENDE ANLAGE DES PSW VIANDEN

Das Pumpspeicherwerk Vianden (Luxemburg) des Betreibers Société Electrique de l'Our (SEO) mit 10 Maschinensätzen und einer Gesamtleistung von momentan 1096 MW (Turbinenbetrieb) bzw. 850 MW (Pumpbetrieb) ist eines der leistungsstärksten Pumpspeicherwerke Europas und ist an das europäische Verbundstromnetz angebunden.

Die Maschinensätze 1 bis 9 (neun horizontale dreiteilige Maschinensätze mit 100/70 MW Leistung) sind in einer Kaverne im Nikolausberg oberhalb des Ortes untergebracht und wurden 1964 in Betrieb genommen.

In den Jahren 1970 bis 1976 wurde das PSW Vianden bereits um eine zehnte Maschine (vertikale Pumpturbine mit 196 MW/220 MW Leistung) in einem Schachtkraftwerk erweitert.

3. BESCHREIBUNG DES AUSFÜHRUNGSPROJEKTS

3.1 Bauwerke

Im Rahmen des momentan laufenden Ausbaus wird das PSW Vianden um eine 11. Maschine (Turbinenleistung 195 MW, Pumpleistung 190 MW) erweitert. Das Projekt umfasst verschiedene Stollen- und Kavernenbauwerke, maschinentechnische und elektrotechnische Ausrüstung sowie verschiedene Maßnahmen an Ober- und Unterbecken zur Vergrößerung des vorhandenen Stauraums. Die Baumaßnahmen im Rahmen des Teilloses „Los 1 – Bauliche Anlagen“ wurden an die Arbeitsgemeinschaft

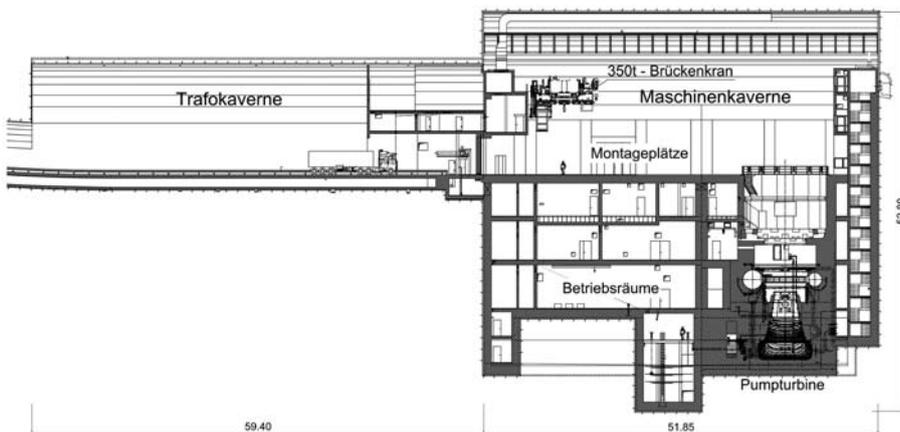


Abb. 1
Längsschnitt
Maschinen- und Trafokaverne

„Erweiterung PSW Vianden, Los 1“ (ARGE der Firmen Züblin/ Jäger/Strabag) vergeben. ILF wurde von der ARGE mit der Ausführungsplanung der Rohbaumaßnahmen für die folgenden unterirdischen Bauwerke beauftragt:

- Maschinenhauskaverne: Massivbauwerk, unterteilt in Maschinenblock und Montageblock, in einer Kaverne mit ca. $b \times h \times l = 25 \times 53 \times 52$ m zur Aufnahme der Pumpturbine und der Betriebseinrichtungen
- Transformatorenkaverne: Massivbauwerk in einer Kaverne mit ca. $b \times h \times l = 17 \times 18 \times 60$ m zur Aufnahme der Transformatoren sowie der Klimatechnik
- Unterwasserstollen: Druckstollen mit Stahlbetoninnenschale, Länge ca. 478 m
- Oberwasserdruckstollen und -schacht: Stollen (Länge ca. 250 m) und Schacht (Höhe ca. 290 m) mit Stahlpanzerung
- Zufahrts- und Verbindungsstollen: Stollen mit Betonfahrbahn und in der Sohle geführten Fortluft- und Entrauchungskanälen, Länge ca. 345 m

3.2 Termine

Ausbruch und Sicherung der Hohlräume und Stollen erfolgten zwischen April 2010 und März 2011. Die Betonarbeiten begannen im März 2011 mit der Betonage der Fahrbahn des Zufahrtsstollens 3. Ungefähr zeitgleich dazu starteten die Arbeiten in der Maschinen- und Trafokaverne.

Zwischen Mai und August 2011 wurden die Betonarbeiten im Maschinenblock für die Installation des Saugrohrs unterbrochen, im September 2011 wurde es mit Zweitbeton einbetoniert. Seit Juli 2011 wird auch die Druckrohrpanzerung des Oberwasserstollens eingebaut.

Die Betonarbeiten für den Erstbeton in der Kaverne werden voraussichtlich April 2012 abgeschlossen. Es erfolgt dann die Montage des 350 t-Trägerkrans sowie die Installation der maschinentechnischen Ausrüstung.

Die für das Jahr 2012 geplanten Arbeiten umfassen außerdem die Ausbauarbeiten/Mauerwerksarbeiten in den Kavernen (ab Februar 2012), die Ortbetoninnenschale des Unterwasserstollens (ab März/April 2012), sowie den Einbau der endgültigen Fahrbahnen in den Zugangsstollen (ab Herbst 2012).

4. BETONBAU

Insgesamt wird laut Planung allein in den beiden Kavernen ca. 16.500 m³ Beton eingebaut und 1.850 t Bewehrungsstahl verlegt.

Der Beton wird in einer eigens installierten Mischanlage auf der Baustelle hergestellt und mit Mischfahrzeugen in die Kaverne transportiert. In der Kaverne wird der Beton mittels Betonverteiler eingebracht.

Der pumpbare Beton mit weicher Konsistenz F3 wurde dabei so eingestellt, dass eine Verarbeitung innerhalb von 1,5 bis 2 Stunden möglich ist. Zur Reduktion der Hydratationswärme wurde in massigen Bauteilen ein Hochfenzement CEM III/A verwendet, der gegenüber dem sonst verwendeten CEM II/A-S eine geringere Wärmeentwicklung aufweist.



Abb. 2 Maschinenkaverne: Betonverteiler

Trafo- und Maschinenkaverne sind in 120 bzw. 540 Betonierabschnitte unterschiedlicher Größe unterteilt:

- Wände mit 3–5 m Höhe und 6 m Länge je Betonierabschnitt
- Stützen bis 5 m Höhe je Betonierschnitt
- Decken bis maximal 300 m³ je Betonierabschnitt

Es war anfangs angedacht, die Treppenhaustürme mit einer Kletterschalung herzustellen, die Höhe der Betonierabschnitte wurde hierfür auf 3 m beschränkt. Die sichtbaren Betonflächen wurden entsprechend der



Abb. 3 Betonarbeiten in der Maschinenkaverne

Anforderungen der Sichtbetonklassen SB1 bzw. SB2 nach DBV Merkblatt „Sichtbeton“ ausgeführt.

Es wurden die folgenden Betonsorten (Beton nach Anforderungen) verwendet:

- C30/37 XC4, XA1 (flüssigkeitsdichter Beton, teilweise mit Beschichtung und entsprechenden Anforderungen an die Beschränkung der Rissbreiten) für die im Endzustand wassergefüllten Bauteile wie Pumpensümpfe, Drainagegang, Raum für Koaleszenzabscheider
- C25/30 XC3, XA1 für die Stahlbetonkonstruktion bis OK Turbinenflur
- C25/30 XC1 für die darüberliegenden Stahlbetonbauteile



Abb. 4 Maschinenkaverne: Betonage des Maschinenblocks

Bis Oberkante Turbinenflur, d.h. ca. 20 m über Gründungssohle, ist die Stahlbetonkonstruktion der Maschinenkaverne als WU-Konstruktion mit massiven Außenwänden ausgelegt. Arbeitsfugen wurden mit Fugenblechen entsprechend der WU-Richtlinie des DAfStB ausgeführt. Die Fuge zwischen Montage- und Maschinenblock wurde als Pressfuge mit innenliegendem Dehnfugenband ausgeführt.

5. AUSFÜHRUNGSPLANUNG

5.1 Tragwerksplanung

Neben den Eigenlasten des Bauwerks und den vertikalen Nutzlasten auf den Bauwerksdecken waren verschiedene weitere Einwirkungen bei der Bemessung zu berücksichtigen:

- In Räumen mit elektrotechnischer Ausrüstung kann sich bei Auftreten eines ungewollten Lichtbogens ein Explosionsdruck aufbauen, der bei der Bemessung des Massivbaus zu berücksichtigen ist (Lastfall „Störlichtbogen“).
- Lasten aus den wasserbaulichen Anlagenteilen (Saugrohr, Saugrohrklappe, Kugelschieber, Spiraleinlaufrohr)

- Einwirkungen aus der maschinentechnischen Ausrüstung

Von den Herstellern von Pumpturbine und Motor-Generator wurden für verschiedene Betriebszustände und Störfälle Einwirkungen und Kräfte genannt, die in unterschiedlicher Kombination bei der Bemessung des Massivbaus zu berücksichtigen waren. Außerdem wurden die Eigenformen der Stahlbetonstruktur untersucht. Besonders für die Auflagerpunkte der Maschinenkomponenten sind in vom Hersteller genannten Frequenzbereichen Eigenformen mit ausreichender Sicherheit auszuschließen. Mittels modaler „steady-state“-Berechnungen wurden die Verformungen der Auflagerpunkte im eingeschwungenen Zustand unter Last ermittelt; mit diesen Werten wurden die vom Hersteller an den Auflagerpunkten geforderten dynamischen Steifigkeiten des Bauwerks nachgewiesen.

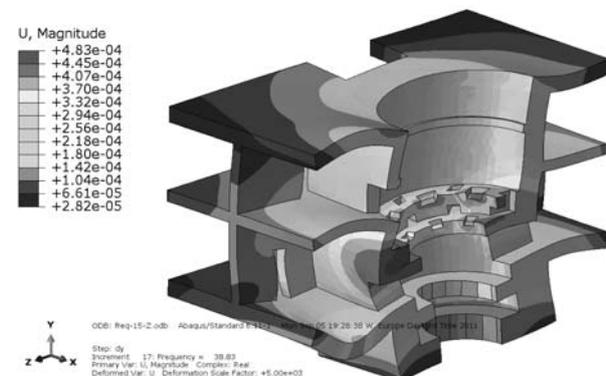


Abb. 5 Dynamische Berechnungen:

Verformungen aus dynamischen Kräften

5.2 Konstruktives Detail: Verbindung Erst- und Zweitbeton

Nach dem Einbau des Maschinensatzes sowie des Saugschlauches werden die Bauteile mit Zweitbeton vergossen. Um eine monolithische Verbindung zwischen den beiden Betonierabschnitten, besonders in den großflächigen vertikalen Arbeitsfugen, zu erreichen, sollten laut Ausschreibung die Kontaktflächen zwischen beiden Arbeitsabschnitten rau ausgeführt und Bewehrung über die Fuge hinweg eingebaut werden. Hierdurch soll Verbund der beiden Bauteile über die „kalte Fuge“ hinweg erreicht werden.

Von ILF wurde die folgende, vom Entwurf abweichende, innovative Konstruktionsweise vorgeschlagen:

- Die freien Betonflächen des Erstbetons zum Zweitbeton hin werden ausreichend rau ausgeführt.
- Die Betonrezeptur des Zweitbetons ist so abzustimmen, dass nur geringes Fröhschwinden auftritt. Hierbei kann auch ein Beton mit langsamer Festigkeitsentwicklung (56-Tage-Festigkeit) oder geringer Endfestigkeit zum Einsatz kommen.



Abb. 6 Maschinenkaverne:
Bewehrungsarbeiten am Saugrohr

- In der Fuge werden planmäßig Injektionssysteme vorgesehen; evtl. auftretende größere Schwindrisse werden kraftschlüssig verpresst.
- Es kann auf Bewehrung über die Fuge hinweg verzichtet werden.

Dies hätte neben Einsparungen bei Stahl und Schalung einen positiven Einfluss auf den ohnehin meist knappen Arbeitsraum für die Installation der Maschinenkomponenten. Es wurde jedoch in Abstimmung mit dem Bauherrn die ausgeschriebene konservative Konstruktion ausgeführt.

5.3 Konstruktives Detail: Festpunkt der Druckstollenpanzerung

Der Oberwasserweg besteht aus dem schwach geneigten OW-Druckstollen, dem Vertikalkrümmen sowie dem vertikalen OW-Druckschacht. In einem Abstand von ca. 28 m zur Hohlraumwand der Maschinenkaverne knickt der OW-Druckstollen um 90° ab. Auf den letzten 17 m vor der Maschinenkaverne verkleinert sich der Querschnitt der Panzerung von 4,5 auf ca. 2,5 m Innendurchmesser („Konusstrecke“). Der Druckstollen ist aufgrund der hohen auftretenden Wasserdrücke auf der gesamten Länge mit einer Stahlpanzerung versehen.

Der Festpunkt der Druckstollenpanzerung wurde zwischen Horizontalkrümmen und Konusstrecke festgelegt. An dieser Stelle werden die aus Temperaturdehnung und Innendruck resultierenden Horizontalkräfte abgeleitet. Der Kugelschieber selbst ist gleitend gelagert. Die bei geschlossenem Kugelschieber auftretenden Deckel-druckkräfte werden in die Stahlpanzerung eingeleitet und am Festpunkt in den Fels abgetragen. Zur sicheren Lastableitung wird der Festpunkt als bewehrte Stahlbetonkonstruktion ausgeführt.

6. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die Arbeiten für den Erstbeton der Maschinenkaverne werden bis April 2012 abgeschlossen sein. Nach Abschluss der Montage des 350 t-Krans und der Maschinenkomponenten erfolgt anschließend der Verguss mit Zweitbeton. Inbetriebsetzung und Probetrieb werden laut Terminplan nach Abschluss der letzten Beton- und Ausbaurbeiten zwischen April und Oktober 2013 erfolgen.

Während der gesamten Bauzeit wurden dann insgesamt 26.000 m³ Stahlbeton und 2.850 t Bewehrungsstahl unter Tage verbaut.



Abb. 7 Oberwasserstollen: Hinterfüllen der Panzerung