Hans-Joachim Stech, Dipl.-Ing., Senior Consultant, HIC Holzhäuser Ingenieur Consult GmbH, Ettlingen (D)
Gabriella Caccavo, Dipl.-Ing., Senior Engineer, Geoconsult ZT GmbH, Puch bei Hallein (A)
Ulrich Gommel, Dipl.-Ing., Gesamtprojektleiter, EnBW Energie Baden-Württemberg AG, Stuttgart (D)
Ingo Kamuf, Dipl.-Ing., Projektleiter Bautechnik, EnBW Energie Baden-Württemberg AG, Stuttgart (D)

Neubau Pumpspeicherwerk Forbach – Verlagerung in eine große Kaverne: 3D-Prognosemodell Geologie, Einfluss der Planungstiefe auf die Akzeptanz, aktueller Stand

Im Murgtal im Nordschwarzwald befindet sich das Rudolf-Fettweis-Werk der EnBW (Energie Baden-Württemberg AG). Zur Weiterentwicklung des Kraftwerksstandorts wurden schon in früheren Jahren verschiedene Ausführungsvarianten untersucht. Die hieraus resultierende Neubau-Variante mit einer untertägigen Unterstufe wurde in das Planfeststellungsverfahren eingereicht und ausgeschrieben. Die Geologie besteht aus der Forbach-Granit-Formation, in der lokale Schwächezonen erkundet wurden. Angesicht der Ausdehnung des Projektgebietes kam ein geologisches 3D-Prognosemodell zum Einsatz, um die Interpretation der räumlichen Lagebeziehung der Schwächezonen im Gebirge und die Orientierung der neuen unterirdischen Anlagen entsprechend zu optimieren. Vermeidbaren negativen Auswirkungen für die Öffentlichkeit wurde schon früh entgegengewirkt, sodass das Projekt eine ausgesprochen hohe Akzeptanz genießt. Der folgende Beitrag gibt einen aktuellen Überblick.

New Construction of the Forbach Pumped-Storage Plant – Relocation into a Large Cavern: 3D Geology Forecast Model, Influence of Planning Depth on Public Acceptance, Current Status

The hydropower plant Rudolf-Fettweis-Werk, owned and operated by EnBW (Energie Baden-Württemberg AG), is situated in the Murg valley in the northern Black Forest. Several configuration alternatives were designed and evaluated in the last years for the renewal and extension of the existing plant. The resulting design solution is a new underground reservoir. It has been submitted for approval procedure and tendered. The in-situ rock mass consists of Forbach Granite with local weakness zones, as encountered in the boreholes. Considering the extension of the project area, a 3D geological prediction model was used to allow a better interpretation of the spatial relationships of weakness zones in the rock mass and to optimize the orientation of the underground caverns. Adverse effects for the public were counteracted at a very early stage, so that the project received a high acceptancw The present paper describes the current state of the project.

1 Einführung

Seit rund 100 Jahren ist am EnBW-Standort Forbach im Nordschwarzwald das Rudolf-Fettweis-Werk (RFW), ein kombiniertes Laufwasser- und Pumpspeicherkraftwerk, in Betrieb. Die Kraftwerksanlage verfügt derzeit über ein Leistungsvermögen von insgesamt 68 MW. Sie liegt am Ufer des Schwarzwaldflüsschens Murg am südlichen Ortseingang der Gemeinde Forbach (**Bild 1**). Im Kraftwerksgebäude befinden sich insgesamt sieben Turbinensätze, fünf davon gehören zum Murgwerk und zwei Pumpturbinen zum Schwarzenbachwerk. **Bild 2** gibt einen Überblick über die Wasserwege und das Einzugsgebiet für das RFW. Oberwasserseitig des RFW befindet sich eine Stauanlage bei Kirschbaumwasen. Von hier wird das Wasser über einen etwa 5,6 km langen Druckwasserstollen zum Wasserschloss 1 und dem Apparatehaus 1 geführt und weiter über zwei Hangrohrleitungen aus Stahl zum Kraftwerk geleitet. Sofern dieses Wasser nicht in den fünf Francis-Turbinen des Murgwerks (22 MW) zur Energiegewinnung genutzt und wieder in die Murg zurückgegeben wird, kann es alternativ über die Pumpturbinen in den etwa 350 m höher gelegenen Schwarzenbachstausee gepumpt werden. Zu erwähnen ist, dass der Stauraum zwischen Niederdruckwerk Forbach und dem RFW nicht als Unterbecken für die Kraftwerksanlage dienen kann.

Der Schwarzenbachstausee hingegen dient der gesamten Kraftwerksanlage als „echtes" Oberbecken mit einem Speichervolumen von etwa 14 Mio. Kubikmetern. Vom Entnahmeturm in der Mitte der Schwarzenbachtalsperre führt ein etwa 1,6 km langer Druckwasserstollen zum Wasserschloss 2, von dort zum Apparatehaus 2 und über eine weitere 881 m lange Stahlrohrleitung den Hang hinab zum RFW. Dort wird das Wasser mit den beiden Pelton-Turbinen des Schwarzen-

Quelle: EnBW

Bild 1 *RFW mit unterem Bereich der Hangrohrbahn bis Apparatehaus 1*
Lower part of the pressure pipe between RFW and valve house 1

bachwerks (46 MW) zur Energieerzeugung verwendet, ebenfalls in den Staubereich des Niederdruckwerks abgegeben und kann für die weitere Stromerzeugung im RFW nicht mehr verwendet werden.

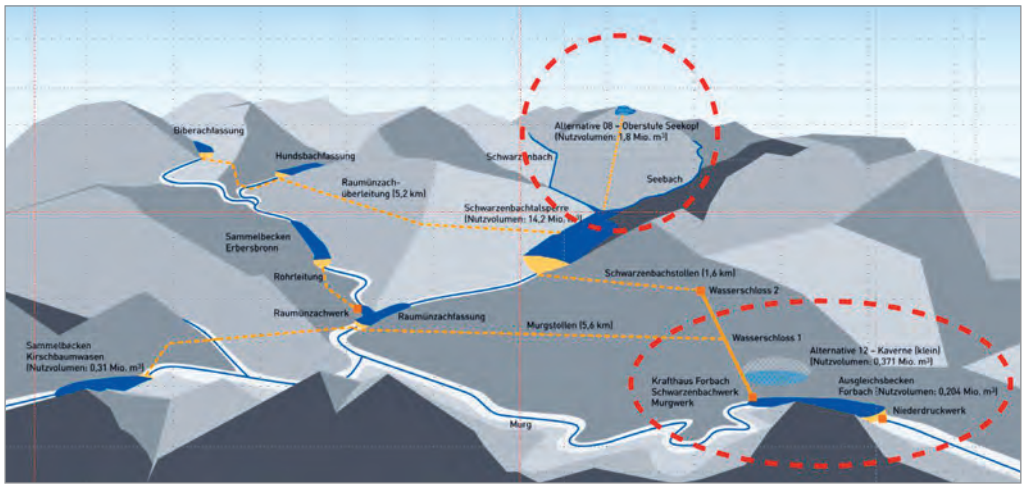
Das Einzugsgebiet des RFW ist jedoch weitaus großräumiger angelegt. Es erstreckt sich auch auf die Seitentäler mit weiteren Sammelbecken, deren Wasser entweder in den Schwarzenbachstausee übergeleitet oder aber der Raumünzachfassung zugeführt wird.

Die Anlage des RFW ist voll funktionstüchtig, allerdings sind viele Anlagenteile mittlerweile in die Jahre gekommen und bedürfen einer kostenintensiven Revision oder einer Umrüstung, um auch für die nächsten Jahrzehnte eine zuverlässige Stromerzeugung sicherzustellen. Diese ebenfalls kostenintensiven Revisionsarbeiten würden zudem einen längeren Produktionsausfall mit sich ziehen.

2 Frühere Planungen

Bereits in den Jahren 2010 bis 2015 wurden für den Kraftwerksstandort Forbach sowohl die Machbarkeit von verschiedenen Ausführungsvarianten untersucht als auch erste Entwurfsplanungen für die Weiterentwicklung des Standorts durchgeführt. Die damaligen Planungen resultierten in einer abgeschlossenen Entwurfsplanung für folgendes Anlagenlayout:

Der Schwarzenbachstausee sollte als Unterbecken für ein auf einer der umliegenden Höhenzüge (Seekopf) neu zu erstellendes Oberbecken fungieren (**Bild 2**). Für diese neue Oberstufe mit 225 MW Nennleistung wurde nach einer Variantenstudie aufgrund der deutlich niedrigeren Investitionskosten die Ausbildung mit Maschinenkaverne einer Schachtkraftwerkslösung mit seichtem Hangstollen vorgezogen. Darauf aufbauend erfolgte die Ausplanung der Oberstufe in



Quelle: EnBW

Bild 2 *Schema des Gesamtlayouts RFW mit den Planungsvarianten für die Oberstufe und Unterstufe*
Schematic general arrangement of RFW showing the design configuration of the upper and lower basin

der vorliegenden Entwurfsplanung als Kavernenkraftwerk. Als Erweiterungsoption wurde für die Gesamtanlage zusätzlich eine neue Unterstufe geplant, die den Schwarzenbachstausee als Oberbecken und im Berg liegende Kavernenwasserspeicher als Unterbecken nutzt. Ein erster Entwurf sah dabei die weitere Verwendung der Hangrohrbahn und ein neu zu erstellendes Schachtkraftwerk im Gelände des RFW vor. Diese Planungen wurden jedoch in der Folgezeit nicht weiter vertieft. Aus der ursprünglichen Option „Neue Unterstufe" entwickelte sich das aktuelle Projekt.

3 Aktuelles Ausschreibungsprojekt

Anders als ein Verkehrsinfrastrukturprojekt ist ein Pumpspeicherwerk (PSW) eine nach marktwirtschaftlichen Kriterien betriebene Produktionsanlage. Die Projektrealisierung wird unmittelbar von aufwändigen marktwirtschaftlichen Modellrechnungen gesteuert. 2017 entschied sich die EnBW, mit der Variante des Neubaus einer untertägigen Unterstufe in das Planfeststellungsverfahren zu gehen.

Die darin ausgeplante Lösung sieht vor, dass sowohl die gesamte Kraftwerksanlage des RFW als Neubau in eine Kraftwerkskaverne ins Gebirge hinein verlagert werden soll als auch ein echtes Unterbecken in Form von untertägigen Kavernenwasserspeichern mit einem nutzbaren Gesamtvolumen von 200.000 m³ aufgefahren werden soll.

Bild 3 zeigt einen Lageplan des gesamten Neubauprojekts. Darin sind die Wasserwege blau hinterlegt. Ausgehend von den beiden alten und im Zuge des Neubauprojekts zu sanierenden Wasserschlössern des Schwarzenbachwerks (SBW) bzw. Murgwerks (MuW) verläuft der jeweilige Oberwasserweg über zwei Vertikalschächte hinunter in die neue Kraftwerkskaverne. Die Kraftwerkskaverne besteht aus drei Abschnitten, dem neuen Schwarzenbachwerk, der Trafokaverne im Mittelteil und dem neuen Murgwerk. Die Unterwasserwege beider Werke laufen im Hauptstollen zusammen, von dem sechs Nebenstollen abzweigen, die als Kavernenwasserspeicher dienen.

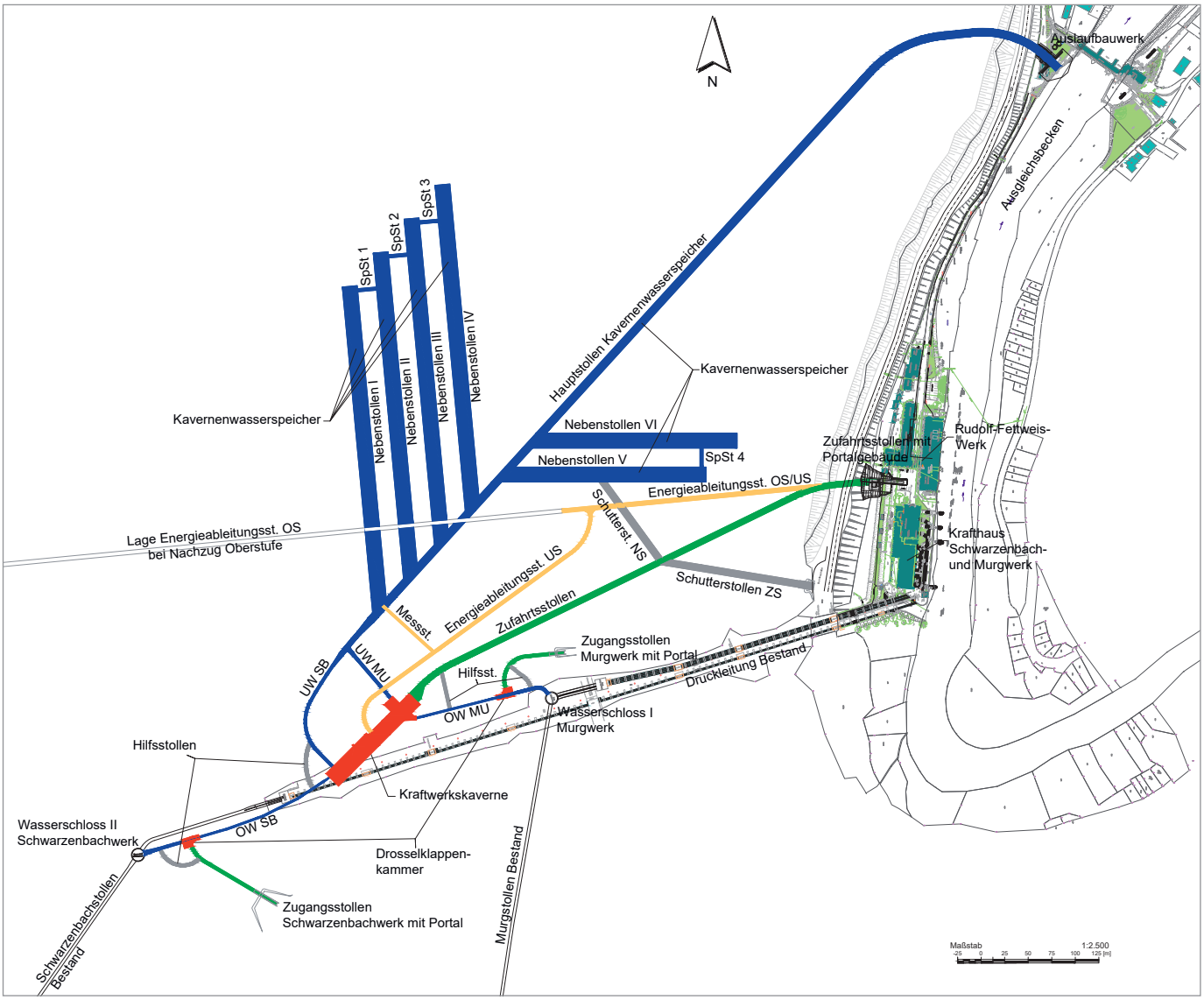


Bild 3 Lageplan der Gesamtanlage „Neue Unterstufe" mit Wasserwegen (blau), Zufahrtsstollen (grün), Kraftwerkskaverne (rot) und Energieableitungsstollen (gelb)
Layout of the overall plant "new lower basin" with pressure and storage tunnels (blue), access tunnel (green), powerhouse cavern (red) and cable tunnel (yellow)

Der Kavernenwasserspeicher besteht aus vier je 340 m (Nebenstollen I bis IV) beziehungsweise zwei je 210 m (Nebenstollen V bis VI) langen Nebenstollen, die stirnseitig an den ca. 946 m langen in nordöstlicher Richtung verlaufenden Hauptstollen anschließen. Dieser verbindet das bestehende Ausgleichsbecken Forbach und die Nebenstollen mit den Einläufen der Kraftwerkskaverne.

Der Zugang zur Kraftwerkskaverne während der Bauzeit und später im Betrieb erfolgt über den Zufahrtsstollen. Der in den beiden Kraftwerken erzeugte Strom wird über den Energieableitungsstollen ins RFW geführt. Die erzeugte bzw. bezogene elektrische Energie wird über die bestehende 110-kV Freileitung ins Netz eingespeist bzw. entnommen.

Während der Bauzeit verbindet ein 12 % geneigter Schutterstollen die untertägigen Baustellen mit der Bundesstraße B 462. Über diesen Stollen sollen etwa 90 % des Ausbruchmaterials zur Zwischenverwertung in einen nahegelegenen Steinbruch abtransportiert werden. Diese Planung macht es möglich, dass quasi der gesamte Schutter-Lkw-Verkehr aus der Gemeinde Forbach ausgelagert werden kann.

Das neue Schwarzenbachwerk wird mit einer reversiblen Pumpturbine mit 50 MW Nennleistung ausgerüstet. Das neue Murgwerk wird mit drei Francis-Turbinen ausgestattet und nutzt dabei Anlagen und Ausrüstungen des neuen Schwarzenbachwerks.

Die bestehenden oberirdischen Druckrohrleitungen des Schwarzenbach- und des Murgwerks sowie die hydraulischen und elektrischen Maschinen der beiden Werke werden nach Inbetriebnahme der neuen Anlagen außer Betrieb genommen. Auf die Planung der neuen Unterstufe nahmen folgende Aspekte maßgeblichen Einfluss:

- Geologische Herausforderungen aufgrund der erkundeten lokalen Schwächezonen (Vergrusungszonen, Störungsbereiche und engständiger geklüftetes Gebirge), die durch eine dreidimensionale Auswertung der Erkundungsdaten entsprechend über die geplante Lage der Bauwerke extrapoliert wurden.
- Hydraulische Aspekte im Sinne der Optimierung der Wasserwege, um möglichst geringe Energieverluste im System zu etablieren.
- Baubetriebliche Anforderungen an Zufahrten, BE-Flächen, Ver- und Entsorgung der Baustellen, Optimierung des Baustellenverkehrs.
- Insbesondere die Disposition der Ausbruchmassen für die rund 450.000 m³ Ausbruchmaterial stellte eine besondere Herausforderung an die Planung dar.

4 Anstehende Geologie

Die Beschreibung des Untergrundaufbaus im Projektgebiet beruht auf dem geotechnischen und hydrogeologischen Gutachten [2, 3].

Das Projektgebiet befindet sich im nördlichen Schwarzwald. In dieser Region sind die magmatischen Tiefengesteine des Grundgebirges weitgehend bis zur Oberfläche aufgeschlossen. Lediglich einige umliegende Höhenkuppen sind noch von sedimentären Schichten des Deckgebirges überlagert.

Für das Projektgebiet wurden folgende Schichten im Rahmen von zwei Erkundungsphasen festgestellt:

Bild 4 ***Bohrkerne aus der KS BK 109 mit vergrustem Forbach-Granit G4, w3 bis w4 [2]***
Core from borehole KS BK 109 with weakened Forbach Granite G4, w3 to w4 [2]

- Quartärer Hangschutt, im Areal oberhalb der querenden Hauptverkehrsstraße B 462,
- quartäre fluviatile Sedimente der Murg,
- rollige und bindige Auffüllungen unterhalb der B 462 sowie
- Forbach-Granit als Vertreter des Grundgebirges im gesamten Areal unter den quartären Sedimenten und den Auffüllungen.

Der Forbach-Granit ist als regellos körniger Zweiglimmergranit im Bereich des Murgtals direkt an der Geländeoberfläche aufgeschlossen und nur von quartären Deckschichten bzw. Auffüllungen überlagert. Er ist nach den Aufschlussergebnissen im Bauwerksbereich vereinzelt von hellen, mittel- bis feinkörnigen, harten Aplitgängen durchzogen, die ca. 60° bis 70° geneigt sind und eine Gangmächtigkeit im Meter- bis Dezimeterbereich besitzen.

In allen Aufschlüssen (Bohrungen und obertägige Aufschlüsse) wurden neben dem frischen Granit räumlich begrenzte vergruste Granitzonen festgestellt; dabei handelt es sich um hydrothermale Veränderungen des Granitgesteins, die vorwiegend an die Kluftsysteme des Grundgebirges gebunden sind. **Bild 4** gibt einen exemplarischen Eindruck, wie diese vergrusten Bereiche mit den Erkundungsbohrungen aufgeschlossen wurden.

5 Geotechnische Erkundung und daraus abgeleitetes geologisches Prognosemodell

Die erste geotechnische und hydrogeologische Erkundungsphase wurde bereits in den Jahren 2012/13 durchgeführt, damals noch mit dem Schwerpunkt auf die neue Oberstufe auf dem Seekopf konzentriert. Für diese Option eines neuen Unterstufenkraftwerks wurden zwar ebenfalls einige Erkundungsarbeiten durchgeführt, jedoch hat sich durch die Aktualisierung der Planung die Lage und die Bauwerkskonfiguration des Layouts geändert. Daher wurde für diesen Baubereich der neuen Unterstufe in den Jahren 2018/19 ein umfangreiches Erkundungsprogramm nachgeschoben, um die bereits vorhandenen Erkenntnisse weiter zu verdichten.

Um die Orientierung von Kraftwerkskaverne und Kavernenwasserspeicher zu optimieren, investierte die Vorhabens-

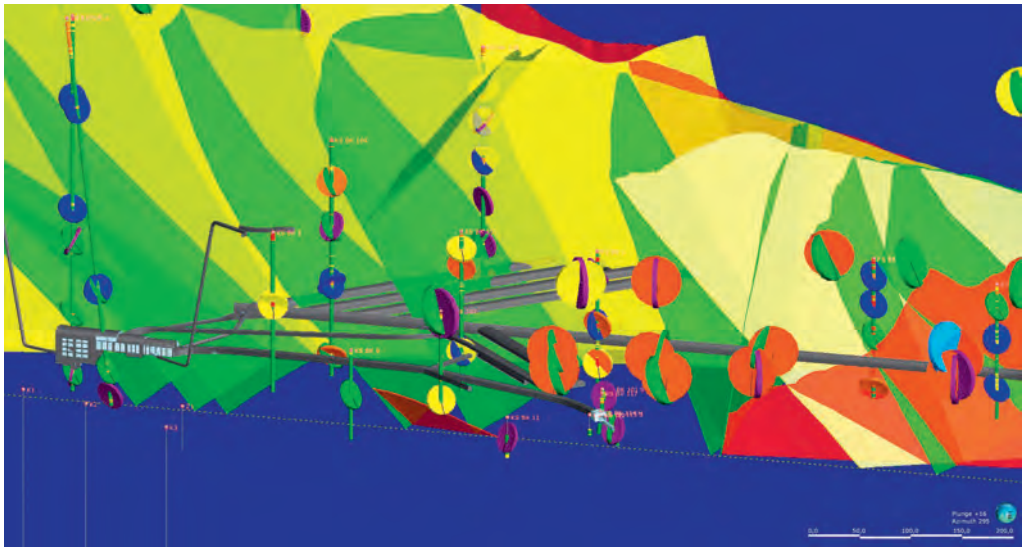


Bild 5 *Geologisches 3D-Prognosemodell mit räumlicher Ausdehnung der Schwächezonen (grün) im Bereich der Kraftwerkskaverne und der Kavernenwasserspeicher [2]*
Geological 3D prediction model with spatial extent of weakness zones around powerhouse and water storage caverns [2]

trägerin EnBW in ein 3D-Prognosemodell der anstehenden Geologie. Hierin wurden die punktuellen Erkenntnisse aus den Erkundungsbohrungen mit Hilfe einer entsprechenden Auswertungssoftware in ein dreidimensionales Raummodell extrapoliert und verarbeitet. **Bild 5** zeigt einen Ausschnitt aus der dreidimensionalen Darstellung im Bereich der Kraftwerkskaverne. Es ist zu erkennen, dass der Kavernenhohlraum von zwei schräg verlaufenden Schwächezonen durchlaufen wird.

In geotechnischen Längsschnitten für alle Teilbauwerke, die Kraftwerkskaverne sowie Stollen und Schächte, wurden alle geotechnischen Auswertungsdaten zur Klüftung, den Festigkeitseigenschaften, den primären Spannungszuständen, Vortriebsklassen und zur Hydrogeologie aufgetragen. Diese Informationen wurden unter anderem für die Planung und Dimensionierung der erforderlichen Sicherungsmittel und die Erstellung der Vortriebspläne zur Ausschreibung weiterverwendet.

Für die Kraftwerkskaverne wurden umfangreiche numerische 2D- und 3D-Berechnungen durchgeführt. Gerade für die Modellierung des numerischen 3D-Netzes waren die räumlichen Auswertungen sehr wertvoll. **Bild 6** zeigt das 3D-FE-Modell unter Berücksichtigung der beiden prognostizierten Schwächezonen, die die Kaverne durchschneiden. Die in der numerischen Berechnung ermittelten Verformungsergebnisse sind in **Bild 7** beispielhaft dargestellt.

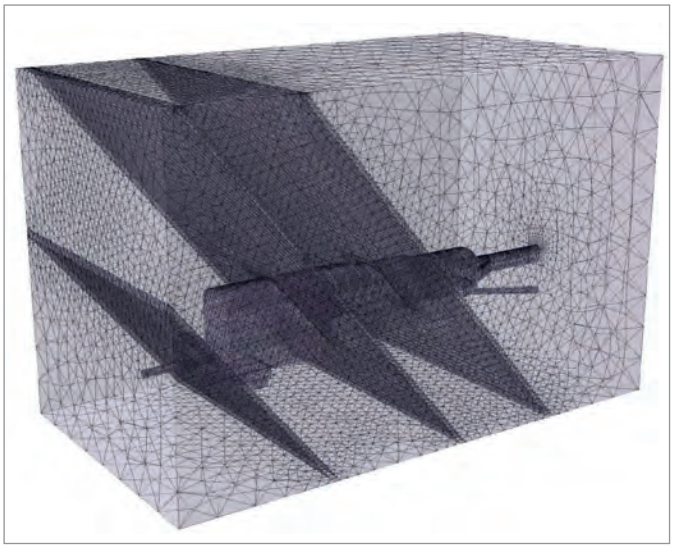


Bild 6 *3D-FE-Modell der Kraftwerkskaverne [1]*
3D FE model of the powerhouse cavern [1]

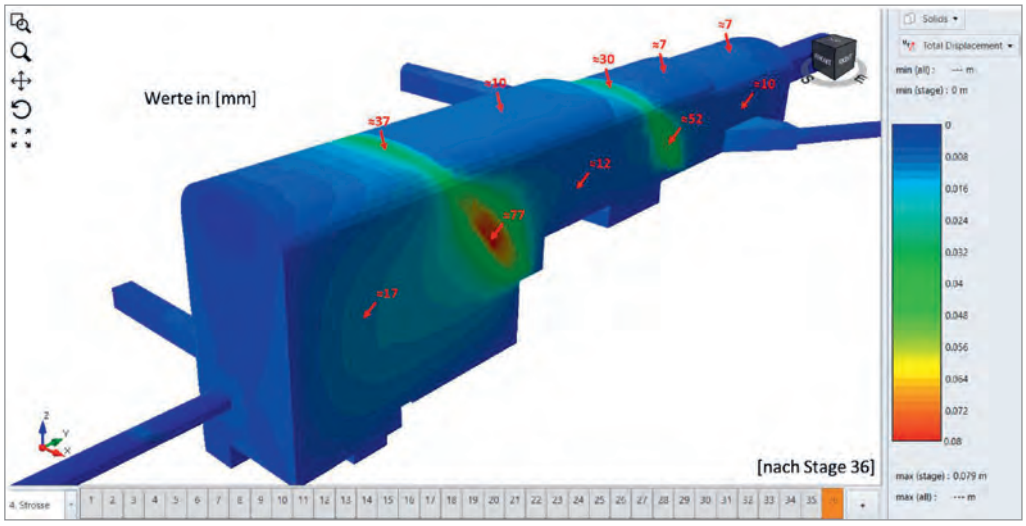


Bild 7 *Berechnungsergebnisse für die Verformungen aus der 3D-FE-Berechnung [1]*
Total displacements resulting from the 3D FE analysis [1]

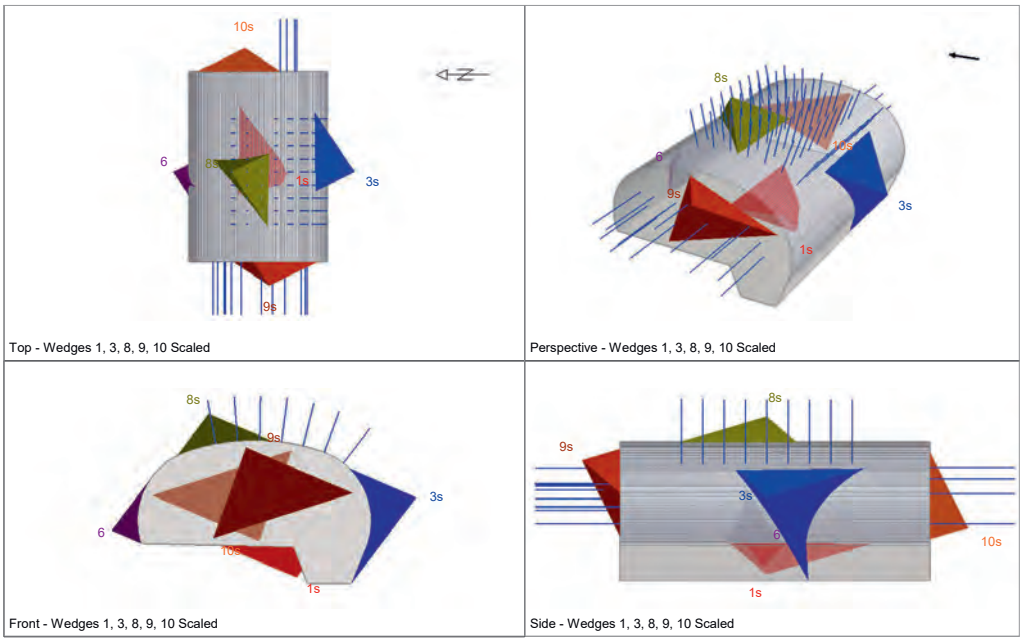


Bild 8 ***Gefügeanalyse Kavernenwasserspeicher, mögliche Bruchkörper in Hohlraumnähe und deren Sicherung***
Wedge stability analysis of storage galleries, pote ntially unstable wedges and required support

Im Bereich der Kavernenwasserspeicher (Nebenstollen I bis VI) sind Störungszonen sowie Vergrusungen des Granitgebirges infolge tektonischer Auflockerung und hydrothermaler Alteration mit Mächtigkeiten im Dezimeter- bis Meterbereich prognostiziert. Die Kavernenwasserspeicher wurden aus geologischer Sicht so orientiert, dass der Aufwand zur Sicherung von potenziell instabilen Kluftkörpern möglichst gering bleibt. In **Bild 8** sind mögliche Kluftkörper und deren Sicherung bzw. Aufhängung exemplarisch dargestellt, wie sie mit der felsmechanischen Auswertungssoftware Unwedge ermittelt werden konnten. Auch hierzu war es ein wesentlicher Vorteil, dass eine Prognose der räumlichen Lage vorhanden war.

Die Nebenstollen des Kavernenwasserspeichers sind als Freispiegelstollen ausgelegt. Ein wesentliches Kriterium bei der Formfindung war neben der Minimierung des Sicherungsaufwandes die Minimierung des Verhältnisses zwischen nutzbarem Speichervolumen und Gesamtausbruchvolumen. Die Sensitivität der Formänderung gegenüber Entfestigung des Gebirges (Granit mit Verwitterungsgrad w0 bis w4) und Änderung der Primärspannungsrichtung wurde mit Hilfe von numerischen Berechnungen untersucht.

6 Projektakzeptanz

Seit den früheren Projektphasen verfolgt die EnBW eine aktive und offene Kommunikation mit allen betroffenen Interessenvertretern über die Ziele des geplanten Vorhabens (unter anderem zahlreiche Öffentlichkeitsveranstaltungen, interaktive Homepage, Projektfilme). Zur Minimierung der durch die Baumaßnahmen verursachten Eingriffe in Natur und Umwelt und der Beeinträchtigungen für Anwohner durch Lärm, Staub, Erschütterungen und Baustellenverkehr wurden bei der Planung des neuen PSW und seiner Nebenanlagen gezielte Lösungsansätze bzw. Schonungs- und Kompensationsmaßnahmen in enger Zusammenarbeit mit Fachleuten und im Dialog mit den Betroffenen erarbeitet. Das Projekt erzielte eine ausgesprochen hohe Akzeptanz in der Öffentlichkeit. Es erfolgte kein einziger Einspruch von Privat aus der Offenlage. Hierfür wesentlich war, dass neben einer überdurchschnittlich hohen Planungstiefe auch viel Detaillierungsarbeit in die bestmögliche Verhinderung öffentlicher Betroffenheiten investiert wurde.

Der Fokus wurde insbesondere auf die möglichst weitgehende bauzeitliche Erhaltung der vorhandenen Infrastruktur wie beispielsweise Tourismus und Wanderwege gelegt, aber auch die Schonung von Wasser- und Tierschutzgebieten war ein großer Schwerpunkt. Die Transportwege für das Ausbruchmaterial wurden außerhalb der Ortslage Forbach geplant. Ein weiterer Aspekt war die Minimierung von Flächeninanspruchnahmen.

7 Stand der Arbeiten im Juli 2021 und Ausblick

Im Spätsommer 2019 wurde der Planfeststellungsantrag beim Regierungspräsidium Karlsruhe eingereicht. Derzeit sind noch die Abstimmungen mit den verschiedenen Fachabteilungen im Gange. Der Planfeststellungsbeschluss wird voraussichtlich in der Jahresmitte 2022 erteilt.

Die Präqualifikation geeigneter Bauunternehmungen für das Los 2, den Rohbau des Neubaus der Unterstufe und der Kraftwerkskaverne mit allen Ober- und Unterwasserwegen (Ausbruch, Sicherung und Kraftwerksbau) fand gemäß Sektorenrichtlinie auf europaweiter Ebene statt. Es qualifizierten sich acht Bietergemeinschaften, die zur Angebotsabgabe eingeladen wurden. Im November 2020 wurden die Ausschreibungsunterlagen für die Bietergemeinschaften in einem Vergabeportal eingestellt. Ende April 2021 war die Frist zur Abgabe der Angebote, gefolgt von der Angebotsauswertung. Die Auswertung der Angebote erfolgt sowohl nach preislichen als auch nach qualitativen Kriterien, wobei die Gewichtung zwischen preislicher und qualitativer Wertung bezüglich des Gesamtergebnisses bei 60:40 liegt.

Als Vergabeform wurde das Verhandlungsverfahren gewählt, welches mehrere Verhandlungsrunden mit immer kleiner werdendem Bieterkreis ermöglicht. Derzeit ist die erste Verhandlungsrunde abgeschlossen.

Der Planfeststellungsbeschluss steht derzeit noch aus. Das neue Kraftwerk soll im Jahr 2026 ans Netz gehen.

Literatur

[1] Thermann, K., Yildiz, E., Kamuf, I.: Planung und Entwurf der Felssicherungsmaßnahmen für die Wasserkraftkaverne Forbach, Vortrag DGGT „24. Symposium Felsmechanik und Tunnelbau“, Online 7. Juli 2021

[2] Mailänder Consult GmbH/GBM – Gesellschaft für Baugeologie und -meßtechnik mbH Baugrundinstitut: PSW Forbach Neue Unterstufe, Geotechnisches und hydrogeologisches Gutachten, Rev. 1, erstellt im Auftrag der EnBW, Dezember 2018

[3] Mailänder Consult GmbH/gbm – Gesellschaft für Baugeologie und -meßtechnik mbH Baugrundinstitut: Pumpspeicherkraftwerk Forbach – Neubau Unterstufe – Stellungnahme zu den zusätzlichen Untersuchungen 2018/2019, Darstellung der wesentlichen neuen Ergebnisse und Erkenntnisse im Vergleich zu den im Gutachten rev.01 getroffenen Aussagen, Karlsruhe/Ettlingen, 2. Novmber 2020

[4] Achatz, R., Kamuf, I.: Unterirdisches Speicherbecken für das Pumpspeicherkraftwerk Forbach, Wasserwirtschaft 6/2016

GC GROUP

GEOCONSULT Deutschland GmbH
Rudower Chaussee 48
12489 Berlin
Telefon: +49 30 25555 820
E-Mail: Office-ber@geoconsult.com

Ihr Ansprechpartner für
Engineering und Design
Baumanagement
Geotechnik
Digitale Services

www.geoconsult.com

Experten für
Geotechnik und Tunnelbau

HIC

Beraten. Prüfen. Überwachen.

Kaverne Flughafentunnel Helsinki

Sanierung DB-Tunnel Reicholzheim

Kombilösung Karlsruhe

www.hic-engineering.de