



---

# Pumpspeicherwerk (PSW) Atdorf

## Planfeststellungsantrag

**Fachliche Prüfung als Landesgutachter**  
**Bericht Nr. 001**

---

Antragsunterlagen zum Planfeststellungsverfahren

Gutachterliche Stellungnahme

**Auftraggeber**

Land Baden-Württemberg  
Vertreten durch das Landratsamt Waldshut

**Projekt Nr.**

11LW10.20

**Dokument Nr.**

2016-WBI-11LW10.20-001-00

**Juni 2016**

## Inhalt

|     |                                                                    |    |
|-----|--------------------------------------------------------------------|----|
| 1.  | Veranlassung                                                       | 1  |
| 2.  | Unterlagen                                                         | 3  |
| 3.  | Felsmechanische Grundlagen                                         | 7  |
| 3.1 | Geologischer und hydrogeologischer Überblick                       | 7  |
| 3.2 | Erkundungen                                                        | 8  |
| 3.3 | Interpretationsbericht Sondierstollen, Felsmechanische Ableitungen | 8  |
| 4.  | Standicherheit und Sicherung der Untertagebauwerke                 | 12 |
| 4.1 | Vorbemerkungen                                                     | 12 |
| 4.2 | Kavernen                                                           | 13 |
| 4.3 | Unterwasserstollen                                                 | 15 |
| 4.4 | Wasserschloss im Nahbereich des Unterwasserstollens                | 17 |
| 4.5 | Druckschächte                                                      | 18 |
| 5.  | Abdichtung                                                         | 18 |
| 5.1 | Vorbemerkungen                                                     | 18 |
| 5.2 | Zum Antragsteil E.I, Hydrogeologisches Fachgutachten               | 19 |
| 5.3 | Zum Antragsteil F.XXI, Abdichtungskonzept Untertagebau             | 21 |
| 6.  | Zusammenfassung und Schlussfolgerungen                             | 23 |

## 1. Veranlassung

Die Schluchseewerk AG (Laufenburg) beabsichtigt auf dem Gebiet des Landkreises Waldshut das Pumpspeicherwerk (PSW) Atdorf zu errichten. Hierzu ist vom Landratsamt Waldshut ein Planfeststellungsverfahren durchzuführen.

Für das PSW Atdorf ist es vorgesehen, auf dem Abhau das Hornbergbecken II als Oberbecken und im Haselbachtal nordwestlich von Bad Säckingen und südöstlich von Wehr das Haselbecken als Unterbecken zu errichten. In ca. 700 m Tiefe unterhalb des Oberbeckens sollen eine Maschinenkaverne und eine parallel dazu liegende Trafokaverne hergestellt werden. Als Verbindung zwischen dem Oberbecken und der Maschinenkaverne sind 2 vertikale Druckschächte vorgesehen. Zwischen dem Kavernenkraftwerk und dem Haselbecken soll ein ca. 8,1 km langer Unterwasserstollen aufgeföhren werden, der in Kavernennähe mit einem untertägigen Wasserschloss verbunden wird. Der Zugang zu den Kavernen soll vom bestehenden Betriebsgelände beim Kavernenkraftwerk Wehr aus über einen ca. 3,7 km langen Zufahrtsstollen ermöglicht werden, der über Querschläge mit einem parallel verlaufenden Fluchtstollen verbunden wird. Ein großer Abschnitt dieses Fluchtstollens wurde bereits zu Erkundungszwecken als sog. Sondierstollen aufgeföhren und bis in den Bereich der späteren Maschinenkaverne geföhrt. Die Transformatorenkaverne wird über einen Energieableitungsstollen / -schacht mit der obertägigen Übergabestation verbunden. Neben diesen Hauptelementen der Untertagebauwerke ist - insbesondere im Nahbereich der Kavernen - ein umfangreiches Stollensystem geplant, welches teilweise für den Betrieb der Anlage und teilweise für die Baudurchföhren erforderlich ist.

Das Land Baden-Württemberg, vertreten durch das Landratsamt Waldshut, hat zur Prüfung und Beurteilung eines Teilbereiches des Planfeststellungsantrages bzw. der entsprechenden Antragsunterlagen den Unterzeichnenden Prof. Dr.-Ing. Walter Wittke (WBI GmbH) als Prüfgutachter eingeschaltet.

Die Prüfaufgabe als Landesgutachter betrifft zunächst die felsmechanischen und statischen Belange der wichtigsten Untertagebauwerke, zu denen im Rahmen des Planfeststellungsantrages entsprechende statische Untersuchungen und Konzepte zur Sicherung bzw. Auskleidung vorgelegt wurden. Hier sind als untersuchte Bauwerke die Maschinenkaverne, die Trafokaverne, der Unterwasserstollen und der Kreuzungsbereich mit dem Wasserschloss sowie die beiden Druckschächte zu nennen. Im Rahmen der gutachterlichen Prüfung der Unterlagen werden sowohl die aus den verfügbaren Untersuchungen und Erkundungsergebnissen abgeleiteten Berechnungsgrundlagen als auch die statischen Untersuchungen und die darauf basierenden Konzepte zur Sicherung und Auskleidung der o. g. Untertagebauwerke bewertet.

Im Hinblick auf die im Rahmen des Vorhabens sowohl in der Bau- als auch in der Betriebsphase geschuldete Vermeidung unzulässiger Beeinträchtigungen der hydrogeologischen Verhältnisse im Projektgebiet müssen die den Untertagebauwerken zutretenden Grund- bzw. Bergwassermengen auf zulässige Größen beschränkt werden. Dazu ist es vorgesehen, in Gebirgsbereichen mit höheren Wasserdurchlässigkeiten (Störungszonen) vortriebsbegleitend bzw. ggf. vorausseilend Abdichtungsinjektionen durchzuführen und damit die in diesen Zonen gegenüber den angrenzenden Homogenbereichen erhöhten Wasserzutrittsmengen in dem erforderlichen Umfang zu begrenzen. Hierzu wird als Bestandteil der Antragsunterlagen das sog. Abdichtungskonzept Untertagebau vorgelegt. Die Beurteilung dieses Abdichtungskonzeptes ist ebenfalls Bestandteil der Prüfaufgabe des Unterzeichnenden. Als Grundlagen des Abdichtungskonzeptes werden u. a. Angaben zu den Wasserdurchlässigkeiten des Gebirges in den weitgehend ungestörten Homogenbereichen und in Störungszonen benötigt. Das Abdichtungskonzept greift dazu auf entsprechende Aussagen im hydrogeologischen Fachgutachten zurück. In die Überprüfung des Abdichtungskonzeptes Untertagebau ist daher auch das hydrogeologische Fachgutachten hinsichtlich der für das Abdichtungskonzept relevanten Schlussfolgerungen und Parameter mit einzubeziehen.

Die vorliegende gutachterliche Stellungnahme bezieht sich gemäß den vorstehenden Erläuterungen unmittelbar auf die nachfolgend genannten Antragsteile:

#### Statische Untersuchungen und zugehörige Grundlagen

- F.XXIV Interpretationsbericht Sondierstollen, Felsmechanische Ableitungen
- F.XIV Felsmechanik Untertagebau
- F.XV Statik Kavernen, Bericht zur statischen Vorbemessung

#### Abdichtungskonzept und zugehörige Grundlagen

- E.I Fachgutachten Hydrogeologie und Thermalquellen Bad Säckingen
- F.XXI Abdichtungskonzept

Bei der Ausarbeitung der gutachterlichen Stellungnahme werden auch andere Antragsteile herangezogen, die nicht Gegenstand der Prüfung durch den Unterzeichnenden sind, jedoch Grundlagen zur Planung und zu den geologischen Verhältnissen beinhalten (z. B. Pläne aus dem Antragsteil B: Beschreibung der Anlage und der Antragsteil F.IV: Strukturgeologische Recherchen). Weiterhin liegen die sog. Ergänzenden Berechnungen und Anlagen (EBA) vor, die nicht Bestandteil der Antragsunterlagen sind, diese jedoch als zugehörige Arbeitsunterlagen im Detail ergänzen (hier insbesondere die Teile EBA.VII, EBA.XIII, EBA.XIV und EBA.XV).

## 2. Unterlagen

### **Fachgutachterlich zu prüfende Antragsteile**

- [1.1] Antragsteil E.I:  
Fachgutachten Hydrogeologie und Thermalquellen Bad Säckingen
- [1.2] Antragsteil F.XIV:  
Felsmechanik Untertagebau
- [1.3] Antragsteil F.XV:  
Statik Kavernen, Bericht zur statischen Vorbemessung
- [1.5] Antragsteil F.XXI:  
Abdichtungskonzept Untertagebau
- [1.6] Antragsteil F.XXIV:  
Interpretationsbericht Sondierstollen, Felsmechanische Ableitungen

### **Eingesehene Antragsteile und Ergänzende Berechnungen und Anlagen (EBA)**

- [2.1] Antragsteil A.V:  
Erläuterungsbericht
- [2.2] Antragsteil B.I:  
Bautechnische Beschreibung
- [2.3] Antragsteil B.II:  
Bemessung und Nachweise
- [2.4] Antragsteil B.IV:  
Übersichtspläne
- [2.5] Antragsteil B.V:  
Pläne
- [2.6] Antragsteil B.VII:  
Durchführung der Maßnahme
- [2.7] Antragsteil F.IV:  
Strukturgeologische Recherchen

- [2.8] EBA.VII:  
Statik Kavernen
- [2.9] EBA.XIII:  
Sondierstollen (LI-Bericht)
- [2.10] EBA.XIV:  
Felsmechanik Untertagebau, Anlagen
- [2.11] EBA.XV:  
Geologische Längenschnitte Untertagebauwerke

### **Besprechungsprotokolle zum Projekt**

- [3.1] Besprechungsprotokoll zum 1. Sondierungsgespräch, Vordimensionierung der Untertagebauwerke, Besprechung am 02.11.2011
- [3.2] Besprechungsprotokoll zum 2. Sondierungsgespräch, Vordimensionierung der Untertagebauwerke, Besprechung am 24.11.2011.
- [3.3] Besprechungsbericht zum 3. Treffen, Vordimensionierung der Untertagebauwerke, Besprechung am 11.01.2012
- [3.4] Besprechungsbericht, Kommentare zum Antragsteil F.XXI, Abdichtungskonzept, Besprechung am 11.01.2012.
- [3.5] Besprechungsbericht, Abstimmungen zum Antragsteil E.I – Gutachten Hydrogeologie, Besprechung am 12.03.2012.
- [3.6] Besprechungsprotokoll, Antragsteil E.I – Gutachten Hydrogeologie, Besprechung am 05.04.2012.
- [3.7] Besprechungsprotokoll, Fachgespräch zu den Themen Hydrogeologischer Wirkraum, Injektionskonzept, Grenzwassermenge und Verschiedenes, Besprechung am 14.06.2013.
- [3.8] Besprechungsbericht, Fachgespräch zum Thema Abdichtungskonzept, Besprechung am 08.09.2014.
- [3.9] Besprechungsbericht, Fachgespräch zum Thema Abdichtungskonzept, Besprechung am 19.09.2014.

## **Stellungnahmen und Anmerkungen aus der Vor- und Vollständigkeitsprüfung der Projektunterlagen**

- [4.1] WBI: PSW Atdorf, Berechnungsquerschnitte Kavernenbereich, Anmerkungen zu Vorschlägen von ILF vom 30.11.2011, E-Mail vom 07.12.2011.
- [4.2] WBI: PSW Atdorf, Berechnungsquerschnitte Kavernenbereich, Anmerkungen zu Vorschlägen von ILF vom 07.12.2011, E-Mail vom 09.12.2011.
- [4.3] WBI: Vorprüfung der Antragsunterlagen, Teil F.XXI, Abdichtungskonzept Untertagebau (Stand Oktober 2011), Tabellen mit Anmerkungen vom 20.12.2011.
- [4.4] WBI: PSW Atdorf, Störungszonen und Berechnungsquerschnitte UW-Stollen, Anmerkungen zu Vorschlägen von ILF vom 17.12.2011, E-Mail vom 23.12.2011.
- [4.5] WBI: PSW Atdorf, Fachgutachten Hydrogeologie, Antragsteil E.I mit Bearbeitungsstand vom 10.05.2012, Überprüfung der für das Abdichtungskonzept Untertagebauwerke maßgebenden hydrogeologischen Parameter, Stellungnahme vom 29.05.2012.
- [4.6] WBI: Vorprüfung der Antragsunterlagen, Teil F.XIV, Felsmechanik Untertagebau und zugehörige Anlagen im Teil EBA.XIV (Stand 30.03 2012), Tabellen mit Anmerkungen vom 16.07.2012.
- [4.7] WBI: Vorprüfung der Antragsunterlagen, Teil EBA.XV, Geologische Längsschnitte Untertagebauwerke (Stand 28.03.2012), Tabellen mit Anmerkungen vom 01.08.2012.
- [4.8] WBI: Vorprüfung der Antragsunterlagen, Teil F.XXIV, Interpretationsbericht Sondierstollen – Felsmechanische Ableitungen (Stand 03.05 2012), Tabellen mit Anmerkungen vom 01.08.2012.
- [4.9] WBI: Vollständigkeitsprüfung der Antragsunterlagen, Teil B.II, Bemessung und Nachweise (Stand 29.06 2012), Tabellen mit Anmerkungen von 09/2012 (nur zu Teilen der Unterlage).
- [4.10] WBI: Vollständigkeitsprüfung der Antragsunterlagen, Teil B.VII, Durchführung der Maßnahme (Stand 29.06 2012), Tabellen mit Anmerkungen von 09/2012 (nur zu Teilen der Unterlage).

- [4.11] WBI: Vollständigkeitsprüfung der Antragsunterlagen, Teil F.XV, Statik Kavernen, Bericht zur statischen Vorbemessung (Stand 23.03 2012), Tabellen mit Anmerkungen von 09/2012 (nur zu Teilen der Unterlage).
- [4.12] WBI: Vollständigkeitsprüfung der Antragsunterlagen, Teil F.XXI, Abdichtungskonzept Untertagebau (Stand 29.06 2012), Tabellen mit Anmerkungen von 09/2012.
- [4.13] WBI: Vollständigkeitsprüfung der Antragsunterlagen, Teil F.XIV, Felsmechanik Untertagebau und zugehörige Anlagen Teil EBA.XIV, Teil F.XXIV, Interpretationsbericht Sondierstollen – Felsmechanische Ableitungen und Teil EBA.XV, Geologische Längsschnitte Untertagebauwerke (auf CD vom 14.12.2012), E-Mail mit Anmerkungen vom 24.05.2013.
- [4.14] WBI: Vollständigkeitsprüfung der Antragsunterlagen, Teil F.XXI, Abdichtungskonzept Untertagebau (Stand 25.11 2014), Tabellen mit Anmerkungen von 04/2015.

#### **Eigene Unterlagen, Veröffentlichungen und Literatur**

- [5.1] Anselment, O., Wittke, W.: Felsmechanisches Gutachten zum Bau der Maschinenkaverne Wehr, Hotzenwaldwerk Hornbergstufe, 3. Bericht : Zur Standsicherheit und Auskleidung der Kaverne, Karlsruhe, März 1972.
- [5.2] Wittke, W., Pfisterer, E., Reißler, P.: Felsmechanische Untersuchungen für die Maschinenkaverne Wehr. In: Proc. 1. Nationale Tagung über Felshohlraumbau, Essen, 1974.
- [5.3] Wittke, W.: Neues Entwurfskonzept für untertägige Hohlräume in klüftigem Fels. In: Veröffentlichungen des Institutes für Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Verkehrswasserbau der RWTH Aachen, Heft 1, Aachen 1976
- [5.4] Wittke, W.: Felsmechanik – Grundlagen für wirtschaftliches Bauen im Fels. Springer: Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo, 1984.
- [5.5] Wittke, W.: Rock Mechanics Based on an Anisotropic Jointed Rock Model (AJRM). Ernst & Sohn: Berlin, 2014.



### **3. Felsmechanische Grundlagen**

#### **3.1 Geologischer und hydrogeologischer Überblick**

Die geologischen Verhältnisse im Projektgebiet sind ausführlich im Antragsteil F.IV (Strukturgeologische Recherchen) beschrieben. Danach kommen die geplanten Untertagebauwerke des PSW Atdorf ausschließlich im von Gneisen und Graniten geprägten kristallinen Grundgebirge des Südschwarzwaldes zu liegen, die überwiegend bis zur Geländeoberfläche reichen. Oberflächennah sind die Gesteine verwittert. Die Mächtigkeit der Verwitterungszone ist größeren Schwankungen unterworfen und kann bis zu ca. 50 m Tiefe reichen. Im Umfeld des Haselbeckens wird das kristalline Grundgebirge noch von einer dünnen Auflage aus Sedimentresten des Oberrotliegend und des Oberen Buntsandsteins bedeckt. Diese Schichten werden jedoch mit den Untertagebauwerken in relativ großer Tiefe unterfahren. Für die felsmechanischen Betrachtungen sind sowohl die o. g. Verwitterungsbereiche des Grundgebirges als auch die Sedimentauflagen ohne wesentliche Bedeutung.

Beim kristallinen Grundgebirge lassen sich aus stratigraphischer Sicht von Norden nach Süden drei Einheiten unterscheiden:

- Gneisdiatextite des Wiese-Wehra-Komplexes  
(in Bereichen Zufahrtsstollen, Kavernen, Druckschächte, Nordabschnitt UW-Stollen)
- Albtalgranit  
(im mittleren, überwiegenden Abschnitt des UW-Stollens)
- Gneisanatextite vom Typ Murgtal  
(im Südabschnitt des UW-Stollens)

Innerhalb dieser drei Einheiten treten noch weitere, kleinere granitische Gesteinskörper in Form von Gängen und kleinen Plutonen auf.

Das kristalline Grundgebirge wird von Störungen und Bruchzonen durchzogen, wobei sich zwei Hauptrichtungen unterscheiden lassen:

- WNW – ESE streichende Strukturen
- N – S bis NNE – SSW streichende Strukturen

Zu den ersteren werden die Vorwald-, die Wolfrist- und die Eggbergstörungszone gezählt, die den geplanten UW-Stollen stumpfwinklig queren. Die zweite o. g. Hauptrichtung steht mit dem Einbruch des Oberrheingrabens in Verbindung. Entsprechende, den UW-Stollen voraussichtlich spitzwinklig querende Strukturen finden sich vor allem im Südabschnitt des

Projektgebietes im Nahbereich der Wehra-Zeiningen-Bruchzone. Es ist überwiegend ein steiles bis sehr steiles Einfallen der Störungen und Bruchzonen zu erwarten.

Das kristalline Grundgebirge stellt aus hydrogeologischer Sicht einen Kluftaquifer mit i. a. geringer bis sehr geringer Durchlässigkeit dar. Höhere Wasserdurchlässigkeiten sind in der Regel an diskrete Störungzonen gebunden. Innerhalb der oberflächennahen Verwitterungs- und Auflockerungszone findet ein Übergang vom Kluftaquifer zum Porenaquifer statt. Eine Trennung der Grundwasserstockwerke liegt nicht vor.

### **3.2 Erkundungen**

Die geologisch-geotechnischen Prognosen beruhen in weiten Teilen auf geologischen Karten und Berichten des LGRB und auf Detailkartierungen im Bereich der Geländeoberfläche sowie auf Unterlagen der Schluchseewerk AG zu früheren ausgeführten Bauvorhaben im Projektgebiet. Die Ergebnisse bzw. die Erkenntnisse der Recherchen wurden insbesondere im Antragsteil F.IV berücksichtigt, der als Grundlagendokument für verschiedene andere Antragsteile herangezogen wird.

Zur direkten Erkundung der Gebirgsverhältnisse im Bereich der Maschinen- und der Trafokaverne sowie im Bereich des Zufahrtsstollens zu den Kavernen wurde der sog. Sondierstollen aufgeföhren, der parallel zum Zufahrtsstollen verläuft und später als Fluchtstollen genutzt werden soll. Im Sondierstollen, dessen Endabschnitt im Kavernenbereich auch als Untersuchungsstollen bezeichnet wird, wurden Kartierungen und Messungen durchgeführt. Weiterhin wurden im Bereich der Maschinen- und der Trafokaverne Bohrungen vom Untersuchungsstollen aus hergestellt, in denen Feldversuche durchgeführt wurden. An Proben aus den Kernbohrungen wurden Laborversuche durchgeführt.

Die Auffahrung des Sondier- bzw. Untersuchungsstollens, die dabei durchgeführten Messungen und Versuche sowie deren Ergebnisse sind in einem Bericht der Lahmeyer International GmbH (LI) dokumentiert, der als Teil EBA.XIII vorliegt. Auf Basis dieses Berichtes wurde der Antragsteil F.XXIV (Interpretationsbericht Sondierstollen, Felsmechanische Ableitungen) erstellt, auf den sich die nachfolgenden Anmerkungen beziehen.

### **3.3 Interpretationsbericht Sondierstollen, Felsmechanische Ableitungen**

In dem vorgelegten Bericht (Antragsteil F.XXIV) werden die aus dem Stollenvortrieb, den vom Stollen aus durchgeführten Erkundungsbohrungen und den felsmechanischen Feld- und Laborversuchen resultierenden Ergebnisse und Erkenntnisse zusammengefasst und im Hinblick auf die Ableitung felsmechanischer Berechnungskennwerte sowie auf die Annahmen zum Primärspannungszustand interpretiert. Auf die Ergebnisse der im Kavernenbereich in Bohrlöchern durchgeführten Wasserabpressversuche (WD-Tests) wird in der

gegenständlichen Unterlage nicht näher eingegangen. Diesbezüglich wird auf den Antragsteil E.I (Hydrogeologisches Gutachten) verwiesen, der sich u. a. mit der Frage der Gegendurchlässigkeit eingehend befasst.

Im Bereich des Sondierstollens wurden ausschließlich der Wiese-Wehra-Formation zugeordnete Schichten aufgeschlossen (vgl. 3.1). Dabei handelt es sich durchweg um Gneise. In F.XXIV werden zwei Gesteinstypen unterschieden, die analog zum zugrunde liegenden LI-Bericht als Gneis-Diatexit und als Granitporphyr bezeichnet werden. Es wird in F.XXIV darauf hingewiesen, dass es sich nach Abstimmungen mit dem LGRB bei den als Granitporphyr (magmatisches Gestein) bezeichneten Gesteinen tatsächlich um granoblastische Gneise (metamorphes Gestein) handelt. Aufgrund der zum Zeitpunkt der Klärung dieser Frage bereits weit fortgeschrittenen Ausarbeitung der Unterlagen wurde im Antragsteil F.XXIV auf eine Anpassung der Terminologie verzichtet. In den darauf aufbauenden Antragsteilen (z. B. Teil F.XIV, Felsmechanik Untertagebau) wird jedoch die korrekte Bezeichnung als Gneis verwendet. In diesem Zusammenhang wird weiterhin darauf hingewiesen, dass sich die im Interpretationsbericht unterschiedenen Gesteinstypen nach den Ergebnissen der durchgeführten Versuche hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften kaum voneinander unterscheiden. Es werden daher abschließend einheitliche felsmechanische Kennwerte ohne eine Unterscheidung nach den o. g. Gesteinstypen festgelegt. Dieser Vorgehensweise kann aus gutachterlicher Sicht zugestimmt werden.

An aus den 13 Kernbohrungen im Kavernenbereich (Längen zwischen 25 m und 100 m) entnommenen Gesteinsproben wurden die nachfolgend aufgelisteten Laborversuche durchgeführt:

- Einaxiale Druckversuche
- Dreiaxiale Druckversuche
- Punktlastversuche
- Direkte Scherversuche
- Spaltzugversuche
- Dichtebestimmungen
- Cerchar Tests
- Los Angeles Tests

Die Ergebnisse der Versuche werden in der Unterlage jeweils zusammenfassend dargestellt und - soweit relevant - hinsichtlich der Festlegung der felsmechanischen Kennwerte interpretiert. Dabei wurden als Ausreißer angesehene Einzelergebnisse bei der Mittelwertbildung aussortiert und die z. T. großen Streuungen der Versuchsergebnisse teilweise be-

wertet. Die diesbezüglichen Angaben können weitgehend nachvollzogen werden. Es zeigt sich, dass die Gesteine des kristallinen Grundgebirges erwartungsgemäß hohe Festigkeiten und geringe Verformbarkeiten besitzen und bezüglich der Standsicherheit der geplanten Untertagebauwerke als günstig zu bezeichnen sind.

In den im Kavernenbereich abgeteufte Kernbohrungen wurden verschiedene Felduntersuchungen durchgeführt. Im Einzelnen handelt es sich um:

- Bohrlochscans
- Dilatometertests
- Schlitzsondenversuche
- WD-Tests

Auf die Ergebnisse der WD-Tests wird - wie bereits oben erläutert - im Rahmen der Antragsunterlage F.XXIV nicht weiter eingegangen (Verweis auf E.I).

Aus den Bohrlochscans wurde eine zusammenfassende Darstellung (Polpunktdiagramm) der Raumstellungen der Klüfte entwickelt. Es zeigt sich dabei eine sehr große Streuung der Einzelwerte. Für die Berücksichtigung der Raumstellung der Klüfte (Klein- und Großklüfte) in den Standsicherberechnungen zu den Kavernen werden daher die direkten Aufnahmen (Trennflächenkartierungen) aus dem entsprechenden Bereich des Sondierstollens herangezogen. Daraus werden 3 Haupt-Kluft-Richtungen abgeleitet, deren Raumstellungen in der Unterlage angegeben sind. Die Angaben lassen sich mit ausreichender Genauigkeit nachvollziehen. In das entsprechende Polpunktdiagramm sind außerdem die im Bereich der Kavernen festgestellten Scherzonen und die beiden angetroffenen Störzonen eingetragen. Gemäß den Angaben im LI-Bericht werden als Scherzonen tektonische Elemente bezeichnet, die nur dünne RuscHELLagen oder einen dünnen Lehm- bzw. Kakiritbe-lag aufweisen, ohne dass ein deutlicher Versatz zu erkennen ist. Bei den angetroffenen Störzonen ist dagegen ein Versatz feststellbar. Die in F.XXIV aufgeführten Klüfte, Scher- und Störzonen dienen mit ihren Raumstellungen als Vorgabe für die Standsicherheitsuntersuchungen zu den Kavernen. Dagegen bestehen keine Einwände.

Bei der Festlegung des E-Moduls für die Standsicherheitsnachweise wird von den Ergebnissen der einaxialen Druckversuche ausgegangen, die zu einem mittleren E-Modul von 45 GPa führen. Dieser wurde auf der sicheren Seite liegend auf einen Wert von 35 MPa abgemindert. Die Ergebnisse der Dilatometerversuche, die zu einem mittlerem E-Modul von 26 GPa führten, wurden bei der Bewertung des Felsmoduls mit der Begründung außer Acht gelassen, dass sie durch das Trennflächengefüge im Bohrlochnahbereich beeinflusst seien und zu niedrige Werte zeigen. Hierzu ist anzumerken, dass die Trennflächen zu ei-

ner Verringerung des E-Moduls des Gebirges im Vergleich zu dem des unzerklüfteten Gesteins führen. Mit den Dilatometerversuchen, die nur kleine Abmessungen haben, wird dieser Einfluss allerdings häufig nicht erfasst, so dass sich aus diesen Versuchen E-Moduln ergeben, die kleiner als der Gesteinsmodul, jedoch größer als der Felsmodul sind. Insofern kann der Begründung, mit der diese Ergebnisse außer Acht gelassen wurden, nicht zugestimmt werden. Allerdings hat der Unterzeichnende im Zusammenhang mit den Voruntersuchungen und dem Bau der benachbarten Maschinenkaverne Wehr Feldversuche betreut, die zu deutlich höheren E-Moduln geführt haben. Auch die Standsicherheitsnachweise und die Planung der Sicherung der Kavernenwände wurden vom Unterzeichnenden und seinen Mitarbeitern erstellt. Eine Nachrechnung der beim Bau gemessenen Verschiebungen hat dann diese höheren E-Moduln bestätigt. Auf dieser Grundlage kann dem in F.XXIV vorgeschlagenen Wert von  $E = 35 \text{ GPa}$  in Gebirgsbereichen außerhalb der Scher- und Störzonen zugestimmt werden. Ebenso wird dem Ansatz der Poissonzahl mit 0,2, der Berücksichtigung der Wichte mit  $26 \text{ kN/m}^3$  und der Annahme einer einaxialen Gesteinsfestigkeit von  $70 \text{ MPa}$  zugestimmt.

Die Klüfte sollen in den statischen Berechnungen entsprechend ihrer jeweiligen Raumstellung mit einer reduzierten Scherfestigkeit quasi verschmiert berücksichtigt werden. Scher- und Störzonen sollen entsprechend ihrer angetroffenen Lage und Orientierung in idealisierter Form diskret simuliert werden. Dazu werden in der Antragsunterlage Empfehlungen für den Ansatz der Mächtigkeiten, eines reduzierten E-Moduls und reduzierter Scherparameter gegeben. Dabei handelt es sich jeweils um Schätzwerte. Gegen die entsprechenden Angaben bestehen keine Einwände.

In einigen Bohrungen im Kavernenbereich wurden zum Zwecke der Bestimmung des Primärspannungszustandes sog. Schlitzsondenversuche durchgeführt und von der ausführenden Versuchsanstalt (GIF) ausgewertet. Auf der Grundlage dieser Auswertung werden für die geplante Kavernenorientierung relativ hohe Seitendruckwerte von  $k_0 = 1,3$  quer bzw.  $k_0 = 1,0$  längs zu den Kavernen angegeben. Die Versuchsergebnisse weisen große Streuungen auf. Sie sind sowohl im Hinblick auf die absolute Größe der Spannungen als auch auf das Verhältnis zwischen Vertikal- und Horizontalspannungen und die Richtungen der Hauptnormalspannungen weder als plausibel noch als zuverlässig zu werten. Dies ist u. a. auch auf die Art der Versuche zurückzuführen, die zwar mit vergleichsweise geringem Aufwand durchgeführt werden können, jedoch hinsichtlich der Zuverlässigkeit der Ergebnisse zu wünschen übrig lassen. Verlässlichere Ergebnisse sind erfahrungsgemäß bei Durchführung von Spannungsmessungen nach der sog. Over coring method (Überbohren einer in ein Pilotbohrloch eingebauten Triaxialzelle) zu erwarten.

Bei der Bewertung der Ergebnisse der Schlitzsondenversuche sind außerdem die Erkenntnisse zum Primärspannungszustand von der in relativer Nähe im gleichen Gebirge liegenden Kaverne Wehr zu berücksichtigen. Aus den beim Sägen von Schlitz für Druckkissenversuche gemessenen Deformationen und aus den zur Kompensation dieser Verformungen benötigten Drücken wurde bei der Kaverne Wehr ein Seitendruckbeiwert von etwa 0,22 quer zur Kaverne abgeleitet. Die seinerzeit nach der FE-Methode durchgeführte rechnerische Interpretation der ausbruchbedingten Verschiebungen hat die Annahmen zum Primärspannungszustand bestätigt. Die Erfahrungen beim Bau der Kaverne Wehr deuten demnach auf einen deutlich geringeren Seitendruck hin, als aus den Schlitzsondenversuchen abgeleitet wurde. Darauf wird auch im Antragsteil F.XXIV hingewiesen. Jedoch wird die Übertragbarkeit der Ergebnisse von der Kaverne Wehr auf den Bereich der Kavernen Atdorf in Frage gestellt. Diese Einschätzung wird aus gutachterlicher Sicht nicht geteilt.

Im Hinblick auf die Unsicherheiten bezüglich des Primärspannungszustandes wird in F.XXIV empfohlen, in den statischen Vorberechnungen zu den Kavernen zunächst einen Seitendruckbeiwert von  $k_0 = 0,8$  anzusetzen und im Rahmen von Parameterstudien auch Berechnungen mit  $k_0 = 0,4$  und  $k_0 = 1,2$  durchzuführen (Umsetzung s. Antragsteil F.XIV). Dieser Vorgehensweise kann im Hinblick auf die Machbarkeit zugestimmt werden. Es sollten auf jeden Fall im Rahmen der weiteren Planungsstufen ergänzende Untersuchungen zur Bestimmung des vorhandenen Primärspannungszustandes (z.B. nach der o. g. Überbohrmethode) und entsprechende statische Berechnungen durchgeführt werden.

#### **4. Standicherheit und Sicherung der Untertagebauwerke**

##### **4.1 Vorbemerkungen**

Im Rahmen der Erstellung der Planfeststellungsunterlagen wurden im Sinne des Nachweises der Machbarkeit statische Berechnungen für die als wesentlich anzusehenden Untertagebauwerke durchgeführt. Für die rechnerischen Untersuchungen wurden die Kavernen (Maschinen- und Trafokaverne), der Unterwasserstollen (UW-Stollen), das Wasserschloss im Nahbereich des UW-Stollens und die vertikalen Druckschächte ausgewählt. Für diese Untertagebauwerke wurden Berechnungen zum Nachweis der Standicherheit der gesicherten Hohlräume durchgeführt. Die statischen Untersuchungen und deren wesentliche Ergebnisse sind im Antragsteil F.XIV (Felsmechanik Untertagebau) zusammengefasst, auf den sich die unter 4.2 bis 4.5 folgenden Anmerkungen beziehen. Ergänzend dazu liegt die Unterlage EBA.XIV vor, in der zusätzliche Anlagen mit detaillierter Darstellung der im Antragsteil F.XIV dokumentierten Berechnungen zusammengestellt sind.



Für die beiden Kavernen wurden darüber hinaus statische Berechnungen zur Vordimensionierung der in die gesicherten Hohlräume einzubauenden Stahlbetonkonstruktionen durchgeführt. Der Bericht zur entsprechenden statischen Vorbemessung ist im Antragsteil F.XV enthalten. Ergänzend dazu liegt die Unterlage EBA.VII (Statik Kavernen) vor, in der die entsprechenden statischen Vorberechnungen im Einzelnen dokumentiert sind. Die Einbauten in den Kavernen werden nicht als Bestandteil der Hohlraumsicherung berücksichtigt. Die Interaktion zwischen den Kavernenausbauten und dem Gebirge beschränkt sich demzufolge auf Bettungsreaktionen in den Sohl- und Wandbereichen. Auf der Basis von Überlegungen und Abschätzungen zum lokalen Ankerausfall bzw. zum Abrutschen von Felskeilen werden konservativ in Teilbereichen potenzielle Einwirkungen aus dem Gebirge als außerplanmäßige Felsdrucklasten berücksichtigt. Dagegen bestehen keine Einwände. Die detaillierte fachgutachterliche Prüfung des Antragsteiles F.XV zur statischen Vorbemessung der Kavernenausbauten fällt nicht in den Aufgabenbereich des Unterzeichnenden. Daher gibt es hierzu keine weiteren Anmerkungen.

#### **4.2 Kavernen**

Für die Maschinen- und die Trafokaverne wurden an 3 ausgewählten Berechnungsquerschnitten zweidimensionale Berechnungen nach der Methode der Finiten Elemente durchgeführt. Die Berechnungsquerschnitte sind über die Kavernenlängsrichtung verteilt und können im Rahmen der Zielsetzung der Untersuchungen (Nachweis der Machbarkeit) als repräsentativ angesehen werden. In den Berechnungsquerschnitten werden jeweils beide Kavernenquerschnitte und der Untergrund im statisch relevanten Bereich seitlich, unterhalb und oberhalb der Kavernen nachgebildet. Die in den Berechnungen berücksichtigte Überlagerungshöhe beträgt bezogen auf die Firste der Maschinenkaverne ca. 740 m (Nachbildung des Untergrundes bis ca. 150 m über Firste, Simulation der darüber folgenden Überdeckung durch Ansatz einer entsprechenden Auflast).

Die Modellierung des in den drei Berechnungsquerschnitten nachgebildeten Gebirgsausschnittes erfolgt jeweils auf der Grundlage der im Sondierstollen angetroffenen Verhältnisse. Für das Gestein wird einheitlich im gesamten Kavernenbereich der granoblastische Gneis angenommen. Als Trennflächen werden jeweils im gesamten Berechnungsausschnitt die im Antragsteil F.XXIV ausgewiesenen 3 Hauptkluftscharen berücksichtigt (Simulation eines mittleren Kluftabstandes von 2,5 m). Die Scher- und Störzonen werden jeweils entsprechend ihrer aufgeschlossenen Lage und Orientierung diskret nachgebildet. Wie erwähnt sind die Berechnungen zweidimensional. Mit einer Ausnahme schneiden die Störungen allerdings die Kavernenachse senkrecht bzw. diagonal. Sie streichen also nicht parallel zur Kavernenachse, wie dies mit den 2D Berechnungen angenommen wird. Im Hinblick auf die Beurteilung der Machbarkeit kann dieser Vorgehensweise zugestimmt

werden. Für die Ausführungsplanungsphase sind jedoch unbedingt räumliche Berechnungen durchzuführen.

Die vertikalen Primärspannungen ergeben sich in den Berechnungen tiefenabhängig jeweils aus dem Eigengewicht des Gebirges. Die horizontalen Primärspannungen werden in den Berechnungen durch Vorgabe eines Seitendruckbeiwertes  $k_0$  bestimmt. Für  $k_0$  wird in den Berechnungen als Mittelwert zunächst 0,8 angenommen. In weiteren Berechnungen werden auch Seitendruckbeiwerte von 0,4 und 1,2 berücksichtigt. Wie bereits im Rahmen der Prüfanmerkungen zum Antragsteil F.XXIV erläutert, werden die berücksichtigten horizontalen Primärspannungen für zu groß gehalten (vgl. 3.3). Die Ergebnisse der unter diesen Annahmen durchgeführten Berechnungen sind erfahrungsgemäß im Hinblick auf die Verformungen und die erforderlichen Sicherungsmittel zu ungünstig. Für die Ausführungsstatik sind in jedem Falle Nachweise mit geringeren Horizontalspannungen vorzulegen.

Als wesentliches Stützmittel zur Sicherung der Kavernenhohlräume ist eine systematische Ankerung (senkrecht zu den Wänden bzw. radial im Gewölbebereich) vorgesehen. Dabei ist im Bereich der großen Maschinenkaverne eine Kombination aus vermörtelten Stabstahlankern mit Längen zwischen ca. 6 und 12 m und aus vorgespannten Verpressankern mit Längen zwischen 12 und 18 m vorgesehen. Im Bereich der kleineren Trafokaverne ist derzeit ausschließlich der Einsatz von Stabstahlankern geplant. Auf der Grundlage von Vorberechnungen und wurden für die jeweiligen Berechnungsquerschnitte jeweils unterschiedliche Ankeranordnungen bezüglich des Ankertyps, der Ankerlängen und der Ankerabstände gewählt und in den Berechnungen simuliert. Die Sicherung bzw. Versiegelung der Kavernenlaibungen mit Spritzbeton wird statisch nicht in Ansatz gebracht.

In den als Detailuntersuchungen bezeichneten Berechnungen (jeweils Berücksichtigung der Klüfte, der Scher- und der Störzonen, Ansatz  $k_0 = 0,8$ ) wurde die phasenweise Herstellung der beiden Kavernen (Ausbruch und Sicherung abschnittsweise von oben nach unten, gleichzeitig in beiden Kavernen) simuliert. In den sog. Sensitivitäts- und worst case-Untersuchungen wurden dagegen vereinfachte Berechnungen ohne die Simulation der einzelnen Bauphasen durchgeführt. Im Rahmen der Sensitivitätsuntersuchungen wurden Berechnungen durchgeführt, mit denen die Einflüsse bestimmter Parameter erfasst werden sollten. Es wurden u. a. rein elastische Berechnungen (ohne Trennflächen), Berechnungen mit Klüften, jedoch ohne Scher- und Störzonen sowie Berechnungen mit Variation des Seitendruckbeiwertes ( $k_0 = 0,4 / 0,8 / 1,2$ ) durchgeführt. Im Rahmen der worst case-Betrachtungen wurde an 2 Berechnungsquerschnitten je eine angenommene, im Rahmen der Erkundungen nicht aufgeschlossene Störzone nördlich der Maschinenkaverne berücksichtigt (Orientierung parallel zu der im Kavernenbereich angetroffenen Störzone).



Auch wenn die Berechnungen und die getroffenen Annahmen hinsichtlich der Primärspannungen die tatsächlichen Verhältnisse nicht hinreichend erfassen, so kann doch den gewählten Sicherungsmaßnahmen aufgrund eigener Erfahrung im Kavernenbau zugestimmt werden. Im Verlauf der weiteren Planung ist die vorgesehene Kavernensicherung zu überprüfen.

Ergänzend wird darauf hingewiesen, dass die dem Planfeststellungsantrag zugrunde gelegte Orientierung der Kavernen aus felsmechanischer Sicht nicht optimal ist. Die Kavernenlängsrichtung verläuft näherungsweise parallel zur südlich des Kavernekomplexes liegenden Vorwald-Störungszone, die bekanntermaßen auch das Muster begleitender Scher- und Störzonen prägt. Derartige etwa parallel zu den Kavernenlängswänden streichende und steil einfallende Zonen sind im Hinblick auf die Standsicherheit generell ungünstig und können infolge der potenziellen Bildung von Felskeilen im Wandbereich zu einem erhöhten Sicherungsaufwand führen. Insofern wäre es statisch günstig, die Kavernen im Grundriss so zu drehen, dass ein paralleles Streichen von Störzonen zur Kavernenlängsrichtung vermieden wird (z. B. durch eine Drehung um ca. 40 – 50°).

### **4.3 Unterwasserstollen**

Der Unterwasserstollen (UW-Stollen) verläuft ausgehend von den Kavernen in Richtung NNE – SSW in den Gneisen und Graniten des kristallinen Grundgebirges. Dabei sind nach den prognostizierten geologischen Verhältnissen mehrere große Störungszone zu durchfahren (vgl. 3.1). Im Antragsteil F.XIV wird davon ausgegangen, dass die Standsicherheit des Stollens in den Bereichen außerhalb der Störungszone gegeben ist und im Rahmen des Nachweises der Machbarkeit dazu keine Standsicherheitsuntersuchungen erforderlich sind. Die im Antrag enthaltenen statischen Untersuchungen beschränken sich daher auf Betrachtungen zur Lage des UW-Stollens im Bereich von Störungszone. Als charakteristische Berechnungsquerschnitte wurden im nördlichen Stollenbereich die Durchfahrung der Vorwald-Störungszone und im südlichen Stollenbereich die Durchfahrung der Eggberg-Störungszone ausgewählt. Dieser Vorgehensweise kann aus Sicht des Unterzeichnenden in der gegenwärtigen Planungsphase zugestimmt werden.

Für die beiden betrachteten Störungszone wurden auf Basis der Angaben im Antragsteil F.IV (Strukturgeologische Recherchen) idealisierte Modelle der Störungszone entwickelt, wobei jeweils zwischen einer "Kernzone" (KZ) und angrenzenden "Zerlegten Zonen" (ZZ) unterschieden wird. Aufgrund der anzunehmenden großen Gesamtmächtigkeiten der Störungszone kommt der UW-Stollen im Durchfahrungsbereich vollständig in diesen beiden Zonen zu liegen. Dabei wird jedoch angenommen, dass die hinsichtlich der Kennwerte ungünstigere Kernzone (KZ) im Querschnitt jeweils nur in einem Teilbereich an der Ortsbrust ansteht, während die angrenzenden Bereiche von der zerlegten Zone (ZZ) gebildet

werden. Unter diesen Annahmen wurden vereinfachte zweidimensionale FE-Berechnungen zur Stollenlage in den beiden o. g. Störungszonen durchgeführt. Im Hinblick auf die prognostizierte Raumstellung der Störungszonen (steil einfallend und stumpf- bis spitzwinklig zur Stollenachse streichend) wurde in den 2D-Berechnungsquerschnitten die Lage des "Streifens" mit der Kernzone in Relation zum Stollenquerschnitt im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse variiert und daraus die jeweils für den Nachweis der Sicherung maßgebliche Konstellation abgeleitet.

Für die Kennwerte zur Verformbarkeit und zur Scherfestigkeit der Kernzone (KZ) und der Zerlegten Zone (ZZ) wurden Schätzwerte angesetzt, die im Vergleich zu den Parametern für das Gebirge außerhalb der Störungszonen sehr klein sind. Da davon ausgegangen wird, dass im Bereich der Durchfahrung der Störungszonen vorausseilende Abdichtungsinjektionen durchgeführt werden, wurde in den statischen Berechnungen eine damit einhergehende Verfestigung der Kern- und der zerlegten Zone berücksichtigt (ringförmige Vergütungszone mit einer Dicke von ca. 5 m). In der Vergütungszone werden die Kennwerte gegenüber den nicht vergüteten Zonen (KZ und ZZ) jeweils geringfügig erhöht. Die Kennwertannahmen beruhen nach Angabe des Aufstellers auf Erfahrungswerten. Sie liegen aus Sicht des Unterzeichnenden in vertretbaren Größenordnungen. Im Rahmen der weiteren Planungsstufen sind die Störungszonen und die maßgeblichen Kennwerte jedoch durch entsprechende Erkundungen und Versuche genauer zu bestimmen und in modifizierten, wirklichkeitsnäheren (räumlichen) Berechnungen zu verwenden. Dies gilt auch für den Ansatz des Primärspannungszustandes, für den hier analog zu den statischen Untersuchungen zum Kavernenbereich ein aus Sicht des Unterzeichnenden viel zu hoher Seitendruckbeiwert ( $k_0 = 0,8$ ) angenommen wurde.

In den statischen Berechnungen zur Durchfahrung der großen Störungszonen werden ein Vollausschlag und die Sicherung mit einer bewehrten Spritzbetonschale zugrunde gelegt. Anker werden nicht in Ansatz gebracht und sollen im Hinblick auf die Vermeidung einer Perforierung der injizierten Zone möglichst auch nicht ausgeführt werden. Im Bereich hoher Überlagerungen und möglicherweise druckhafter Gebirgsverhältnisse in den Störungszonen soll die Sicherung ggf. temporär nachgiebig ausgebildet werden (Verformungsschlitz in der Spritzbetonschale, überschiebbare Ausbaubögen).

Die durchgeführten und im Antragsteil F.XIV dokumentierten statischen Berechnungen zum UW-Stollen im Bereich der Durchfahrung großer Störungszonen sind sehr stark vereinfachend und können die tatsächlichen Verhältnisse (geometrisch und hinsichtlich der Lastabtragung räumlich) nicht wirklichkeitsnah erfassen. Dazu sind dreidimensionale Berechnungen erforderlich, die zwar aufwendiger, jedoch mit den heute verfügbaren rechnerischen Möglichkeiten umsetzbar sind. Im Hinblick auf den grundsätzlichen Nachweis der

Machbarkeit des Unterwasserstollens auch im Bereich der Störungszonen können die vorgelegten vereinfachten statischen Betrachtungen akzeptiert werden. Die Machbarkeit kann aus gutachterlicher Sicht bestätigt werden.

#### **4.4 Wasserschloss im Nahbereich des Unterwasserstollens**

Das Wasserschloss besteht aus einer Unter- und einer Oberkammer, die jeweils aus einem im Grundriss in Form einer liegende Acht verlaufenden Stollen bestehen. Die beiden in der Höhe versetzt liegenden Wasserschlosskammern sind über einen vertikalen Schacht miteinander verbunden. Das Sohlniveau des Stollens der Unterwasserkammer liegt etwa einen Durchmesser oberhalb des Firstniveaus des UW-Stollens. Aufgrund des achtförmigen Stollenverlaufs überquert der Unterkammerstollen den UW-Stollen insgesamt an 4 Stellen. An zwei Querungsstellen werden die Stollen miteinander verbunden.

Im Antragsteil F.XIV ist eine statische Berechnung an einem zweidimensionalen Schnitt quer zum UW-Stollen dokumentiert. In diesem Schnitt treten der UW-Stollen einmal und der Unterkammerstollen des Wasserschlosses zweimal auf. Die Untergrundverhältnisse im betrachteten Berechnungsquerschnitt werden auf der Grundlage der im Kavernenbereich aufgeschlossenen Verhältnisse nachgebildet (granoblastischer Gneis, Klüfte extrapoliert, diskrete Simulation einer Scherzone). Auch die Kennwerte werden entsprechend den Annahmen in den Kavernenberechnungen angesetzt. Die horizontalen Primärspannungen werden in einzelnen Berechnungsfällen variiert ( $k_0 = 0,4 / 0,8 / 1,2$ ).

In den Berechnungen wird jeweils der Ausbruch der Stollen ohne die Berücksichtigung von Stützmitteln simuliert. Es ergeben sich aus den Berechnungen keine kritischen Traglast- und Verformungszustände. Gegenseitige Beeinflussungen zwischen den Stollen sind zwar erkennbar, jedoch ohne relevante Auswirkungen.

Zu den Berechnungen ist anzumerken, dass die Ergebnisse unter den getroffenen Annahmen den Erwartungen entsprechen. Allerdings weisen der UW-Stollen und der zweimal im Berechnungsschnitt auftretende Unterkammerstollen in dem untersuchten Querschnitt jeweils relativ große seitliche Abstände zueinander auf. Als Zielsetzung der Berechnung ist die Untersuchung möglicher gegenseitiger Beeinflussungen des Wasserschlossstollens und des UW-Stollens ausgewiesen. Insofern ist die Durchführung der vorgelegten zweidimensionalen Berechnung am ausgewählten Querschnitt nicht ganz nachvollziehbar. In weiteren Planungsphasen sollten Berechnungen zu Bereichen durchgeführt werden, in denen der UW-Stollen und der Stollen des Wasserschlosses kleinere Abstände zueinander aufweisen. Dazu sind dann jedoch räumliche Betrachtungen erforderlich, um die im Grundriss unterschiedlichen Stollenverläufe in den Querungsbereichen wirklichkeitsnah zu erfassen.

Die grundsätzliche Machbarkeit der im Planfeststellungsantrag vorgesehenen Ausführung des Wasserschlosses kann aus gutachterlicher Sicht grundsätzlich als gegeben angesehen werden.

#### **4.5 Druckschächte**

Für die Herstellung der beiden vertikalen Druckschächte ist gemäß der in den Antragsunterlagen beschriebenen Planungskonzeption voraussichtlich die Anwendung des sog. Raise Bore-Verfahrens vorgesehen. Dieses erfordert im Bauzustand eine temporär standsichere Schachtwandung. Im Antragsteil F.XIV sind dazu dreidimensionale Blockstabilitätsuntersuchungen dokumentiert, in denen die Standsicherheit der durch Verschneidung entstehenden räumlichen Felskeile untersucht wird. Als Trennflächen werden dabei die Klüfte mit den auch für die Kavernenbereiche angenommenen Raumstellungen (3 Kluftscharen) berücksichtigt. Außerdem ist nach der geologischen Prognose zu erwarten, dass eine der im Sondierstollen angetroffenen Störungszonen einen der beiden Schächte mit steilem Einfallen kreuzt. Auch diese Störungzone wird in den keilstatischen Untersuchungen berücksichtigt.

Für die Verschneidungsflächen der untersuchten geometrisch möglichen Keile wurde jeweils ein Reibungswinkel vorgegeben (in Anlehnung an die Ansätze in der Kavernenstatik) und im Zuge der schrittweisen Durchführung der Berechnungen die Kohäsion jeweils bis auf den zur Erzielung einer ausreichenden Standsicherheit erforderlichen Wert erhöht. Sicherungsmittel (z. B. Anker und Spritzbeton) wurden in den Untersuchungen nicht berücksichtigt. Aus der Bewertung der statisch erforderlichen Kohäsionswerte auf den Verschneidungsflächen wird abgeleitet, dass von einer ausreichenden Standsicherheit der Schachtwandungen im Bauzustand ausgegangen werden kann. Für den Bereich der Störungzone wird dabei in geringer Größe eine Erhöhung der primär angenommenen Kohäsion infolge einer Vergütung bei den im Falle der Störungzone vorgesehenen Abdichtungsinjektionen in Anspruch genommen.

Die Berechnungsergebnisse sind unter den getroffenen Annahmen plausibel. Die Schlussfolgerungen können nachvollzogen werden. Aus gutachterlicher Sicht ist die Machbarkeit der vertikalen Druckschächte grundsätzlich gegeben.

### **5. Abdichtung**

#### **5.1 Vorbemerkungen**

Im Rahmen des Vorhabens ist das Schutzgut Wasser, insbesondere das Grundwasserregime im oberflächennahen Bereich vor unzulässigen Beeinträchtigungen zu schützen. Bezüglich der untertägig zu errichtenden Bauwerke bedeutet dies, dass sowohl in der Bau-

als auch in der Betriebsphase die den Untertagebauwerken zutretenden Grund- bzw. Bergwassermengen (sog. Bergwasserdrainage) auf zulässige Größen beschränkt werden müssen. Dazu ist es vorgesehen, in Gebirgsbereichen mit höheren Wasserdurchlässigkeiten nach Erfordernis Abdichtungsinjektionen durchzuführen und damit die in diesen Zonen gegenüber den angrenzenden Homogenbereichen erhöhten Wasserzutrittsmengen zu begrenzen.

Als Antragsteil F.XXI wurde dazu das sog. Abdichtungskonzept Untertagebau vorgelegt. Im Rahmen des Abdichtungskonzeptes werden als Grundlagen u. a. Ansätze zu den Wasserdurchlässigkeiten in den weitgehend ungestörten Homogenbereichen des Grundgebirges und in Störungszonen verwendet. Weiterhin werden in der Unterlage Zieldurchlässigkeiten für durch Injektionen abgedichtete Störungszonen angegeben. Diese Angaben erfolgen unter Bezugnahme auf das Hydrogeologische Fachgutachten, welches als Antragsteil E.I vorliegt. Der Antragsteil E.I ist in seiner Gesamtheit nicht Gegenstand der fachgutachterlichen Prüfung durch den Unterzeichnenden. Im Hinblick auf die Verknüpfung des Abdichtungskonzeptes (F.XXI) mit den im Hydrogeologischen Fachgutachten (E.I) enthaltenen Aussagen und Annahmen zu den Wasserdurchlässigkeiten der Homogenbereiche und abgedichteter Störungszonen im Bereich der Untertagebauwerke werden Teile dieser Unterlage jedoch in die Prüfung und Bewertung des Abdichtungskonzeptes einbezogen.

## **5.2 Zum Antragsteil E.I, Hydrogeologisches Fachgutachten**

Im Hydrogeologischen Fachgutachten werden die Durchlässigkeitsbeiwerte ( $k_f$ -Werte) des Gebirges anhand von Literaturwerten, von Feldversuchen sowie von hydraulischen Berechnungen auf der Basis der Beobachtungen und Messungen bei ausgeführten Untertagebauwerken im Projektgebiet abgeschätzt bzw. bestimmt. Für die Ansätze der mittleren Gebirgsdurchlässigkeit in den Homogenbereichen des Grundgebirges außerhalb von Störungszonen wird insbesondere auf die Ergebnisse von Kalibrierungsberechnungen zurückgegriffen, die auf der Grundlage der gemessenen Bergwasserzuflüsse im Sondierstollen Atdorf durchgeführt wurden.

Im Sondierstollen wurden drei ausgeprägte Störungszonen angetroffen und durchfahren, in denen größere Wasserzutritte zum Stollen auftraten. In den Bereichen zwischen diesen Störungszonen, die in den Antragsunterlagen als Homogenbereiche bezeichnet werden, waren die Wasserzutritte dagegen relativ gering. Die Wasserzutritte in diesen Bereichen ergaben sich i. a. in einzelnen geklüfteten Zonen. Große Abschnitte des Stollens zeigten sich auch vollständig trocken und ohne erkennbare Wasserzutritte aus dem Gebirge. Im stationären Zustand entfielen ca. 80 % des gesamten Bergwasseranfalls im Sondierstollen auf die lokalen Störungszonen, deren Längenanteil bezogen auf die Gesamtlänge des

Sondierstollens nur ca. 1,7 % beträgt. In den Homogenbereichen außerhalb der Störungszonen wurde im Mittel ein stationärer Bergwasserzutritt von 0,4 l/s auf 100 m Stollenlänge festgestellt. In zur Kalibrierung des  $k_f$ -Wertes durchgeführten numerischen Berechnungen an einem Vertikalschnittmodell wurde dieser mittlere Wasserzufluss interpretiert und daraus ein mittlerer Wasserdurchlässigkeitsbeiwert der Homogenbereiche des Grundgebirges außerhalb von Störungszonen mit  $k_f = 7,5 \cdot 10^{-9}$  m/s abgeleitet.

Die Ergebnisse der durchgeführten Interpretation und der Kalibrierung zum Sondierstollen erscheinen plausibel. Gegen die Berücksichtigung des o. g.  $k_f$ -Wertes für Homogenbereiche des Grundgebirges außerhalb von Stör- und Bruchzonen in numerischen Berechnungen zur Abschätzung von Wasserzutrittsmengen in entsprechenden Abschnitten der geplanten Untertagebauwerke bestehen keine Einwände.

Im Hydrogeologischen Fachgutachten werden auch die vom Sondierstollen aus im Bereich der Kavernen durchgeführten Wasserdruckversuche (WD-Tests) behandelt. Die Auswertung dieser Versuche hat größere  $k_f$ -Werte ergeben, als aus der Kalibrierung am Sondierstollen abgeleitet. Im Antragsteil E.I werden die Ursachen dafür erläutert. Es wird die Schlussfolgerung gezogen, dass die aus den WD-Tests im Kavernenbereich abgeleiteten  $k_f$ -Werte für die Abschätzung von großräumig in Homogenbereichen auftretenden Bergwasserzuflüsse nicht repräsentativ und daher für die gesamthaften Betrachtungen nicht maßgeblich sind. Den entsprechenden Angaben und Schlussfolgerungen des hydrogeologischen Fachgutachters kann aus Sicht des Unterzeichnenden zugestimmt werden.

Zur Begrenzung der Bergwasserzutritte aus Störungszonen sollen im Rahmen der Auffahrung der Untertagebauwerke Abdichtungsinjektionen durchgeführt werden (s. Antragsteil F.XXI). Dies betrifft insbesondere den Bereich des Unterwasserstollens, mit dem nach der geologischen Prognose große, stumpf- bis spitzwinklig zum Stollen streichende Störungszonen zu durchfahren sind (vgl. 3.1). Im Rahmen des Hydrogeologischen Fachgutachtens (E.I) wird diesbezüglich davon ausgegangen, dass in einer ringförmigen, durch vorauseilende Injektionen abgedichteten Zone die primär mit einem Durchlässigkeitsbeiwert von  $k_f = 1 \cdot 10^{-5}$  m/s angenommene Durchlässigkeit der Störungszone auf einen Wert von  $k_f = 2 \cdot 10^{-8}$  m/s reduziert werden kann. Darüber hinaus wird angenommen, dass sich infolge der Spannungsumlagerungen beim Stollenvortrieb die Wasserdurchlässigkeit des vorauseilend hergestellten Injektionsringes durch Kompressionseffekte weiter verringert. Mit Verweis auf vorliegende Erfahrungen zu diesem Effekt wird der Durchlässigkeitsbeiwert des mit 5 m Dicke konzipierten Injektionsringes mit  $k_f = 5 \cdot 10^{-9}$  m/s angenommen. Auf dieser Basis werden im Hydrogeologischen Fachgutachten die im Bereich abgedichteter Störungszonen dem Stollen zutretenden Wassermengen in numerischen Berechnungen (Ver-



tikalschnittmodell) rechnerisch abgeschätzt und in den gesamthaften Betrachtungen zur sog. Bergwasserdrainage durch die Untertagebauwerke berücksichtigt.

Im Vorgriff auf die unten folgenden Anmerkungen zum Abdichtungskonzept (F.XXI) ist hierzu anzumerken, dass im Vorfeld der Baumaßnahmen auf jeden Fall geeignete Injektionsversuche durchgeführt werden müssen, um die Erreichbarkeit der im Hydrogeologischen Fachgutachten angenommenen primären Reduzierung des  $k_f$ -Wertes in Störungszonen auf  $2 \cdot 10^{-8}$  m/s nachzuweisen und die dazu erforderlichen Methoden festzulegen. Außerdem bedarf die postulierte weitere Verringerung der Wasserdurchlässigkeit der injizierten Zone infolge von Spannungsumlagerungen und damit einhergehenden Kompressionen einer nachvollziehbaren theoretischen Begründung bzw. des praktischen Nachweises.

### **5.3 Zum Antragsteil F.XXI, Abdichtungskonzept Untertagebau**

Wie bereits erläutert nimmt das Abdichtungskonzept Untertagebau direkten Bezug auf das Hydrogeologische Fachgutachten. Dementsprechend werden in der Unterlage nach einem kurzen Abriss zu den geologischen und hydrogeologischen Verhältnissen die Begründungen und die Zielsetzungen der Abdichtungsmaßnahmen noch einmal wiedergegeben.

Im Abdichtungskonzept werden zunächst in allgemeiner Form injektionstechnische Gesichtspunkte vorgestellt, wobei u. a. auf mögliche Injektionsmittel und deren spezielle Einsatzbereiche eingegangen wird. Mit Bezugnahme auf Erfahrungen, insbesondere aus skandinavischen Ländern und von Untertagebauwerken in den Alpen, werden Größenordnungen für mit Injektionsmaßnahmen erzielbare Durchlässigkeiten genannt. Auf das Projekt Atdorf bezogen wird als Zieldurchlässigkeit bei der Abdichtung von Störungszonen im Bereich der Durchfahrung mit dem Stollen der bereits im Hydrogeologischen Fachgutachten genannte Wert  $k_f = 5 \cdot 10^{-9}$  m/s angeführt und als erreichbar bewertet (bei Ausführung eines 5 m dicken Injektionsringes und Berücksichtigung einer vortriebsbedingten Spannungsumlagerung). Zu dieser Annahme wurden bereits oben unter 5.2 Anmerkungen gemacht (Erfordernis von Injektionsversuchen und weiteren Nachweisen). Ggf. muss die Dicke des Injektionsringes vergrößert werden, um bei Nichterreichen der o. g. Zieldurchlässigkeit die zutretende Bergwassermenge auf das zulässige Maß zu begrenzen.

Als vorgesehene Injektionsmittel werden für den Regelfall Wasser-Zementsuspensionen (Normalzemente oder Fein- bzw. Ultrafeinzemente) mit den üblichen Beigaben genannt. Weiterhin kommen auch chemische Injektionsstoffe wie z. B. PU-Schäume, Epoxidharze, Acrylatgele, Silikatgele und Thermoplaste in Frage.

Es folgen im Abdichtungskonzept allgemeine Erläuterungen zu Injektions- und Abbruchkriterien und zu diesbezüglich aus der Literatur bekannten Methoden. Zutreffend wird im Abdichtungskonzept darauf hingewiesen, dass die Kriterien letztlich projektspezifisch auf der Grundlage der vor Ort vorliegenden Verhältnisse und entsprechender Vorversuche festgelegt werden müssen. Dies ist aus gutachterlicher Sicht zu bestätigen. Die Notwendigkeit der in späteren Planungsphasen durchzuführenden Injektionsversuche ist in diesem Zusammenhang noch einmal hervorzuheben.

Die Abdichtungsmaßnahmen sind unmittelbar mit vorauseilenden Erkundungen beim Vortrieb verbunden. Hier ist nach Angabe im vorgelegten Konzept grundsätzlich eine systematische Vorauserkundung mit Bohrungen geplant. Dazu werden in der Unterlage mit Bezug auf ausgeführte Projekte grundsätzliche Konzeptionen vorgestellt.

Das Abdichtungskonzept Untertagebau bezieht sich nicht nur auf die Stollenvortriebe, sondern auch auf die abzuteufenden Schachtbauwerke. In der Unterlage werden dazu das bei den Schächten vorgesehene Erkundungs- und Injektionskonzept mit den dabei möglichen Variationen (im Einzelnen vom Bauverfahren der Schächte abhängig) vorgestellt. Die Angaben sind plausibel und nachvollziehbar.

Bei den Stollenvortrieben ist bezüglich des Erkundungs- und Injektionskonzeptes zwischen konventionellen Vortrieben (Sprengvortrieb) und maschinellen Vortrieben mit einer Tunnelbohrmaschine (TBM) zu unterscheiden. Im Abdichtungskonzept wird auf beide Fälle näher eingegangen. Während beim konventionellen Vortrieb die Zugänglichkeit zur Ortsbrust stets gegeben ist und die vorauseilenden Erkundungen und Injektionsmaßnahmen einfacher umzusetzen sind, ergeben sich beim TBM-Vortrieb Erschwernisse. Hier sind teilweise aufwendigere Sonderlösungen mit seitlichen Nischen oder ggf. Umleitungsstollen als Zugang zum vor einer zurückgezogenen TBM liegenden Ortsbrustbereich notwendig. Im Abdichtungskonzept werden entsprechende Möglichkeiten skizziert und Beispiele von ausgeführten Projekten gezeigt. Dabei wird auch näher auf die als besonders schwierig zu bewertende Situation eingegangen, bei der Störungs- oder Bruchzonen parallel bis spitzwinklig zum Stollen streichen. Mit derartigen Verhältnissen ist insbesondere im südlichen Abschnitt des UW-Stollens zu rechnen (Nahbereich der Wehra-Zeiningen-Bruchzone bzw. Nord-Süd orientierte Äste der Eggberg-Störungzone). Die im Abdichtungskonzept enthaltenen Angaben dazu sind grundsätzlich plausibel und nachvollziehbar. Die Machbarkeit ist aus gutachterlicher Sicht gegeben. Es ist jedoch darauf hinzuweisen, dass diesbezüglich im Zuge der Ausführungsplanung vertiefte Planungen und Betrachtungen auch im Hinblick auf die Bauzeit und die Kosten durchgeführt werden sollten.

Während im Bereich der großen Störungszonen grundsätzlich die Abdichtungsinjektionen (abschnittsweise) als vorauseilende Maßnahme durchgeführt werden sollen, ist dies beim



Durchfahren kleinerer Stör- und Bruchzonen nicht unbedingt notwendig. Sofern die hydraulische Wirksamkeit derartiger Zonen nicht zu groß ist, können ggf. auch Abdichtungsmaßnahmen nachlaufend, d. h. aus dem bereits aufgefahrenen Stollenquerschnitt heraus durchgeführt werden. Dies hat den Vorteil, dass dabei zeit- und kostenaufwendige Vortriebsunterbrechungen vermieden werden können. Die Festlegung, ob vorauseilende oder nachlaufende Abdichtungsmaßnahmen durchgeführt werden sollen, ist nach dem vorgelegten Konzept vortriebsbegleitend anhand eines Grenzwasserkriteriums zu entscheiden. Als Grenzwassermenge wird dazu ein Wert von 5 l/s (stationär) auf 10 m Stollenlänge vorgeschlagen, der mit Erfahrungen von ausgeführten Projekten begründet wird. Da die Entscheidung über die Art der Durchführung der Injektionen (vorauseilend oder nachlaufend) bereits vor dem Auffahren des entsprechenden Stollenabschnittes getroffen werden muss, soll zur indirekten Bestimmung bzw. Abschätzung der zu erwartenden Grenzwassermenge im Stollen der Wasseranfall in den vorauseilenden Erkundungsbohrungen herangezogen werden. Diese Wassermenge wird im Abdichtungskonzept als Interventionswassermenge bezeichnet und - wiederum mit Verweis auf vorliegende Erfahrungen von ausgeführten Tunnelprojekten – mit 4 l/s auf 10 m Bohrlochlänge gewählt. Der Faktor 1,25 (5 l/s / 4 l/s) als angenommene Erhöhung der im 10 m langen Stollenabschnitt nach dem Ausbruch anfallenden Wassermenge gegenüber der im 10 m langen Abschnitt des vorlaufenden Bohrlochs wird im Konzept als Sicherheitsfaktor bezeichnet, da erfahrungsgemäß mit keiner Erhöhung zu rechnen sei.

Die vorstehend genannten Kriterien zur Entscheidung über die Durchführung der Injektionsmaßnahmen (vorauseilend oder nachlaufend) werden vom Aufsteller der Unterlage ausschließlich mit Erfahrungen begründet. Aus gutachterlicher Sicht sind im Rahmen der Ausführungsplanungen geeignete rechnerische Untersuchungen durchzuführen und entsprechende Nachweise zum Beleg der diesbezüglich getroffenen Annahmen vorzulegen.

Mit dem vorgelegten Abdichtungskonzept kann aus Sicht des Unterzeichnenden die Machbarkeit der beim Projekt Atdorf erforderlichen vortriebsbegleitenden Erkundungs- und Injektionsmaßnahmen grundsätzlich gezeigt werden. Im Detail sind jedoch im Rahmen der weiteren Planungsstufen noch verschiedene Fragestellungen vertieft zu behandeln und die teilweise willkürlich anmutenden und relativ pauschal mit vorliegenden Erfahrungen begründeten Annahmen zu verifizieren bzw. anzupassen.

## **6. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen**

Die Schluchseewerk AG (Laufenburg) beabsichtigt auf dem Gebiet des Landkreises Waldshut das Pumpspeicherwerk (PSW) Atdorf zu errichten. Im Rahmen des Baumaßnahme sind eine Reihe von Untertagebauwerken zu errichten, die in dem aus Gneisen und Graniten bestehenden kristallinen Grundgebirge des Südschwarzwaldes zu liegen

kommen. Zu dem Bauvorhaben ist vom Landratsamt Waldshut ein Planfeststellungsverfahren durchzuführen. Das Land Baden-Württemberg, vertreten durch das Landratsamt Waldshut, hat zur Prüfung und Beurteilung eines Teilbereiches des Planfeststellungsantrages bzw. der entsprechenden Antragsunterlagen den Unterzeichnenden Prof. Dr.-Ing. Walter Wittke (WBI GmbH) als Prüfgutachter eingeschaltet.

Die Prüfaufgabe als Landesgutachter betrifft zunächst die felsmechanischen und statischen Belange der wichtigsten Untertagebauwerke, zu denen im Rahmen des Planfeststellungsantrages entsprechende statische Untersuchungen und Konzepte zur Sicherung bzw. Auskleidung vorgelegt wurden. Hier sind als untersuchte Bauwerke die Maschinenkaverne, die Trafokaverne, der Unterwasserstollen und der Kreuzungsbereich mit dem Wasserschloss sowie die beiden Druckschächte zu nennen. Im Rahmen der gutachterlichen Prüfung der Unterlagen wurden sowohl die aus den verfügbaren Untersuchungen und Erkundungsergebnissen abgeleiteten Berechnungsgrundlagen als auch die statischen Untersuchungen und die darauf basierenden Konzepte zur Sicherung und Auskleidung der o. g. Untertagebauwerke bewertet.

Die geologisch-geotechnischen Prognosen beruhen in weiten Teilen auf geologischen Karten und Berichten des LGRB und auf Detailkartierungen im Bereich der Geländeoberfläche sowie auf Unterlagen der Schluchseewerk AG zu früheren ausgeführten Bauvorhaben im Projektgebiet. Zur direkten Erkundung der Gebirgsverhältnisse im Bereich der Maschinen- und der Trafokaverne sowie im Bereich des Zufahrtsstollens zu den Kavernen wurde der sog. Sondierstollen aufgefahren, in dem Kartierungen und Messungen durchgeführt wurden. Weiterhin wurden im Bereich der Maschinen- und der Trafokaverne Bohrungen vom Stollen aus hergestellt, in denen Feldversuche durchgeführt wurden. An Proben aus den Kernbohrungen wurden Laborversuche durchgeführt. Auf Basis dieser Untersuchungen wurde der Antragsteil F.XXIV (Interpretationsbericht Sondierstollen, Felsmechanische Ableitungen) erstellt, in dem die Ergebnisse der Versuche zusammenfassend dargestellt und interpretiert werden. Abschließend werden felsmechanische Kennwerte als Grundlage für die im Rahmen des Planfeststellungsantrages durchgeführten statischen Untersuchungen angegeben. Gegen die Verwendung der vorgeschlagenen Kennwerte in der derzeitigen Planungsphase bestehen aus gutachterlicher Sicht keine Einwände.

Im Antragsteil F.XXIV sind außerdem Angaben zum Primärspannungszustand enthalten, die sich auf die im Sondierstollen durchgeführten Schlitzsondenversuche beziehen. Daraus wurden hohe Seitendruckbeiwerte  $\geq 1$  abgeleitet. Die Ergebnisse der Schlitzsondenversuche weisen große Streuungen auf und werden vom Unterzeichnenden weder als plausibel noch als zuverlässig bewertet. Nach den Erkenntnissen vom Bau der in der Nähe im gleichen Gebirge liegenden Kaverne Wehr sind die horizontalen Primärspannungen

deutlich kleiner, als gegenwärtig für die Untersuchungen zum PSW Atdorf angenommen. Diese Ansätze werden für zu ungünstig gehalten. Im Zuge der weiteren Planungsstufen sollten ergänzende Feldversuche zur Bestimmung des Primärspannungszustandes durchgeführt werden. Es wird empfohlen, dazu Spannungsmessungen nach der sog. Over coring method durchzuführen.

Die oben erwähnten statischen Untersuchungen wurden im Hinblick auf die Machbarkeit der Untertagebauwerke durchgeführt und sind im Antragsteil F.XV dokumentiert. Zur Maschinen- und zur daneben liegenden Trafokaverne wurden vereinfachende zweidimensionale statische Berechnungen durchgeführt, in denen die felsmechanischen Kennwerte und der Primärspannungszustand auf der Grundlage des Antragsteiles F.XXIV angesetzt wurden. Weiterhin wurden die im Rahmen der Erkundungen (Sondierstollen) festgestellten Klüfte sowie diskrete Scher- und Störzonen berücksichtigt. Mit den Berechnungen kann die Machbarkeit der Kavernen unter Berücksichtigung einer Sicherung mit Stabstahl- und bereichsweise Vorspannankern nachgewiesen werden. Die Machbarkeit kann aus gutachterlicher Sicht bestätigt werden. Im Zuge der weiteren Planungsstufen sollten jedoch unbedingt wirklichkeitsnähere dreidimensionale Standsicherheitsberechnungen durchgeführt werden, in denen auch der nach Einschätzung des Unterzeichnenden günstigere Primärspannungszustand berücksichtigt wird (s. o.). Damit dürfte sich der Sicherungsaufwand in den Kavernen gegenüber der bisherigen Konzeptplanung optimieren lassen. Eine weitere Optimierung der Sicherungsmittel ist aus Sicht des Unterzeichnenden möglich, wenn die Kavernenlage im Grundriss um ca. 40 – 50° gedreht wird, so dass die Kavernenlängsachse nicht mehr wie derzeit etwa parallel zu der bekannten großen Vorwald-Störungszone verläuft. Bei einer entsprechend Drehung sind im Hinblick auf die Bildung von potenziellen Felskeilen statisch günstigere Verhältnisse zu erwarten.

Im Antragsteil F.XV finden sich auch statische Voruntersuchungen zum Unterwasserstollen, mit dem nach der geologischen Prognose mehrere große Störungszonen durchfahren werden müssen. Zwischen diesen Zonen sind weitgehend ungestörte Homogenbereiche zu erwarten, in denen die Machbarkeit erfahrungsgemäß auch ohne Berechnungen als gegeben angesehen werden kann. Die statischen Voruntersuchungen zum UW-Stollen beschränken sich daher auf die stark vereinfachende Betrachtungen an zweidimensionalen Berchnungsschnitten im Bereich der Durchfahrung großer Störungszonen. Auch für diesen Fall lässt sich die Machbarkeit unter den getroffenen Annahmen nachweisen. Im Rahmen der weiteren Planungsstufen sollten für diese Bereiche räumliche Berechnungen durchgeführt werden, mit denen die Verhältnisse wirklichkeitsnäher erfasst und die Sicherungsmittel wirtschaftlicher geplant werden können.

Für die vertikalen Druckschächte, die das Oberbecken mit dem Kavernenkomplex verbinden sollen, wurden ebenfalls statische Voruntersuchungen durchgeführt, mit denen die Machbarkeit nachgewiesen wird. Weiterhin wurden statische Untersuchungen zum unteren Kammerstollen des Wasserschlosses unter Berücksichtigung des in relativer Nähe verlaufenden UW-Stollens durchgeführt. Auch diese Berechnungen (zweidimensional) sind stark vereinfachend und müssen im weiteren Verlauf durch räumliche Berechnungen ergänzt werden.

Im Rahmen des Vorhabens ist das Schutzgut Wasser, insbesondere das Grundwasserregime im oberflächennahen Bereich vor unzulässigen Beeinträchtigungen zu schützen. Bezüglich der untertägig zu errichtenden Bauwerke bedeutet dies, dass sowohl in der Bau- als auch in der Betriebsphase die den Untertagebauwerken zutretenden Grund- bzw. Bergwassermengen (sog. Bergwasserdrainage) auf zulässige Größen beschränkt werden müssen. Dazu ist es vorgesehen, in Gebirgsbereichen mit höheren Wasserdurchlässigkeiten nach Erfordernis Abdichtungsinjektionen durchzuführen und damit die in diesen Zonen gegenüber den angrenzenden Homogenbereichen erhöhten Wasserzutrittsmengen zu begrenzen.

Als Antragsteil F.XXI wurde dazu das sog. Abdichtungskonzept Untertagebau vorgelegt. Im Rahmen des Abdichtungskonzeptes werden als Grundlagen u. a. Ansätze zu den Wasserdurchlässigkeiten in den weitgehend ungestörten Homogenbereichen des Grundgebirges und in Störungszonen verwendet. Weiterhin werden in der Unterlage Zieldurchlässigkeiten für durch Injektionen abgedichtete Störungszonen angegeben. Diese Angaben erfolgen unter Bezugnahme auf das Hydrogeologische Fachgutachten, welches als Antragsteil E.I vorliegt und vom Unterzeichnenden mit seinen diesbezüglichen Angaben in die Prüfung und Bewertung des Abdichtungskonzeptes einbezogen wurde.

Im Hydrogeologischen Fachgutachten (E.I) wird auf der Grundlage einer Rückrechnung der im Sondierstollen Atdorf außerhalb von Störungszonen gemessenen Bergwasserzuflüsse ein mittlerer Wasserdurchlässigkeitsbeiwert der Homogenbereiche des Grundgebirges außerhalb von Störungszonen mit  $k_f = 7,5 \cdot 10^{-9}$  m/s abgeleitet. Die Ergebnisse der durchgeführten Interpretation und der Kalibrierung zum Sondierstollen erscheinen plausibel. Gegen die Berücksichtigung des o. g.  $k_f$ -Wertes für Homogenbereiche des Grundgebirges außerhalb von Stör- und Bruchzonen in numerischen Berechnungen zur Abschätzung von Wasserzutrittsmengen in entsprechenden Abschnitten der geplanten Untertagebauwerke bestehen keine Einwände.

Maßgeblich für den Entzug von Bergwasser über die untertägigen Bauwerke (sog. Bergwasserdrainage) sind die im Vergleich zu den Homogenbereichen stark durchlässigen Störungszonen. Diese sollen im Zuge der Vortriebsarbeiten vorausseilend abgedichtet wer-

den. Im Rahmen des Hydrogeologischen Fachgutachtens wird diesbezüglich davon ausgegangen, dass in einer ringförmigen, durch vorauseilende Injektionen abgedichteten Zone die primär mit  $k_f = 1 \cdot 10^{-5}$  m/s angenommene Durchlässigkeit der Störungszone auf einen Wert von  $k_f = 2 \cdot 10^{-8}$  m/s reduziert werden kann. Darüber hinaus wird angenommen, dass sich infolge der Spannungsumlagerungen beim Stollenvortrieb die Wasserdurchlässigkeit des vorauseilend hergestellten Injektionsringes durch Kompressionseffekte weiter verringert. Mit Verweis auf vorliegende Erfahrungen zu diesem Effekt wird der Durchlässigkeitsbeiwert des mit 5 m Dicke konzipierten Injektionsringes mit  $k_f = 5 \cdot 10^{-9}$  m/s angenommen.

Hierzu ist aus gutachterlicher Sicht anzumerken, dass die getroffenen Annahmen als vergleichsweise optimistisch anzusehen sind. Im Vorfeld der Baumaßnahmen müssen geeignete Injektionsversuche durchgeführt werden, um die Erreichbarkeit der im Hydrogeologischen Fachgutachten angenommenen primären Reduzierung des  $k_f$ -Wertes in Störungszone auf  $2 \cdot 10^{-8}$  m/s nachzuweisen und die dazu erforderlichen Methoden festzulegen. Außerdem bedarf die postulierte weitere Verringerung der Wasserdurchlässigkeit der injizierten Zone infolge von Spannungsumlagerungen und damit einhergehenden Kompressionen einer nachvollziehbaren theoretischen Begründung bzw. des praktischen Nachweises.

Im Abdichtungskonzept (F.XXI) werden zunächst in allgemeiner Form injektionstechnische Gesichtspunkte vorgestellt, wobei u. a. auf mögliche Injektionsmittel und deren spezielle Einsatzbereiche eingegangen wird. Mit Bezugnahme auf Erfahrungen werden Größenordnungen für mit Injektionsmaßnahmen erzielbare Durchlässigkeiten genannt. Auf das Projekt Atdorf bezogen wird als Zieldurchlässigkeit bei der Abdichtung von Störungszone im Bereich der Durchfahrung mit dem Stollen der bereits im Hydrogeologischen Fachgutachten genannte Wert  $k_f = 5 \cdot 10^{-9}$  m/s angeführt. Diese Annahme ist wie vorstehend erwähnt im Vorfeld der Baumaßnahmen zu verifizieren. Ggf. muss die Dicke des Injektionsringes vergrößert werden, um bei Nichterreichen der o. g. Zieldurchlässigkeit die zutretende Bergwassermenge auf das zulässige Maß zu begrenzen.

Die Abdichtungsmaßnahmen sind unmittelbar mit vorauseilenden Erkundungen beim Vortrieb verbunden. Hier ist nach Angabe im vorgelegten Konzept grundsätzlich eine systematische Vorauserkundung mit Bohrungen geplant. Dazu werden in der Unterlage mit Bezug auf ausgeführte Projekte grundsätzliche Konzeptionen vorgestellt.

Das Abdichtungskonzept Untertagebau bezieht sich nicht nur auf die Stollenvortriebe, sondern auch auf die abzuteufenden Schachtbauwerke. In der Unterlage werden dazu das bei den Schächten vorgesehene Erkundungs- und Injektionskonzept mit den dabei mögli-

chen Variationen (im Einzelnen vom Bauverfahren der Schächte abhängig) vorgestellt. Die Angaben sind plausibel und nachvollziehbar.

Bei den Stollenvortrieben ist bezüglich des Erkundungs- und Injektionskonzeptes zwischen konventionellen Vortrieben (Sprengvortrieb) und maschinellen Vortrieben mit einer Tunnelbohrmaschine (TBM) zu unterscheiden. Im Abdichtungskonzept wird auf beide Fälle näher eingegangen. Während beim konventionellen Vortrieb die Zugänglichkeit zur Ortsbrust stets gegeben ist und die vorauseilenden Erkundungen und Injektionsmaßnahmen einfacher umzusetzen sind, ergeben sich beim TBM-Vortrieb Erschwernisse. Die dabei möglichen Lösungen werden aufgezeigt und mit Beispielen von ausgeführten Projekten belegt. Dabei wird auch näher auf die als schwierig zu bewertende Situation eingegangen, bei der Störungs- oder Bruchzonen parallel bis spitzwinklig zum Stollen streichen. Mit derartigen Verhältnissen ist insbesondere im südlichen Abschnitt des UW-Stollens zu rechnen (Nahbereich der Wehra-Zeiningen-Bruchzone bzw. Nord-Süd orientierte Äste der Eggberg-Störungszone). Die im Abdichtungskonzept enthaltenen Angaben dazu sind grundsätzlich plausibel und nachvollziehbar. Die Machbarkeit ist aus gutachterlicher Sicht gegeben. Es ist jedoch darauf hinzuweisen, dass diesbezüglich im Zuge der Ausführungsplanung vertiefte Planungen und Betrachtungen auch im Hinblick auf die Bauzeit und die Kosten durchgeführt werden sollten.

Während im Bereich der großen Störungszonen grundsätzlich die Abdichtungsinjektionen als vorauseilende Maßnahme durchgeführt werden sollen, ist dies beim Durchfahren kleinerer Stör- und Bruchzonen nicht unbedingt notwendig. Sofern die hydraulische Wirksamkeit derartiger Zonen nicht zu groß ist, können ggf. auch Abdichtungsmaßnahmen nachlaufend, d. h. aus dem bereits aufgefahrenen Stollenquerschnitt heraus durchgeführt werden. Die Festlegung, ob vorauseilende oder nachlaufende Abdichtungsmaßnahmen durchgeführt werden, soll nach dem vorgelegten Konzept vortriebsbegleitend anhand eines Grenzwasserkriteriums (Wasserzutrittsmenge im Stollen) bzw. anhand einer sog. Interventionswassermenge (Wasserzutrittsmenge in einer vorauseilenden Bohrung) entschieden werden. Zu den Kriterien werden im Abdichtungskonzept Werte angegeben, die ausschließlich mit Erfahrungen begründet werden. Aus gutachterlicher Sicht sind im Rahmen der Ausführungsplanungen geeignete rechnerische Untersuchungen durchzuführen und entsprechende Nachweise zum Beleg der diesbezüglich getroffenen Annahmen vorzulegen.

Mit dem vorgelegten Abdichtungskonzept kann aus Sicht des Unterzeichnenden die Machbarkeit der beim Projekt Atdorf erforderlichen vortriebsbegleitenden Erkundungs- und Injektionsmaßnahmen grundsätzlich gezeigt werden. Im Rahmen der weiteren Planungs-



stufen sind jedoch noch verschiedene Fragestellungen vertieft zu behandeln und getroffene Annahmen zu verifizieren bzw. anzupassen.

Weinheim, 30.06.2016

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'W. Wittke', written over the printed name.

Prof. Dr.-Ing. Walter Wittke