

Pumpspeicherwerk Forbach – Geotechnische und hydro-geologische Erkundungen für die Planung der Erweiterung der bestehenden Anlagen

Oliver Haupt
EnBW, Kraftwerke AG, Stuttgart

Ulrike Mainka
Mailänder Geo Consult GmbH, Karlsruhe

Walter Rahn
gbm Gesellschaft für Baugeologie- -meßtechnik-mbH Baugrundinstitut, Ettlingen

Peter Rothengatter
gbm Gesellschaft für Baugeologie- -meßtechnik-mbH Baugrundinstitut, Ettlingen

Zusammenfassung

Die EnBW Kraftwerke AG betreibt in Forbach die Wasserkraftanlage Rudolf-Fettweis-Werk. Die Gesamtanlage wird als Laufwasserkraftwerk und als Speicherkraftwerk mit Zubringerpumpe genutzt. Die EnBW beabsichtigt die Erneuerung und Erweiterung des Kraftwerks zur Gewährleistung des zukünftigen Betriebs und zur Nutzung der Potenziale im Nordschwarzwald.

Zur Feststellung der geotechnischen Eignung des Baugrundes und des Gebirges für die geplanten Erdbauwerke, Fels-hohlräume und tiefen Baugruben sowie zur Beurteilung der hydrogeologischen und hydrologischen Situation im Projektgebiet wurden in der Zeit vom November 2010 bis April 2011 der Oberbecken-Standort Seekopf und der Unterbecken-Standort Kavernenwasserspeicher durch insgesamt 20 Erkundungsbohrungen und oberflächengeophysikalische Messungen näher untersucht und eine hydrogeologische Kartierung durchgeführt. Zusätzlich wurden Bohrungen aus der Erkundungsphase 1971 zur Beurteilung der Gebirgsverhältnisse mit herangezogen.

Die Untersuchungen haben ergeben, dass die geplanten Bauwerke aus geotechnischer und hydrogeologischer Sicht grundsätzlich herstellbar sind und entsprechend den aktuellen Anforderungen und technischen Standards sicher betrieben werden können. Aufgrund der geologischen und hydrogeologischen Randbedingungen sind im Zuge der weiteren Planungen Optimierungsmöglichkeiten im Hinblick auf die wirtschaftliche Herstellung und Unterhaltung der Anlagen zu prüfen.

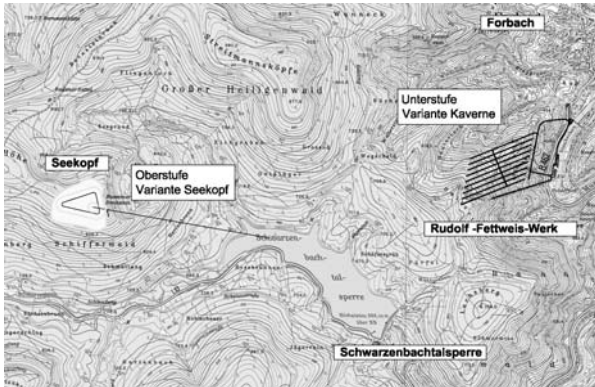
1. Beschreibung des Vorhabens

Die EnBW Kraftwerke AG betreibt in Forbach, Nord-schwarzwald, die Wasserkraftanlage Rudolf-Fettweis-Werk. Die Gesamtanlage wird als Laufwasserkraftwerk und als Speicherkraftwerk mit Zubringerpumpe genutzt.

Das Rudolf-Fettweis-Werk hat seinen Betrieb 1926 aufgenommen und stellt damit eine Pionierleistung aus den 20er Jahren des letzten Jahrhunderts dar. Die Maschinensätze und Anlagen sind in die Jahre gekommen. Im Zusammenhang mit der anstehenden Modernisierung ergeben sich für den Standort aber auch sehr gute Möglichkeiten, die Leistung zu steigern und Potenziale zu erschließen.

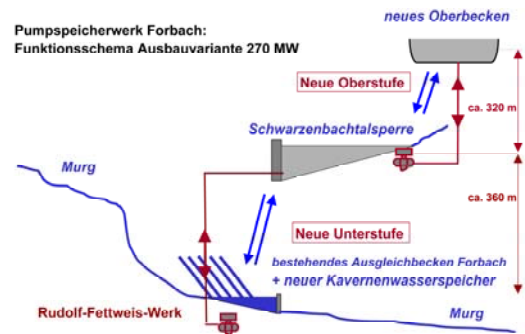
Die EnBW plant daher die Erneuerung und Erweiterung des Kraftwerkstandorts.

Bild 1: Bestehendes Rudolf-Fettweis-Werk mit Ausbauvarianten



Zum einen ist eine neue Oberstufe mit einer Leistung von 200 Megawatt (MW) mit der bestehenden Schwarzenbachtalsperre als Unterbecken vorgesehen. Das dazugehörige Oberbecken soll auf einer der umgebenden Bergkuppen der Schwarzenbachtalsperre zu liegen kommen und über einen ebenso neu zu schaffenden unterirdischen Wasserweg (Einlaufschacht, Druckrohrleitung) mit dem neuen Schachtkraftwerk an der Schwarzenbachtalsperre verbunden werden. Zum anderen ist die Erweiterung des bestehenden Schwarzenbachwerkes an der Murg durch eine neue Unterstufe geplant. Hierzu soll ein neues Schachtkraftwerk mit einer Leistung von 70 MW errichtet werden und das vorhandene Unterbecken am Rudolf-Fettweis-Werk erweitert werden. Als Oberstufe dient hierfür wie bisher die Schwarzenbachtalsperre.

Bild 2: Funktionsschema zur geplanten Erweiterung des Rudolf-Fettweis-Werks



Momentan werden für das Oberbecken der neuen Oberstufe und für die Erweiterung des Unterbeckens am Rudolf-Fettweis-Werk mehrere alternative Standorte untersucht. Ende 2011 / Anfang 2012 sollen die Raumordnungsunterlagen für die Standortfindung eingereicht werden.

Nachdem bereits in den 1970er Jahren erste geotechnische Erkundungen an verschiedenen möglichen Standorten durchgeführt wurden, fanden vom November 2010 bis April 2011 nochmals nähere Untersuchungen an zwei Standorten statt. Zum einen wurde der „Seekopf“ als Standort für das neue Oberbecken näher untersucht, zum anderen die steile westliche Talflanke des Murgtales auf Höhe des Rudolf-Fettweis-Werkes als Standort eines unterirdischen Kavernenwasserspeichers.

2. Neubau Oberstufe – Alternative Seekopf

2.1 Technische Daten

Die neue Oberstufe umfasst folgende Bauwerke:

Tab. 1: Neubau Oberstufe, Alternative „Seekopf“: mögliche Bauwerke und vorläufige technische Kenndaten

Bauwerke	Technische Kenndaten
Oberbecken (Erdbauwerk)	1,8 Mio m ³ Speichervolumen bis zu 50 m hoher Randdamm bis zu 26 m tiefe Beckensohle
Druckstollen	L = 1.600 m Rohrdurchmesser: ca. 5 m Neigung: max. 11 %
Einlauffturm und Schacht	Schachttiefe: 70 m
Schachtkraftwerk	Schachttiefe: 60 m Grundriss: 25m mal 45m

Die Höhendifferenz zwischen Ober- und Unterbecken beträgt ca. 320 m.

2.2 Geologie

Das Oberbecken kommt in den überwiegend bankigen Sandsteinen des Badischen Bausandsteins zu liegen (Mittlerer Buntsandstein). Das Schachtkraftwerk an der Schwarzenbachtalsperre liegt vollständig im Forbach-Granit. Somit durchörtert der aufzufahrende Druckstollen folgende Gesteinsschichten (vom Hangenden zum Liegenden):

Deckgebirge aus klastischen Sedimenten

- Badischer Bausandstein / Mittlerer Buntsandstein (überwiegend gebankte feste Sandsteine, zwischengeschaltet Ton-/Schluffstein-Horizonte)
- ECK-Formation / Unterer Buntsandstein (überwiegend massige mürbe geröllführende Sandsteine, untergeordnet Ton-/Schluffsteine)
- Tigersandstein-Formation / Zechstein (überwiegend Arkose-Sandsteine und Feinsandsteine)

Kristalliner Sockel

- Forbachgranit, Aplit-Gänge

3. Neubau Unterstufe – Alternative Kaverne (klein)

3.1 Technische Daten

Die neue Unterstufe umfasst folgende Bauwerke:

Tab. 2: Neubau Unterstufe, Alternative „Kavernenwasserspeicher“: mögliche Bauwerke und vorläufige technische Kenndaten

Bauwerke	Technische Kenndaten
Neue oberirdische Druckrohrleitung	L = 700 m
Schachtkrafthaus	Schachttiefe: 42 m Durchmesser: 24 m
Hauptstollen	L = 480 m A = 62 m ²
Einlauf-/Auslaufstollen	L = 430 m A = 62 m ²
9 Nebenstollen und ein Querstollen	L _{Neben} = 740 m L _{Quer} = 400 m A = 46 m ²
Zufahrtsstollen	L = 1.060 m A = 46 m ²

Die Höhendifferenz zwischen der Schwarzenbachtalsperre (Oberbecken) und dem Kavernenwasserspeicher (Unterbecken) beträgt 364 m.

Der Kavernenwasserspeicher hat im Bereich des Hauptstollens und der Nebenstollen eine Überdeckung von 80 m bis 400 m.

3.2 Geologie

Der Kavernenwasserspeicher kommt vollständig im Forbach-Granit, einem recht homogenen mittel- bis grobkörnigen Zwei-Glimmer-Granit, der mit feinkörnigen harten Aplit-Gängen durchzogen ist, zu liegen. Im Nahbereich von tektonischen Schwächezonen weist der Granit Spuren einer chemischen Verwitterung, bis hin zu starker Vergrusung auf.

Am Hangfuß, wo das Schachtkrafthaus errichtet werden soll und sich der Hangschutt mit dem Murgschotter verzahnt, lagern auf dem Granit bis zu 20 m mächtige quartäre Lockergesteine; diese bestehen im Wesentlichen aus sandig-kiesigem Granitmaterial, das mit Steinen und Blöcken durchsetzt ist.

4. Zielsetzung der Erkundungsmaßnahmen

Ziel der Baugrunduntersuchungen war es, Daten und Informationen über den Baugrund und die hydrogeologischen Verhältnisse im Bereich der geplanten Bauwerke für die technische Entwurfsplanung der Erd-, Kunst- und Untertagebauwerke in Form eines ingenurgeologischen Gutachtens bereitzustellen. Die baugeologischen und hydrogeologischen Erkundungen sollten im Wesentlichen Aufschluss geben über:

- Verbreitung, Mächtigkeit und Orientierung (Streichen und Einfällen)
- Zusammensetzung und erdgeschichtliche Entwicklung (Vorbeltung)
- Trennflächen (Schichtfugen, Klüfte, Störungen)
- Verwitterung, Entfestigung
- Primärspannungsverhältnisse
- Wasserführung und -stände, hydrochemische Eigenschaften
- Bewertung der hydrogeologischen Situation im Hinblick auf wasserwirtschaftliche und naturschutzrechtliche Belange
- baugeologische und geotechnische Eigenschaften
- Eignung als Erdbaustoffe und als Baugrund sowohl für die Erdbauwerke (Oberbecken) als auch für die Schacht- und Stollenstrecken
- Beurteilung des anfallenden Aushub- und Ausbruchmaterials im Hinblick auf seine Wiederverwendbarkeit

der betroffenen, d.h. der mit den Wasserkraftanlagen, Erd- und Kunstbauwerken bzw. mit den Untertagebauwerken in Wechselwirkung stehenden Schichteinheiten bzw. Gesteine.

Außerdem waren für erdstatische Nachweise die Kennwerte des Baugrundes, die das physikalische Verhalten der einzelnen von den Bauwerken betroffenen Schichtglieder kennzeichnen, anzugeben. Im geo-

technischen Gutachten sind daher Kennwerte für die Ermittlung der zulässigen Beanspruchung des Baugrundes und für die Ermittlung der Standsicherheit der Bauwerke unter Berücksichtigung der Wassereinflüsse zur Verfügung zu stellen.

5. Durchgeführte Untersuchungen

5.1 Baugrunderkundung

Bohrungen

Zu diesem Zweck wurden 20 Erkundungsbohrungen durchgeführt. Angesichts eines durch Minimierung der Störeinflüsse auf die Natur bedingten sehr engen Terminrahmens für die Fertigstellung der Erkundungsarbeiten und trotz extremer Witterungsbedingungen in den Wintermonaten konnten die Arbeiten dank des sehr engagierten und professionellen Einsatzes der Bohr-Arge und ihrer Nachunternehmer fristgerecht und erfolgreich abgeschlossen werden.

Die im Zuge der Erkundungsphase Nov 2010 bis März 2011 ausgeführten Aufschlüsse, einschließlich der in den Aufschlüssen ausgeführten Feldversuchen, sind in Tab. 3 aufgelistet und ihre Lage in Bild 3 dargestellt.

Tab. 3: In 2010/2011 ausgeführte Erkundungsarbeiten

Nr.	Aufschluss	Station Bauwerk	Endteufe [m]	Ausbau	Bohrloch-/ Feldversuche
1	SK BK 1	Oberbecken	19,10	-	1 ETIBS
2	SK BK 2	Oberbecken	25,00	-	1 ETIBS
3	SK BK 3	Oberbecken	40,00	-	1 ETIBS
4	SK BK 4	Schacht Druckrohrleitung	167,70	GWMst (Piezometer)	1 ABF 1 GR 3 WD 1 KPV
5	SK BK 5	Oberbecken	40,60	-	1 ETIBS 1 GR 2 KRI 1 WD
6	SK BK 6	Druckrohrleitung	105,00	GWMst	1 ETIBS 1 GR 4 FLOW 6 WD 1 KRI 1 PV
7	SK BK 7	Druckrohrleitung	70,00	GWMst	1 ABF 1 GR 4 WD 1 KPV
8	SK BK 8	Krafthaus-schacht	100,00	GWMst	1 ABF 1 GR 2 FLOW 1 TEMP/SAL 2 KRI 3 WD 1 Slug 1 KPV 1 PV
9	SK BK 9	Einlauf- / Auslaufbauwerk	50,00	-	1 ABF 1 GR 3 WD

Nr.	Aufschluss	Station Bauwerk	Endteufe [m]	Ausbau	Bohrloch-/ Feldversuche
10	KS BK 1	NS 9 Station 640 m	400	-	3 WD 1 ABF
11	KS BK 2	NS 5 Station 730 m	370	-	3 WD 3 PPV 2 FLOW 1 ETIBS 1 ABF
12	KS BK 3	NS 1 Station 680 m	300	-	3 WD 1 ETIBS 1 ABF
13	KS BK 4	NS 9 Station 380 m	320	GWMst (Piezometer)	3 WD 1 ETIBS 1 ABF
14	KS BK 5	NS 9 Station 100 m ZS Station 1010 m	160,6	GWMst (Piezometer)	2 WD 1 WD + Pulse 1 PPV 1 PV 2 FLOW 1 ETIBS 1 ABF
15	KS BK 6	NS 5 Station 6 m HS Station 665 m	140,9	-	2 WD 1 ETIBS 3 ABF
16	KS BK 7	NS 1 Station 0 m HS Station 415 m	139	-	2 WD 1 Arteser 1 ABF
17	KS BK 8	HS Station 195 m	100	-	3 WD 1 ETIBS
18	KS BK 9	ZS Station 980 m	90	GWMst (Piezometer)	1 Arteser 3 WD 1 GR 2 FLOW 1 ETIBS 1 ABF
19	KS BK 10	HS Station 15 m	30	-	1 KRI 1 WD 1 ABF
20	KS BK 11	SKW	40,6	GWMst	2 WD 1 PV 1 ABF
21	K1	ZS Station 304 m	210,36		(33 WD)
22	K2	ZS Station 285 m	200,7		(29 WD)
23	K3	ZS Station 520 m	130,51		(32 WD)
24	Z1	ZS Station 716 m	44,6		(12 WD)

Legende:

SK BK: Seekopfbohrkern (2010)
 KS BK: Kavernenspeicherbohrkern (2011)
 K1, Z1: Kerne (1971)
 NS: Nebenstollen mit Nummerierung
 HS: Hauptstollen
 ZS: südlicher Zufahrtstollen
 SKW: Schachtkraftwerk
 GWMst: Grundwassermessstelle
 ETIBS: Optischer Bohrlochscanner

Bild 3a: Erkundungen im Bereich des Seekopfes und der Schwarzenbachtalsperre

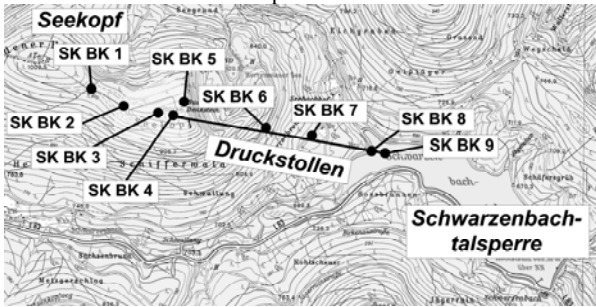
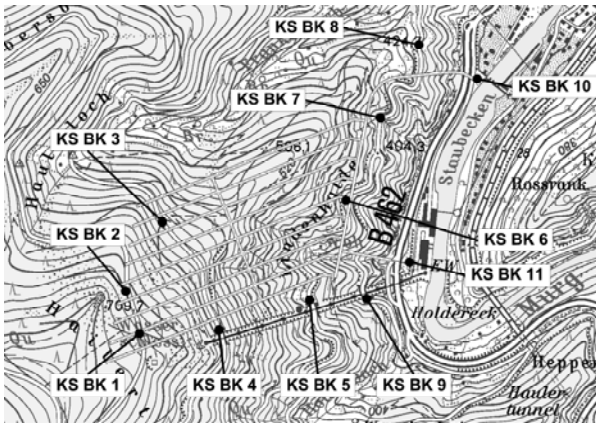


Bild 3b: Erkundungen im Bereich des Kaverenwasserspeichers



Laborversuche

Des Weiteren wurden aus den Bohrungen Boden- und Felsproben entnommen und im Labor entsprechend den einschlägigen DIN-Normen und Vorschriften untersucht. Es wurden an den Proben folgende Untersuchungen durchgeführt:

- Wassergehaltsbestimmungen
- Korngrößenbestimmungen an Lockergestein
- Bestimmung der Feucht- und Trockendichten
- Bestimmung der einaxialen Druckfestigkeit an Festgesteinen
- Bestimmung der triaxialen Scherfestigkeit an Festgesteinen
- Bestimmung der Zugfestigkeit (Brazilian Tests)
- Frost-Tauwechselversuche
- Bestimmung der Abrasivität
- Mineralogische und chemische Untersuchungen

Bohrlochversuche

Zur in situ Bestimmung von geotechnischen und hydraulischen Gebirgseigenschaften wurden in den Bohrlochern Untersuchungen durchgeführt:

- Optische und akustische Bohrlochlogs (auch Kamerabefahrungen) zur Bestimmung des

Kluftinventars, offener Klüfte, des Kluftabstands, und des Zustands des Gebirges.

- Gamma-Logs zur Untersuchung von petrographischen Unregelmäßigkeiten
- Tiefenorientierte WD-Tests, slug-Tests und Konstante-Rate-Injektionen zur Bestimmung der Durchlässigkeit des Gebirges in unterschiedlichen Teufen.
- Flowmetermessungen (FLOW) in grundwassererfüllten Gebirgsbereichen zur Bestimmung der Durchlässigkeit des Gebirges und zur Abschätzung von Bereichen mit verstärktem Grundwasserandrang.

Geophysik

Oberflächengeophysikalische Untersuchungen wurden in zwei Profilen im Bereich des Kraftausschachtes Seekopf (im Granit) und in drei Profilen im Bereich des Oberbeckens am Seekopf (im Buntsandstein) durchgeführt, um Anhaltspunkte über den Tiefgang der oberflächennahen Verwitterung und der Hangentspannung zu erhalten und mögliche Schwächezonen im Gebirgsaufbau (z.B. tektonische Störungen) zu erkennen.

Primärspannungsmessungen

Im Zuge der Erkundungsmaßnahmen wurden fünf auswertbare Primärspannungsmessungen nach der Bohrlochentspannungsmethode mittels Triaxialzellen durchgeführt. Alle Primärspannungsmessungen erfolgten im Forbach-Granit im Areal des geplanten Kavernenfeldes.

5.2 Hydrogeologische Untersuchungen

Um die unterschiedlichen Aquifertypen näher charakterisieren zu können und Aussagen zu den Gebirgsdurchlässigkeiten zu erhalten, wurden Langzeitpumpversuche in ausgebauten Messstellen durchgeführt.

Für spezielle Fragestellungen wie z.B. die Herkunft von Quellwässern erfolgten umfangreiche Quellkartierungen und hydrochemische Charakterisierungen der Wässer.

Derzeit läuft ein langzeitiges Messprogramm zur Abfluss-Charakteristik von Quellbächen im möglichen Einflussbereich der geplanten Bauwerke und zur zeitlichen Entwicklung der Gebirgswasserstände.

6. Darstellung der Ergebnisse

Die ausführlichen Ergebnisse der Untersuchungen und ihre Auswirkungen auf die Bautechnik sind in den Baugrundgutachten für die Bauwerke dargestellt. In den folgenden Kapiteln werden einige wichtige Einzelergebnisse der Untersuchungen dargestellt.

6.1 Hangzerreißung

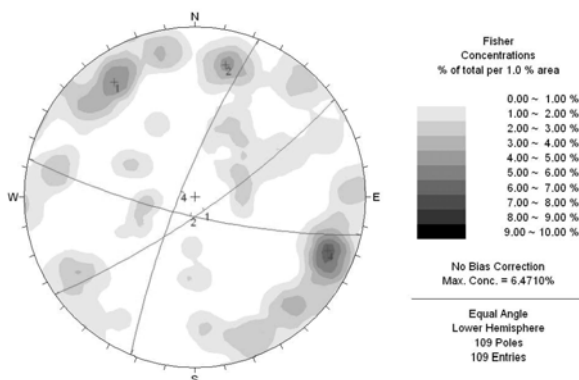
Die Auswertung der Bohrlochsondierungen auf dem Seekopf (SK BK 1 bis SK BK 5) und die Hangbohrung SK BK 6 ergaben für die Klüftung des Buntsandsteins ein ca. orthogonales, steil stehendes Kluftsystem (siehe Bild 4). Die beiden Kluftrichtungen liegen bei

- 185 bis 205/70 bis 85 und
- 110 bis 130/70 bis 85 bzw.
- 290 bis 320/70 bis 85 (Konjugierte Richtung).

In den Bohraufschlüssen des Seekopfes (SK BK 1 bis SK BK 4) wurden in Tiefen bis zu 22,5 m (SK BK 2) offene Klüfte im Badischen Bausandstein erkundet. Die Öffnung solcher Klüfte wurde auch durch Spülverluste während des Bohrvorgangs in allen Bohrungen am Seekopf belegt. Die Bohrungen im Hangbereich des Seekopfes (SK BK 4 und SK BK 6) zeigen, dass im Badischen Bausandstein solche Hangzerreißungsspalten bis in Tiefen von 20 bis 30 m nicht abgeschlossen werden können.

In der SK BK 5 (Hangkante des Seekopfes zum Herrenwieser See) wurden vertikale Klüfte bis in Tiefen größer 30 m festgestellt, die steilstehend, über mehrere Meter im Bohrkern erkundet wurden. Diese Klüfte sind mit Eisen- und Manganhydroxiden belegt und geöffnet. Sie werden als Hangzerreißungsklüfte in den übersteilten Hängen der Vogesensandsteinstufe (z.B. Karwand des Herrenwieser Sees) interpretiert

Bild 4: Statistische Häufigkeitsdarstellung der Klüftung des Badischen Bausandsteins am Seekopf



Die oberflächengeophysikalischen Untersuchungen im Bereich des Seekopfes ergaben, dass die Gebirgsauflöckerung durch Entspannung im Bereich der Verebnung bis in ca. 10 m Tiefe reicht, im Hangbereich jedoch deutlich tiefer, nämlich bis etwa 30 m, vereinzelt bis ca. 50 m unter Gelände.

6.2 Übergang Deckgebirge /Granit

Vor der Ablagerung der Perm-Sedimente bildete der Forbachgranit die Landoberfläche. Unter den ariden klimatischen Bedingungen entstand eine (paläo-) oberflächennahe Verwitterungszone, die durch die später abgelagerten Zechsteinsedimente konserviert wurde. Die Mächtigkeit der fossilen Verwitterungszone beträgt im Untersuchungsgebiet ca. 5 m bis 10 m. In der Zone des stark verwitterten Granits ist die Kornbindung gelockert, der Gebirgsverband ist entfestigt, die Klüfte sind z.T. mit Kaolinit (Verwitterungsprodukt des Granits) belegt.

Die Gesteinsfestigkeit ist gegenüber der des frischen Granits deutlich vermindert. Die Gesteinsfestigkeit des verwitterten Granits der Paläozone liegt zwischen 8 und 36 MN/m², die Festigkeit außerhalb der Paläozone zwischen 70 und 170 MN/m².

In Verbindung mit den darüber liegenden Zechstein-Sedimenten stellt der stark verwitterte Granit einen Grundwasserleiter dar, dessen Basis vom unverwitterten Granit gebildet wird.

Der Druckstollen der Oberstufe durchfährt die fossile Verwitterungszone des Granits.

6.3 Vergrusungszonen

In allen Bohrungen, die den Forbachgranit durchteufen, finden sich auch in größeren Tiefen ausgeprägte Verwitterungserscheinungen, so genannte Vergrusungen, die den Granit deutlich entfestigen. Diese Veränderung der Gesteinseigenschaften variiert zwischen leichter Vergrusung und der vollständigen Entfestigung des Granits, so dass das Gestein als Lockermaterial angesprochen werden kann (siehe Bild 5b).

Mineralogisch unterscheidet sich der vergrusste vom frischen Granit durch den geringeren Anteil von Quarz und Plagioklas und das Fehlen von Alkalifeldspat, sowie das Vorhandensein von Smektit und Kaolinit im vergrusteten Granit.

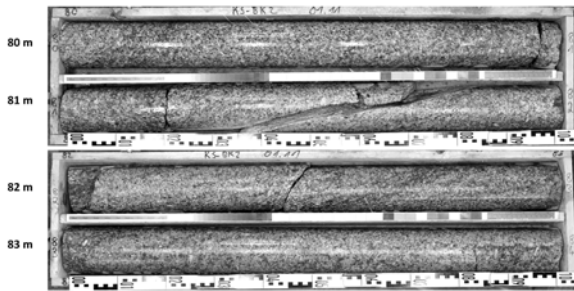
Es wird angenommen, dass die zur Vergrusung führende Verwitterung des Granits durch hydrothermale Vorgänge ausgelöst wurde. Dem entsprechend wird erwartet, dass die Vergrusungen an tektonische Strukturen des Granitgebirges orientiert sind.

Gefügeauswertungen von Trennflächen, die im näheren Umfeld (bis 0,5 m zur jeweiligen Trennfläche) von vergrusteten Bereichen eingemessen wurden, zeigen einen Trend, der im Wesentlichen der Nord-/Süd-Haupt-Kluftrichtung 240-280/35-65 und der Richtung der gemessenen Hauptspannungen entspricht (siehe Abschnitt 6.4). Der Anteil der Kernstrecken mit Vergrusungserscheinungen in den einzelnen Bohrungen, die im Bereich des geplanten Kavernenspeichers abgeteufte wurden, variiert deutlich.

Bild 5: Erscheinungsbild des Forbachgranits

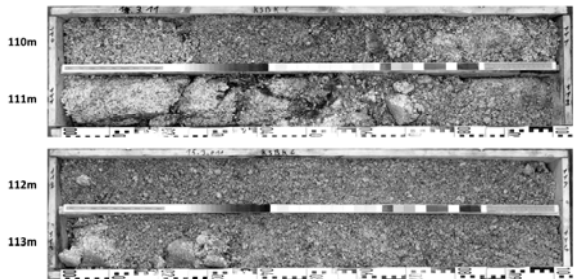
- a) frischer Granit
- b) stark vergruster Granit

Bohrung Nr.: KSBK 2 Datum / Zeitraum: 11.01. – 07.02.2011 Seite 9/37



a) frischer Granit

Bohrung Nr.: KSBK 6 Datum / Zeitraum: 03.03. – 24.03.2011 Seite 12/15



b) stark vergruster Granit

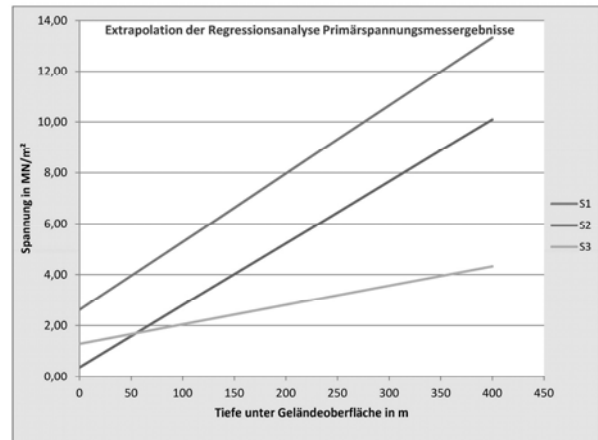
6.4 Primärspannungen

Die wesentlichen Ergebnisse der Primärspannungsmessungen im Forbachgranit sind grafisch in Bild 6 dargestellt. Die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

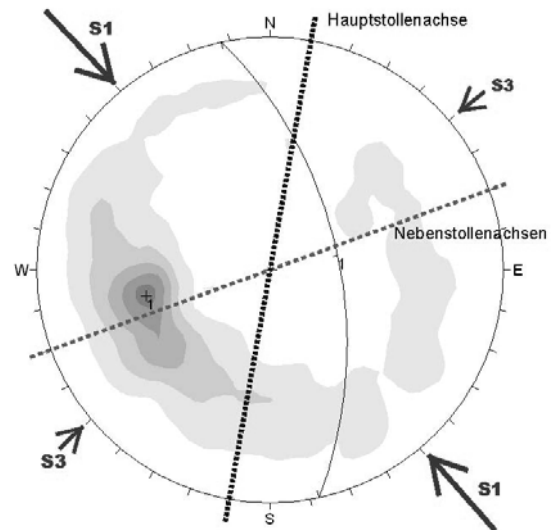
- Die größte Hauptspannung (S1) ist horizontal und NW-SE gerichtet (ca. 140°). Die Größe der Druckspannung nimmt mit zunehmender Teufe zu ($dS1/dz \approx 0,027 \text{ MN/m}^3$).
- Die mittlere Hauptspannung (S2) ist nahezu vertikal orientiert und entspricht in etwa der Gebirgsdruckspannung aus dem Eigengewicht ($dS2/dz \approx 0,024 \text{ MN/m}^3$).
- Die kleinste Hauptspannung (S3) ist nahezu horizontal (ca. 10°) und NE-SW gerichtet (ca. 50°). Die Größe der Druckspannung nimmt mit zunehmender Teufe zu, jedoch in geringerem Maße als bei den Hauptspannungen S1 und S2 ($dS3/dz \approx 0,008 \text{ MN/m}^3$).

Die vorliegenden Spannungsmessergebnisse bestätigen somit im Wesentlichen das regionale Spannungsbild. Bemerkenswert sind allerdings die vergleichsweise großen Horizontalspannungen, die dem 1,4-fachen bis 1,9-fachen des Überlagerungsdrucks entsprechen.

Bild 6: Grafische Darstellung der Ergebnisse der Primärspannungsmessungen im Forbachgranit
a) Hauptspannungsbeträge in Abhängigkeit von der Teufe
b) Hauptspannungsrichtungen und Kluftgefüge



a) Hauptspannungsbeträge in Abhängigkeit von der Teufe



b) Hauptspannungsrichtungen und Kluftgefüge im Forbachgranit

6.5 Quelltypen

Anhand der Quellkartierungen konnten die folgenden Haupttypen an Quellaustritten unterschieden werden:

- (1) Quellaustritte an Schichtgrenzen innerhalb der sedimentären Gesteinsabfolge
- (2) Quellaustritte an der Grenze sedimentäres Deckgebirge / Kristalliner Sockel (Hauptquellhorizont, sog. „Basisquellen“)
- (3) Quellaustritte am Fuß von Karwänden

Bei den Quellen (1) und (2) handelt es sich um typische Schichtquellen, bei denen das Grundwasser an einer geringer durchlässigen Schicht aufgestaut wird und im Ausstrichbereich dieser Schichtgrenze zu Tage tritt.

Der Quelltyp (3) hingegen wird im wesentlichen aus dem Deckschichtenabfluss (auch „Zwischenabfluss“ oder „interflow“, siehe Bild 7) gespeist: Das Niederschlagswasser sickert im Bereich des Kars in die mehrere Meter mächtigen Schuttdecken ein und fließt oberflächennah und hangparallel zum Karfuß hin ab.

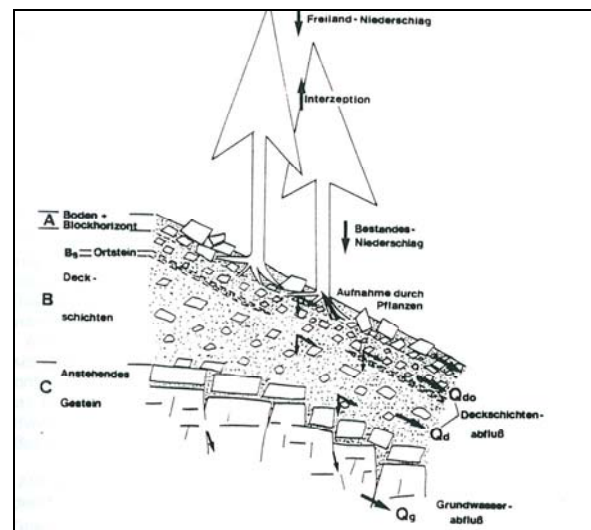
Hangschuttquellen fallen normalerweise aufgrund des geringen Retentionsvermögens der Schuttdecken nach wenigen Tagen bis Wochen trocken. Die kartierten Quellen zeigen hingegen auch bei anhaltender Trockenheit noch Restschüttungen. Daher wurde in der Literatur z.T. vermutet, dass auch eine Schüttungskomponente aus längerfristigem Grundwasserabfluss die Quellen speist (MEESENBURG und MÜLLER, 1992).

Die anhaltende Schüttung kann aber auch damit erklärt werden, dass die „Karquellen“ ein für Hangschuttquellen recht großes Einzugsgebiet haben, das von der Karform bestimmt wird (SEEGER, 1986), und dass im Nordschwarzwald über das ganze Jahr verteilt sehr viel Niederschlag fällt (hier lokal über 2.000 mm/a); länger anhaltende Trockenzeiten fehlen.

Für die Prognostizierung der Projektauswirkungen auf die Quellschüttungen und in Folge auf die davon abhängigen geschützten Biotope ist die Beantwortung der Frage, wie hoch der Grundwasseranteil an den Schuttquellen ist, von großer Bedeutung.

Das derzeit laufende langfristige Messprogramm soll diese Frage abschließend klären.

Bild 7: Schema des Abflussverhaltens im Seebachgebiet nach HINDERER und EINSELE (1992)



6.6 Hydrogeologische Gliederung am Seekopf

Quellkartierungen und Bohrergergebnisse ergaben mehrere Grundwasserkörper innerhalb der erbohrten Schichtenfolge (Bild 8).

Die Speisung dieser Grundwasservorkommen aus dem Niederschlag kann wie folgt beschrieben werden:

Das auf den Seekopf fallende Niederschlagswasser dringt zunächst sehr rasch und mehrere Dekameter tief über die zahlreich vorhandenen offenen Klüfte in den Badischen Bausandstein ein. Durchlässigkeiten zwischen 10^{-2} und 10^{-3} m/s sind möglich. Darunter nimmt die Klüftigkeit deutlich ab und es treten vermehrt Schiefer-tonlagen auf. Dies verzögert die weitere Versickerung und bewirkt einen Aufstau von Grundwasser, das aber allmählich seitlich abgeführt wird, so dass hier nur temporär mit Grundwasser zu rechnen ist.

Das tiefer versickernde Wasser wird dann am Übergang zur ECK-Formation durch wiederum sich verringere vertikale Durchlässigkeiten aufgestaut. Das aufgestaute Wasser wird zum einen Teil über Quellaustritte im Grenzbereich Bausandstein / ECK-Formation abgeführt, zum anderen überwiegenden Teil werden die tiefer liegenden „Basis-Quellen“ an der Grenze Tigersandstein-Formation / Granit gespeist.

Bild 8: Hydrogeologische Gliederung im Bereich Seekopf

Stratigraphische Einheit Erbohrte Mächtigkeiten	Wasserwegsamkeiten	Grundwasservorkommen
Badischer Bausandstein (145 m)	Überwiegend über vertikale Klüfte (große Klüfte infolge Hangzerreißung, Frostsprengung)	Stark durchlässiger bis durchlässiger Kluftgrundwasserleiter mit schwebenden Grundwasservorkommen: Innerhalb des Bausandsteins, oberhalb tonsteinreichen Horizonts – nur zeitweise wasserführend; an der Grenze sVs / suE – möglicherweise dauerhaft wasserführend
ECK-Formation (60 m)	Überwiegend Gesteinsporosität, nur untergeordnet über Klüfte	Lokal wassererfüllter Porenraum, aber insgesamt gering durchlässig
Tigersandstein-Formation (65 m)	Überwiegend über vertikale Klüfte	Durchlässiger Kluftgrundwasserleiter mit ausgebildetem Grundwasserkörper, wasserwirtschaftlich genutzt
Forbach-Granit (100 m)	Dreidimensionales Kluftnetz	Gering durchlässiger Kluftgrundwasserleiter, grundwassererfüllt

Die komplette in Bild 8 aufgeführte Schichtenfolge wird vom geplanten Druckstollen durchörtert. Eine Abdichtung des Druckstollens gegen das Gebirge und eine Wiederherstellung der hydraulischen Trennungen ist aus wasserwirtschaftlicher Sicht und zum Grundwasserschutz geplant und auch erforderlich.

7 Literatur

- HINDERER, M. & EINSELE, G. (1992): Stoffbilanzierung und langfristige Trends im Chemismus saurer, oberflächenaher Quell- und Bachabflüsse im kalkfreien, basenarmen Mittleren Buntsandstein. - Abschlussbericht PWAB-Projekt PW 89.074, Lehrstuhl für Allgemeine und Angewandte Geologie, Geologisches Institut der Universität Tübingen.
- MEESENBURG, H. & MÜLLER, H. E. (1992): Simulation des Stofftransportes im Sickerwasser, Interflow und Bachwasser basenarmer Einzugsgebiete des Nordschwarzwaldes. – Abschlussbericht, PWAB-Projekt PW 89.076, Institut für Physische Geographie der Universität Freiburg.
- SEEGER, T (1986): Geologische- und Deckschichtenkartierung, sowie Wasserbilanz und Wasserchemie in einem Teileinzugsgebiet im Buntsandsteinschwarzwald. – Diplomarbeit am Geologisch-Paläontologischen Institut der Eberhard-Karls-Universität Tübingen.