



Pumpspeicherwerk Forbach Neubau Unterstufe

Geotechnisches und hydrogeologisches Gutachten

**Rev. 02
Juli 2021**

**Gesellschaft für Baugeologie und
-meßtechnik mbH Baugrundinstitut
Pforzheimer Straße 126a
76275 Ettlingen
Tel.: 07243 / 7632-0**

**Mailänder Consult GmbH
Mathystraße 13
76133 Karlsruhe
Tel.: 0721/9 32 80-0**

Änderungsverlauf des geotechnischen und hydrogeologischen Gutachtens zum Raumordnungsverfahren, 09/2012

Mailänder Consult GmbH / gbm Gesellschaft für Baugeologie und -meßtechnik mbH: PSW Forbach - Neubau Unterstufe, Alternative 12 - Kaverne (klein) - Geotechnisches und hydrogeologisches Gutachten - Karlsruhe, 14.09.2012.

Index	Datum	Veranlassung / Art der Änderung
Rev. 01	Dezember 2018	Gutachten zur Entwurfsplanung / Planfeststellung Fortschreibung des Gutachtens mit neuen Daten aus Geländeaufnahmen und hydrogeol. Messungen sowie Anpassung an die geänderte technische Planung, November 2015
Rev. 02	September 2019	Gutachten zur Ausschreibung <i>vorab übergeben zur Ausschreibungsplanung</i> Ergänzendes Bohrprogramm 2018/2019 Einarbeitung der Ergebnisse aus dem Bohrprogramm 2018/2019 – so weit bis Mitte 2019 vorliegend
	02.11.2020	Stellungnahme zu den zusätzlichen Untersuchungen 2018/2019 Darstellung der wesentlichen neuen Ergebnisse und Erkenntnisse im Vergleich zu den im Gutachten rev.01 getroffenen Aussagen
Rev. 02	Juli 2021	Gutachten Einarbeitung der in Rev. 02 (September 2019) noch fehlenden Daten aus dem Bohrprogramm 2018/2019 sowie der hydrogeologischen Messdaten aus den neuen Messstellen von 2018/2019 Anpassung an die im Zuge der Ausschreibungsplanung geänderte technische Planung, Stand: Oktober 2020 Ergänzung Herleitung Wirkraum Grundwasser

Verzeichnisse

Inhaltsverzeichnis

1	Veranlassung	1
2	Verwendete Unterlagen	3
2.1	Verwendete Planungsunterlagen und Datengrundlagen	3
2.2	Literatur	6
3	Beschreibung des Vorhabens	14
4	Durchgeführte Erkundungen und Untersuchungen	15
4.1	Baugrunderkundung	15
4.1.1	Bohraufschlüsse 2010/2011	16
4.1.2	Bohraufschlüsse 2018/2019	16
4.1.3	Geländekartierungen 2011/2012	21
4.1.4	Laborversuche aus Bohrkernen 2018/2019	21
4.1.5	Franzosenstollen	21
4.2	Bohrlochversuche	22
4.3	Geophysik	22
4.4	Hydraulische Tests	25
4.5	Grundwasserstandsmessungen	28
4.6	Hydrologische und hydrochemische Untersuchungen	30
4.6.1	Quellkartierung	30
4.6.2	Abflussmessungen	30
4.6.3	Hydrochemische Untersuchungen	30
4.7	Umweltchemische Untersuchungen	33
4.8	Radonmessungen	34
5	Beschreibung der geologischen Verhältnisse	35
5.1	Geologischer Überblick	35
5.2	Geologische Schichtenbeschreibung	39
5.2.1	Forbach-Granit (Grundgebirge)	39
5.2.2	Lockergesteine	45
5.2.3	Oberboden	47
5.3	Lagerungsverhältnisse, Tektonik	47
5.3.1	Übersicht	47
5.3.2	Klüftung	49
5.3.3	Schwächezonen	58
5.4	Primärspannungen	61

Verzeichnisse

5.5	Erdbeben	63
5.6	Räumliche Darstellung Schwächezonen	63
6	Beschreibung der hydrogeologischen Verhältnisse	66
6.1	Hydrostratigraphie	66
6.1.1	Überblick	66
6.1.2	Forbach-Granit	66
6.1.3	Quartäre Lockergesteinsdecken	83
6.2	Quellaustritte	87
6.3	Oberflächengewässer	90
6.4	Wasserchemismus	95
6.4.1	Hydrochemische Charakterisierung des Grundwassers	95
6.4.2	Betonaggressivität des Grundwassers	98
6.4.3	Einleitung des Grundwassers in Oberflächengewässer	100
6.4.4	Eignung von Oberflächenwasser als Zugabewasser für Beton und Prüfung der Korrosionswahrscheinlichkeit	100
6.5	Wasserschutzgebiete und Wassernutzungen	100
6.6	Wasserbilanz	101
7	Hydrogeologisches Standort-Modell	102
8	Untersuchungsergebnisse der Feld- und Laborversuche	105
8.1	Oberflächengeophysikalische Untersuchungen	105
8.1.1	Zugangsstollen Murg	105
8.1.2	Zugangsstollen Schwarzenbach	105
8.1.3	Zufahrtstollen mit Portalgebäude	106
8.1.4	Auslaufbauwerk	106
8.2	Bohrlochuntersuchungen	107
8.2.1	Optische und geophysikalische Bohrlochuntersuchungen	107
8.2.2	Bohrlochaufweitungsversuche (BAVs)	107
8.3	Boden- und felsmechanische Laborversuche	108
8.3.1	Probennahme und Bohrgutansprache	108
8.3.2	Wassergehalt	110
8.3.3	Korngrößenverteilung	113
8.3.4	Dichten	115
8.3.5	Einaxiale Druckversuche	117
8.3.6	Dreiaxiale Druckversuche	118

Verzeichnisse

8.3.7	Indirekte Bestimmung der Zugfestigkeit	121
8.3.8	Verwitterungsbeständigkeit (Frostwiderstand, DIN EN 1367-1)	122
8.3.9	Abrasivität	122
8.3.10	Wasseraufnahme nach DIN EN 13755	123
8.3.11	Physikalische Eigenschaften Körnung nach DIN EN 1097	124
8.4	Mineralogie	125
8.4.1	Röntgendiffraktometrie (XRD)	125
8.4.2	Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA)	126
8.4.3	Dünnschliffanalysen	128
8.5	Wasser-Druck-Versuche (WD-Versuche)	128
9	Baugrundbeurteilung und felsmechanische Charakterisierung	130
9.1	Beschreibung und Charakterisierung der geotechnischen Gebirgseinheiten	130
9.2	Bautechnische Klassifizierung (Homogenbereiche)	131
9.3	Charakteristische Kennwerte für geotechnische Berechnungen	132
10	Grundwasserverhältnisse in Bezug auf die einzelnen Bauwerke	144
10.1	Allgemeines	144
10.2	Bauzeitlicher und permanenter Wasseranfall	144
10.3	Charakteristische Grundwasserhöhen für die Bauwerke der Kaverne Forbach	146
11	Bautechnische Empfehlungen	147
11.0	Allgemein	147
11.1	Kraftwerkskaverne	147
11.1.1	Bauwerksdaten	147
11.1.2	Geologische und hydrogeologische Situation	149
11.1.3	Gebirgsspannungen	150
11.1.4	Bauverfahren / Vortriebsverfahren	151
11.1.5	Aushubarbeiten / Vortriebsklassen / Felssicherung	152
11.1.6	Bauzeitliche Entwässerung	154
11.1.7	Ausbau der Kavernen	154
11.1.8	Bemessungswasserspiegel	155
11.2	Nebenstollen I bis VI des Kavernenspeichers	155
11.2.1	Bauwerksdaten	155
11.2.2	Geologische und hydrogeologische Situation	156
11.2.3	Gebirgsspannungen	157
11.2.4	Bauverfahren / Vortriebsverfahren	158

Verzeichnisse

11.2.5	Aushubarbeiten / Vortriebsklassen / Felssicherung	158
11.2.6	Bauzeitliche Entwässerung	160
11.2.7	Ausbau der Nebentollen	161
11.2.8	Bemessungswasserspiegel	161
11.3	Nebentollen V und VI des Kavernenspeichers	162
11.3.1	Bauwerksdaten	162
11.3.2	Geologische und hydrogeologische Situation	163
11.3.3	Gebirgsspannungen	164
11.3.4	Bauverfahren / Vortriebsverfahren	165
11.3.5	Aushubarbeiten / Vortriebsklassen / Felssicherung	165
11.3.6	Bauzeitliche Entwässerung	167
11.3.7	Ausbau der Nebentollen	167
11.3.8	Bemessungswasserspiegel	168
11.4	Hauptstollen Kavernenwasserspeicher	168
11.4.1	Bauwerksdaten	168
11.4.2	Geologische und hydrogeologische Situation	169
11.4.3	Gebirgsspannungen	171
11.4.4	Bauverfahren / Vortriebsverfahren	171
11.4.5	Aushubarbeiten / Vortriebsklassen / Felssicherung	171
11.4.6	Bauzeitliche Entwässerung	175
11.4.7	Ausbau der Stollenabschnitte	176
11.4.8	Bemessungswasserspiegel	176
11.4.9	Auslaufbauwerk	177
11.5	Zufahrtsstollen Kraftwerkskaverne (Unterstufe)	179
11.5.1	Bauwerksdaten	179
11.5.2	Geologische und hydrogeologische Situation	180
11.5.3	Gebirgsspannungen	182
11.5.4	Bauverfahren / Vortriebsverfahren	182
11.5.5	Aushubarbeiten / Vortriebsklassen / Felssicherung	182
11.5.6	Bauzeitliche Entwässerung	184
11.5.7	Ausbau des Zufahrtsstollens	184
11.5.8	Bemessungswasserspiegel	185
11.6	Oberwasserstollen Murgwerk	185
11.6.1	Bauwerksdaten	185

Verzeichnisse

11.6.2	Geologische und hydrogeologische Situation	187
11.6.3	Bauverfahren / Vortriebsverfahren	188
11.6.4	Aushubarbeiten / Vortriebsklassen / Felssicherung	189
11.6.5	Bauzeitliche Entwässerung	190
11.6.6	Ausbau des Oberwasserstollens Murgwerk	191
11.6.7	Bemessungswasserspiegel	191
11.6.8	Zufahrtsstollen und Portalbereich	192
11.7	Unterwasserstollen Murgwerk	192
11.7.1	Bauwerksdaten	192
11.7.2	Geologische und hydrogeologische Situation	193
11.7.3	Bauverfahren / Vortriebsverfahren	194
11.7.4	Aushubarbeiten / Vortriebsklassen / Felssicherung	194
11.7.5	Bauzeitliche Entwässerung	195
11.7.6	Ausbau des Unterwasserstollens Murgwerk	195
11.7.7	Bemessungswasserspiegel	195
11.8	Oberwasserstollen Schwarzenbachwerk	196
11.8.1	Bauwerksdaten	196
11.8.2	Geologische und hydrogeologische Situation	197
11.8.3	Bauverfahren / Vortriebsverfahren	199
11.8.4	Aushubarbeiten / Vortriebsklassen / Felssicherung	199
11.8.5	Bauzeitliche Entwässerung	201
11.8.6	Ausbau des Oberwasserstollens Schwarzenbachwerk	202
11.8.7	Bemessungswasserspiegel	202
11.8.8	Zufahrtsstollen und Portalbereich	202
11.9	Unterwasserstollen Schwarzenbachwerk	203
11.9.1	Bauwerksdaten	203
11.9.2	Geologische und hydrogeologische Situation	204
11.9.3	Bauverfahren / Vortriebsverfahren	205
11.9.4	Aushubarbeiten / Vortriebsklassen / Felssicherung	205
11.9.5	Bauzeitliche Entwässerung	206
11.9.6	Ausbau des Unterwasserstollens Schwarzenbachwerk	206
11.9.7	Bemessungswasserspiegel	206
11.10	Energieableitungsstollen Oberstufe/Unterstufe und Unterstufe	207
11.10.1	Bauwerksdaten	207

Verzeichnisse

11.10.2 Geologische und hydrogeologische Situation	208
11.10.3 Bauverfahren / Vortriebsverfahren	209
11.10.4 Aushubarbeiten / Vortriebsklassen / Felssicherung	210
11.10.5 Bauzeitliche Entwässerung	212
11.10.6 Ausbau der Energieableitungstollen	212
11.10.7 Bemessungswasserspiegel	213
11.11 Schutterstollen Zufahrtsstollen und Schutterstollen Nebenstollen	213
11.11.1 Bauwerksdaten	213
11.11.2 Geologische und hydrogeologische Situation	214
11.11.3 Bauverfahren / Vortriebsverfahren	215
11.11.4 Aushubarbeiten / Vortriebsklassen / Felssicherung	216
11.11.5 Bauzeitliche Entwässerung	217
11.11.6 Bemessungswasserspiegel	218
11.11.7 Anschlagswand	218
11.12 Sonstige Bauwerke	218
11.12.1 Hilfsstollen	218
11.12.2 Messstollen	221
11.12.3 Zufahrtsstollen mit Portalgebäude	224
11.13 Wiederverwendbarkeit der Aushubmassen	228
11.13.1 Quartäre Lockergesteine	228
11.13.2 Granit	228
12 Abfalltechnische Beurteilung von potentiellen Ausbruchmassen	229
13 Auswirkungen des Bauvorhabens auf die hydrogeologischen Verhältnisse	233
13.1 Wirkfaktoren	233
13.2 Herleitung Wirkraum Grundwasserabsenkung	235
13.2.1 Schwächezonen als Strukturen bevorzugter Wasserwegigkeit	235
13.2.2 Reichweitenabschätzung	235
13.3 Baubedingte Auswirkungen	236
13.3.1 Schaffung von Wasserwegigkeiten und Dränierung des Gebirges	236
13.3.2 Eintrag von Schadstoffen und Trübstoffen	239
13.4 Anlagebedingte Auswirkungen - dauerhafte Gebirgsdränage	240
13.5 Betriebsbedingte Auswirkungen	241
13.6 Bilanzierung der Gebirgsdränage	242
13.7 Auswirkungen auf das Tiefenzirkulationswasser	245

Verzeichnisse

13.8	Ableiten von Baustellenabwässern	246
14	Zusammenfassung und Empfehlungen	248
14.1	Zusammenfassung der Baugrunduntersuchungen	248
14.2	Zusammenfassung der hydrogeologisch-hydrochemischen Untersuchungen	250
14.3	Zusammenfassung der abfalltechnischen Untersuchungen	252
14.4	Zusammenfassung der wesentlichen Auswirkungen des Bauvorhabens auf die hydrogeologischen Verhältnisse	252
14.5	Empfehlungen	253
14.6	Abschließende Anmerkungen	255

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Vereinfachte Darstellung der Strahlwege seismischer Wellen im Untergrund	24
Abb. 2:	Bohrkern im unverwitterten Granit G1, w0-w1.	40
Abb. 3:	Forbach-Granit G2, w1-w2 mit Mikrorissen	40
Abb. 4:	Oberflächennahe verwitterter Granit des Gebirgstyps Granit G4 mit der Verwitterungsstufe w3 bis w4	41
Abb. 5:	Bohrkerne aus der KS BK 109, bei 112 m Teufe mit vergrustem Forbach-Granit G4, w3 bis w4.	42
Abb. 6:	Lage des Untersuchungsgebiets während der Herzynischen bzw. Variszischen Gebirgsbildung (modf. nach V.Bouchot „Crustal-scale hydrothermal palaeofield and related variscan Au, Sb, W orogenic deposits at 310-305 MA, 2000).	48
Abb. 7:	Darstellung der aufgenommenen Klüfte im Rosendiagramm nach ihrem Streichen.	50
Abb. 8:	Statistische Häufigkeitsverteilung der Polpunkte	51
Abb. 9:	Statistische Häufigkeitsverteilung der Klufffläche aus den Oberflächenaufschlüssen A 1 bis A 26.	52
Abb. 10:	Statistische Häufigkeitsverteilung der Polpunkte	53
Abb. 11:	Statistische Häufigkeitsverteilung der Polpunkte	57
Abb. 12:	Rosendiagramm der Streichrichtung der aufgefundenen Schwächezonen.	59
Abb. 13:	Ergebnisse der Primärspannungsmessungen im Bereich des Kavernenwasserspeichers	62
Abb. 14:	Halbtransparente Darstellung der Topographie im Untersuchungsgebiet mit Bohrprofilen und schematischen Bauwerksdarstellungen	64
Abb. 15:	Bauwerke und Bohrprofile mit den in Bereichen von Vergrusungszonen dargestellten Scheiben, welche gemäß der tiefenbezogen ermittelten Hauptkluftrichtungen orientiert sind	64
Abb. 16:	Darstellung möglicher Schwächezonen im Bereich der Kraftwerkskaverne	65

Verzeichnisse

Abb. 17: Gesamtdarstellung möglicher Schwächezonen im Bereich des Untersuchungsgebietes	65
Abb. 18: Grundwasserganglinie KS BK 5	77
Abb. 19: Gegenüberstellung Grundwasserspiegel KS BK 4 und Seespiegel Schwarzenbachtalsperre, 28.03.2011 bis 17.04.2011	79
Abb. 20: Gegenüberstellung Grundwasserspiegel KS KB 4 und KS BK 9, 17.05.2011 bis 06.06.2011	79
Abb. 21: Gegenüberstellung Grundwasserganglinien KS BK 4-neu, KS BK9, KS BK 5 und KS BK 104, 15.12.2018 bis 31.12.2020	81
Abb. 22: Grundwasserganglinie KS BK 11	85
Abb. 23: Vergleich Grundwasserganglinien KS BK 11 und KS BK 112	86
Abb. 24: Schema des Abflussverhaltens im nahegelegenen Seebachgebiet nach HINDERER und EINSELE (1992)	87
Abb. 25: Ausschnitt aus Lageplan Anlage 1.3 (unmaßstäblich): Bezeichnung der Quellgruppe	88
Abb. 26: Lage der Messwehre	91
Abb. 27: Gegenüberstellung Niederschläge und Abfluss am Messwehr 1 "Löschteich"	93
Abb. 28: Messreihe der Messwehrs 1 "Löschteich"	94
Abb. 29: Messreihe des Messwehrs 2 "Referenz"	94
Abb. 30: Messreihen des Messwehrs 3 "Holderbach"	95
Abb. 31: Äquivalent-Ionenkonzentrationen der Grundwasserproben	97
Abb. 32: SCHOELLER-Diagramm, Äquivalent-Ionenkonzentrationen zur hydrochemischen Charakterisierung der Grundwasserproben	97
Abb. 33: Kavernenteil Schwarzenbachwerk und Kavernenteil Transformatoren - Längsschnitt	148
Abb. 34: Kavernenteil Schwarzenbachwerk und Kavernenteil Transformatoren - Charakteristische Querschnitte	149
Abb. 35: Extrapolation der Primärspannungsmessergebnisse für den Teufenbereich des Kavernenteil Schwarzenbachwerk und Kavernenteil Transformatoren	151
Abb. 36: Maßgebendes Trennflächengefüge für das Kavernenteil Schwarzenbachwerk und Kavernenteil Transformatoren	153
Abb. 37: Kavernenwasserspeicher - Regelquerschnitt Nebenstollen	156
Abb. 38: Gefügedaten Nebenstollen I bis IV	159
Abb. 39: Kavernenwasserspeicher - Regelquerschnitt Nebenstollen	163
Abb. 40: Gefügedaten Nebenstollen V und VI	166
Abb. 41: Kavernenwasserspeicher - Regelquerschnitt Hauptstollen	169
Abb. 42: Gefügedaten Hauptstollen Süd	173

Verzeichnisse

Abb. 43: Gefügedaten Hauptstollen Nord	174
Abb. 44: Hauptstollen Kavernenwasserspeicher - Mündungsbereich (= Überlappungsbereich des linken und rechten Fotos)	178
Abb. 45: Zufahrtsstollen Regelquerschnitt und Sonderquerschnitt im Eingangsbereich	180
Abb. 46: Gefügedaten Zufahrtsstollen	183
Abb. 47: Oberwasserstollen Murgwerk - Lageplan und Längsschnitt im Bereich Wasserschloss	186
Abb. 48: Lagekugel OW Murg	190
Abb. 49: Lagekugel UWS Murg	195
Abb. 50: Oberwasserstollen Schwarzenbachwerk - Lageplan und Längsschnitt im Bereich Schacht-fuß - Kraftwerkskaverne	197
Abb. 51: Lagenkugel OWS Schwarzenbachwerk	200
Abb. 52: Gefüge UWS Schwarzenbachwerk	206
Abb. 53: Regelquerschnitte Energieableitungsstollen Oberstufe/Unterstufe und Energieableitungsstollen Unterstufe	208
Abb. 54: Gefügedaten Energieableitungsstollen Ober-/Unterstufe	211
Abb. 55: Gefügedaten Energieableitungsstollen Unterstufe	211
Abb. 56: a) Regelquerschnitt Schutterstollen und Hilfsstollen b) Portal und Eingangsbereich Schutterstollen Zufahrtsstollen	214
Abb. 57: Gefügedaten Zufahrtsstollen	217
Abb. 58: a) Eingangsbereich Messstollen/Hauptstollen Kavernenwasserspeicher b) Regelquerschnitt Messstollen	222
Abb. 59: Zufahrtsstollen mit Portalgebäude oben: Lageplan, unten: Längsschnitt	225
Abb. 60: Foto der Probe KS BK 106 5,7 m bis 6,0 m. Der Forbach-Granit (weiß) zeigt eine bis zu 1 cm mächtige Klufffüllung (rot) aus Tonmineralen (gelb/braun) und Hämatit (rot/schwarz, glitzernd).	230
Abb. 61: Übersichtslageplan Unterstufe	234
Abb. 62: Quellaustritte innerhalb des Wirkraums Grundwasserabsenkung für kf-Wert :3*E-8 m/s	237

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Wesentliche, im Unterstufenbereich, geplante bauliche Anlagen; Planungsstand: 11/2015 bzw. 10/2020	15
Tab. 2: Zusammenfassung der im Bereich der Unterstufe durchgeführten Aufschlüsse	17
Tab. 3: Übersicht über die durchgeführten geophysikalischen Untersuchungen und deren zugehörigen Bauwerke	23
Tab. 4: Parameter der durchgeführten oberflächennahe Reflexions- und Refraktionsseismik.	23

Verzeichnisse

Tab. 5: Durchgeführte hydraulische Tests mit instationären Auswerteverfahren	25
Tab. 6: WD-Tests (hydraulische Tests mit stationären Auswerteverfahren)	27
Tab. 7: Piezometer-Messstellen - Ausbaudaten	29
Tab. 8: Grundwasser-Messstellen - Ausbaudaten	29
Tab. 9: Durchgeführte hydrochemische Untersuchungen an Grund- und Oberflächenwässern an der geplanten Unterstufe	32
Tab. 10: Abfalltechnisch untersuchte Proben	33
Tab. 11: Geologische Übersicht der im Bereich der Unterstufe anstehenden Gesteine	35
Tab. 12: Übersicht über das Vorkommen des Forbach-Granits in den Aufschlussbohrungen	39
Tab. 13: Kategorisierung der scheinbaren Vergrusungsmächtigkeit	43
Tab. 14: Prozentuale Verteilung der Vergrusungszonen auf die jeweilige Kategorie	43
Tab. 15: Übersicht über die Mächtigkeiten der Lockergesteine in den Aufschlussbohrungen gemäß den Bohrprofilen (Anlage 3)	46
Tab. 16: Übersicht Aufschlüsse aufgenommener Klufdaten	49
Tab. 17: Übersicht der Hauptkluftrichtungen HKR 1 bis HKR 6, in denen die angetroffenen Klüfte klassifiziert sind	53
Tab. 18: Übersicht der prognostizierten Schwächezonen im Untersuchungsgebiet	60
Tab. 19: Ergebnisse der hydraulischen Tests im Forbach-Granit an der Unterstufe (ohne WD-Tests) im Zuge der Bohrkampagne 2010/2011	67
Tab. 20: Ergebnisse der hydraulischen Tests im Forbach-Granit an der Unterstufe (ohne WD-Tests) im Zuge der Bohrkampagne 2018/2019	68
Tab. 21: Ermittelte kf-Werte im Forbach-Granit	70
Tab. 22: Hydraulische Tests in vergrusten Abschnitten der Bohrungen	71
Tab. 23: Ergebnisse der WD-Tests im Zuge der Bohrkampagne 2010/2011	73
Tab. 24: Ergebnisse der WD-Tests im Zuge der Bohrkampagne 2018/2019	74
Tab. 25: Grundwasser-Kenndaten der Grundwassermessstellen im Forbach-Granit,	82
Tab. 26: Ergebnisse der hydraulischen Tests im Quartär	84
Tab. 27: Grundwasser-Kenndaten der Grundwassermessstellen im Quartär	86
Tab. 28: Kennzahlen der wöchentlichen Abflussmessungen, Messzeitraum: 06.09.2011 bis 20.09.2013	92
Tab. 29: Probenahme Grundwasser	96
Tab. 30: Grenzwerte bei chemischem Angriff durch natürliche Grundwasser nach DIN 4030-1:2008-06	98
Tab. 31: Analysenergebnisse und Expositionsclassen Grundwässer	99
Tab. 32: Wasserhaushaltsdaten der LUBW für Forbach	101
Tab. 33: Hydrogeologische Gliederung im Bereich der Unterstufe	104

Verzeichnisse

Tab. 34: Ergebnisse der Bohrlochaufweitungsversuche	108
Tab. 35: Statistische Auswertung der Ergebnisse von Wassergehaltsbestimmungen an Auffüllungen und quartären Lockergesteinen	110
Tab. 36: Statistische Auswertung der Ergebnisse von Wassergehaltsbestimmungen an Hangschutt und oberflächennahen Granit	111
Tab. 37: Statistische Auswertung der Ergebnisse von Wassergehaltbestimmungen an Festgesteinsproben	112
Tab. 38: Statistische Auswertung der Ergebnisse von Kornverteilungen an Auffüllungen und quartären Lockergesteinen (ungegliedert)	113
Tab. 39: Statistische Auswertung der Ergebnisse von Kornverteilungen für Hangschutt und oberflächennahen, stark verwitterten Granit	114
Tab. 40: Statistische Auswertung der Ergebnisse für Kornverteilungen von vergrusten Graniten	114
Tab. 41: Statistische Auswertung der Ergebnisse der Dichtebestimmung (Feuchtdichte) an Festgesteinsproben	115
Tab. 42: Statistische Auswertung der Ergebnisse der Dichtebestimmung (Feuchtdichte) an Auffüllungen und quartären Lockergesteinen (ungegliedert)	116
Tab. 43: Statistische Auswertung der Ergebnisse der Dichtebestimmung (Feuchtdichte) an Hangschutt	117
Tab. 44: Statistische Auswertung der Ergebnisse der einaxialen Druckversuche	117
Tab. 45: Zusammenstellung der dreiaxialen Druckversuche an Festgesteinsproben	120
Tab. 46: Statistische Auswertung der Ergebnisse der Zugfestigkeitsbestimmung an Granitproben	121
Tab. 47: Ergebnisse der Abrasivitätstests für Granit	123
Tab. 48: Quantitative mineralogische Zusammensetzung von Graniten berechnet nach Rietveld aus Röntgenbeugungsversuchen.	125
Tab. 49: Ergebnisse der Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA)	127
Tab. 50: Charakteristische Werte der quartären Ablagerungen und Auffüllungen	139
Tab. 51: Homogenbereiche der quartären Ablagerungen und Auffüllungen	143
Tab. 52: Bauwerksdaten Kavernenteil Schwarzenbachwerk und Kavernenteil Transformatoren	148
Tab. 53: Relevante Hauptkluftrichtungen mit Einfallsrichtung und -winkel (Clar) Kaverne	153
Tab. 54: Bauwerksdaten Nebestollen Kavernenspeicher	155
Tab. 55: Relevante Hauptkluftrichtungen mit Einfallsrichtung und -winkel (Clar) Nebestollen I-IV	160
Tab. 56: Bauwerksdaten Nebestollen v und VI	162
Tab. 57: Relevante Hauptkluftrichtungen mit Einfallsrichtung und -winkel (Clar) Nebestollen V/VI	167

Verzeichnisse

Tab. 58: Bauwerksdaten Hauptstollen Kavernenspeicher	168
Tab. 59: Relevante Hauptkluftrichtungen mit Einfallsrichtung und -winkel (Clar) Hauptstollen Süd	173
Tab. 60: Relevante Hauptkluftrichtungen mit Einfallsrichtung und -winkel (Clar) Hauptstollen Nord	175
Tab. 61: Bauwerksdaten Zufahrtsstollen Kraftwerkskaverne	179
Tab. 62: Relevante Hauptkluftrichtungen mit Einfallsrichtung und -winkel (Clar) Zufahrtsstollen	183
Tab. 63: Bauwerksdaten Oberwasserstollen Murgwerk	185
Tab. 64: Bauwerksdaten Unterwasserstollen Murgwerk	193
Tab. 65: Bauwerksdaten Oberwasserstollen Schwarzenbachwerk	196
Tab. 66: Bauwerksdaten Unterwasserstollen Schwarzenbachwerk	203
Tab. 67: Bauwerksdaten Energieableitungsstollen (EAbS)	207
Tab. 68: Bauwerksdaten Schutterstollen Zufahrtsstollen und Nebenstollen	213
Tab. 69: Bauwerksdaten Hilfsstollen Murgwerk und Schwarzenbachwerk	219
Tab. 70: Bauwerksdaten Messstollen	221
Tab. 71: Bauwerksdaten Zufahrtsstollen mit Portalgebäude	224
Tab. 72: Abfalltechnische Einstufung der Proben aus dem Bereich des Kavernenwasserspeichers	229
Tab. 73: Baubedingte Wirkfaktoren und mögliche Auswirkungen	233
Tab. 74: Anlagebedingte Wirkfaktoren und mögliche Auswirkungen	233
Tab. 75: Betriebsbedingte Wirkfaktoren und mögliche Auswirkungen	233
Tab. 76: Schaffung von Wasserwegigkeiten und Dränierung des Gebirges	236
Tab. 77: Baubedingte Auswirkungen auf Quellschüttungen	238
Tab. 78: Eintrag von Schadstoffen und Trübstoffen	239
Tab. 79: Anlagebedingte Auswirkungen - dauerhafte Gebirgsdränage	240
Tab. 80: Betriebsbedingte Auswirkungen	241
Tab. 81: Zusammenstellung bauzeitlicher Wasseranfall in den einzelnen Bauwerken	243
Tab. 82: Hydrogeologische Gliederung im Bereich der Unterstufe	250

Verzeichnisse

Anlagenverzeichnis

Anlage 1: Lagepläne

- Anlage 1.1: Lageplan mit Lage der Erkundungen und Störungen an der Oberfläche, M 1:2.000
- Anlage 1.2: Lageplan Wasserschutzgebiete und Quellschutzgebiete, M 1:25.000
- Anlage 1.3: Lageplan kartierte Quellen und Brunnen 2011 - 2013, M 1:20.000
- Anlage 1.4: Lageplan Detailkartierung Quellen 2018, M 1:5.000
- Anlage 1.5: Lageplan Messergebnisse der Detailkartierung Quellen (Leitfähigkeiten), M 1:5.000
- Anlage 1.6: Lageplan mit Lage der Störungsbereiche auf einem Niveau von 300 mNN, M 1:2.000
- Anlage 1.-7: Lageplan zu den berechneten Reichweiten der Gebirgsdrainage entlang der Schwächezonen (kf-Wert von $3 \cdot 10^{-8}$ m/s), M 1:8.000
- Anlage 1.-8: Lageplan zu den berechneten Reichweiten der Gebirgsdrainage entlang der Schwächezonen (kf-Wert von $5 \cdot 10^{-7}$ m/s), M 1:8.000

Anlage 2: Schnitte

- Anlage 2.1: Geotechnische Längsschnitte mit aufgeführten Aufschlüssen
- Anlage 2.1.1: Geotechnischer Längsschnitt der Kraftwerkskaverne, M 1:250
- Anlage 2.1.2: Geotechnischer Längsschnitt des Nebenstollen II, M 1:1.000
- Anlage 2.1.3: Geotechnischer Längsschnitt des Nebenstollen V mit Verlängerung, M 1:1.000
- Anlage 2.1.4: Geotechnischer Längsschnitt des Hauptstollens Kavernenwasserspeicher, M 1:1.000
- Anlage 2.1.5: Geotechnischer Längsschnitt des Zufahrtsstollens, M 1:1.000
- Anlage 2.1.6: Geotechnischer Längsschnitt des Energieableitungstollens OS, M 1:1.000
- Anlage 2.1.7: Geotechnischer Längsschnitt des Ober- und Unterwasserstollens des Murgwasserweges, Blatt 1 und Blatt 2 M 1:1.000
- Anlage 2.1.8: Geotechnischer Längsschnitt des Ober- und Unterwasserstollens des Schwarzenbachwasserweges, Blatt 1 und Blatt 2, M 1:1.000
- Anlage 2.1.9: Geotechnischer Längsschnitt des Zufahrtsstollens zum Oberwasserstollen des Murgwasserweges, M 1:1.000
- Anlage 2.1.10: Geotechnischer Längsschnitt des Zufahrtsstollens zum Oberwasserstollen des Schwarzenbachwasserweges, M 1:1.000
- Anlage 2.1.11: Geotechnischer Längsschnitt des Energieableitungstollens / US, M 1:1.000
- Anlage 2.1.12: Geotechnischer Längsschnitt des Schutterstollens, M 1:1.000
- Anlage 2.1.13: Geotechnischer Längsschnitt des Portal- und Voreinschnittbereichs des Zufahrtsstollens zum Oberwasserstollen des Murgwasserweges, M 1:100

Verzeichnisse

Anlage 2.1.14: Geotechnischer Längsschnitt des Portal- und Voreinschnittbereichs des Zufahrtsstollens zum Oberwasserstollen des Schwarzenbachwasserweges, M 1:100

Anlage 2.1.15: Geotechnischer Längsschnitt durch das Auslaufbauwerk des Hauptstollens, M 1:100

Anlage 2.1.16: Geotechnischer Längsschnitt durch das Portalbauwerk des Zufahrtsstollens, M 1:100

Anlage 2.1.17: Geotechnischer Längsschnitt durch den Portalbereich des Schutterstollens, M 1:100, M 1:50

Anlage 2.1.18: Franzosenstollen mit Darstellung der Klüfte, M 1:50

Anlage 3: Aufschlussprofile und Bohrkernfotos

Anlage 3.1: Erläuterungen zu den Aufschlussprofilen

Anlage 3.2: Aufschlussprofile, M 1:200

Anlage 3.3: Bohrkernfotos

Anlage 4: Ergebnisse der geohydraulischen Feldversuche

Anlage 4.1: Erläuterungen zu den geohydraulischen Feldversuchen

Anlage 4.2: Zusammenstellung der Auswertungsergebnisse der geohydraulischen Feldversuche

Anlage 4.3: Versuchsberichte

Anlage 4.3.1: Geohydraulische Versuche im offenen Bohrloch

Anlage 4.3.1.1: Wasser-Druck-Versuche (WD)

Anlage 4.3.1.2: Ventiltests

Anlage 4.3.1.3: Flowmeter-Messungen - entfällt

Anlage 4.3.1.4. Salinitätslogs - entfällt

Anlage 4.3.1.5: Gamma-Logs (GR) und Flowmeter-Logs (FLOW)

Anlage 4.3.2: Geohydraulische Versuche in der ausgebauten Messstelle

Anlage 5: Daten der Quellkartierungen, Wasseruntersuchungen, der Grundwassermessungen und der Messungen an Oberflächengewässern

Anlage 5.1: Quellkartierungen und Quellmessungen

Anlage 5.1.1: Liste der erfassten Quellen bis 2013– Grunddaten

Anlage 5.1.2: Liste der erfassten Quellen 2018/2019 - Grunddaten

Anlage 5.1.3: Liste der erfassten Quellen bis 2013 - Messdaten

Anlage 5.1.4: Liste der erfassten Quellen 2018/2019 - Messdaten

Verzeichnisse

Anlage 5.2 Chemische Wasseruntersuchungen / Laborberichte

Anlage 5.2.1: Grundwasseruntersuchungen 2011

Anlage 5.2.2: Wasseruntersuchungen bei Hoch-/Niedrigwasserverhältnissen 2011 / 2013

Anlage 5.2.3: Einzeluntersuchungen zur Beurteilung der Betonaggressivität und der Korrosionswahrscheinlichkeit

Anlage 5.2.4: Grundwasser-Analysen 2018

Anlage 5.3: Grundwasserstandsmessungen

Anlage 5.3.1: Grundwasserabstiche - Messdaten

Anlage 5.3.2: Piezometermessungen – Messdaten

Anlage 5.3.2.1 Piezometermessungen – Messdaten pneumatische Piezometer

Anlage 5.3.2.2 Piezometermessungen – Messdaten elektrische Piezometer (nur digital)

Anlage 5.3.3: Grundwasserganglinien und Niederschlagsverteilung

Anlage 5.4: Messungen an Oberflächengewässern

Anlage 5.4.1: Erläuterungen zur Bestimmung der Durchflussmessungen

Anlage 5.4.2: Messreihen Oberflächengewässer

Anlage 6: Geophysikalische, optische und akustische Felduntersuchungen

Anlage 6.1: Erläuterungen zu den optischen und akustischen Bohrlochuntersuchungen

Anlage 6.2: Zusammenstellung der Ergebnisse der optischen und akustischen Bohrlochuntersuchungen

Anlage 6.3: Geophysikalische, optische und akustische Logs

Anlage 6.3.1: Untersuchungsberichte geophysikalische, optische Logs

Anlage 6.3.2: Messberichte geophysikalische, optische Logs

Anlage 6.3.3: Untersuchungsberichte zu den akustischen Logs - entfällt

Anlage 6.3.4: Messberichte zu den akustischen Logs - entfällt

Anlage 6.3.5: Untersuchungsbericht zur Geophysikalischen Erkundung von Geotomographie GmbH vom 28.01.2019

Anlage 7: Geomechanische Bohrlochuntersuchungen

Anlage 7.1: Primärspannungsmessungen (2011)

Anlage 7.2: Bohrlochaufweitungsversuche

Anlage 8: Ingenieurgeologische und geomechanische Laborversuche

Anlage 8.1: Zusammenstellung der Laborversuche

Verzeichnisse

Anlage 8.2: Versuchsprotokolle KS BK 101 bis KS BK 116, KS BK 4 neu, Schurf 2018/101, Schurf 2018/102

Anlage 8.3: Laborversuchsbericht

Anhang A: Ergebnisberichte der Abrasivitäts-Untersuchungen

Anhang B: Zusammenstellung der geotechnischen Laborversuche

Anhang C: Ergebnisse der einaxialen Druckversuche ohne Dehnungsmessstreifen

Anhang D: Ergebnisse der Spaltzugversuche

Anhang E: Ergebnisse der einaxialen Druckversuche mit Dehnungsmessstreifen

- Anhang F: Prüfbericht Nr. 832/18 (Bestimmung Rohdichte, Widerstand gegen Frostbeanspruchung, Widerstand gegen Zertrümmerung und Hitzebeanspruchung und grobe organische Verunreinigungen)

Anlage 8.4: Berechnung von geotechnischen Kennwerten

Anlage 9: Mineralogische und abfalltechnische Untersuchungen

Anlage 9.1: Polarisationsmikroskopische und Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen

Anlage 9.2: Ergebnisse der abfalltechnischen Untersuchungen

Anlage 9.2.1: Übersicht über die Ergebnisse der abfalltechnischen Untersuchungen

Anlage 9.2.2: Laborberichte zu den abfalltechnischen Untersuchungen

Anlage 9.3: Röntgenographische, chemische Untersuchungen

Anlage 9.4: Radonmessungen

Anlage 10: Homogenbereiche

Anlage 10.1: Datenblätter

Anlage 11: DVD: Versuchsergebnisse 2010

Kapitel 1: Veranlassung

1 Veranlassung

Die EnBW betreibt in Forbach die Wasserkraftanlagen des Rudolf-Fettweis-Werks und beabsichtigt die Erneuerung bzw. Erweiterung des Kraftwerks zur Gewährleistung eines zukunftsfähigen Betriebs.

Zur Feststellung der geotechnischen Eignung sowie der hydrogeologischen Situation wurden in der Zeit vom November 2010 bis Frühjahr 2011 Erkundungsbohrungen an den damaligen Standorten am Seekopf (Neue Oberstufe) und westlich des Rudolf-Fettweis-Werkes (Neubau Unterstufe) durchgeführt (Bohrkampagne 2010/2011). Die Ergebnisse sind im geotechnischen und hydrogeologischen Gutachten zum Raumordnungsverfahren 2012 für die Unterstufe dargelegt [3].

In den darauffolgenden Jahren wurden die Ergebnisse aus den Erkundungsprogrammen 2010/2011 durch weitere Geländeaufnahmen und bodenmechanische sowie umweltchemische Untersuchungen ergänzt und die 2011 begonnenen hydrogeologischen Messungen fortgesetzt.

Die seit 2012 fortgeführte technische Planung führte zu neuen Lösungen und damit geänderten Bauwerken und Bauwerksgeometrien.

Mailänder Consult GmbH, Karlsruhe wurde im Jahre 2013 von der EnBW mit der Durchführung ergänzender Untersuchungen sowie der Ergänzung und Aktualisierung der geotechnischen und hydrogeologischen Gutachten auf Grundlage der aktuellen technischen Planung beauftragt. Die auf die technische Planung aus dem Jahre 2015 angepassten geotechnischen Aussagen wurden in einem geotechnischen und hydrogeologischen Gutachten zur Unterstufe [14] bzw. zur Oberstufe [21] für die Planfeststellung zusammengefasst.

Der Neubau der Unterstufe wurde zwischenzeitlich im Herbst 2020 ausgeschrieben. Da hierfür noch vertiefte Erkenntnisse erforderlich waren, fand in den Jahren 2018/2019 eine zweite Bohrkampagne statt.

Für die Betreuung der ergänzenden Erkundungsarbeiten sowie die Ergänzung und Aktualisierung des geotechnischen und hydrogeologischen Gutachtens zur Ausschreibung der Unterstufe wurde die Ingenieurgemeinschaft Mailänder Consult/gbm mit Vertrag vom 22.08.2018 von der EnBW beauftragt. Die geologisch-geotechnischen Fragestellungen bearbeitet gbm (Kapitel 5, 8, 9, 10 und 11), während Mailänder Consult die hydrogeologischen und abfalltechnischen Fragestellungen bearbeitet (Kapitel 6, 7, 12 und 13).

Der geotechnische Teil beinhaltet im Wesentlichen die für die technische Planung notwendigen geotechnischen Grundlagen einschließlich der Grundwasserverhältnisse in Bezug auf die einzelnen Bauwerke.

Der hydrogeologische Teil behandelt die für die Beurteilung der Umweltauswirkungen relevanten hydrogeologischen Aspekte.

Das folgende Gutachten umfasst somit die geologisch-geotechnischen und hydrogeologischen Aussagen zum Neubau der Unterstufe mit Kraftwerkskaverne und Kavernenwasserspeicher und basiert auf dem geotechnischen und hydrogeologischen Gutachten zur Raumordnung aus dem Jahr 2012 sowie Erkundungen und Auswertungen aus den Jahren 2018/2019.

In Fortsetzung des Gutachtens für die Entwurfsplanung (Geotechnisches und Hydrogeologisches Gutachten – Rev. 01) wird das Gutachten als Geotechnisches und hydrogeologisches Gutachten – Rev. 02 bezeichnet.

Kapitel 1: Veranlassung

Da für die fortlaufenden Planungen weitere vertiefte Erkenntnisse erforderlich waren und damit auf die frühere Empfehlung eines Sondierstollens verzichtet werden kann, fand in den Jahren 2018/2019 eine zweite Bohrkampagne für die neu konfigurierte Unterstufe statt.

Zeitliche Verzögerungen beim Bohrprogramm 2018/2019 machten es erforderlich, eine Vorabzugsversion des Gutachtens Rev. 02 mit Stand September 2019 trotz noch z.T. lückenhafter Daten an den technischen Planer für die Ausschreibungsplanung zu übergeben.

Im Herbst 2020 waren die meisten Feld- und Laborarbeiten abgeschlossen und ausgewertet. Es war jedoch absehbar, dass sich die endgültige Fertigstellung des Gutachtens noch wegen restlicher Messstellenbauten verzögern würde. Daher wurde der Erkenntniszuwachs durch das Bohrprogramm 2018/2019 gegenüber der Rev. 01 des Gutachtens in Form einer Stellungnahme zusammengestellt [28].

Mit Stand Februar 2021 sind die Daten vollständig; zudem haben sich im Zuge der Ausschreibungsplanung noch Änderungen in der technischen Planung ergeben. Die von Seiten des LGRB noch geforderte Herleitung des Wirkraums Wasser wurde ebenfalls in das Gutachten aufgenommen.

Damit liegt jetzt das Gutachten Rev. 02 (Juli 2021) vor, das den aktuellen Planungsstand wiedergibt. Teile der technischen Planung wurden seit 2015 nicht mehr verändert, so dass auf den Plänen des Gutachtens Rev. 02 dann als Planungsstand das Datum aus 2015 angegeben ist.

Das Gutachten Rev. 02 ersetzt alle vorherigen Versionen.

2 Verwendete Unterlagen

2.1 Verwendete Planungsunterlagen und Datengrundlagen

Die dem vorliegenden Gutachten zur neuen Unterstufe Forbach beiliegenden Lagepläne M 1:2.500 (Anlage 1) sowie die beiliegenden Längsschnitte (Anlage 2) entsprechen dem Planungsstand November 2015 bzw. Oktober 2020 (wenn vom Planungsstand November 2015 abweichend) des Planers Ingenieurarbeitsgemeinschaft Pumpspeicherwerk Forbach (IAF), bestehend aus Tractebel Hydroprojekt GmbH und Geoconsult ZT GmbH.

Datengrundlagen

- [1] Bohrprofile aus dem Archiv des Landesamtes für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg, Bohrkampagne „Pumpspeicherwerk Badenwerk Forbach“, 1971.
- [2] Aufzeichnungen von Wasserständen Schwarzenbachtalsperre, Wasserschloss 1 und 2 durch die EnBW, 2011 - 2013 (Auszüge).
- [3] Mailänder Consult GmbH / gbm Gesellschaft für Baugeologie und -meßtechnik mbH: PSW Forbach - Neubau Unterstufe, Alternative 12 - Kaverne (klein) - Geotechnisches und hydrogeologisches Gutachten - Karlsruhe, 14.09.2012.
- [4] GBM - Gesellschaft für Baugeologie und -meßtechnik mbH Baugrundinstitut: Pumpspeicherwerk Forbach, Neubau Unterstufe - Alternative 12 - Kaverne (klein). Kartierung geologischer Strukturen in Geländeaufschlüssen im Bereich der Kaverne (klein) - Bericht, erstellt im Auftrag der EnBW, gbm/Mailänder Geo Consult, 30.12.2012.
- [5] Deutscher Wetterdienst (DWD): Aufzeichnung der täglichen Schneehöhen an der Wetterstation ID-Nr: 1468, Freudenstadt, 1949 - 5/2014.1
- [6] Niederschläge an der Schwarzenbachtalsperre. - aufgezeichnet durch die EnBW, 01/2011 - 07/2014.
- [7] GBM - Gesellschaft für Baugeologie und -meßtechnik mbH Baugrundinstitut: Stellungnahme zur Auswertung von Trennflächen im Granitgebirge des geplanten Standorts der Maschienenkaverne der Unterstufe 50 MW, erstellt im Auftrag der EnBW, gbm, 30.01.2015.
- [8] GBM - Gesellschaft für Baugeologie und -meßtechnik mbH Baugrundinstitut: PSW Forbach/Planung, Trennflächenauswertung Kaverne UST, E-Mail Hr. Rothengatter (gbm) an Hr. Strasser (GeoConsult), 24.02.2015.

3

¹ Die Wetterstation Freudenstadt ID-Nr: 1468 befindet sich ca. 22 km südlich der Schwarzenbachtalsperre auf einer Höhe von 797 mNN. Die Aufzeichnung dieser Wetterstation wurde gewählt, da sie die dem Untersuchungsgebiet am nächsten liegende zur Verfügung stehende kontinuierliche tägliche Aufzeichnung der Schneehöhen ist. Es kann darüber hinaus angenommen werden, dass aufgrund der räumlichen Nähe und der vergleichbaren topographischen Situation die Schneehöhen im Untersuchungsgebiet den Stationswerten ähnlich sind.

Kapitel 2: Verwendete Unterlagen

- [9] GBM - Gesellschaft für Baugeologie und -meßtechnik mbH Baugrundinstitut: Stellungnahme zur Auswertung von Trennflächen im Granitgebirge des geplanten Standorts der Speicherkaverne und des Zufahrtsstollens Nord der Unterstufe 50 MW, erstellt im Auftrag der EnBW, gbm, 26.02.2015.
- [10] GBM - Gesellschaft für Baugeologie und -meßtechnik mbH Baugrundinstitut: Stellungnahme zur Auswertung von Trennflächen im Granitgebirge des geplanten Standorts des Hauptstollens und Auslaufstollens der Unterstufe 50 MW, erstellt im Auftrag der EnBW, gbm, 02.03.2015.
- [11] GBM - Gesellschaft für Baugeologie und -meßtechnik mbH Baugrundinstitut: Stellungnahme zur Auswertung von Trennflächen im Granitgebirge des geplanten Standorts des Zufahrtsstollens zur Maschienenkaverne der Unterstufe 50 MW, erstellt im Auftrag der EnBW, gbm, 02.03.2015.
- [12] GBM - Gesellschaft für Baugeologie und -meßtechnik mbH Baugrundinstitut: Stellungnahme zur Auswertung von Trennflächen im Bereich des Schwarzenbachoberwasser- und unterwasserstollens und des Murgober- und -unterwasserstollens der Unterstufe 50 MW, erstellt im Auftrag der EnBW, gbm, 04.03.2015.
- [13] GBM - Gesellschaft für Baugeologie und -meßtechnik mbH Baugrundinstitut: Stellungnahme zur Gebirgsvergrusung im Bereich der 50 MW Maschienenkraftwerks in Forbach, erstellt im Auftrag der EnBW, gbm, 11.03.2015.
- [14] Mailänder Consult GmbH / GBM – Gesellschaft für Baugeologie und-meßtechnik mbH Baugrundinstitut: PSW Forbach Neue Unterstufe, Geotechnisches und hydrogeologisches Gutachten, Rev. 1, erstellt im Auftrag der EnBW, Dezember 2018.
- [15] IAF - Ingenieurarbeitsgemeinschaft PSW Forbach: Entwurfsplanung Unterwerk: Stand November 2015.
- [16] Mailänder Consult GmbH / gbm Gesellschaft für Baugeologie und -meßtechnik mbH: PSW Forbach - Neubau Oberstufe, Alternative 08 - Seekopf- Geotechnisches und hydrogeologisches Gutachten zur Planfeststellung- Karlsruhe, 30.08.2017.
- [17] SDA engineering GmbH: Seismologisches Gutachten für das Pumpspeicherwerk Forbach im Schwarzwald - 52134 Herzogenrath, 2016.
- [18] Mailänder Consult GmbH: Stellungnahme G355 / 25.10.2012 - Pumpspeicherwasserkraftwerk Forbach - Radon und natürliche Radioaktivität im Forbach-Granit -- Karlsruhe, 25.10.2012.
- [19] Riede, Patricia: Ausbau des Pumpspeicherwerks Forbach, Bestimmung der Gebirgsdurchlässigkeit und Ermittlung des Wasserandrangs – study project am Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Fakultät für Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften, Institut für Wasser und Gewässerentwicklung (unveröffentlicht) April 2019.

Kapitel 2: Verwendete Unterlagen

- [20] Mailänder Consult GmbH / gbm – Gesellschaft für Baugeologie und –meßtechnik mbH Baugrundinstitut: Pumpspeicherkraftwerk Forbach – Neubau Oberstufe – Geotechnisches und hydrogeologisches Gutachten.- Gutachten zur Raumordnung, Karlsruhe/Ettlingen, 16.09.2011.
- [21] Mailänder Consult GmbH / gbm – Gesellschaft für Baugeologie und –meßtechnik mbH Baugrundinstitut: Pumpspeicherkraftwerk Forbach – Neubau Oberstufe – Geotechnisches und hydrogeologisches Gutachten.- Gutachten zur Planfeststellung, Karlsruhe/Ettlingen, 30.08.2017.
- [22] gbm – Gesellschaft für Baugeologie und –meßtechnik mbH Baugrundinstitut: Pumpspeicherkraftwerk Forbach – Neubau Oberstufe – Alternative Seekopf – Schürfe im Bereich Seekopf. Ettlingen, 2013.
- [23] VwV Boden – Verwaltungsvorschrift des Umweltministeriums Baden-Württemberg für die Verwertung von als Abfall eingestuftem Bodenmaterial, 2007.
- [24] Landratsamt Karlsruhe, Amt für Umwelt und Arbeitsschutz: Rundverfügung Nr. 75. Verwertung und Umlagerung von Bodenmaterial, hier: Regelungen zum Parameter Aluminium. Karlsruhe, 27.7.2017.
- [25] TrinkwV – Trinkwasserverordnung, Verordnung über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch, 2001, geändert am 2. August 2013.
- [26] Ingenieurgesellschaft Mailänder Consult GmbH / gbm – Gesellschaft für Baugeologie und –meßtechnik mbH Baugrundinstitut: Pumpspeicherkraftwerk Forbach – Neubau Unterstufe – Verwertung von Bodenaushub und Tunnelausbruch, Konzept zur Qualitätssicherung; Karlsruhe, 30.11.2018.
- [27] Regierungspräsidium Karlsruhe: EG-Wasserrahmenrichtlinie - Bericht zur Bestandsaufnahme im Bearbeitungsgebiet Oberrhein, Teilbearbeitungsgebiet 34 Murg-Alb, 30.03.2005.
- [28] Mailänder Consult GmbH / gbm – Gesellschaft für Baugeologie und –meßtechnik mbH Baugrundinstitut: Pumpspeicherkraftwerk Forbach – Neubau Unterstufe – Stellungnahme zu den zusätzlichen Untersuchungen 2018/2019 Darstellung der wesentlichen neuen Ergebnisse und Erkenntnisse im Vergleich zu den im Gutachten rev.01 getroffenen Aussagen, Karlsruhe/Ettlingen, 02.11.2020.

Kapitel 2: Verwendete Unterlagen

2.2 Literatur

- BIEHLER, D. (1995): Kluffgrundwässer im kristallinen Grundgebirge des Schwarzwaldes – Ergebnisse von Untersuchungen in Stollen.- Tübinger Geowissenschaftliche Arbeiten (TGA), Reihe C, Nr.22; Tübingen.
- STEHEN, H (2004): Geschichte des modernen Bergbaus im Schwarzwald. Books on Demand, Norderstedt.
- UMWELTMINISTERIUM BADEN-WÜRTTEMBERG (2007): Radon in Baden-Württemberg, Vorkommen – Risiko – Empfehlungen.
- APPEL, D. & HABLER, W. (2001): Quantifizierung der Wasserdurchlässigkeit von Gesteinen als Voraussetzung für die Entwicklung von Kriterien zur Grundwasserbewegung, Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte.
- ATV-DVWK, ARBEITSBLATT A 138 (2002): Planung, Bau und Betrieb von Anlagen zur Versickerung von Niederschlagswasser, ATV-DVWK Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef.
- AYDIN, A., BASU A. (2005): The Schmidt hammer in rock material characterization, Engineering Geology, 81, Seite 1-14, Elsevier.
- AYDIN, A. (2009): ISRM suggested method for determination of the Schmidt hammer rebound hardness: Revised version, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 46, Seite 627 – 634, Elsevier.
- BENDER, K. (1995): Herkunft und Entstehung der Mineral- und Thermalwässer im nördlichen Schwarzwald. - Heidelberger Geowissenschaftliche Abhandlungen, Band 85, Ruprecht-Karls-Universität, Heidelberg.
- BIENSTOCK, R. (1995): Die neuen Spritzbetone gefährden das Grundwasser beim Tunnelbau nicht.-Tunnelbau.
- BLINDE, A., HÖTZL H. (1982): Verdichtungs-, Verformungs- und Sättigungsverhalten von Schüttungen in Abhängigkeit von der geologischen Gesteinsentfestigung.- DFG-Schwerpunktprogramm „Ingenieurgeologie“, Bonn. Schlußbericht zum Projekt Bl. 116/24-5, 42 S., Abt. Erddambau und Grundbau, Institut Bodenmechanik und Felsmechanik, Universität Karlsruhe [unveröff.].
- BRAUNS, J., HÖTZL, H., KAST, K., LEMPP, CH., METZLER, F. (1985): Ingenieurgeologie aufgelockerter Granite. Verwitterung und Auflockerung - Einführung und Versuch einer Klassifikation.- In ingenieurgeologische Probleme im Grenzbereich zwischen Locker- und Festgesteinen. Hrsg. Heitfeld, K.-H., Springer-Verlag, Berlin.
- BUNDESMINISTERIUM FÜR GESUNDHEIT (2001): Verordnung zur Novellierung der Trinkwasserverordnung vom 21. Mai 2001, Verordnung über Trinkwasser und Wasser für Lebensmittelbetriebe (Trinkwasserverordnung - TrinkwV) Nr. 66 - Inkraftgetreten 01. Januar 2003.
- BUNDESAMT FÜR STRAHLENSCHUTZ (2012): Radonkarte von Deutschland.
http://www.bfs.de/de/ion/radon/radon_boden/radonkarte.html. Abgerufen. 11.9.2012
- CORNET, F. H. & VALETTE, B. (1986): In-situ Stress Determination from Hydraulic Injection Test Data. - 2. Geophys. Res., 89, S. 517 - 537.
- CENTRE D'ÉTUDES DE CHARBONAGE DE FRANCE (1986): The Cerchar Abrasiveness Index.- 8 S., 4 Taf., Verneuil.

Kapitel 2: Verwendete Unterlagen

- CHAPMAN, T.G (1956): Groundwater Flow to Trenches and Wellpoints. Inst. Engrs. Australia 28, H. 10 / 11.
- DEUTSCHE FORSCHUNGSGESELLSCHAFT (1995): Schadstoffe im Grundwasser, Band 3, Weinheim.
- DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN, Fachsektion Hydrogeologie (2010): Hydrogeologische Modelle, Bedeutung des Hydrogeologischen a priori-Wissens, SDGG, Schriftenreihe der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, Heft 70.
- DGGT (2004): Empfehlung Nr. 1: Einaxiale Druckversuche an Gesteinsproben. - Bautechnik, 56: 217 - 220; Berlin.
- DGGT (1986): Empfehlung Nr. 2: Dreiaxiale Druckversuche an Gesteinsproben.- Bautechnik, 56: 221 - 224; Berlin.
- DGGT (1987): Empfehlung Nr. 12: Mehrstufentechnik bei dreiaxialen Druckversuchen und direkten Scherversuchen.- Bautechnik, 64: 382 - 38; Berlin.
- DGGT (2006): Empfehlung des Arbeitskreises „Baugruben“ EAB - 3. Auflage, Verlag Ernst & Sohn, Berlin.
- DIN 1054: 2010-12: Baugrund - Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau. Ergänzende Regelungen zu DIN EN 1997-1.
- DIN 1055-100: 2001-03: Einwirkungen auf Tragwerke Teil 100: Grundlagen der Tragwerksplanung, Sicherheitskonzept und Bemessungsregeln. zurückgezogen ersetzt durch DIN EN 1990:2010-12, DIN EN 1990/NA:2010-12.
- DIN 4084 mit Beiblättern 1 und 2: 2009-01: Gelände- und Böschungsbruchberechnungen; Ausgabe 1981; Beiblatt 1: Ausgabe 2012-07; Vornorm DIN V 4084-100; Beiblatt 2: Ausgabe 2012-07; Vornorm DIN V 4084-100.
- DIN 4020: 2010-12: Geotechnische Untersuchungen für bautechnische Zwecke. Ergänzende Regelungen zu DIN EN 1997-2.
- DIN 4022 Teil 1: 1987-09: Baugrund und Grundwasser - Benennung und Beschreibung von Fels - Schichtenverzeichnis für Bohrungen ohne durchgehende Gewinnung von gekernten Proben im Boden und Fels. zurückgezogen ersetzt durch DIN EN ISO 140688-1:2018-05, DIN EN ISO 22475-1:2007-01.
- teilweise ersetzt durch:
- DIN EN ISO 14 689-1: 2018-05: Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Benennung und Beschreibung von Fels - Teil 1: Benennung und Beschreibung (ISO: 14689 - 1: 2003).
- DIN EN ISO 22475-1:2007-01: Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Probenahmeverfahren und Grundwassermengen – Teil 1: Technische Grundlagen der Ausführung (ISO 22475-1:2006); Deutsche Fassung EN ISO 22475-1:2006.
- DIN 4023: 2006-02: Geotechnische Erkundungen und Untersuchungen - Zeichnerische Darstellung der Ergebnisse von Bohrungen und sonstigen direkten Aufschlüssen.
- DIN 4030: 2008-06: Beurteilung betonangreifender Wässer, Böden und Gase Teil 1 und 2.
- DIN 4124: 2012-01: Baugruben und Gräben, Böschungen, Verbau, Arbeitsraumbreiten.
- DIN 4149: 2005-04: Bauten in deutschen Erdbebengebieten, Lastannahmen, Bemessung und Ausführung üblicher Hochbauten, Beuth - Verlag, Berlin. zurückgezogen, ersetzt durch DIN EN 1998-1:2010-12.

Kapitel 2: Verwendete Unterlagen

- DIN 18 300: 2016-09: VOB Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen Teil C: Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen (ATV), Erdarbeiten. Beuth Verlag GmbH, Berlin, Wien, Zürich.
- DIN 18 312: 2016-09: VOB Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen Teil C: Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen (ATV), Untertagebauarbeiten. Beuth Verlag GmbH, Berlin, Wien, Zürich.
- DIN EN 1097-6:2013: Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 6: Bestimmung der Rohdichte und der Wasseraufnahme; Ausgabe 2013.
- DIN EN 1367-1:2007: Prüfverfahren für thermische Eigenschaften und Verwitterungsbeständigkeit von Gesteinskörnungen – Teil 1: Bestimmung des Widerstands gegen Frost-Tauwechsel; Ausgabe 2007.
- DIN EN 1097-2:2010: Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 2: Verfahren zur Bestimmung des Widerstands gegen Zertrümmerung (Los-Angeles-Prüfverfahren; Ausgabe 2010.
- DIN EN 1367-5:2011: Prüfverfahren für thermische Eigenschaften und Verwitterungsbeständigkeit von Gesteinskörnungen – Teil 5: Bestimmung des Widerstands gegen Hitzebeanspruchung; Ausgabe 2011.
- DIN EN 1997-1:2014-03: Eurocode 7:Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik - Teil 1: Allgemeine Regeln; Deutsche Fassung EN 1997-1: 2004 + AC:2009 + A1:2013.
- DIN EN 1997-1 / NA:2010-12: Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik - Teil 1: Allgemeine Regeln.
- DIN EN 1997-2:2010-10: Eurocode 7:Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik - Teil 2: Erkundung und Untersuchung des Baugrunds; Deutsche Fassung EN 1997-2: 2007+ AC:2010.
- DIN EN 1997-2 / NA:2010-12: Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik - Teil 2: Erkundung und Untersuchung des Baugrunds.
- DIN EN 1998-1:2010-12, Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben – Teil 1: Grundlagen, Erdbebeneinwirkungen und Regeln für Hochbauten; Deutsche Fassung EN 1998-1:2004 + AC:2009.
- DIN 19 700-13: 2004-07: Stauanlagen - Teil 13: Staustufen. Beuth Verlag GmbH, Berlin, Wien, Zürich. zurückgezogen.
- DIN EN 13 755: 2008-08: Prüfung von Naturstein, Bestimmung der Wasseraufnahme unter atmosphärischem Druck. Deutsche Fassung EN 13577:2008.
- DIN EN 1990:2010-12: Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung; Deutsche Fassung EN 1990:2002 + A1:2005 + A1:2005/AC:2010.
- DIN EN 1990/NA:2010-12: Eurocode: Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter – Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung.
- DIN TASCHENBUCH 113/1 und 113/2 (2008-11): Erkundung und Untersuchung des Baugrundes, Beuth-Verlag, Berlin, Wien, Zürich.

Kapitel 2: Verwendete Unterlagen

- DIN TASCHENBUCH 113 (2002): Erkundung und Untersuchung des Baugrundes, Beuth-Verlag, Berlin, Wien, Zürich.
- DÖRHÖFER, G. & JOSOPAIT, V. (1980): Eine Methode zur flächendifferenzierten Ermittlung der Grundwasserneubildungsrate. Geol. Jahrbuch C27, S. 45 - 65.- Hannover.
- DVWK (1996): Merkblätter zur Wasserwirtschaft Nr. 238, Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen, Kommissionsvertrieb Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas- und Wasser mbH.- Bonn.
- EINSELE, G., HEITFELD, K.-H., LEMPP, Ch. & SCHETELIG, K. (1985): Auflockerung und Verwitterung in der Ingenieurgeologie: Übersicht, Feldansprache, Klassifikation (Verwitterungsprofile) - einleitender Beitrag -. In: HEITFELD, K.-H. (Hrsg): Ingenieurgeologische Probleme im Grenzbereich zwischen Locker- und Festgesteinen, S. 2 - 23. - Springer, Berlin, Heidelberg, New York, Tokio.
- EISBACHER, G. H. & FIELITZ, W. (2010): Karlsruhe und seine Regionen. - Sammlung geologischer Führer, Band 103, Gebrüder Borntraeger Stuttgart.
- EISSELE, K., LINK, G. (1981): Gebirgsdurchlässigkeiten im Nordschwarzwälder Buntsandstein und ihre Verminderung durch Injektionen, dargestellt am Beispiel der Nagoldtalsperre Erzgrube. Jh. geol. L.-Amt Baden-Württemberg, 22,59 - 97, Freiburg i. Br.
- FACHGRUPPE WASSERCHEMIE IN DER GESELLSCHAFT DEUTSCHER CHEMIKER UND NORMENAUSSCHUSS WASSERWESEN IM DEUTSCHEN INSTITUT FÜR NORMIERUNG e.V. (1996): Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser, Abwasser- und Schlammuntersuchung, Weinheim 1996, fortlaufende Lieferungen.
- FECKER, E. & REIK, G. (1987): Baugeologie. - Enke, Stuttgart.
- FEGER, K. - H. [INSTITUT FÜR BODENKUNDE UND WALDERNÄHRUGSLEHRE] (1986): Biochemische Untersuchungen an Gewässern im Schwarzwald unter besonderer Berücksichtigung atmogener Stoffeinträge. - Inaugural-Dissertation an der Forstwirtschaftlichen Fakultät der Albert-Ludwigs-Universität zu Freiburg im Breisgau, Freiburger Bodenkundliche Abhandlungen, Heft 17.
- FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRASSEN- UND VERKEHRSWESEN (1987): Zusätzliche Technische Vorschriften und Richtlinien für die Befestigung ländlicher Wege - ZTV - LW 87.
- GAMBLE, S. (1971): Durability - plasticity classification of shales and other argillaceous rocks. - Ph. D. Thesis, University of Illinois.
- GARTUNG, E. (1982): Punktlastversuche an Gesteinsproben; Empfehlung Nr. 5 des AK 19 - Versuchstechnik Fels - der DGGT. Bautechnik 59, S. 13 - 15. - Ernst & Sohn, Berlin.
- GBM- GESELLSCHAFT FÜR BAUGELOGIE UND -MESSTECHNIK - BAUGRUNDINSITUT (1996): Innerstädtischer Entlastungstunnel Stadt Bad Wildbad.- Baugeologische und hydrogeologische Dokumentation, Ettlingen.
- GEOLOGISCHES LANDESAMT BADEN-WÜRTTEMBERG (1994), (heute LGRB): Ergiebigkeitsuntersuchungen in Festgesteinsaquiferen, Information 6/94.
- GEOLOGISCHES LANDESAMT BADEN-WÜRTTEMBERG (1995), (heute LGRB): Symbolschlüssel Geologie (Teil 1) und Bodenkunde Baden-Württemberg; Freiburg i. Br.
- GEYER, O.F. & GWINNER, M.P. (1986): Geologie von Baden-Württemberg, 3. Aufl. - Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.

Kapitel 2: Verwendete Unterlagen

- GK 25, 7215 Baden-Baden (1985): Geologische Karte 1:25.000 von Baden-Württemberg Blatt 7215 Baden-Baden nebst Erläuterungen, Geologisches Landesamt Baden-Württemberg, Freiburg im Breisgau.
- GK 25, 7216 Gernsbach (1994): Geologische Karte 1:25.000 von Baden-Württemberg Blatt 7216 Gernsbach nebst Erläuterungen, Geologisches Landesamt Baden-Württemberg, Freiburg im Breisgau.
- GK 25, 7316 Forbach (1988): Geologische Karte 1:25.000 von Baden-Württemberg Blatt 7316, Forbach nebst Erläuterungen, Geologisches Landesamt Baden-Württemberg, Freiburg im Breisgau.
- GK 25, 7315 Bühlertal, (1926): Geologische Karte von Baden-Württemberg 1:25.000, Blatt 7315 Bühlertal, Geologisches Landesamt Baden-Württemberg, Freiburg im Breisgau.
- 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.
- HOEK, E. and BROWN, E. T (1997): Practical estimates of rock mass strength. Int. J. Rock Mech. Min.g. Sci. & Geomech. Abstr., 34 (8), 1165 - 1186.
- HÖLTING, B. (1989): Hydrogeologie. - 3. Aufl., Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart.
- HÖLTING, B. & COLDEWEY, W. G. (2009): Hydrogeologie. - 7. Aufl., Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg.
- HOLLIGER, P, PAGEL, M, PIRONON J (1989): A model for 238U radioactive daughter loss from sediment-hosted pitchblende deposits and the Late permian-early triassic depositional U-Pb age of the Müllenbach uranium ore (Baden-Württemberg, F.R.G.). Chemical Geology 80, 1. Pp.45-53.
- INTERNATIONAL ASSOCIATION OF ENGINEERING GEOLOGY, IAEG, (1979): Classification of rocks and soils for engineering geological mapping, Part I: Rock and soil material. Report of the IAEG Commission on Engineering Geological Mapping. - Bulletin IAEG 19, 364 - 371, Krefeld.
- INTERNATIONAL SOCIETY OF ROCK MECHANICS (ISRM) (1979): Suggested method for determining water content, porosity, density, absorption and related properties, and swelling and slake - durability index properties. - Int. J. Rock Mechanics and Mining & Geomech. Abstract, S. 141 - 156.
- ISRM (International Society for Rock Mechanics) (1978) Suggested Methods for the Quantitative Description of Discontinuities in Rock Masses. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 15, 319-368.
- KAST, K. (1994): Die Trinkwassersperre kleine Linzig im Schwarzwald, Baustoffe und Dammbau. Mitteilungen der Abteilung Erddammbau und Deponiebau am Institut für Boden- und Felsmechanik, Universität Karlsruhe, Erddammbau und Deponiebau, Heft 4, Karlsruhe.
- KAST, K., BLINDE A., BRAUNS J. (1985): Verdichtungs-, Verformungs- und Sättigungsverhalten von Schüttungen in Abhängigkeit von der geologischen Gesteinsfestigkeit. Aus Ingenieur-geologische Probleme im Grenzbereich zwischen Locker- und Festgesteinen in K.H. Heitfeld, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg.

Kapitel 2: Verwendete Unterlagen

- KIDERLEN, H. (1953): Zur Entstehung der Schwarzwaldthermen, neues Jb. Geol. u. Paläontol. Abh., Band 97, Stuttgart.
- KLING, M. (1993): Zeitreihenanalyse der 40-jährigen Abflussmessreihe des Seebach im Hinblick auf Veränderungen durch Waldschäden. - Diplomarbeit am Institut für Physische Geographie der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg.
- LÄNDERARBEITSGEMEINSCHAFT WASSER (LAWA) (1998): Richtlinien für Heilquellenschutzgebiete, 3. Aufl. Länderarbeitsgemeinschaft Wasser, Berlin.
- LANDESVERMESSUNGSAMT BADEN-WÜRTTEMBERG (2005): Karte der Erdbebenzonen und geologischen Untergrundklassen für Baden-Württemberg, M 1:350.000 – Stuttgart.
- LANGGUTH, H.-R. & VOIGT, R. (1980): Hydrogeologische Methoden. - Springerverlag Berlin.
- LOTZE, T. (1999): Geochemische Grundlagen zur nachhaltigen Bewirtschaftung von Gesteinen in Baden-Württemberg. Diss. Braunschweig.
- MATTHESS, G. & UBELL, K. (1983): Allgemeine Hydrogeologie Grundwasserhaushalt, Gebrüder Borntraeger, Stuttgart.
- 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.
- METZLER, F. (1985): Ermittlung des Durchlässigkeits- und Injektionsverhaltens aufgelockerter Granite. Dissertation. Karlsruhe.
- MEYNEN, E. & SCHMITHÜSEN, J. (1995): Handbuch der naturräumlichen Gliederung Deutschlands. 2. Lieferung. - Remagen.
- MINISTERIUM FÜR UMWELT UND VERKEHR BADEN-WÜRTTEMBERG (2004): Wasser- und Bodenatlas „WaBoA“ Baden-Württemberg.-2. Auflage.
- MITTEILUNGEN AUS DEM FACHGEBIET GRUNDBAU UND BODENMECHANIK 20, (1995): Beeinflussung des Grundwasserspiegels durch unterirdische Bauwerke von Frank Köne- mann, Herausgegeben von Professor Dr.-Ing. W. Richwien, Universität-Gesamthochschule Essen, Verlag Glückauf GmbH, Essen 1995.
- MÜLLER, B. et al. (1992): Regional Pattern of tectonic Stresses in Europe, J. Geophys. Res., S. 11783 - 11803.
- MÜLLER, L. (1978): Der Felsbau Bd. 3 Tunnelbau. - Enke Stuttgart.
- NIEDERMEYER, S., RAHN, W., ROTHENGATTER, P., EFFENBERGER, K (1983): Results of geotechnical investigations for tunnels in the Bunter Sandstone-formation.- Proc. Int. Symp. on Field Measurements in Geomechanics, Zürich.
- NIEDERMEYER, S., RAHN, W., REIK, G., STOLL R.-D. (1983): Geologische Gegebenheiten im Unteren und Mittleren Buntsandstein und ihre geotechnische Bedeutung für Baumaßnahmen im Fels. Felsbau, 1, 54-67.
- NORMENAUSSCHUSS BAUWESEN (NABau) IM DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG e.V. (1991): Beurteilung betonangreifender Wässer, Böden und Gase, Grundlagen und Grenzwerte, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, DIN 4030, Teil 1, Juni 1991.

Kapitel 2: Verwendete Unterlagen

- ODENWALD, B. & HEKEL, U. & THORMANN, H. (2009): Grundwasserströmung, Grundwassererhaltung. In: WITT, Karl Josef (Hrsg.): Grundbau Taschenbuch, Teil 2: Geotechnische Verfahren, 7. Auflage, Verlag Ernst & Sohn.
- PAHL, A. (1984): Empfehlung Nr. 8 des Arbeitskreises 19 - Versuchstechnik Fels - der Deutschen Gesellschaft für Erd- und Grundbau e.V., Dilatometerversuche in Felsbohrungen. In: Bautechnik 4/1984).
- PRINZ, H. (1991): Abriß der Ingenieurgeologie. - Enke, Stuttgart.
- RICHTLINIEN DES LANDES BADEN-WÜRTTEMBERG (1998): Orientierungswerte für die Bearbeitung von Altlasten und Schadensfälle in Baden-Württemberg, Stand 01.03.1998; in: GABI. 06.05.1998.
- RiStWag (2002): Richtlinien für bautechnische Maßnahmen an Straßen in Wasserschutzgebieten. - Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen Arbeitsgruppe Erd- und Grundbau, Bonn.
- ROCSCIENCE INC. (1996): Software RocLab. Toronto, Ontario.
- RÖDER, M. (1992): Ermittlung der Grundwasserneubildungsrate für Planungen im Maßstab 1:50.000, Beispiel des Landesrahmenplanes ‚Sächsische Schweiz‘. Naturschutz und Landschaftsplanung 2/92. S. 54 - 57.
- SAUER, K. (1966): Die Thermen von Baden-Baden und ihre erdgeschichtlichen Ursachen - In: So heilt Baden-Baden: Seite 9-17, Uelzen.
- SCHNEIDER, G. (1983): Beeinflussung des Grundwasserstromes durch Baumaßnahmen mit Grundwasserdurchleitungen bei gleichzeitiger Umströmungsmöglichkeit.- Die Bautechnik, 06/1983.
- SCHULTZE, E. & MUHS, H. (1967): Bodenuntersuchungen für Ingenieurbauten - 722 S., 782 Abb., 1 Taf. - Berlin (Springer).
- 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.
- SICHARDT, W. (1928): Das Fassungsvermögen von Rohrbrunnen und seine Bedeutung für die Grundwasserabsenkung, insbesondere für größere Absenktiefen.- 89 Seiten, Berlin, J.Springer.
- SMITH & CARSON (1977): Trace Metals in the Environment. - Ann Arbor Science, Ann Arbor IMI.
- SMOLTCZYK, U. (1990): Grundbau-Taschenbuch, Ernst und Sohn Verlag.
- STEHEN, H (2004): Geschichte des modernen Bergbaus im Schwarzwald. Books on Demand, Norderstedt.
- STOBER, I. (1995): Die Wasserführung des kristallinen Grundgebirges. - Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart.
- STOBER, I. (1986): Strömungsverhalten in Festgesteinsaquiferen mit Hilfe von Pump- und Injektionsversuchen. - Geol. Jb, Reihe C, Heft 42, Stuttgart.
- TL Gestein-StB 04 (2018): technische Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im Straßenbau, Ausgabe 2004, Fassung 2018.
- TÜRKE, H. (1990): Statik im Erdbau, Ernst und Sohn Verlag.

Kapitel 2: Verwendete Unterlagen

TRUNKO, L. (1984): Karlsruhe und Umgebung - Sammlung geologischer Führer, Band 78, Gebrüder Borntraeger Berlin Stuttgart.

UMWELTMINISTERIUM BADEN-WÜRTTEMBERG (2007): Radon in Baden-Württemberg, Vorkommen - Risiko - Empfehlungen.

WITTKE, W. (1984): Felsmechanik, Grundlagen für wirtschaftliches Bauen im Fels, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo.

ZTVE-StB 09 (2009): Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau, Akad. Dir. Dr.-Ing. Heyer, FGSV Verlag GmbH Köln.

3 Beschreibung des Vorhabens

Die EnBW beabsichtigt die Errichtung und den Betrieb des Pumpspeicherwerks Forbach - Neue Unterstufe auf der Gemarkung der Gemeinde Forbach im Nordschwarzwald. Hier ist geplant, die bestehenden Anlagen des Rudolf-Fettweis-Werkes umfassend zu erneuern und auf heutige Leistungsansprüche anzupassen. Hierzu trägt insbesondere der Ausbau der Energiespeicherfunktion der Gesamtanlage bei.

Im Rahmen des Vorhabens Pumpspeicherwerk Forbach - Neue Unterstufe wird das bestehende Schwarzenbachwerk durch ein vollwertiges Pumpspeicherwerk und das bestehende Murgwerk durch ein neues Wasserkraftwerk ersetzt. Sowohl das neue Schwarzenbach- als auch das neue Murgwerk werden in Kavernen-Bauweise, d. h. unterirdisch erstellt. Die neue Kraftwerkskaverne nimmt alle Anlagenbestandteile (Kavernenteil Schwarzenbachwerk, Kavernenteil Murgwerk, und Kavernenteil Transformatoren jeweils inklusive der zum Betrieb notwendigen Nebeneinrichtungen) unterirdisch auf.

Die Planung der Neuen Unterstufe basiert auf dem Grundsatz, vorhandene Anlagen weiter zu nutzen. So können sowohl die Schwarzenbachtalsperre als auch das Sammelbecken Kirschbaumwasen ohne bauliche und betriebliche Veränderungen in das neue Anlagenkonzept integriert werden. Für das neue Schwarzenbachwerk wird das bestehende Ausgleichsbecken um einen Kavernenwasserspeicher ergänzt; das so erweiterte Ausgleichsbecken dient dann als Unterbecken für das neue Pumpspeicherwerk. Zusätzlich zum Nutzvolumen des Ausgleichsbeckens werden rund 200.000 m³ Speichervolumen geschaffen. Damit ist das Pumpspeicherwerk für einen ca. 9-stündigen Pumpbetrieb ausgelegt.

Weitere wichtige Vorhabenbestandteile sind die zugehörigen Stollen, insbesondere die Unterwasser-, der Zufahrts-, der Energieableitungsstollen, sowie für die Bauarbeiten erforderliche Schut-terstollen. An den vorhandenen Wasserschlossern werden zwei neue Druckschächte angebunden, welche die vorhandenen Oberwasserstollen mit der neuen Kraftwerkskaverne verbinden. Es ist geplant, das Schwarzenbachwerk als Pumpspeicherwerk mit einer Pumpturbinenleistung von ca. 50 MW und das Murgwerk als Laufwasserkraftwerk mit einer Turbinenleistung von ca. 18 MW auszustatten.

Das neue Schwarzenbachwerk soll zukünftig als Stromspeicher im Tageszyklus dienen. Mit überschüssiger Energie, d. h. wenn die Stromproduktion den aktuellen Bedarf übersteigt, wird im Pumpbetrieb die Schwarzenbachtalsperre aus dem Ausgleichsbecken und dem Kavernenwasserspeicher befüllt und somit elektrische Energie in potentielle Energie umgewandelt. Bestehen Erzeugungsdefizite, z. B. in Spitzenlastzeiten, wird im Turbinenbetrieb die gespeicherte potentielle Energie wieder in elektrische Energie umgewandelt, die dann dem bestehenden Stromnetz zugeführt wird. Der Gesamtwirkungsgrad des Pumpspeicherwerks beträgt ca. 75 %.

Das neue Murgwerk wird weiterhin die Abflüsse der Murg zur Erzeugung erneuerbarer Energie nutzen. Durch den Neubau der Anlagen wird die Effizienz erhöht. Diese Effizienzgewinne können die aus der Umsetzung der WRRL-Maßnahmen resultierenden Erzeugungsverluste (Mindestwasserabgabe, Fischauf-/abstiegsanlagen) teilweise kompensieren.

4 Durchgeführte Erkundungen und Untersuchungen

4.1 Baugrunderkundung

Ziel des vorliegenden Baugrundgutachtens ist es vertiefte Daten und Informationen über den Baugrund und die hydrogeologischen Verhältnisse im Bereich der geplanten Bauwerke für die technische Ausschreibungsplanung der Erd-, Kunst- und Untertagebauwerke in Form eines ingenieurgeologischen Gutachtens bereitzustellen. In Erweiterung der Untersuchungen für die Raumordnung und die Entwurfsplanung wird das vorliegende Gutachten als Revisionsgutachten 02 die Baugrunderkenntnisse vertiefen. Die wesentlichen baulichen Anlagen (Planungsstand November 2015 bzw. Oktober 2020, wenn vom Planungsstand November 2015 abweichend) für das Gutachten Rev. 02 sind in Tab. 1 zusammengefasst.

**Tab. 1: Wesentliche, im Unterstufenbereich, geplante bauliche Anlagen;
Planungsstand: 11/ 2015 bzw. 10/2020**

Lfd. Nr.	Abmessungen [m]	Bauwerksbezeichnung
Hauptbauwerke		
1	62,5 x 18,75 x 112	Kraftwerkskaverne
2	340 340 340 340 340 210 210	Nebenstollen I - VI
3	946,5	Hauptstollen Kavernenwasserspeicher
4	544,7	Zufahrtstollen Unterstufe Kraftwerkskaverne
5	67,7 153,1 90,8	OW-Stollen Murg von Wasserschloss bis Schachtkopf OW-Schacht Murg OW-Stollen Murg von Schachtfuß bis Kraftwerkskaverne
6	63,03 348,1 156,0	OW-Stollen SB von Wasserschloss bis Schachtkopf OW-Schacht SB OW-Stollen SB von Schachtfuß bis Kraftwerkskaverne
7	71,4	UW-Stollen Murg
8	187,9	UW-Stollen SB
9	290,4	Energieableitungstollen OS/US
10	354,4	Energieableitungstollen Unterstufe
Sonstige Bauwerke		
11	151,5	Schutterstollen Zufahrtstollen
12	101,7	Schutterstollen Nebenstollen
13	107,0	Zugangsstollen Murg
14	113	Zugangsstollen SB
15	43,3	Hilfsstollen Murg
16	51,9	Hilfsstollen SB
17	73,8	Messstollen
18	40	Spülstollen 1 bis 4, je Stollen

Legende zu Tab. 1:

US = Unterstufe
OS = Oberstufe
OW = Oberwasser
UW = Unterwasser
SB = Schwarzenbachtalsperre

Kapitel 4: Durchgeführte Erkundungen und Untersuchungen

4.1.1 Bohraufschlüsse 2010/2011

Für die Raumordnungsuntersuchung im Jahre 2010/2011 wurden für die Unterstufe 11 Kernbohrungen (KS BK 1 bis KS BK 11) durchgeführt. Diese wurden in den Gutachten für die Raumordnungsplanungsgutachten [[3] und Entwurfsplanungsgutachten [14] ausgewertet. Da sie für das vorliegende Baugrundgutachten – Rev. 02 ebenfalls herangezogen wurden, sind sie in der Tab. 2 mit aufgelistet.

Im Zuge der Entwurfsplanung (2012 bis 2017) wurden außer Oberflächenkartierungen keine weiteren Erkundungsaufschlüsse durchgeführt.

4.1.2 Bohraufschlüsse 2018/2019

Im Zuge der Ausschreibungsphase wurden seit September 2018 weitere vertiefende Erkundungen und eine Kartierung des „Franzosenstollens“ durchgeführt. Die Ergebnisse aus den Erkundungen von 2010 sowie die Ergebnisse der neuen Erkundungen 2018 dienen als Grundlage für das Gutachten - Rev. 02 der Ausschreibung.

Die baugeologischen und hydrogeologischen Erkundungen 2018/2019 sollen im Wesentlichen die bisherigen Ergebnisse aus den Untersuchungen 2010/2011 vertiefen. Dabei soll vor allem die

- Verbreitung, Mächtigkeit und Orientierung (Streichen und Einfallen)
- Zusammensetzung und erdgeschichtliche Entwicklung (Vorbelastung)
- Trennflächen (Schichtfugen, Klüfte, Schwächezonen)
- Verwitterung, Entfestigung
- Primärspannungsverhältnisse
- Wasserführung und -stände, hydrochemische Eigenschaften
- Bewertung der hydrogeologischen Situation im Hinblick auf wasserwirtschaftliche 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 vertiefend nach DIN EN 1997 – 1 und 2 (EC 7) untersucht werden.

Dazu müssen für erdstatische Nachweise die Kennwerte des Baugrundes, die das physikalische Verhalten der einzelnen von den Bauwerken betroffenen Schichtglieder kennzeichnen, entsprechend DIN EN 1997 – 1 und 2 (EC 7) angegeben werden. Die Erkundungen müssen daher Kennwerte für die Ermittlung der zulässigen Beanspruchung des Baugrundes und für die Ermittlung der Standsicherheit des Bauwerkes unter Berücksichtigung der Wassereinflüsse liefern.

Zu diesem Zweck wurden nach den 11 Erkundungsbohrungen 2010/2011 (KS BK 1 bis KS BK 11) 15 weitere Erkundungsbohrungen (KS BK 101 bis KS BK 117) und 2 Baggerschürfe, abgestimmt auf den Planungsstand 2015, durchgeführt. Die im Zuge der Erkundungsphase September 2018

Kapitel 4: Durchgeführte Erkundungen und Untersuchungen

bis Februar 2019 ausgeführten Aufschlüsse, sowie die bereits im Jahr 2011 durchgeführten Bohrungen, einschließlich den in den Aufschlüssen ausgeführten Feldversuchen, sind in Tab. 2 aufgelistet.

Die Aufschlüsse sind nach laufender Benennung sortiert. Zu jedem Aufschluss werden folgende Angaben gemacht: Rechts- und Hochwert, Station im jeweiligen Einzelbauwerk, Lage zur Bauwerks-Achse, Ansatzhöhe GOK (mNN), Endteufe, Ausbau und Anzahl der Bohrloch-/Feldversuche.

Zusätzlich zu den Aufschlüssen aus dem Jahre 2011 und 2018/19 wurden vier Aufschlüsse aus der Erkundungsphase des Jahres 1971 herangezogen [1]. Diese Aufschlüsse sind ebenfalls in Tab. 2 aufgelistet.

Die Bohrprofile der Aufschlüsse KS BK 101 bis KS BK 117 aus dem Jahre 2018/2019 befinden sich mit den dazugehörigen Aufschlussfotos in den Anlagen 3.2 und 3.3. Die Bohrprofile aus den Jahren 2011 und früher sind in [14] und in Anlage 11 zu finden.

Tab. 2: Zusammenfassung der im Bereich der Unterstufe durchgeführten Aufschlüsse

Lfd Nr.	Jahr	Aufschluss	Rechtswert	Hochwert	Bauwerk Station [von HS]	Lage zum Bauwerk	Ansatzhöhe GOK [mNN]	Endteufe [m]	Ausbau	Bohrloch-/Feldversuche
1	2011	KS BK 1	3451561,5	5392289,1	OWS SB	100 m (nördlich)	671,3	400	-	3 WD 1 ABF
2	2011	KS BK 2	3451520,8	5392416,2	OWS SB	210 m (nördlich)	658	370	-	3 WD 3 PPV 2 FLOW 1 ETIBS 1 ABF
3	2011	KS BK 3	3451631,6	5392621,7	NS 1 Station 190 m EAS Station 760	220 m (westlich) 98 m (nördlich)	576,6	300	-	3 WD 1 ETIBS 1 ABF
4	2011	KS BK 4	3451801,36	5392300,47	KKV Station(gbm) 10 m UWS SB Station 20	25 m (nördlich) 5 m (östlich)	596,1	320	GWMst (Piezometer)	3 WD 1 ETIBS 1 ABF
5	2011	KS BK 5	3452074,54	5392389,49	ZS Station 410 m	35m (östlich) 70 m (westlich)	436,6	160,6	GWMst	2 WD 1 WD + Pulse 1 PPV 1 PV 2 FLOW 1 ETIBS 1 ABF

Kapitel 4: Durchgeführte Erkundungen und Untersuchungen

Lfd Nr.	Jahr	Aufschluss	Rechtswert	Hochwert	Bauwerk Station	Lage zum Bauwerk	Ansatzhöhe GOK	Endteufe	Ausbau	Bohrloch-/Feldversuche
6	2011	KS BK 6	3452184,4	5392687,3	NS 6 Station 155 m HS Station 620 m	45 m (nördlich) 82 m (westlich)	410,3	140,9	-	2 WD 1 ETIBS 3 ABF
7	2011	KS BK 7	3452288,3	5392935,7	HS Station 360 m	50 m (östlich) 6 m (westlich)	400,0	139	-	2 WD 1 Arteser 1 ABF
8	2011	KS BK 8	3452404,6	5393152,9	HS Station 160 m	95 m (nördlich)	384,7	100	-	3 WD 1 ETIBS
9	2011	KS BK 9	3452248,0	5392393,32	ZS Station 400 m	140 m (südlich)	362,1	90	GWMst (Piezometer)	1 Arteser 3 WD 1 GR 2 FLOW 1 ETIBS 1 ABF
10	2011	KS BK 10	3452579,9	5393052,2	HS Station 15 m	8 m (nördlich)	302,6	30	-	1 KRI 1 WD 1 ABF
11	2011	KS BK 11	3452376,0	5392502,09	ZS Station 50	93 m	314,2	40,6	GWMst	2 WD 1 PV 1 ABF
12	1971	K1	3452620,0	5391870,0	ZS Station 304 m	11 m (südlich)	480,0	210,36		(33 WD)
13	1971	K2	3452686,0	5391907,0	ZS Station 285 m	60 m (nördlich)	478,0	200,7		(29 WD)
14	1971	K3	3452515,0	5392072,0	ZS Station 520 m	67 m (nördlich)	391,0	130,51		(32 WD)
15	1971	Z1	3452340,0	53921700,0	ZS Station 716 m	22 m (nördlich)	355,5	44,6		(12 WD)
16	2018	KS BK 101 S	3452358,4	5392612,1	ZS/EAS	18,5 m (nördlich)	325,13	60,50		1 ETIBS 1 ABF 2 WD
17	2018	KS BK 102	3452215,6	5392504,9	ZS/Schutt erstollen	28,10 m (südlich)	380,22	100	GWMst (Piezometer)	1 ETIBS 1 ABF 1 Dilatometer 1 FLOW GR 2 WD 1 Pulse 1 DST 1 KPV
18	2018	KS BK 103 S	3451808,2	5392291,2	KKV	13,4 m (nördlich)	596,52	385	GWMs	1 ETIBS 1 ABF 3 Dilatometer 1 FLOW GR 3 WD 3 Pulse

Kapitel 4: Durchgeführte Erkundungen und Untersuchungen

Lfd Nr.	Jahr	Aufschluss	Rechtswert	Hochwert	Bauwerk Station	Lage zum Bauwerk	Ansatzhöhe GOK	Endteufe	Ausbau	Bohrloch-/Feldversuche
19	2018	KS BK 104	3451944,9	5392512,3	HS/UWS SB und Murg	22,95 m (südlich)	482,34	238	GWMst (Piezometer)	1 ETIBS 1 ABF 1 Dilatometer 2 FLOW GR 3 WD 2 Pulse 2 DST 1 Slug 1 Pump
20	2018	KS BK 106	3451781,2	5392185,9	ZS/OWS/SB	46 m (nördlich)	609,65	27		1 ETIBS 1 ABF 1 KRI
21	2018	KS BK 107 nicht funktionstüchtiger Ausbau	3452107,2	5392576,8	EAS/ZS	84,05 m (nördlich)	423,78 ROK 425,40	161,6		2 Dilatometer 2 WD 1 Pulse 1 PV (verworfen) 1 FLOW GR 2 ETIBS 1 ABF 1 Video
21a	2019	Ersatz: KS BK 107 -neu: Grundwasser-messstelle Piezometer	3452102,4 3452102,0	5392578,4 5392575,2			ROK 424,97 ROK 424,64	22,0 131	Zwei getrennte Messstellen: GWMst und Piezometer	1 PV
22	2018	KS BK 109	3451860,1	5392714,1	NS I - IV	17,8 m (westlich)	530,60	268		1 ETIBS 1 ABF 2 Dilatometer 1 Seitendruckversuch 2 FLOW GR 4 WD 4 Pulse 2 DST
23	2018	KS BK 111	3452391,7	5393020,1	HS	11,1 m (südlich)	391,24	136		1 ETIBS 1 ABF 4 WD 4 Pulse 1 DST
24	2018	KS BK 112	3452392,0	5392583,1	Portal ZS/EAS	12,1 m (südlich)	311,25 ROK 311,25	20,9	GWMst	1 ETIBS 1 FLOW GR 1 WD 1 DST 1 PV 1 Klarpumpen
25	2018	KS BK 113 S	3452393,1	5392595,2	Portal ZS/EAS	i.d. Achse	311,08	21,6		1 ABF

Kapitel 4: Durchgeführte Erkundungen und Untersuchungen

Lfd Nr.	Jahr	Aufschluss	Rechtswert	Hochwert	Bauwerk Station	Lage zum Bauwerk	Ansatzhöhe GOK	Endteufe	Ausbau	Bohrloch-/Feldversuche
26	2018	KS BK 114 H	3452393,1	5392595,2	Portal ZS/EAS	i.d.Achse	311,08	10,7		
27	2018	KS BK 115 S	3452545,8	5393070,1	Portal HS	4,8 m (südlich)	312,12	40		1 ETIBS 1 ABF 1 WD 1 Pulse 1 KRI 1 Slug
28	2018	KS BK 116 H	3452564,2	5393057,5	Portal HS	i.d. Achse	305,65			1 ETIBS
29	2018	KS BK 117	3452370,8	5392606,0	KKV	11,3 m (nördlich)	325,13			
30	2018	KS BK 4 neu	3451801,3	5392300,5	KKV	24,8 m (nördlich)	596,1	378		1 ABF 2 Dilatometer 3 WD 2 Pulse 1 DST 1 FLOW GR
31	2018	SCH 2018/101 1	3452067,6	5392403,7	Portal ZS/OWS Murg	i.d. Achse	434,35 – 438,89	4,0		
32	2018	SCH 2018/102 1	3451763,9	5392144,8	Portal ZS/OWS SB	i.d.Achse	607,11 – 611,11	3,00		

Legende zu Tab. 2:

NS: Nebenstollen mit Nummerierung

HS: Hauptstollen

ZS: Zufahrtstollen

KKV: Kraftwerkskaverne

OWS: Oberwasserstollen

UWS: Unterwasserstollen

SB: Schwarzenbachtalsperre

EAS: Energieableitungstollen

GWMst: Grundwassermessstelle

ETIBS: Optischer Bohrlochscanner

ABF: Akustisches Bohrlochfernsehen

GR: Gamma-Ray-Log

WD: Wasserdruckversuch zur Ermittlung hydraulischer Kennwerte

KPV: Kurzpumpversuch im offenen Bohrloch

KRI: Konstante-Raten-Injektions-Tests zur Ermittlung hydraulischer Kennwerte

FLOW: Flowmeter

PV: Pumpversuch in der ausgebauten Messstelle

TEMP: Temperatur-Log

SAL: Salinitäts-Log

Slug: Slug-Test zur Ermittlung hydraulischer Kennwerte

Kapitel 4: Durchgeführte Erkundungen und Untersuchungen

4.1.3 Geländekartierungen 2011/2012

Nach der Bohrerkundung Anfang 2011 wurde im Jahr 2012 eine Geländekartierung (Oberflächenkartierung) im Bereich der damals geplanten Bauwerke durchgeführt, um tektonische Strukturen (Schwächezonen/Klüfte) an der Geländeoberfläche zu ermitteln. Die Auswertung dieser Ergebnisse wurde in einem separaten Kartierbericht (siehe [4]) zusammengefasst. Die Ergebnisse der Kartierung sind im Lageplan (siehe Anlage 1.1) dargestellt. Die Klufftauswertungen wurden in die Kapitel 5.3 eingearbeitet.

4.1.4 Laborversuche aus Bohrkernen 2018/2019

Des Weiteren wurden aus den Bohrungen Boden- und Felsproben entnommen und im Labor entsprechend den einschlägigen 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-Tauwechsellversuche
- Bestimmung der Abrasivität
- Mineralogische Untersuchungen

Die Ergebnisse der boden- und felsmechanischen Laboruntersuchungen sind in der Anlage 8 zusammengestellt (einschließlich Abrasivität). Eine Bewertung der Ergebnisse findet in Kapitel 8 statt. Die entsprechenden bautechnischen Empfehlungen aus den Versuchsergebnissen für die einzelnen Bauwerke werden in Kapitel 11 zusammengefasst.

Die Ergebnisse der mineralogischen Gesteinsuntersuchungen des Grundgebirges (XRD und RFA) sind in Anlage 9.1 zusammengestellt. Die Untersuchungsergebnisse der mineralogischen Untersuchungen der vergrusteten Granitgesteine sind in der Anlage 9.3 zusammengestellt. Die Interpretation der mineralogischen Untersuchungen erfolgt in Kapitel 8.4.

4.1.5 Franzosenstollen

Am südlichen Ortsausgang von Forbach befindet sich auf etwa 310 mNN der sogenannte Franzosenstollen. Das ca. 95 m lange Stollensystem besteht aus einem Ein- und einem Ausgang in etwa 80 m Entfernung. Der Stollen verläuft spitzwinklig zur B462 und besteht aus je zwei Eingangsbereichen, die den NW-SE verlaufenden Hauptstollen miteinander verbinden. Der Franzosenstollen wurde bereits im Zuge der Geländekartierung 2011/2012 begutachtet. Die damals erarbeiteten Ergebnisse sind in [4], Kapitel 5.26 dargestellt.

Anlässlich der Erkundung 2018 wurde der Stollen im Rahmen jüngerer Fragestellungen erneut untersucht. Dabei wurde insbesondere versucht die räumliche Anordnung der einzelnen Kluffsysteme in Bezug auf Kluffabstände und Ausbisslängen zu erfassen. Zu diesem Zweck wurden die Verschneidungslinien der Kluffflächen mit Stollenfirse und –ulmen aufgenommen und schematisch in Anlage 2.1.18 dargestellt. Des Weiteren wurden die Trennflächeneigenschaften der einzelnen

Kapitel 4: Durchgeführte Erkundungen und Untersuchungen

Klüfte wie z. B. Rauigkeit und Bestege sowie eventuell vorhandene Wasserzutritte kartiert. Ebenso wurden die Gefügewerte in Form von Clar-Werten ermittelt, dokumentiert und ausgewertet.

4.2 Bohrlochversuche

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

- Optische und akustische Bohrlochlogs (auch Kamerabefahrungen) zur Bestimmung des Kluffinventars, offenen Klüften, Kluffabstand, Zustand des Gebirges.
- Bohrlöchaufweitungsversuche (BAV) zur Bestimmung der Verformungsmoduli durch den hervorgerufenen Spannungs-Verformungs-Zustand im Gebirge.
- 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.

Die Ergebnisse der akustischen und optischen Bohrlochlogs sind in Anlage 6.1 bis Anlage 6.3 zusammengestellt. Die Ergebnisse werden in Kapitel 8.2.1 interpretiert.

Die Messergebnisse der Gamma-Logs sind in Anlage 4.3 zusammengestellt. Die Ergebnisse wurden in die geologische Interpretation in Kapitel 8.2.1 übernommen.

Die Messergebnisse der WD-Tests, der Flowmetermessungen und der Sal-Logs sind in der Anlage 4.3 zusammengestellt. Die Interpretation der Ergebnisse wird in Kapitel 8.5 und Kapitel 6.1 vorgenommen.

4.3 Geophysik

Im Rahmen des Erkundungsprogramms 2018/2019 wurden zur Erkundung der Baugrundverhältnisse in den Portalbereichen der Zugangsstollen, des Schutterstollen mit Portal, des Auslauf- und des Zufahrtsstollen mit Portalgebäude oberflächengeophysikalische Untersuchungen durch die Fa. Geotomographie GmbH ausgeführt.

Im Dezember 2018 wurden im Portalbereich der Bauwerke Zugangsstollen Murg und Schwarzenbach, sowie den Zufahrtsstollen mit Portalgebäude und dem Auslaufbauwerk sieben oberflächennahe Reflexions- und Refraktionsseismikprofile aufgenommen (siehe Tab. 3) die Lage der Profile ist der Anlage 1.1 zu entnehmen.

Kapitel 4: Durchgeführte Erkundungen und Untersuchungen

Tab. 3: Übersicht über die durchgeführten geophysikalischen Untersuchungen und deren zugehörigen Bauwerke

Bauwerk (Portalbereich)	Geophysikalische Untersuchung	Bezeichnung	Länge [m]
Zugangsstollen Murg	Oberflächennahe Reflexions- und Refraktionsseismik	GP 2018/101	142
Zugangsstollen Schwarzenbach	Oberflächennahe Reflexions- und Refraktionsseismik	GP 2018/102	166
Zufahrtsstollen mit Portalgebäude	Oberflächennahe Reflexions- und Refraktionsseismik	GP 2018/103/1	190
		GP 2018/103/2	190
		GP 2018/103/3	142
Auslaufbauwerk	Oberflächennahe Reflexions- und Refraktionsseismik	GP 2018/104/1	190
		GP 2018/104/2	190

Tab. 4: Parameter der durchgeführten oberflächennahe Reflexions- und Refraktionsseismik.

Parameter	Anwendung
Auslage (Messpunktanordnung)	Längsprofil
Energiequelle	Hammerschlag (8 kg)
Eigenfrequenz Geophon	4,5 Hz
Geophonabstand	2 m
Schußpunktabstand	4 m
Stapelung (Processing)	4-fach

Die Messapparatur (siehe Tab. 4) wurde gemäß dem Erkundungsziel der oberflächennahen Erkundung (bis 50 m Tiefe) gewählt. Als Energiequelle diente ein 8 kg schwerer Vorschlaghammer, der im wiederholenden Abstand von 4 m seismische Wellen in den Untergrund abstrahlte (siehe Abb. 1). Die Aufnahme der seismischen Wellen erfolgte durch Geophone, deren Abstand 2 m zueinander betrug. Zur Verbesserung der Datenqualität wurden die seismischen Messungen im Datenprocessing 4-fach gestapelt.

Kapitel 4: Durchgeführte Erkundungen und Untersuchungen

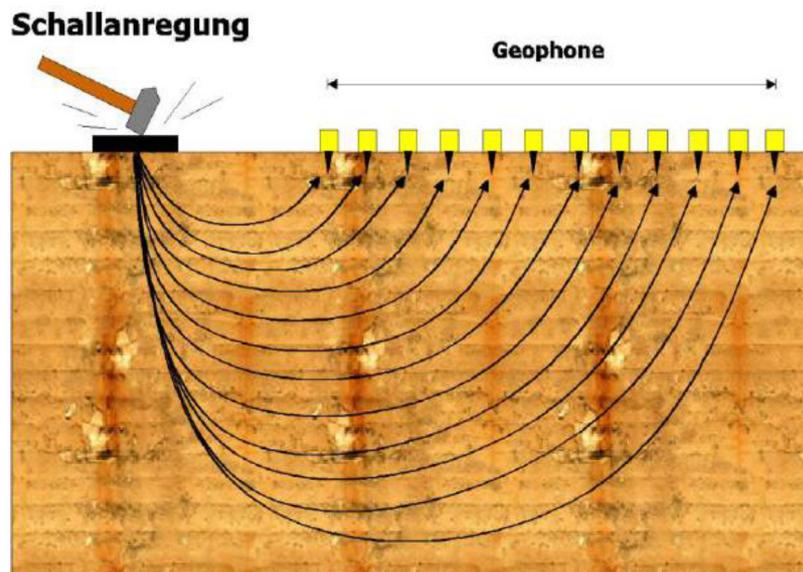


Abb. 1: Vereinfachte Darstellung der Strahlwege seismischer Wellen im Untergrund
(Quelle: Geotomographie GmbH)

Mit einer anzunehmenden Frequenz von 50 Hz und einer Wellengeschwindigkeit von größenordnungsmäßig ca. 500 m/s im Locker- bzw. ca. 4.000 m/s im Festgestein besitzen die angeregten seismischen Wellen eine Auflösung von etwa 2 m bis 3 m im Lockergestein und etwa 20 m im Festgestein.

Zur Aufnahme von geophysikalischen Profilen ist eine gradlinige Anordnung optimal. Aufgrund der topographischen und biologischen Bedingungen im Bereich des Voreinschnitts des Zufahrtsstollen war keine exakte gradlinige Profillauslegung möglich. Die ausgeführte Profillauslegung (siehe Anlage 1.1) ist jedoch als hinreichend genau einzuschätzen.

Die Datenqualität der aufgenommenen Profile variiert je nach Stärke der Ankopplung der Energiequelle und der Geophone an den Untergrund, sowie der Stärke auftretender Störquellen (u. a. Wind, Regen, Schnee, Verkehrslärm, Turbinen- oder Bohrergeräusche).

So zeigte sich im Bereich der Profillauslagen entlang der Verkehrswege (GP 2018/103/1 bis GP 2018/103/3, GP 2018/104/1 und GP 2018/104/2) eine gute Datenqualität, bei der die Ankopplung u. a. über die Asphaltdecke in den Untergrund als sehr gut einzuschätzen ist. Die auftretenden Störquellen des Straßenverkehrs und der Turbinenvibration wurden durch eine Energieanregung während Verkehrspausen reduziert bzw. durch Filter bei der Datenprozessierung eliminiert.

Im Bereich der Zugangsstollen Murg und Zugangsstollen Schwarzenbach konnte hingegen nur eine mittlere bis mäßige Datenqualität erzielt werden. Zwar waren die mögliche Störquellen u. a. fallender Schnee bzw. Regen und windinduzierter Bewegung der Bäume sehr gering, jedoch war die Ankopplung an den Untergrund (quartärer Hangschutt in Blockgröße und mit Nadeln gefüllte Mulden) relativ schlecht.

Schlussfolgernd besitzen die Ergebnisse der oberflächennahen Reflexions- und Refraktionsseismik, trotz relativ schlechter Ankopplung im Bereich abseits der Verkehrswege, eine ausreichende Datenqualität um zielführende Aussagen über die baugrundtechnische Situation im Untersuchungsgebiet zu erlangen.

Kapitel 4: Durchgeführte Erkundungen und Untersuchungen

4.4 Hydraulische Tests

Um Aussagen zur Gebirgsdurchlässigkeit im weiteren Umfeld der Bohrungen zu erhalten, wurden neben den in Kapitel 4.2 bereits erwähnten Ventiltests Kurzpumpversuche im offenen Bohrloch als auch Pumpversuche in ausgebauten Messstellen durchgeführt.

Da während der Bohrarbeiten 2010/2011 artesische Grundwasserverhältnisse festgestellt wurden, erfolgten ergänzend Druckaufbau- und Auslaufversuche. Diese dienten zum einen der Feststellung des artesischen Druckpotentials, und zum anderen konnten daraus die Transmissivitäten des Gebirges bestimmt werden.

Sämtliche Versuche fanden innerhalb des Forbach-Granits statt. Tab. 5 enthält die Rahmendaten der durchgeführten Versuche, die während der beiden Bohrkampagnen durchgeführt wurden.

Tab. 5: Durchgeführte hydraulische Tests mit instationären Auswerteverfahren

Aufschluss	Hydraulischer Test	Datum	Teststrecke [m u. GOK]	Ruhepotential [m u. GOK]	Entnahmerate	Pumpdauer
Tests im Rahmen der Bohrkampagne 2010/2011						
KS BK 2	D/A und KPV	16. - 17.02.2011	172,0 - 370,0	- 5,12 m	Drei Pumpzyklen (0,02 / 0,1 / 0,15 l/s)	insg. 48 min
KS BK 2	D/A und KPV	22.02.2011	52,2 - 370,0	- 8,45 m	0,1 l/s	2 h 30 min
KS BK 2	D/A und KPV	23. - 24.02.2011	11,0 - 370,0	- 1,8 m	0,05 l/s	2 h 38 min
KS BK 5	KPV	15.02.2011	0 - 162	10,03 m	zweistufig: 0,28 / 0,5 l/s	2 h 15 min
KS BK 5	KPV	16.02.2011	0 - 162	10,03 m	0,6 l/s	1 h 36 min
KS BK 5	KPV	17. - 18.02.2011	96,8 - 162	8,40 m	0,02 l/s	4 h 05 min
KS BK 5	PV	30.03. - 01.04.11	120,0 - 160,0	7,63 m	0,05 l/s	54h 35 min
KS BK 7	D/A	27.01.2011	0 - 139,5	2,84 m	Dreimaliges Abpumpen: (0,4 / 0,6 / 0,7 l/s) Beim 2. Abpumpen gleichzeitig Infiltration (1,1 l/s)	Jeweils zwischen 6 und 14 min
KS BK 9	D/A	24. - 25.01.2011	72,0 - 90,0	19 m (gemessen) 28 m (extrapoliert)	-	-
KS BK 11	PV	24.03.2011	10 - 39,0	15,02 m	zweistufig: 0,3 / 0,45 l/s	6 h 0 min
Tests im Rahmen der Bohrkampagne 2018/2019						
KS BK 04-neu	Pulse	14.01.2019	336,5 – 354,0 m	23,50 m	-	-
KS KB 04-neu	Pulse	21.01.2019	354,3 – 379,0 m	31,61 m	-	-
KS BK 102	KPV	05.09.2018	2,9 – 12,4 m	2,91 m	0,05 l/s / 0,02 l/s	2 h 21 min
KS BK 102	DST	13.09.2018	60,0 – 67,0 m	- 0,40 m	-	-
KS BK 102	Pulse	18.09.2018	75,1 – 81,7 m	0,80 m	-	-
KS BK 103s	Pulse	08.10.2018	307,8 – 314,0 m	18,00 m	-	-
KS BK 103s	Pulse	08.11.2018	314,9 – 322,0 m	40,45 m	-	-
KS BK 103s	Pulse	14.11.2018	331,0 – 339,0 m	31,33 m	-	-
KS BK 104	DST	07.09.2018	80,7 – 90,2 m	2,60 m	-	-
KS BK 104	Pulse	24.09.2018	171,5 178,0 m	- 9,10 m	-	-
KS BK 104	Pulse	28.09.2018	191,6 – 196,2 m	- 9,30 m	-	-

Kapitel 4: Durchgeführte Erkundungen und Untersuchungen

Aufschluss	Hydraulischer Test	Datum	Teststrecke [m u. GOK]	Ruhepotential [m u. GOK]	Entnahmerate	Pumpdauer
KS BK 104	DST	10.10.2018	214,0 – 238,0 m	0,05 m	-	-
KS BK 104	KPV	11.10.2018	214,0 – 238,0 m	2,00 m	0,013 l/s	3 h 39 min
KS BK 106	Slug/KRI	29.10.2018	12,7 – 27,0 m	13,58 m	0,02 l/s Injektion	33 min
KS BK 107	Pulse	30.11.2018	115,2 – 128,2 m	- 5,07 m	-	-
KS BK 107	PV	17.12.2018 13.02.2019	6,0 – 22,0 m			Abbruch wegen Zementdämmer im Förderwasser
KS BK 107-neu	PV	19.11.2019	6,0 – 22,0 m	3,98 m	0,07 l/s	3 h 5 min
KS BK 109	DST	19.09.2018	108,4 – 116,0 m	26,18 m	-	-
KS BK 109	Pulse	30.10.2018	213,3 – 224,0 m	20,69 m	-	-
KS BK 109	Pulse	07.11.2018	226,8 – 231,0 m	14,00 m	-	-
KS BK 109	Pulse	13.11.2018	236,0 – 241,0 m	18,00 m	-	-
KS BK 111	Pulse	29.09.2018	74,0 – 79,2 m	29,00 m	-	-
KS BK 111	Pulse	01.10.2018	84,6 – 92,2 m	29,00 m	-	-
KS BK 111	Pulse	08.10.2018	94,0 – 99,6 m	28,50 m	-	-
KS BK 111	DST	10.10.2018	106,4 – 111,1 m	29,61 m	-	-
KS BK 112	DST	13.09.2018	16,5 – 20,3 m	9,30 m	-	-
KS BK 112	PV	18.12.2018	10,0 – 14,0 m	11,20 m	-	-
KS BK 115s	Pulse	10.10.2018	14,9 – 18,4 m	11,10 m	-	-
KS BK 115s	Slug/KRI	15.10.2018	18,8 – 24,7 m	13,50 m	Anfangs bis 0,25 l/s, nach 25 min konstant 0,13 l/s Injektion	1 h 31 min

Legende

PV - Pumpversuch in der ausgebauten Grundwassermessstelle

Versuche im offenen Bohrloch, Teststrecke mittels Packer abgetrennt:

KPV - Kurzpumpversuch

D/A - Druckaufbau-/Auslaufversuch

KRI – Konstante Rate Injektion

Pulse – Pulse-Test

DST – Drill-Stem-Test

Slug – Slug-Test

Kapitel 4: Durchgeführte Erkundungen und Untersuchungen

Tab. 6: WD-Tests (hydraulische Tests mit stationären Auswerteverfahren)

Bohrung / getesteter Ab- schnitt	Hydrauli- scher Test	Datum	Teststrecke (m u. GOK)	Ruhepotential (m u. GOK)	Injektionsrate bei max. Druck- stufe (in l/s)	Injektions- dauer
Tests im Rahmen der Bohrkampagne 2010/2011						
KS BK 1	WD	12.01.2011	19,0 – 20,2 m	4,98 m	0,0390	36 min
KS BK 1	WD	29.01.2011	373,4 – 377,9 m	-0,52 m	0,0065	2 h 05 min
KS BK 1	WD	30.01.2011	382,3- 386,5 m	-0,42 m	0,0086	1 h 09 min
KS BK 2	WD	13.01.2011	11,3 – 15,0 m	1,20 m	0,0490	35 min
KS BK 2	WD	15.02.2011	293,5 – 298,0 m	25,57 m	0,022	47 min
KS BK 2	WD	04.02.2011	343,0 – 348,0 m	-1,78 m	0,0013	29 min
KS BK 2	WD	05.02.2011	352,0 – 357,0 m	-1,31 m	0,0	23 min
KS BK 3	WD	12.01.2011	18,3 – 21,0 m	1,76 m	0,0013	37 min
KS BK 3	WD	28.02.2011	277,2 – 282,0 m	-0,82 m	0,0	41 min
KS BK 3	WD	02.03.2011	280,5 – 288,0 m	-1,03 m	0,002	37 min
KS BK 4	WD	14.02.2011	285,0 – 289,2 m	25,57 m	0,028	39 min
KS BK 4	WD	16.02.2011	297,4 – 304,0 m	19,38 m	0,006	46 min
KS BK 4	WD	18.12.2018	328,0 – 337,0 m	-	0,00031	59 min
KS BK 4	WD	14.01.2019	336,5 – 354,0 m	-	0,00011	1 h 06 min
KS BK 4	WD	21.01.2019	354,3 – 379,0 m	-	0,00016	59 min
KS BK 5	WD	15.02.2011	124,0 – 128,0 m	10,01 m	0,0011	34 min
KS BK 5	WD	04.02.2011	129,0 – 136,5 m	10,61 m	0,0102	36 min
KS BK 5	WD	08.02.2011	138,0 – 142,8 m	7,95 m	0,0005	35 min
KS BK 6	WD	14.03.2011	106,0 – 109,7 m	-0,03 m	0,0107	40 min
KS BK 6	WD	22.03.2011	133,0 – 140,9 m	0,18 m	0,0	37 min
KS BK 7	WD	20.01.2011	97,0 – 105,8 m	-2,16 m	0,0	28 min
KS BK 7	WD	21.01.2011	105,9 – 111,1 m	-1,92 m	0,0	33 min
KS BK 8	WD	18.01.2011	64,0 – 69,0 m	1,28 m	0,0228	36 min
KS BK 8	WD	20.01.2011	74,0 – 79,0 m	2,35 m	0,0006	42 min
KS BK 8	WD	31.01.2011	82,0 – 87,0 m	2,57 m	0,0017	26 min
KS BK 9	WD	17.01.2011	55,0 – 58,0 m	1,28 m	0,0044	31 min
KS BK 9	WD	18.01.2011	57,0 – 64,0 m	1,51 m	0,0003	27 min
KS BK 9	WD	18.01.2011	64,0 – 70,0 m	0,40 m	0,0003	28 min
KS BK 10	WD	04.02.2011	16,9 – 22,0 m	3,46 m	0,2260	32 min
KS BK 11	WD	10.03.2011	20,8 – 25,6 m	14,07 m	0,037	35 min
KS BK 11	WD	15.03.2011	35,0 – 39,5 m	13,97 m	0,0090	1 h 10 min
Tests im Rahmen der Bohrkampagne 2018/2019						
KS BK 101s	WD	21.11.2018	27,0 – 32,0 m	-	0,00004	59 min
KS BK 101s	WD	05.12.2018	46,7 – 53,0 m	-	0,00003	1 h 00 min
KS BK 102	WD	14.09.2018	60,0 – 67,0 m	-	0,013	1 h 06 min
KS BK 102	WD	18.09.2018	75,1 – 81,7 m	-	0,0	1 h 16 min

Kapitel 4: Durchgeführte Erkundungen und Untersuchungen

KS BK 103	WD	09.10.2018	307,8 – 314,0 m	-	0,0	1h 01 min
KS BK 103	WD	09.11.2018	314,9 – 322,0 m	-	0,0	43 min
KS BK 103	WD	15.11.2018	331,0 – 339,0 m	-	0,0	48 min
KS BK 104	WD	07.09.2018	80,7 – 90,2 m	-	0,0060	59 min
KS BK 104	WD	25.09.2018	171,5 – 178,0 m	-	0,0	1 h 05 min
KS BK 104	WD	29.09.2018	191,6 – 196,2 m	-	0,0	1 h 05 min
KS BK 107	WD	27.11.2018	107,7 – 114,1 m	-	0,00006	1 h 15 min
KS BK 107	WD	03.12.2018	121,7 – 128,2 m	-	0,00044	57 min
KS BK 109	WD	19.09.2018	108,4 – 116,0 m	-	0,0042	58 min
KS BK 109	WD	30.10.2018	213,3 – 224,0 m	-	0,00035	1 h 05 min
KS BK 109	WD	07.11.2018	226,8 – 231,0 m	-	0,00003	54 min
KS BK 109	WD	13.11.2018	236,0 – 241,0 m	-	0,00005	59 min
KS BK 111	WD	29.09.2018	74,0 – 79,2 m	-	0,00001	57 min
KS BK 111	WD	02.10.2018	84,6 – 92,2 m	-	0,0	1 h 26 min
KS BK 111	WD	09.10.2018	94,0 – 99,6 m	-	0,0	1 h 09 min
KS BK 111	WD	11.10.2018	106,4 – 111,1 m	-	0,008	1 h 19 min
KS BK 112	WD	14.09.2018	16,5 – 20,3 m	-	0,04	1 h 01 min
KS BK 115	WD	09.10.2018	6,7 – 12,0 m	-	0,027	1 h 03 min

4.5 Grundwasserstandsmessungen

Im Zuge der Bohrkampagne 2010/211 wurden die Bohrungen KS BK 4 und KS BK 9 als Piezometermessstellen mit elektrischen Piezometern und Datalogger ausgebaut. Die Bohrungen KS BK 5 und KS BK 11 wurden als Grundwassermessstellen ausgebaut.

Im Zuge der Bohrkampagne 2018/2019 wurde die Piezometermessstelle KS BK 4 überbohrt und vertieft, so dass seit Anfang 2019 an derselben Stelle wie KS BK 4 eine neue, tiefere Piezometermessstelle mit elektrischem Piezometer und Datalogger zur Verfügung steht. Als weitere Piezometermessstelle mit einem elektrischen Piezometer wurde die Bohrung KS BK 104 ausgewählt; ergänzend wurden noch pneumatische Piezometer in die Bohrungen KS BK 102 und KS BK 107 eingebaut und die Bohrung KS BK 112 als Grundwassermessstelle ausgebaut. Geplant war auch ein Ausbau der KS BK 107 als Doppelmessstelle (im tieferen Bereich Einbau eines Piezometers, im oberflächennahen Bereich Ausbau als Grundwassermessstelle). Aufgrund technischer Schwierigkeiten während des Ausbaus steht die oberflächennahe Grundwassermessstelle nicht zur Verfügung. Ebenso zeigte sich bei ersten Messungen, dass der Piezometer in KS BK 107 defekt ist und nicht für Messungen zur Verfügung steht.

Als Ersatz wurden Oktober 2019 in unmittelbarer Nähe der defekten KS BK 107 eine flache Grundwassermessstelle (KS BK 107-neu GWM) und eine tiefe Piezometermessstelle (KS BK 107-neu Piezo) errichtet. Als Bohrverfahren kam eine Meißelbohrung zum Einsatz.

Kapitel 4: Durchgeführte Erkundungen und Untersuchungen

Tab. 7: Piezometer-Messstellen - Ausbaudaten

Bohrung	Piezometertyp	GOK [m ü .NN]	stratigraphische Lage des Piezometers	Filterkiesschüttung				Einbau Piezometer	
				von [mNN]	bis [mNN]	von [m u. GOK]	bis [m u. GOK]	[mNN]	[m u. GOK]
KS BK 4-neu	elektrisch, Datalogger	596,10	tiefer Granit	261,1	246,1	335	350	251,1	345
KS BK 9	elektrisch, Datalogger	362,10	tiefer Granit	287,1	272,1	75	90	277,1	85
KS BK 102	pneumatisch	380,22	oberflächennaher Granit	374,72	370,22	5,5	10	370,72	9,5
KS BK 104	elektrisch, Datalogger	483,00	oberflächennaher Granit	479	469	4	14	470	13
KS BK 107	pneumatisch	423,78	tiefer Granit	Messstelle defekt					
KS BK 107-neu Piezo	pneumatisch	423,89	tiefer Granit	307,89	293,89	116	130	294,89	129
KS BK 4 (zurückgebaut 09/2018)	elektrisch, Datalogger	596,10	tiefer Granit	-	-	-	-	301,1	295

Tab. 8: Grundwasser-Messstellen - Ausbaudaten

Grundwasser-messstelle	GOK	POK	Ausbau	Filterstrecke		stratigraphische Lage der Filterstrecke
	[mNN]	[mNN]		[mNN]	[m u. GOK]	
KS BK 5	436,60	437,47	überflur 4,5 Zoll	316,60 - 276,60 416,60 - 343,60	120,00 - 160,00 20,00 - 90,00	tiefer Granit
KS BK 11	314,20	314,96	unterflur 3 Zoll	304,20 - 275,20	10,00 - 39,00	Quartär (Murgschotter) und oberflächennaher Granit
KS BK 112	311,25	311,16	unterflur DN 125	301,45 - 297,45	9,80 - 13,80	Quartär (Murgschotter)
KS BK 107-neu GWM	423,94	424,97	überflur DN 125	417,94 - 401,94	6,00 - 22,00	oberflächennaher Granit

Die elektrischen Piezometer erfassen im Stundentakt die Druckverhältnisse im Forbach-Granit. Die neuen pneumatischen Piezometer sollen zukünftig 14-tägig gemessen werden.

Die Grundwasserstände werden 14-tägig mittels Lichtlot gemessen.

Die Messergebnisse bis zum 26.02.2019 befinden sich in Anlage 5.3.1 und 5.3.2. Die Messungen der elektrischen Piezometer liegen dem Gutachten aufgrund der Datenmenge nur in digitaler Form bei. Die Auswertung erfolgt in Kapitel 6.1.2.2.

4.6 Hydrologische und hydrochemische Untersuchungen

4.6.1 Quellkartierung

Zur Schaffung eines Überblicks über die Eigenschaften der Quellaustritte im Planungsgebiet Forbach – Herrenwies wurde im Zeitraum Dezember 2010 bis Mai 2011 ein Großteil der austretenden Quellen, Quellbereiche und Brunnen dokumentiert.

Im Zuge weiterer Geländebegehungen im Jahr 2013 wurden die Aufnahmen um weitere Quellaustritte ergänzt.

Bei diesen Übersichtskartierungen 2010 bis 2013 wurden insgesamt 93 Quellen, Quellbereiche und Brunnen erfasst.

Im Zuge der Bohrkampagne 2018/2019 fand eine Detailkartierung im Bereich der geplanten Unterstufe statt. Hierbei wurden 20 Quellen und Quellbereiche aufgenommen, von denen sieben identisch mit den früher aufgenommenen Quellpunkten waren oder in der Nähe der früheren Quellpunkte lagen. Die Detailkartierung fand am 26.10.2018 bei Niedrigwasserverhältnissen statt sowie am 17.04.2019 nach vorausgegangenen Niederschlägen.

Sämtliche Quellpunkte wurden mit GPS eingemessen, die Leitfähigkeit und die Temperatur dokumentiert sowie Besonderheiten aufgenommen. Die Messdaten befinden sich in Anlage 5.1, Lagepläne dazu in Anlage 1.3 bis Anlage 1.5. Die Daten werden in Kapitel 6 interpretiert.

4.6.2 Abflussmessungen

Um die Auswirkungen der geplanten unterirdischen Bauwerke auf die Wasserführung von Kleingewässern beurteilen zu können, wurden entsprechend der Planung 2011 drei Fließgewässer ausgewählt und mit Messwehren ausgestattet (siehe Anlage 5.4.1):

Messwehr 1 „Löschteich“ erfasst den wesentlichen oberirdischen Abfluss aus dem Baubereich der geplanten Unterstufe

Messwehr 2 „Referenz“ dient als vom Bauvorhaben unbeeinflusste Referenzmessstelle,

Messwehr 3 „Holderbach“ erfasst den Abfluss des Holderbaches, unter dem der ursprünglich geplante Zufahrtsstollen zum Kavernenwasserspeicher verlief.

Die Messung der Durchflussmenge erfolgte über die Bestimmung der Überfallhöhe an Thomsonwehren. Ergänzend zu den Messungen der Überfallhöhen wurden auch jeweils vor Ort die Parameter pH-Wert, elektrische Leitfähigkeit und Temperatur im fließenden Wasser bestimmt.

Die Messungen fanden zwischen dem 06.09.2011 und 20.09.2013 wöchentlich statt und dienten in erster Linie der Beobachtung des Abflussgeschehens am Hang oberhalb des Rudolf-Fettweis-Werkes und der Beweissicherung. Die Messwehre wurden am 18.10.2013 rückgebaut.

Die Messergebnisse finden sich in Anlage 5.4.2. Die Interpretation der Ergebnisse findet sich in Kapitel 6.2 und Kapitel 13.

4.6.3 Hydrochemische Untersuchungen

Zur hydrochemischen Charakterisierung der Grundwässer wurden während der Bohrkampagne 2010/2011 die bei den Bohrungen angetroffenen Wässer der Bohrungen KS BK 5 und KS BK 9 untersucht. Das Wasser in KS BK 5 wurde aufgrund eines auffälligen Aluminium-Gehaltes nochmals nachbeprobet und auf Aluminium untersucht.

Kapitel 4: Durchgeführte Erkundungen und Untersuchungen

Die Wasserproben aus KS BK 5 wurden im Rahmen von Pumpversuchen im offenen Bohrloch mit Tauchpumpen gewonnen. Aus KS BK 9 wurde eine Schöpfprobe (artesischer Überlauf) entnommen.

In der Folgezeit 2011 bis 2013 wurden verschiedene Oberflächengewässer zu unterschiedlichen hydrologischen Situationen hydrochemisch untersucht, um Hinweise auf unterschiedliche Quellwasseranteile bei Hoch-/Niedrigwasser zu erhalten.

Weitere Untersuchungen zwischen 2012 und 2014 an ausgewählten Wässern dienten der Bestimmung der Betonaggressivität und der Feststellung, ob die Wässer als Betonzuschlagwasser geeignet sind.

Im Zuge der Bohrkampagne 2018/2019 bestand zudem die Möglichkeit ergänzender Grundwasseruntersuchungen. Aus der unteren Filterstrecke der KS BK 5 wurde am 11.12.2018 eine Pumpprobe entnommen. Während der Pumpversuche in KS BK 112 und KS BK 107-neu GWM erfolgte jeweils eine Grundwasser-Probenahme. Die drei Proben dienten der hydrochemischen Charakterisierung, die Proben aus KS BK 5 und KS BK 112 zusätzlich noch der Bestimmung der Betonaggressivität und Korrosionswahrscheinlichkeit.

Die Probenahmeprotokolle finden sich zusammen mit den Untersuchungsergebnissen in Anlage 5.2 oder - falls die Probenahme im Rahmen hydraulischer Tests stattfand - bei den entsprechenden Versuchsprotokollen (Anlage 4.3).

In der folgenden Tabelle sind die durchgeführten hydrochemischen Untersuchungen zusammengestellt.

Für die Grundwasser-Charakterisierung wurden folgende Parameter untersucht:

Vor-Ort-Analytik (Pumpproben): pH-Wert, elektrische Leitfähigkeit, Sauerstoffgehalt, Temperatur, Farbe, Geruch und Trübung.

Labor-Analytik: pH-Wert, elektrische Leitfähigkeit, Absorption 436 nm und 254 nm, Säurekapazität bis pH 4,3, Gesamthärte, DOC, AOX, Calcium, Magnesium, Natrium, Kalium, Ammonium, Eisen, Mangan, Chlorid, Nitrat, Sulfat, Ortho-Phosphat, Hydrogencarbonat, Bor, Arsen, Schwermetalle (Pb, Cd, Cr, Cu, Ni, Zn, Hg), Aluminium, Permanganat-Verbrauch, Kohlensäure aggr., Sulfid (gelöst).

Für die Oberflächenwasser-Charakterisierung wurden folgende Parameter untersucht:

Vor-Ort-Analytik: pH-Wert, elektrische Leitfähigkeit, Temperatur, Farbe, Geruch und Trübung

Labor-Analytik: pH-Wert, gelöster organisch gebundener Kohlenstoff DOC, Ammonium, Nitrat, Sulfat, Chlorid, Hydrogencarbonat, Aluminium, Calcium, Magnesium, Natrium, Kalium, Eisen, Mangan, am 11.04.2013 zusätzlich noch AOX, Bor, Hydrogencarbonat, Säurekapazität bis pH 4,3, Gesamthärte und freie aggr. Kohlensäure (berechnet).

Die Untersuchungsergebnisse finden sich in Anlage 5.2, die Interpretation der Ergebnisse erfolgt in Kapitel 6.4.

Tab. 9 enthält die am Grund- und Oberflächenwasser durchgeführten hydrochemischen Untersuchungen.

Kapitel 4: Durchgeführte Erkundungen und Untersuchungen

Tab. 9: Durchgeführte hydrochemische Untersuchungen an Grund- und Oberflächenwässern an der geplanten Unterstufe

Entnahmestelle	Art der Entnahme bzw. der Entnahmestelle	Datum der Probenahme	Bemerkung
Grundwasser-Charakterisierung 2011			
KS BK 9	Schöpfprobe aus Überlauf des offenen Bohrlochs (artesisch)	24.01.2011	
KS BK 5	Pumpprobe aus offenem Bohrloch	16.02.2011	
KS BK 5	Pumpprobe aus ausgebauter GWM	01.04.2011	Überprüfung Aluminium-Gehalt
Oberflächenwasser-Charakterisierung 2011 – 2013			
Bachlauf am Löschteich Probenahmeort: Messwehr 1 „Löschteich“ Probenbezeichnungen: KV 1 bzw. Messwehr 1	Fließgewässer	04.10.2011 / 11.04.2013	04.10.2011: Niedrigwasser-Verhältnisse 11.04.2013: Hochwasser-Verhältnisse
Bachlauf zwischen Franken- und Wiedbach Probenahmeort: Messwehr 2 „Referenz“ Probenbezeichnungen: KV 2 bzw. Messwehr 2	Fließgewässer	04.10.2011 / 11.04.2013	
Holderbach Probenahmeort: Messwehr 3 „Holderbach“ Probenbezeichnungen: KV 3 bzw. Messwehr 3	Fließgewässer	04.10.2011 / 11.04.2013	
Einzeluntersuchungen zu Beurteilung der Betonaggressivität und der Korrosionswahrscheinlichkeit, 2012 – 2014			
Schwarzenbachtalsperre	Schöpfprobe	26.09.2012	Korrosionswahrscheinlichkeit nach DIN 50929 T3
Staubecken Rudolf-Fettweis-Werk	Schöpfprobe	26.09.2012	Korrosionswahrscheinlichkeit nach DIN 50929 T3
SK BK 8*	Pumpprobe aus ausgebauter GWM	16.01.2014	Betonaggressivität nach DIN 4030-1: 2008-06
KS BK 5	Pumpprobe aus ausgebauter GWM	16.01.2014	Betonaggressivität nach DIN 4030-1: 2008-06
Ergänzende Grundwasseruntersuchungen im Zuge des Bohrprogramms 2018/2019			
KS BK 5	Pumpprobe aus ausgebauter GWM	11.12.2018	
KS BK 112	Pumpprobe aus ausgebauter GWM	18.12.2018	
KS BK 107-neu GWM	Pumpprobe aus ausgebauter GWM	19.11.2019	

* Grundwassermessstelle am Seekopf, SK BK 8 im Forbach-Granit (Daten zur Grundwassermessstelle in [16])

Kapitel 4: Durchgeführte Erkundungen und Untersuchungen

4.7 Umweltchemische Untersuchungen

Die bei der Herstellung der baulichen Anlagen anfallenden Ausbruchmassen aus den anstehenden Gesteinen können in Abhängigkeit von ihrer geotechnischen Eignung und abfalltechnischen Einstufung als Bau- und Schüttmaterial wiederverwendet werden.

Im Zuge der Bohrkampagne 2010/2011 wurden zur Ermittlung der Schadstoffgehalte für die verschiedenen stratigraphischen Einheiten (Granit, quartärer Hangschutt/Murgschotter) repräsentative Bohrkernabschnitte ausgewählt; je beprobter Kernstrecke wurden mehrere Einzelproben zu einer Mischprobe vereinigt. Drei Mischproben wurden zur umweltchemischen Untersuchung ins Labor gegeben.

Die Proben aus dem Granit wurden auf Aluminium, Arsen und Schwermetalle (Pb, Cd, Cr, Cu, Ni, Zn, Hg) im Original und Eluat untersucht, da die weiteren Parameter nach VwV Boden in den bereits untersuchten Granit-Proben aus den Bohrungen am Seekopf (in [16]) unauffällig gewesen waren. Die Probe aus den quartären Lockergesteinen wurde auf die Parameter der Tab. 6.1 der Verwaltungsvorschrift des Umweltministeriums Baden-Württemberg für die Verwertung von als Abfall eingestuftem Bodenmaterial vom 14. März 2007 („VwV Boden“) untersucht.

Im Zuge der Bohrkampagne 2018/2019 fanden ergänzende abfalltechnische Untersuchungen statt. Es wurden 10 Bohrkernproben unterschiedlich stark verwittertem Forbach-Granit sowie zwei Lockergesteinsproben der quartären Überdeckung als Einzelproben untersucht. Die Lockergesteinsproben und 8 der 10 Bohrkernproben wurden auf die Parameter der Tab. 6.1 der Verwaltungsvorschrift des Umweltministeriums Baden-Württemberg für die Verwertung von als Abfall eingestuftem Bodenmaterial vom 14. März 2007 („VwV Boden“) untersucht. Die übrigen zwei Bohrkernproben wurden im Rahmen einer Nachuntersuchung lediglich auf Kupfer im Original und im Eluat untersucht, um den auffällig hohen Kupfergehalt in einer Einzelprobe zu verifizieren.

Tab. 10: Abfalltechnisch untersuchte Proben

Bohrung	Entnahmetiefe [m]		Stratigraphische Einheit	Gesteinsbeschreibung	Analyseumfang	Bemerkung
	von	bis				
Bohrkampagne 2010/2011						
KS BK 3	265,0	265,5	GFO	Granit, w0/w1	Schwermetalle	
KS BK 6	74,0	75,7	GFO	Granit, w5	Schwermetalle	
KS BK 11	8,0	13,0	q	Sand, steinig, kiesig	VwV	
Bohrkampagne 2018/2019						
KS BK 101	40,8	41,0	GFO	Granit, w2/w3	VwV	grüner Kluftbelag
KS BK 103 S	341,6	341,7	GFO	Granit, w2/w3	VwV	
KS BK 103 S	344,9	345,0	GFO	Granit, w1/w2	VwV	
KS BK 104	142,3	142,5	GFO	Granit, w3/w4	VwV	
KS BK 106	7,0	7,3	GFO	Granit, w3/w4	VwV	auffällig hoher Kupfergehalt
KS BK 106	6,8	7,0	GFO	Granit, w3/w4	Kupfer	Verifizierung des Kupfergehalts in der Probe KS BK 106 (7,0-7,3m)

Kapitel 4: Durchgeführte Erkundungen und Untersuchungen

KS BK 106	7,3	7,5	GFO	Granit, w3/w4	Kupfer	Verifizierung des Kupfergehalts in der Probe KS B K106 (7,0-7,3m)
KS BK 107	53,0	53,2	GFO	Granit, w2/w3	VwV	
KS BK 113	6,6	7,0	q	Schluff, steinig, sandig, kiesig	VwV	
KS BK 116 H	5,0	6,0	q	Sand, kiesig, schluffig	VwV	auffälliger Geruch (PAK?)

Legende:

GFO	Forbach-Granit
q	Quartär
w	Verwitterungsgrad (w0 bis w5)
VwV	Verwaltungsvorschrift Bodenverwertung Baden-Württemberg

Die Untersuchungsergebnisse finden sich in Kapitel 12, Anlage 9.2 enthält die Laborberichte.

4.8 Radonmessungen

Granit kann Spuren von radioaktiven Elementen enthalten und diese in Form von Radon als gasförmiges radioaktives Zerfallsprodukt an die Umwelt abgeben. Um die bauzeitliche Belastung der Arbeiter durch diese natürliche Radioaktivität bewerten zu können, wurden im Franzosenstollen vier Radonexposimeter in Form von Messdosen über eine Messdauer von ca. 2 Wochen ausgelegt.

Der Franzosenstollen wurde als Versuchsort gewählt, da der Stollen im Forbach-Granit liegt und unverbaut ist. Um besser und schlechter belüftete Bereiche vergleichen zu können wurden die vier Exposimeter gleichmäßig über die gesamte Stollenlänge verteilt. Die Exposimeter wurden am 30.10.2018 ausgelegt und am 14.11.2018 eingesammelt.

Die Analyse der Exposimeter erfolgte durch das Radonlabor am Campus Nord des KIT nach DIN EN ISO/IEC 17025.

Die Ergebnisse werden in Kapitel 5.2.1 beschrieben. Eine Fotodokumentation der genauen Lage und Anbringung der Messdosen und das Ergebnisprotokoll finden sich in Anlage 9.4.

5 Beschreibung der geologischen Verhältnisse

5.1 Geologischer Überblick

Der Bauwerksbereich ist dem Naturraum Nordschwarzwald zuzuordnen.

Die Mittelgebirgslandschaft wird geprägt durch die Hänge des Buntsandsteins und Zechsteins sowie des unterlagernden Forbach-Granits.

Die Buntsandsteinhänge sind zum Teil durch steil abfallende Karwände und Karseen (Herrenwieser See) geprägt, die eine sehr hohe Reliefenergie besitzen und meist nach Osten hin signifikant das Landschaftsbild prägen.

Im Untersuchungsgebiet der Unterstufe stehen ausschließlich die Schichten des Forbach-Granits (GFO) und des Quartärs an. Der Forbach-Granit wird größtenteils von quartärem Hangschutt und Blockschuttdecken überlagert und ist z. T. mit Aplit-Gängen durchsetzt. Im Murgtal stehen über dem Forbach-Granit zudem die Schotterterrassen der Murg an. Die Granite weisen auch in tieferen Lagen (unter der Geländeoberfläche) des Gebirges Verwitterungen, sogenannte Vergrusungen, auf. In der Tab. 11 sind die im Untersuchungsgebiet auftretenden und durch Bohrungen aufgeschlossenen Schichtglieder zusammenfassend dargestellt.

Die **Vergrusungszonen** weisen sich im Wesentlichen durch stark verwitterte Bereiche des Granits aus, wodurch lokal Verwitterungsgrus entsteht. Dieser hat meist eine Korngröße von 2 mm bis 6 mm (Feinkies). Die Vergrusung betrifft häufig plutonische Gesteine, wie Granite, bei denen hauptsächlich die verwitterungsempfindlichen Minerale zerfallen und sich dadurch der Gesteinsverband auflöst. Ursache für die Verwitterung auch in tieferen Lagen des Gebirges sind Temperaturschwankungen und/oder Verwitterung durch Hydrolyse. Treten Temperaturschwankungen auf, so ziehen sich die unterschiedlichen Minerale unterschiedlich schnell zusammen, bzw. dehnen sich unterschiedlich schnell aus, was auf ihre unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten zurückzuführen ist. Dadurch lockert sich langsam die Gebirgsfestigkeit. Die allmähliche Verwitterung des Gesteins durch Hydrolyse (Bindung von H^+ und OH^- Ionen der Minerale an Wasser) betrifft hauptsächlich die enthaltenen Feldspäte und Glimmer. Durch die chemische Reaktion werden diese in Tonminerale umgewandelt.

Beide Prozesse schwächen das Gefüge der Granite erheblich, wodurch die Gebirgstypen 3 und 4 entstehen.

An den Flanken des Murgtals finden sich kleinere Quellaustritte.

Tab. 11: Geologische Übersicht der im Bereich der Unterstufe anstehenden Gesteine

Formation	Abteilung	Stufe, Gesteine
Quartär	Pleistozän	Hangschutt, Blockschuttdecken, Talschotter
Grundgebirge	Granit	Forbach-Granit (GFO)

Die geologischen Verhältnisse sind in den ingenieurgeologischen Längsschnitten (Anlage 2.1.1 bis Anlage 2.1.18) und in den Lageplänen (Anlage 1.1 und Anlage 1.5) zeichnerisch dargestellt. Auf eine Darstellung des Mutterbodens wurde auf Grund sehr geringer Mächtigkeiten verzichtet.

Im Folgenden werden in Kurzform die Hauptbauwerke und die geologischen Verhältnisse erläutert.

Kapitel 5: Beschreibung der geologischen Verhältnisse

Die auf der Grundlage des aktuellen Standes der Planung ermittelten Stollenlängen beziehen sich jeweils auf die Achsen der Bauwerke.

Der **Oberwasserstollen des Murgwasserwegs** verbindet die Kraftwerkskaverne mit dem bereits bestehenden, aus Süden kommenden und östlich der geplanten Kaverne endenden Murgstollen. Dies erfolgt über einen insgesamt 311 m langen Vertikalschacht. Der Vertikalschacht überwindet einen Höhenunterschied von ca. 155 m, davor und danach erfolgt über die horizontalen Stollenabschnitte der Anschluss an die Kraftwerkskaverne. Der Oberwasserstollen des Murgwasserwegs wird vollständig im Kristallin des Forbach-Granits aufgefahren. Im Bereich des Oberwasserstollens ist nach den Erkundungen mit einer Schwächezone im Bereich des Vertikalschacht zu rechnen. Im Bereich des Oberwasserstollens ist lokal des Weiteren mit einer Vergrusung der Granitgebirges und mit aplitischen Ganggesteinen zu rechnen. Der Oberwasserweg ist in der Bauphase durch einen 137 m langen Zufahrtsstollen zu erreichen, in welchem nach den Erkundungen eine Schwächezone im Bereich des Portals des Zufahrtsstollens vorhanden ist. Die geologischen Verhältnisse für den Oberwasserweg Murgstollen sind im Schnitt in Anlage 2.1.7, Blatt 1 und Blatt 2, für den Zufahrtsstollen in Anlage 2.1.9 und für den Portalbereich des Zufahrtsstollens in der Anlage 2.1.13 zusammengestellt. Der Verlauf der Schwächezonen im Bereich des Wasserwegs Murgstollen kann für die Oberfläche in Anlage 1.1 und für das 300 mNN – Niveau in Anlage 1.6 entnommen werden.

Der **Oberwasserstollen des Schwarzenbachwasserwegs** verbindet die Kraftwerkskaverne mit dem bereits bestehenden, aus Südwesten kommenden und südwestlich der geplanten Kaverne endenden Schwarzenbachstollen. Dies erfolgt über einen insgesamt 569,1 m langen, von Südwesten nach Nordosten verlaufenden Stollenabschnitt, der sich aus horizontalen und vertikalen Komponenten zusammensetzt. Der Vertikalschacht überwindet einen Höhenunterschied von 356 m, davor und danach erfolgt über die horizontalen Stollenabschnitte der Anschluss an den Schwarzenbachstollen bzw. die Kraftwerkskaverne. Der Oberwasserstollen des Schwarzenbachstollens wird vollständig im Kristallin des Forbach-Granits aufgefahren. Im Anschlussbereich an den bestehenden Schwarzenbachstollen wird der Oberwasserstollen nahezu orthogonal von einer tektonischen Schwächezone gekreuzt. Im Bereich des Oberwasserstollens ist nach den Erkundungen mit 2 Schwächezonen, im Bereich des Vertikalschacht mit 3 Schwächezonen und im Bereich des Unterstollens mit 1 Schwächezone zu rechnen. In diesem Bereich ist eine starke mechanische Zerlegung des Gebirges und erhöhte Wasserdurchlässigkeit zu erwarten. Das Antreffen von aplitischen Ganggesteinen kann nicht ausgeschlossen werden. Der Oberwasserweg Schwarzenbach ist in der Bauphase durch einen 113 m langen Zufahrtsstollen zu erreichen, in welchem nach den Erkundungen eine Schwächezone durch die Krümmung des Stollenverlaufs an zwei Stellen durch den Stollen streicht. Die geologischen Verhältnisse für den Wasserweg Schwarzenbachstollen sind im Schnitt in Anlage 2.1.8, Blatt 1 und Blatt 2, für den Zufahrtsstollen in Anlage 2.1.10 und für den Portalbereich des Zufahrtsstollens in der Anlage 2.1.14 zusammengestellt. Der Verlauf der Schwächezonen im Bereich des Wasserwegs Schwarzenbachstollen kann für die Oberfläche in Anlage 1.1 und für das 300 mNN – Niveau der Anlage 1.6 entnommen werden.

Die **Kraftwerkskaverne** der Unterstufe befindet sich ca. 60 m westlich des Wasserschlosses der bestehenden Druckleitung in einer Tiefe von ca. 300 m unter der Geländeoberkante. Die Hauptebene E1 (Maschinenhausflur) der Kraftwerkskaverne liegt auf 271,90 mNN, die maximale Höhe der Kaverne beträgt 39,3 m (290,5 mNN bis 251,2 mNN). Die Kraftwerkskaverne der Unterstufe wird vollständig im Forbach-Granit aufgefahren. Im direkten Bereich des Kaverne ist nach den Erkundungen mit 2 Schwächezonen zu rechnen, eine dritte Schwächezone liegt unmittelbar südlich der Kaverne. Im Bereich der Kaverne durchziehen die Schwächezonen das Bauwerk von der Firste bis zur Sohle. Des Weiteren ist im Bauwerksbereich mit aplitischen Ganggesteinen zu rechnen. Die

Kapitel 5: Beschreibung der geologischen Verhältnisse

geologischen Verhältnisse für die Kaverne sind im Schnitt in Anlage 2.1.1, Blatt 1 zusammengestellt. Der Verlauf der Schwächezonen im Bereich des Kaverne kann für die Oberfläche in Anlage 1.1 und für das 300 mNN – Niveau in Anlage 1.6 entnommen werden.

Der **Unterwasserstollen des Murgwasserwegs** verläuft vom nördlichen Bereich der Kraftwerkskaverne Richtung Norden und geht in den Unterwasserstollen SB über, somit wird die Kraftwerkskaverne mit dem Kavernenwasserspeicher verbunden. Der 71,40 m lange Unterwasserstollen des Murgwasserwegs liegt durchgehend im Kristallin des Forbach-Granits, wobei auch in diesem Bauwerksbereich mit Vergrusungszonen und aplitischen Ganggesteinen zu rechnen ist. Die geologischen Verhältnisse für den Unterwasserstollen Murg sind im Schnitt in Anlage 2.1.7, Blatt 1 und Blatt 2 zusammengestellt. Der Verlauf der Schwächezonen im Bereich des Unterwasserstollens kann für die Oberfläche in Anlage 1.1 und für das 300 mNN – Niveau in Anlage 1.6 entnommen werden.

Der **Unterwasserstollen des Schwarzenbachwasserwegs** verläuft vom südlichen Bereich der Kraftwerkskaverne in nordöstlicher Richtung und geht zusammen mit dem Unterwasserstollen des Murgwasserwegs in den Hauptstollen Kavernenwasserspeicher über. Der 187,9 m lange Unterwasserstollen des Schwarzenbachwasserwegs schafft dadurch eine zweite Verbindung zwischen Kraftwerkskaverne und Kavernenwasserspeicher. Im Bereich des Unterwasserstollens ist nach den Erkundungen mit 2 Schwächezonen zu rechnen. Auch hier ist mit Vergrusungszonen und aplitischen Ganggesteinen zu rechnen. Die geologischen Verhältnisse für den Unterwasserstollen Schwarzenbach sind im Schnitt in Anlage 2.1.8, Blatt 1 und Blatt 2 zusammengestellt. Der Verlauf der Schwächezonen im Bereich des Unterwasserstollens kann für die Oberfläche in Anlage 1.1 und für das 300 mNN – Niveau in Anlage 1.6 entnommen werden.

Die **Nebenstollen** I bis VI bilden den Kavernenwasserspeicher der geplanten Unterstufe Forbach und befinden sich beidseitig am südwestlichen Abschnitt des Hauptstollens Kavernenwasserspeicher. Die Nebenstollen I bis IV zweigen in nördlicher Richtung vom Hauptstollen Kavernenwasserspeicher ab und verlaufen parallel zueinander von Süd nach Nord in Richtung Frankenbach. Sie besitzen jeweils eine Länge von 340 m. Die Nebenstollen V und VI zweigen in östlicher Richtung vom Hauptstollen Kavernenwasserspeicher ab und verlaufen parallel zueinander von West nach Ost in Richtung Rudolf-Fettweis-Werk, sie besitzen jeweils eine Länge von 210 m. Die insgesamt 1.780 Stollenmeter verlaufen vollständig im Kristallin des Forbach-Granits (GFO). Im Bereich der Nebenstollen I bis IV ist nach den Erkundungen mit einer 3 Schwächezonen zu rechnen, wobei wie die Anlage 1.6 zeigt, die Schwächezone Nr. 7 alle 4 Stollen, die Schwächezone Nr. 6 die Nebenstollen I und II und die Schwächezone Nr.9 wiederum alle 4 Nebenstollen trifft. Im Bereich der Nebenstollen V und VI treffen, wie die Anlage 1.6 zeigt, die Schwächezonen 14, 15 und 18 beiden Stollen. Im Bereich aller 6 Stollen ist lokal des Weiteren mit einer Vergrusung der Granitgebirges und mit aplitischen Ganggesteinen zu rechnen. Die geologischen Verhältnisse für die Nebenstollen I bis IV sind exemplarisch im Schnitt für Nebenstollen II in Anlage 2.1.2, Blatt 1 zusammengestellt. Die geologischen Verhältnisse für die Nebenstollen I bis VI sind exemplarisch im Schnitt für Nebenstollen V in Anlage 2.1.3, Blatt 1 zusammengestellt. Der Verlauf der Schwächezonen im Bereich der 6 Nebenstollen kann für die Oberfläche in Anlage 1.1 und für das 300 mNN – Niveau der Anlage 1.6 entnommen werden.

Der **Hauptstollen** Kavernenwasserspeicher verbindet über eine Länge von 240 m die südlichen (Nebenstollen I bis IV) bzw. westlichen (Nebenstollen V und VI) Enden der Nebenstollen. In nordöstlicher Richtung endet der Hauptstollen im nördlichen Bereich des Ausgleichsbeckens des Rudolf-Fettweis-Werkes. Hierdurch entsteht die Verbindung von Kavernenwasserspeicher und Ausgleichsbecken. Über die Gesamtlänge von 946,5 m verläuft der Hauptstollen vollständig im Kristallin des Forbach-Granits (GFO).

Kapitel 5: Beschreibung der geologischen Verhältnisse

Das Nordöstliche Ende des Hauptstollens bildet das **Ein-/Auslaufbauwerk**. Es wird unter gering mächtigen quartären Lockerschichten und Auffüllungen im Kristallin des Forbach-Granits gegründet. Die Felsschichten sind oberflächennah verwittert.

Im Bereich des Hauptstollens und des Ein- und Auslaufbauwerk ist nach den Erkundungen mit 10 Schwächezonen zu rechnen. Beim Auffahren des Bauwerks ist mit dem Antreffen mächtiger Vergrusungszonen (vgl. Bohrung KS BK 6) zu rechnen, Des Weiteren ist im gesamten Bauwerksbereich mit aplitischen Ganggesteinen zu rechnen. Die geologischen Verhältnisse für den Hauptstollen sind in Anlage 2.1.4, Blatt 1 zusammengestellt. Die geologischen Verhältnisse im Bereich des Portalbauwerks (Ein- und Auslaufbauwerk) des Hauptstollens sind in Anlage 2.1.15 dargestellt. Der Verlauf der Schwächezonen im Bereich des Hauptstollens kann für die Oberfläche in der Anlage 1.1 und für das 300 mNN – Niveau der Anlage 1.6 entnommen werden

Der **Zufahrtsstollen** zur Kraftwerkskaverne verläuft vom Rudolf-Fettweis-Werk kommend in südwestlicher Richtung zur Kraftwerkskaverne. Der 598 m lange Zufahrtsstollen verläuft mit Ausnahme des Portalbereichs vollständig im Kristallin des Forbach-Granits. Im Bereich des Zufahrtstollens ist nach den Erkundungen mit 4 Schwächezonen zu rechnen. Lokal ist des Weiteren mit einer Vergrusung der Granitgebirges und mit aplitischen Ganggesteinen zu rechnen. Im Portalbereich wird das Bauwerk unter Auffüllungen und quartären Lockerschichten im Kristallin des Forbach-Granits gegründet. Die Felsschichten sind oberflächennah verwittert. Die geologischen Verhältnisse für den Zufahrtsstollen sind im Schnitt in Anlage 2.1.5, und für den Portalbereich des Zufahrtsstollens in der Anlage 2.1.16 zusammengestellt. Der Verlauf der Schwächezonen im Bereich des Zufahrtsstollens kann für die Oberfläche in Anlage 1.1 und für das 300 mNN – Niveau der Anlage 1.6 entnommen werden.

Der **Energieableitungsstollen** Unterstufe/Oberstufe zweigt aus dem Zufahrtsstollen der Kraftwerkskaverne ab (ca. km 0,1) und besitzt folglich den identischen Portalbereich wie der Zufahrtstollen. Von km 0,0 bis km 0,340 handelt es sich um einen gemeinsamen Energieableitungsstollen für die Ober- und Unterstufe. Ab km 0,340 verlaufen zwei getrennte Energieableitungsstollen zu den Kraftwerkskavernen der Ober- und Unterstufe. Der Energieableitungsstollen Unterstufe hat eine Länge von 354,4 m. Der Energieableitungsstollen Oberstufe wird derzeit nicht bis zur Oberstufe gebaut. Er wird derzeit nur mit einer Länge von ca. 276 m geplant. Im Bereich der Unterstufe liegt der gemeinsame Energieableitungsstollen von Ober- und Unterstufe im Kristallin des Forbach-Granits. Lediglich im Portalbereich wird das Bauwerk unter gering mächtigen quartären Lockerschichten im Kristallin des Forbach-Granits gegründet. Die Felsschichten sind oberflächennah verwittert. Im Bereich des Energieableitungsstollens Unterstufe ist nach den Erkundungen mit 3 Schwächezonen zu rechnen. Im Bereich des Energieableitungsstollens Oberstufe ist nach den Erkundungen mit 4 Schwächezonen zu rechnen. Die geologischen Verhältnisse für den Energieableitungsstollen Unterstufe sind in Anlage 2.1.11 zusammengestellt. Die geologischen Verhältnisse für den Energieableitungsstollen Oberstufe sind in Anlage 2.1.6 zusammengestellt. Die geologischen Verhältnisse im Bereich des Portalbauwerks Zufahrtsstollen / Energieableitungsstolle sind in Anlage 2.1.16 dargestellt. Der Verlauf der Schwächezonen im Bereich der Energieableitungsstollens Unterstufe kann für die Oberfläche in der Anlage 1.1 und für das 300 mNN – Niveau der Anlage 1.6 entnommen werden.

Der **Schutterstollen** zum Abtransport des Ausbruchsmaterials aus den untertägigen Bauwerken der Unterstufe beginnt auf dem Niveau der B462, am Parkplatz vor der Brücke über die Fallrohre des Rudolf-Fettweis-Werkes. Er verläuft zunächst in nordwestlicher Richtung bis zum Zufahrtsstollen, kreuzt diesen auf gleichem Niveau und läuft weiter bis zum Nebenstollen V. Er hat insgesamt eine Länge 253,2 m (151,5 m vom Portal bis Zufahrtsstollen und 101,7 m vom Zufahrtsstollen bis zum Nebenstollen V). Der Schutterstollen wird komplett im Forbach-Granit aufgeföhren. Im Bereich

Kapitel 5: Beschreibung der geologischen Verhältnisse

des Schutterstollens ist nach den Erkundungen mit 2 prognostizierten Schwächezonen zu vermuten. Die geologischen Verhältnisse für den Schutterstollen sind in Anlage 2.1.12 zusammengestellt. Die geologischen Verhältnisse im Bereich des Portalbauwerks Schutterstollen sind in Anlage 2.1.17 dargestellt. Der Verlauf der Schwächezonen im Bereich der Energieableitungsstollens Unterstufe kann für die Oberfläche in der Anlage 1.1 und für das 300 mNN – Niveau der Anlage 1.6 entnommen werden.

5.2 Geologische Schichtenbeschreibung

5.2.1 Forbach-Granit (Grundgebirge)

Der Forbach-Granit (GFO) unterlagert im Bereich Forbach die sedimentären Deckschichten und ist als regellos körniger Zweiglimmergranit im Bereich des Kavernenwasserspeichers (Talflanken der Murg) direkt an der Geländeoberfläche aufgeschlossen (Bereich des Schutterstollenportals und Auslauf-/Einlaufbauwerk). In der Tab. 12 sind die Erkundungsbohrungen mit den entsprechenden Aufschlusslängen im Granit zusammengestellt.

Tab. 12: Übersicht über das Vorkommen des Forbach-Granits in den Aufschlussbohrungen

Bohrungen 2018/19	Kernmarschlängen des Forbach-Granits
	[m]
KS BK 4 neu	377,50
KS BK 101	59,50
KS BK 102	97,50
KS BK 103	381,00
KS BK 104	236,70
KS BK 106	26,80
KS BK 107	157,90
KS BK 109	264,65
KS BK 111	134,70
KS BK 112	5,50
KS BK 113S	9,80
KS BK 114H	-
KS BK 115S	39,10
KS BK 116H	20,05
KS BK 117	21,00

Um die in den bisherigen Gutachten vorgenommene Einteilung des Granitgebirges in 4 Gebirgstypen bei der Aufnahme der angegebenen Bohrkerne quantitativ vornehmen zu können und in den Kernaufnahmen (Anlage 3) ein adäquate Ansprache durchführen zu können, wurden alle Bohrkerne mit dem Schmidtschen Hammer im 10 cm-Abstand geprüft und entsprechend der gemessenen Festigkeit den in den bisherigen Gutachten beschriebenen 4 Gebirgstypen zugeordnet. Diese 4 Gebirgstypen sind:

Kapitel 5: Beschreibung der geologischen Verhältnisse

Granit G1, frisch bis gering verwittert, tieferer Bereich, w0-w1

Granit in der Regel meist hart und unverwittert. Ausnahmen bilden dabei die vergrusten Bereiche im Granit. Die Klüfte sind i. d. R. geschlossen. Der RQD beträgt >75%, meist 90 % bis 100% (siehe Abb. 2).

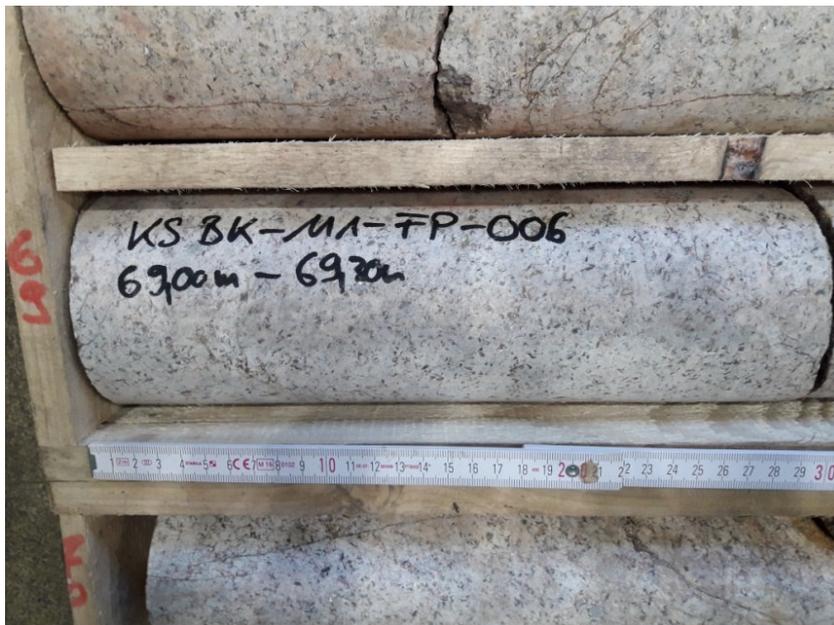


Abb. 2: Bohrkern im unverwitterten Granit G1, w0-w1.

Granit G2, frisch bis gering verwittert, tieferer Bereich, w1-w2

Granit in der Regel meist hart und unverwittert. Ausnahmen bilden dabei die vergrusten Bereiche im Granit. Die Klüfte sind i. d. R. geschlossen. Der RQD beträgt >75%, meist 90 % bis 100% (siehe Abb. 3).

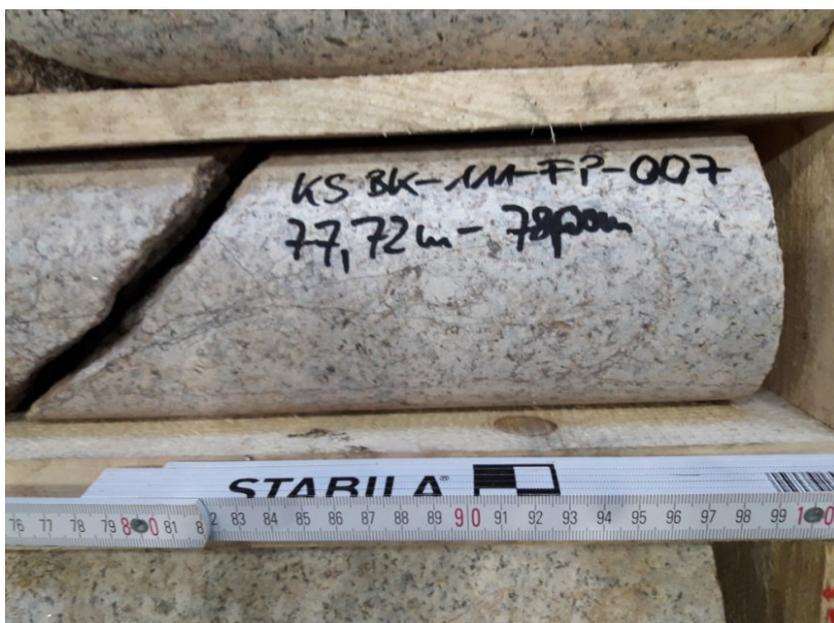


Abb. 3: Forbach-Granit G2, w1-w2 mit Mikrorissen

Kapitel 5: Beschreibung der geologischen Verhältnisse

Granit G3, überwiegend mäßig verwittert, Übergangszone, w2-w3

Unterhalb der 5 m Grenze ist der Granit meist überwiegend mäßig verwittert (w2 bis w3), wobei entlang Klüften Verwitterungsgrade von w4 in einer Tiefe von Zentimeter bis Dezimeter, parallel der Klüfte, durchaus vorkommen können. Diese Zone reicht in Tiefen bis ca. 30 m. Der RQD beträgt >65%.



Abb. 4: Oberflächennahe verwitterter Granit des Gebirgstyps Granit G4 mit der Verwitterungsstufe w3 bis w4

Granit G4, stark verwittert, oberflächennah, w3-w4

Im Bereich der natürlichen Geländeoberfläche (Krafthaussschacht, Einlauf-/Auslaufbauwerk, Portalbereich des südlichen Zufahrtsstollens) ist das Granitgebirge, wie die Bohraufschlüsse (Anlage 3.2) zeigen, von der Oberfläche her flächig, bis in eine Tiefe ca. 5 m verwittert (w3 bis w4) und teilweise zersetzt. Der RQD beträgt <65%.

Die Dünnschliff - Modalanalyse einer Dünnschliffprobe für den Granit aus dem Bereich des Seekopfs zeigt, dass der Zweiglimmergranit aus ca. 35 Vol. % Alkalifeldspat, 20 Vol. % Plagioklas, 35 Vol. % Quarz, 5 Vol. % Biotit und 5 Vol.% Muskovit besteht [16].

Charakteristisch im Untersuchungsgebiet ist eine oberflächennahe bis tiefgreifende Vergrusung des anstehenden, granitischen Gesteins. Dabei entstehen bei der chemischen Verwitterung durch Zerfall kleine, eckig-kantige Gesteinsstücke von 2 mm bis 6 mm Durchmesser (Grus), die sich entlang ebener oder gebogener Gesteinsplatten konzentrischschalig ablösen. Die Mächtigkeit der Vergrusungsdecken/-schalen liegt häufig im cm-Bereich, mancherorts auch im m-Bereich. Die Gesteinsfestigkeit ist derart verringert, dass der Granit im Vergrusungsbereich Lockergesteinseigenschaften besitzt. Solche Zonen wurden in den Bohrprofilen (Anlage 3.1) und im Kartierbericht [4] ausgewiesen. Eine Auswertung der Vergrusungsbereiche im Hinblick auf die Lage der geplante Bauwerke ist in Kapitel 5.3 zusammengestellt.

Kapitel 5: Beschreibung der geologischen Verhältnisse

Wie in den Anlagen 2.1.1 bis 2.1.18 dargestellt, wird beim Ausbruch der Untertagebauwerke im Bereich von Schwächezonen eine Reihe von Vergrusungszonen vorkommen.

Vergruster Granit wurde auch in den tieferen Bereichen des Gebirges angetroffen. Dabei handelt es sich um Areale im Gebirge, in denen im Meter- oder Dekameterbereich durch chemische Umwandlung der Minerale die Gesteinsfestigkeit verringert wurde, so dass der Granit lockergesteinsähnliche Eigenschaften besitzt (siehe Abb. 5) In diesen Bereichen sind im entfestigten Gebirgsverband die Klüfte noch vorhanden. In Kapitel 5.3.2 sind die Kluftauswertungen für den vergrusten Granit zusammengestellt.



Abb. 5: Bohrkern aus der KS BK 109, bei 112 m Tiefe mit vergrustem Forbach-Granit G4, w3 bis w4.

Anhand der Ergebnisse der Auswertung der Bohrdaten wurde ein Gebirgsmodell hinsichtlich des Vergrusungsgrades des Forbach-Granits entwickelt.

Um den Anteil der Vergrusung im Granitgebirge zu erfassen, wurden die aus den Bohrkernaufnahmen aus dem Jahr 2011 und 2018 als vergrust angesprochenen Bohrkernbereiche hinsichtlich ihrer Länge im Bohrkern erfasst, die Vergrusungslängen addiert und im Anschluss das prozentuale Auftreten von Vergrusungsbereichen, bezogen auf die Länge des ausgewerteten Teufenabschnitts ermittelt. Dies geschah zum Einen für die vollständigen Kernmarschlängen des Granits in den Aufschlussbohrungen KS BK 1 bis KS BK 117 und zum Anderen für die bauwerksrelevanten Teufenabschnitte (Bauwerksfirste +30 m bis zur Endteufe) der Bohrungen in relevanter Distanz zu den geplanten Bauwerken. Die Ergebnisse dieser Auswertungen sind in den geotechnischen Längsschnitten der Anlage 2, dem folgenden Schema entsprechend dargestellt.

- am Bohransatzpunkt wurde der Prozentanteil an vergrustem Granit an der Gesamtstrecke jeder Bohrung dargestellt.
- am unteren Bohrende wurde der Prozentanteil an vergrustem Granit an der Strecke 30 m über Firste der Bauwerke bis zur Endteufe jeder Bohrung (in der Regel 20 m unter der Stollenachse) dargestellt.

Die vertikale Auswertung des punktuellen Aufschlussprogrammes zeigt einen Anteil von ca. 22 % bis 10 % an vergrustem Granit für die erkundeten Gesamtstrecken des Granit. Bei der Betrachtung

Kapitel 5: Beschreibung der geologischen Verhältnisse

der punktuellen Aufschlüsse im vorgesehenen Tiefenniveau der geplanten Bauwerke ergibt sich ein Anteil von ca. 12 % an vergrustem Granitgebirge.

Um die Abmessungen der Vergrusungszonen zu klassifizieren, wurden die ermittelten Vergrusungsabschnitte hinsichtlich ihrer vertikalen Mächtigkeit im Bohrkern ausgewertet und in 4 Kategorien unterteilt. Tab. 13 zeigt das verwendete Klassifizierungsschema.

Tab. 13: Kategorisierung der scheinbaren Vergrusungsmächtigkeit

Kategorie	vertikale Mächtigkeit der Vergrusung im Bohrkern [m]
1	0,01 bis 1
2	1 bis 5
3	5 bis 10
4	> 10

Anschließend wurde die prozentuale Verteilung der Vergrusungszonen in den betrachteten Bohrungen auf die einzelnen Vergrusungskategorien ermittelt.

Tab. 14 zeigt die Anzahl und prozentuale Verteilung der im Zuge der Auswertung festgestellten Vergrusungsbereiche auf die Vergrusungskategorien.

Tab. 14: Prozentuale Verteilung der Vergrusungszonen auf die jeweilige Kategorie

Kategorie	Anzahl	prozentualer Anteil [%]
1	10	27
2	17	53
3	5	15
4	2	5

Es ist ersichtlich, dass über die Hälfte der aufgeschlossenen Vergrusungszonen der Kategorie 2 (1 m bis 5 m scheinbare Mächtigkeit) zuzuordnen sind. Vergrusungsbereiche der Kategorie 1 und 3 bilden 27 % bzw. 15 % aller erfassten Vergrusungszonen. Lediglich 5 % der aufgeschlossenen Vergrusungsbereiche zeigen in den Bohrkernen scheinbare Mächtigkeiten von über 10 m.

Die Auswertung der Daten der Erkundungskampagne aus dem Jahr 2011 ergibt, dass der Vergrusungsanteil in den einzelnen Bohrungen stark schwankt, von 1 % bis 56 % (siehe Anlagen 2.1.1 bis 2.1.6 sowie Anlage 3). Es ist jedoch zu erkennen, dass tendenziell im nördlichen Projektareal eine stärkere Vergrusung des Gebirges in den Bohrungen aufgeschlossen wurde. Zum überwiegenden Teil handelt es sich bei den Vergrusungszonen um Strukturen mit einer Mächtigkeit von 1 m bis 5 m, daneben treten Strukturen bis zu 1 m Mächtigkeit häufig auf. Mächtigeren Zonen (≥ 5 m) kommen nur untergeordnet vor.

Kapitel 5: Beschreibung der geologischen Verhältnisse

Bei einer räumlich differenzierten Betrachtung des Untersuchungsgebietes zeigen sich lokal deutliche Unterschiede in Bezug auf die prozentualen Anteile am vergrustem Gebirge und der Verteilung der Vergrusungszonen auf die einzelnen Vergrusungskategorien.

Die Übertragung des Gebirgsmodells auf den Bereich westlich des Staubeckens bis zum Frankentbach zwischen Rudolf-Fettweis-Werk und der dazugehörigen Staumauer ergibt einen erwarteten Anteil der Gebirgsvergrusung von 8 % bis 39 %. Die Gesamtvergrusung teilt sich mit 62 % zum überwiegenden Teil auf Strukturen der Vergrusungskategorie 2 auf. Auffällig ist der hohe Anteil an Vergrusungszonen der Kategorie 4 mit 15 %. Ebenfalls einen Anteil von 15 % besitzt die Vergrusungskategorie 2. Vergrusungskategorie 3 kommt mit einem Anteil von 8 % am seltensten vor.

Im Gebiet der Lindenthalde zwischen Rudolf-Fettweis-Werks und Haulerloch, in dem sich das Kavernenfeld, der Großteil des Zufahrtstollens zur Kraftwerkskaverne sowie ein Teil des Energieableitungstollens befinden, beträgt der Anteil an vergrustem Gebirgsbereichen 8 % bis 32%. In diesem Bereich wurden zum überwiegenden Teil die Vergrusungskategorien 1 (44 % bis 86%) und 2 (14 % bis 44 %) aufgeschlossen. Vergrusungskategorie 4 wird einen geschätzten Anteil von 0 % bis 12% der Gesamtvergrusung in diesem Bereich ausmachen. Vergrusungszonen der Kategorie 3 wurden in der Datenauswertung für diesen Bereich nicht festgestellt.

Im Bereich südlich des Rudolf-Fettweis-Werks zwischen Murg und Hailert sind der Bau der Kraftwerkskaverne sowie der Ober- und Unterwasserstollen des Murg -und Schwarzenbachwasserwegs geplant. Hier ist auf Grundlage der Bohrdaten ein Vergrusungsanteil von ca. 8 % zu erwarten. Auch hier wurden hauptsächlich die Vergrusungskategorien 1 (13 % bis 100 %) und 2 (0 % bis 53 %) aufgeschlossen. 0 % bis 26% der Gebirgsvergrusung in diesem Bereich werden voraussichtlich auf Kategorie 3 entfallen und lediglich 0 % bis 8% auf Kategorie 4.

Wie in Anlage 2.1.1 dargestellt, wird beim Ausbruch der Kraftwerkskaverne das Antreffen einer mit ca. 50° Richtung NE einfallenden Vergrusungszone bei Stationierung (gbm) 10,0 gerechnet. Die identische Vergrusungszone wird vermutlich beim Auffahren des Schwarzenbach-Oberwasserstollens bei Stationierung 5 sowie dem dazugehörigen Schrägschacht bei Stationierung (gbm) 150 m angetroffen.

Aplitgänge

Der Forbach-Granit ist nach den Aufschlussresultaten vereinzelt von hellen, mittel- bis feinkörnigen, harten Granitgängen (Apliten) durchzogen, die ca. 60° bis 70° geneigt sind und eine Gangmächtigkeit von Zentimetern bis Metern besitzen. Die Ganggesteine wurden in den Erkundungsbohrungen von 2018 in KS BK 101S bis KS BK 104, KS BK 107, KS BK 109, KS BK 113S und KS BK 117 festgestellt.

Die Dünnschliff - Modalanalyse einer Dünnschliffprobe zeigt, dass der Aplitgranit aus ca. 30 Vol. % Alkalifeldspat, 20 Vol. % Plagioklas, 40 Vol. % Quarz und 7 - 10 Vol. % Muskovit besteht. Die helle Farbe des Gesteins wird durch das Fehlen des Biotits (dunkler Glimmer) bedingt [16].

Kapitel 5: Beschreibung der geologischen Verhältnisse

Natürliche Radioaktivität im Forbach-Granit

Der Forbach-Granit zeigt keine außerordentlich hohen Uran-Thorium-Konzentrationen. Uranvorkommen sind im Gebiet des Granit-Plutons nicht bekannt. Das dem Plangebiet nächste nennenswerte Uranvorkommen liegt bei Müllenbach, Stadt Baden-Baden (STEHEN, 2004). Hier ist Uranoxid in karbonischen Sedimenten aufkonzentriert. Diese Lagerstätte befindet sich jedoch im Deckgebirge (HOLLIGER et al., 1989) und es besteht kein direkter Zusammenhang mit dem Forbach-Granit.

Die Radonwerte der Bodenluft im Bereich des Forbach-Granits liegen zwischen 40.000 Bq/m³ und 80.000 Bq/m³ (UMWELTMINISTERIUM BW, 2007) und zeigen damit keine Region erhöhter Radonkonzentrationen an.

Die Radonmessungen im Franzosenstollen ergaben für die Stollenluft Werte zwischen 98 Bq/m³ in gut belüfteten Abschnitten und 307 Bq/m³ in schlecht belüfteten Abschnitten. Als Referenzwert für öffentliche Gebäude wird 300 Bq/m³ angegeben, wobei Werte unter 100 Bq/m³ laut Weltgesundheitsorganisation als unbedenklich gelten. Mit Hilfe von Bewetterung kann der Radongehalt in der Stollenluft während den Tunnelbauarbeiten auf ein unkritisches Maß reduziert werden.

5.2.2 Lockergesteine**Hangschutt und Murgschotter (Quartär)**

Im Folgenden werden sämtliche quartären Blockschuttdecken und Wanderschuttdecken (Fließerd/Hangschutt) und Schotterterrassen der Murg als Lockergesteine zusammengefasst.

Die Lockergesteine des Granits wurde im Bereich des Kavernenwasserspeichers in den Erkundungsbohrungen 2010 in KS BK 1 bis KS BK 3, KS BK 6, KS BK 7, KS BK 9 bis KS BK 11 und in den Erkundungsbohrungen 2018 in KS BK 101S und KS BK 117, sowie in den Schürfen SCH 2018/101 und SCH 2018/102 erbohrt, bzw. angetroffen.

Die in den einzelnen Bohrungen der Erkundung angetroffenen Mächtigkeiten der vorgenannten Lockergesteine sind der Tab. 15 zu entnehmen. Diese wurden unterteilt in Hangschutt auf den Hochflächen, Hangschutt an den Talflanken sowie die Schotterterrassen im Murgtal (Murgschotter).

Die Mächtigkeiten der Lockergesteine sind in den geologischen Längsschnitten in Anlage 2 dargestellt.

Der Hangschutt im Bereich der Unterstufe besteht aus locker gelagertem, verwittertem, sandigem Granitmaterial, das in situ verwittert ist. Das Sandmaterial des Hangschutts ist von kiesigem, steinigem Granitmaterial durchsetzt, das an der Oberfläche des Kavernenwasserspeichers als große Blöcke über die Talflanken und der Hochfläche verteilt ist. In den unteren Talflanken der Murg lagert dieses Material als Schottermaterial in kantengerundeter Form und durchsetzt mit Hangschutt aus dem morphologisch höher gelegenen Deckgebirge.

Auf den Hochflächen in den Bohrungen KS BK 102S, KS BK 106, KS BK 109 und in SCH 2018/102 finden sich annähernd keine Auffüllungen.

Kapitel 5: Beschreibung der geologischen Verhältnisse

Tab. 15: Übersicht über die Mächtigkeiten der Lockergesteine in den Aufschlussbohrungen gemäß den Bohrprofilen (Anlage 3)

Bohrung	Mächtigkeit der Lockergesteine		
	Hangschutt Hochfläche Granit Kavernenwasser- speicher [m]	Hangschutt Talflanken Granit Kavernenwasser- speicher [m]	Schotterterrassen Murgtal [m]
KS BK 1	10,90		
KS BK 2	7,00		
KS BK 3	8,90		
KS BK 4		1,20	
KS BK 5		1,50 ¹⁾	
KS BK 6		2,10	
KS BK 7		0,20	
KS BK 8		2,00 ¹⁾	
KS BK 9		2,20	
KS BK 10			10,50
KS BK 11			18,00
K1		2,00	
K2		2,50	
K3		2,3 0	
Z1		11,2	
KS BK 101S		0,80 ¹⁾	
KS BK 102		0,70 ¹⁾ / 1,80	
KS BK 103 S	4,00		
KS BK 104		1,25 ¹⁾	
KS BK 106		0,20 ¹⁾	
KS BK 107		0,50 ¹⁾ / 2,80	
KS BK 109	0,10 ¹⁾ / 0,90		
KS BK 111		0,55 ¹⁾ / 0,75	
KS BK 112			6,40 ¹⁾ / 8,50
KS BK 113 S			5,80 ¹⁾ / 6,00
KS BK 114 H			5,00 ¹⁾ / 5,30
KS BK 115 S		0,90 ¹⁾	
KS BK 116 H			2,60 ¹⁾ / 7,35
KS BK 117		4,0 ¹⁾ / 0,90	
SCH 2018/101		1,50	
SCH 2018/102	2,50		

¹⁾ Auffüllung**Auffüllungen**

In KS BK 101S, KS BK 102, KS BK 104 bis KS BK 117 finden sich in den obersten Zentimetern bis Metern Auffüllungen, welche häufig zur Wegbefestigung dienen. Teilweise liegen die Auffüllungen noch auf dem Hangschutt, teilweise folgen nach den Auffüllungen direkt der Fels. Diese Auffüllungen bestehen aus locker bis dicht gelagerten Sand- und Kiesmaterial, das von steinigem bis leicht schluffigem Material durchsetzt ist. Teilweise findet sich auch Beton und Asphalt als oberste Schicht der Auffüllung.

Die Auffüllungen wurden in folgende Homogenbereiche geteilt:

A1.1 Asphalt

A1.2 Beton

Kapitel 5: Beschreibung der geologischen Verhältnisse

A21. Kies, stark sandig bis Sand, stark kiesig

A2.2 Kies, stark sandig, stark schluffig bis Schluff, kiesig bis sandig

A2.3 Schluff, sandig, schwach kiesig bis kiesig, schwach tonig

Die Verbreitung der Auffüllungen ist in den Anlagen 2.1.13 bis 2.1.17 dargestellt.

5.2.3 Oberboden

Oberboden ist in den Erkundungsbohrungen des Kaverenwasserspeichers (KS BK 1, KS BK 3, KS BK 4, KS BK 6, KS BK 7, KS BK 9 bis KS BK 11, KS BK 4 neu, KS BK 101S, KS BK 104, SCH 2018/101 und SCH 2018/102) in Mächtigkeiten zwischen 0,05 m bis 1,20 m vorhanden.

5.3 Lagerungsverhältnisse, Tektonik

5.3.1 Übersicht

Das Untersuchungsgebiet befindet sich im granitischen Grundgebirge des Schwarzwaldes, das einen Intrusivkörper darstellt, der sich im Zuge der Herzynischen bzw. Variszischen Gebirgsbildung durch die Kollision von Gondwana und Laurussia im Zeitraum von vor ca. 300 Mio. bis 400 Mio. Jahren gebildet hat.

Durch die damalige Südost – Nordwest (SE – NW) gerichtete Kollisionsrichtung Gondwanas auf Laurussia kam es zur Bildung des heutigen tektonischen Störungsmuster. Dieses tektonische Muster ist geprägt durch:

- die **West-südwest – Ost-nordost (WSW – ENE)** verlaufenden Auf- und Abschiebungen an der Moldanubischen – Saxothuringikum Grenzzone (herzynischer Trend),
- den **Nord-nordost – Süd-südwest (NNE – SSW)** induzierten Scherzonen (rheinscher Trend), an denen der granitische Intrusivkörper des Schwarzwaldes aufstieg, und
- der herzynischen und rezenten primären Druck- bzw. Kollisionsrichtung aus **Süd-ost - Nordwest Richtung (SE – NW)** (Kollisions- bzw. Primäre Spannungsrichtung)

Aufgrund der derzeitigen und seit ca. 80 Mio. Jahren anhaltenden Kollision der Afrikanischen Platte auf die Eurasische Platte im Zuge der Alpidischen Gebirgsbildung, die der damaligen Kollisionsrichtung nahezu entspricht, werden die damaligen Schwächezonen reaktiviert und zusätzlich neu entstehende, parallel zur Kollisionsrichtung (siehe Primärspannungsanalyse Kapitel 5.4) verlaufende Störungen, in Südost – Nordwest (SE – NW) Richtung gebildet.

Kapitel 5: Beschreibung der geologischen Verhältnisse

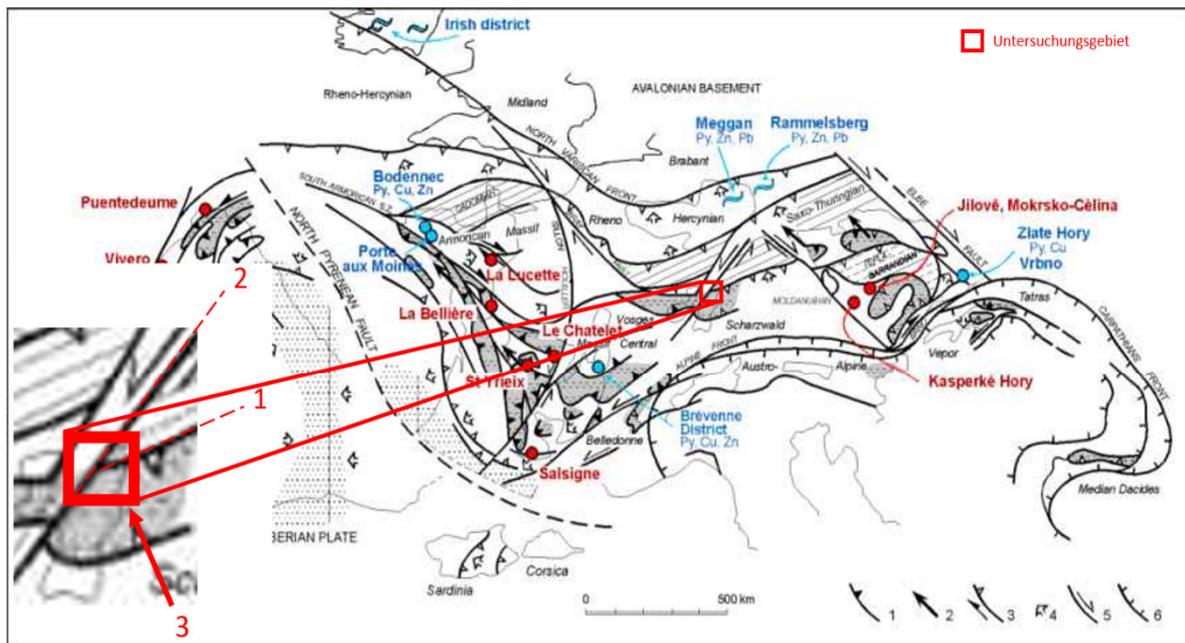


Abb. 6: Lage des Untersuchungsgebiets während der Herzynischen bzw. Variszischen Gebirgsbildung (modf. nach V.Bouchot „Crustal-scale hydrothermal palaeofield and related variscan Au, Sb, W orogenic deposits at 310-305 MA, 2000).

Beachte: das übergeordnete Störungsinventar bestehend aus dem herzynischen Trend (1), dem rheinischen Trend (2) und der herzynischen und rezenten Kollisionsrichtung (3).

Die ursprünglich mehr oder weniger horizontal abgelagerten Schichtenfolgen des Deckgebirges (Buntsandstein und Perm) des Nordschwarzwaldes wurden durch tektonische Prozesse im Zusammenhang mit der Auffaltung der Alpen angehoben (GK 7316 Forbach, GEYER & GWINNER 2010) und mit etwa 1° bis 2° nach Südost bis Südsüdost verkippt. Lokal können, z. B. durch Verstellungen an Störungen, auch größere Einfallwinkel auftreten.

Um Erkenntnisse über das Kluffgefüge, das Schwächezoneinventar und die Spannungsverhältnisse im Untersuchungsgebiet zu erlangen, wurden in den Bauwerksbereichen Erkundungsbohrungen abgeteuft und analysiert.

Im Zuge der Analyse des Kluffgefüges wurden an den Bohrlochwänden der Bohrungen der Erkundungsprogrammen 2010/2011 und 2018/2019 optische (ETIBS) und akustische (ABF) bohrlochgeophysikalische Untersuchungen durchgeführt (siehe Kapitel 4.2), ausgewertet und in Pol-Punkt Diagrammen dargestellt (siehe Kapitel 5.3.2).

Zusätzlich zu den bohrlochgeophysikalischen Untersuchungen zur Kluffanalyse wurden im Jahr 2012 und 2018/2019 eine geologische Oberflächenkartierung und eine Kartierung des in der Nähe zum Auslaufbauwerks gelegenen Franzosenstollen durchgeführt, deren Ziel die geotechnische Ansprache und die Auswertung von tektonischen Strukturen an der Geländeoberfläche war.

Um Erkenntnisse über den Spannungszustand bzw. der primären Spannungsrichtung im Gebirge (derzeitige Druck- bzw. Kollisionsrichtung) zu erhalten, wurden im Erkundungsprogramm

Kapitel 5: Beschreibung der geologischen Verhältnisse

2010/2011 Spannungsmessungen an den Bohrkernen durchgeführt und die Orientierung der drei Hauptspannungen (Sigma 1, Sigma 2 und Sigma 3) ermittelt.

Die Messungen an den Bohrkernen der Bohrungen KS BK 4 bis KS BK 5 ergaben eine primäre Spannungsrichtung (Sigma 1) im Bereich von 138° (KS BK 4) bis 154° (bzw. 334°, die entsprechende gegenüberliegende, parallel Druckrichtung) (KS BK 6). Aufgrund von Erfahrungswerten ist eine lokale Rotation der primären Spannungsrichtung (Sigma 1) über diesen Bereich hinaus möglich.

Die im Gebirge vorhandenen Klufflächen wurden für den Granit aus den Bohrlochscanneraufnahmen ausgewertet und statistisch auf die Maxima der Häufigkeitsverteilung der Klüfte ausgewertet (Die Klufflächen werden in CLARschen-Werten angegeben). Aus den Häufigkeitsverteilungen werden die Hauptkluftrichtungen ermittelt. Die Auswertung des Trennflächengefüges erfolgte mit der Software DIPS v6.0 der Firma Rocscience.

Die Ergebnisse der Kluffgefüge Untersuchungen sind in dem Kapitel 5.3.2 beschrieben, die der Schwächezonanalyse im Kapitel 5.3.3 und die der Spannungsrichtungen im Kapitel 5.4 aufgeführt.

In den geotechnischen Schnitten (Anlage 2), den geophysikalischen Felduntersuchungen (Anlage 6) und geomechanischen Bohrlochversuchen (Anlage 7) sind alle Messdaten, Untersuchungsberichte und Ergebnisdarstellungen zu finden.

5.3.2 Klüftung

Um Aussagen über die Klüftung im Untersuchungsgebiet zu erlangen, wurden Klüfte in den Erkundungsprogrammen 2010/2011 und 2018/2019 hauptsächlich mit bohrlochphysikalischen Untersuchungen und in dem Erkundungsprogramm 2012 mit dem Geologenkompass aufgenommen (siehe Tab. 16).

Tab. 16: Übersicht Aufschlüsse aufgenommener Kluffdaten

Erkundungsprogramm	Aufschlüsse / Bohrungen	Durchgeführte Untersuchungen
2010/2011	KS BK 1 KS BK 2 KS BK 3 KS BK 4 KS BK 5 KS BK 6 KS BK 7 KS BK 8 KS BK 9 KS BK 10 KS BK 11	optische (ETIBS) und akustische (ABF) bohrlochgeophysikalische Untersuchungen
2012	Oberflächenkartierung	Kluffeinmessung mittels Geologenkompass

Kapitel 5: Beschreibung der geologischen Verhältnisse

2018/2019	KS BK 4 (neu) KS BK 101 S KS BK 102 KS BK 103 S KS BK 104 KS BK 106 KS BK 107 KS BK 109 KS BK 111 KS BK 112 KS BK 113 S KS BK 115 S KS BK 116 H KS BK 117	Optische (ETIBS) und akustische (ABF) bohrlochgeophysikalische Untersuchungen
2012 und 2018/2019	Kartierung Franzosenstollen	Klufteinmessung mittels Geologenkompass

Das Abbilden aller aufgenommenen Klüfte nach ihrer Streichrichtung (siehe Abb. 7) zeigt eine Dominanz der NW – SW streichenden Klüfte, die sich durch das Einwirken der Primärspannung (bzw. Kollisionsrichtung) parallel zu ihnen geöffnet haben.

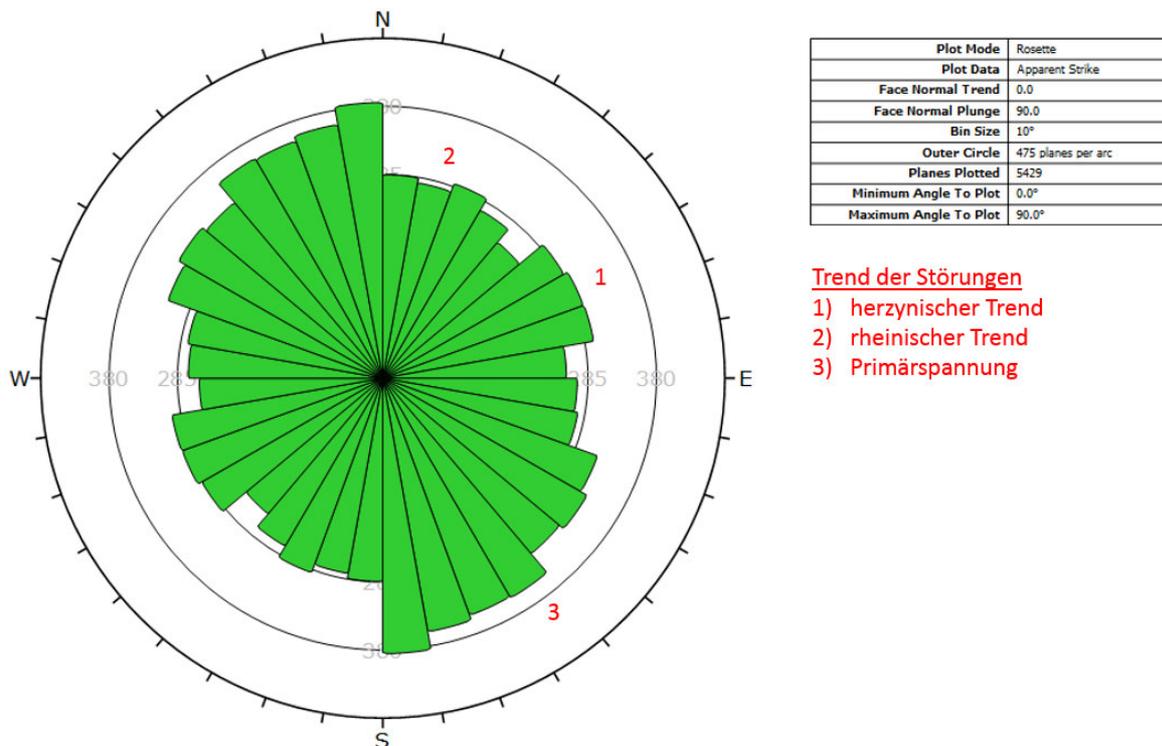


Abb. 7: Darstellung der aufgenommenen Klüfte im Rosendiagramm nach ihrem Streichen.

Beachte: die drei dominierenden Trends (1 herzynischer Trend, 2 rheinischer Trend und 3 der Trend der durch die Primärspannungsrichtung geöffneten Klüfte.). Die induzierten NW - SE streichenden Klüfte der Primärspannung dominieren.

Kapitel 5: Beschreibung der geologischen Verhältnisse

Die Auswertung der Klüfte hinsichtlich ihrer Einfallsrichtung zeigt vier dominierende Kluftrichtungen, die durch die Häufungspunkte (Zentrum der Polpunktswolken bzw. Cluster) 1, 2.1, 2.2, 3.1, 3.2 und 4 ersichtlich sind (siehe Abb. 8). Die dominierenden Kluftrichtungen sind gekennzeichnet durch:

- den Häufungspunkt 1, der **Nordnordwest - Südsüdost (NNW – SSE)** streichende Klüfte wiederspiegelt
- die Häufungspunkte 2.1 und 2.2, die die konjugierten Klüfte der Streichrichtung **Nordwest -Südost (NW - SE)** repräsentieren
- die Häufungspunkte 3.1 und 3.2 der konjugierten Klüfte mit der Streichrichtung **West-südwest – Ostnordost (WSE - ENE)**
- den Häufungspunkt 4, der die **Nordnordost – Südsüdwest (NNE – SSW)** streichenden Klüfte beschreibt

Diese vier Kluftrichtungen lassen sich den im Kapitel 5.3 erläuterten Verlauf der drei Schwächezonennrichtungen, die während der Herzynischen Gebirgsbildung entstanden, zuordnen.

Die Häufungspunkte 1, 2.1 und 2.2 sind auf die derzeit vorherrschende Primärspannungsrichtung Sigma 1 (Kollisionsrichtung Alpidische Gebirgsbildung bzw. der ehemaligen Herzynischen Gebirgsbildung) aus Südost – Nordwest Richtung und deren lokaler Rotation um 145° zurückzuführen.

Der herzynische Trend, der die Schwächezonen der Auf- und Abschiebungen während der Herzynischen Orogenese widerspiegelt, ist durch die Häufungspunkte 3.1 und 3.2 repräsentiert.

Die große Scherzone, an der der Granitkörper des Schwarzwaldes während der Herzynischen Gebirgsbildung aufstieg und dessen Schwächezoneninventar der Forbach-Granit ebenfalls trägt, ist dem rheinischen Trend zuzuordnen und wird durch den Häufungspunkt 4 repräsentiert.

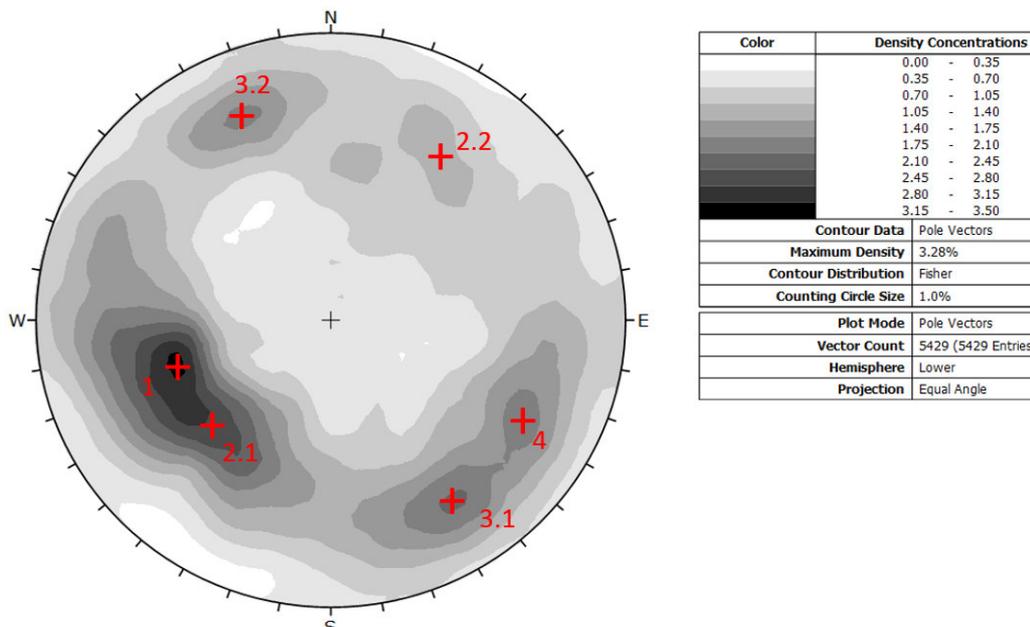


Abb. 8: Statistische Häufigkeitsverteilung der Polpunkte

Kapitel 5: Beschreibung der geologischen Verhältnisse

(Flächennormale auf der Kluffläche projiziert auf die untere Kugelhälfte, der aufgenommenen Klüfte im Untersuchungsgebiet **Beachte:** Vier dominierende Kluftrichtungen (Häufungspunkte 1, 2.1, 2.2, 3.1, 3.2 und 4).

Zusätzlich zu den Bohraufschlüssen wurden zur Untersuchung des Gebirges in den Bauwerksbereichen im Zeitraum 08.10.2012 bis 24.10.2012 insgesamt 25 oberflächennahe, natürliche und künstliche Aufschlüsse, sowie ein Stollen (Franzosenstollen), aufgenommen, um über das Kluffüge und eventuell gestörte Bereiche ergänzende Daten und Informationen zu gewinnen.

Die Lagenkugeldarstellung in Abb. 9 zeigt ein Maximum der Häufigkeitsverteilung im südöstlichen bzw. nordwestlichen Bereich. Dies entspricht einer Nordost-Südwest streichenden Kluftrichtung mit einem Einfallen von ca.:

297-317/80-90 bzw.

115-130/80-90 (konjugierte Richtung)

Des Weiteren tritt ein Maximum der Häufigkeitsverteilung von Nordwest-Südost streichenden Klüften auf. Diese Klüfte besitzen ein Einfallen von ca.:

50-60/65-80 bzw.

230-240/75-90 (konjugierte Richtung)

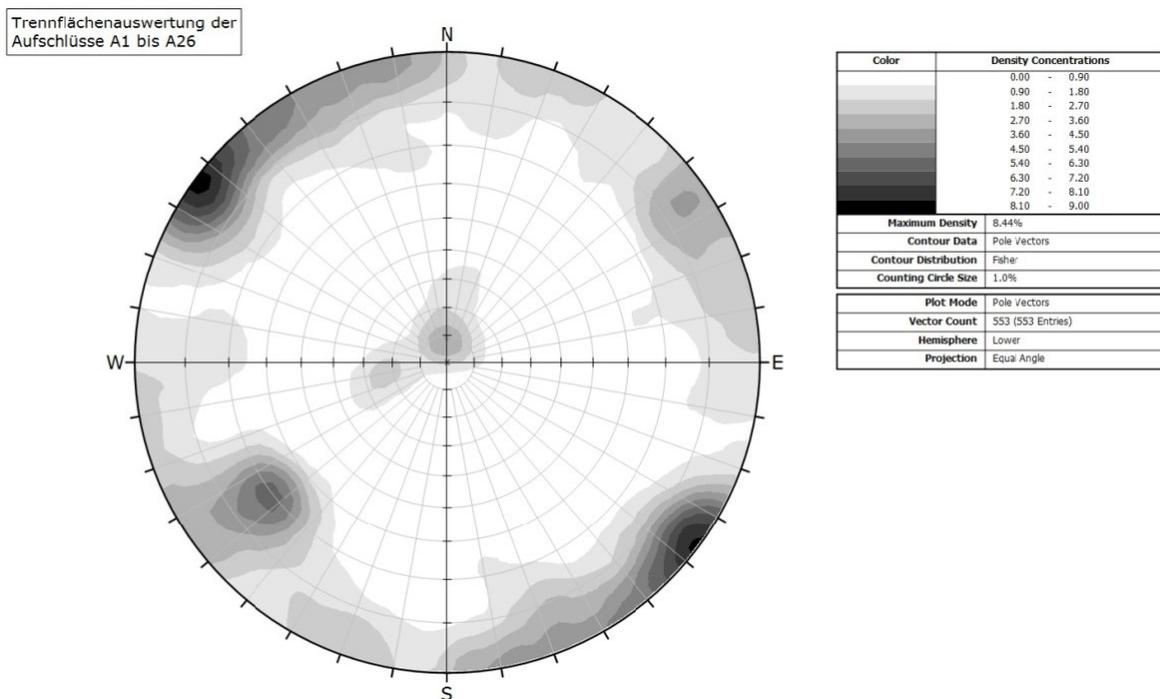


Abb. 9: Statistische Häufigkeitsverteilung der Kluffläche aus den Oberflächenaufschlüssen A 1 bis A 26.

Der Vergleich der Daten aus den Bohrlochsondierungen und den Oberflächenaufschlüssen zeigt neben den unterschiedlichen Maxima der Häufigkeitsverteilung eine deutlich höhere Anzahl an steil stehenden Klufflächen (Einfallswinkel 80° bis 90°) in den Oberflächenaufschlüssen. Die in der Auswertung der Bohrlochsondierungen ermittelten Einfallswinkel von hauptsächlich ca. 60° bis 75° werden dadurch erklärt, dass diese flacheren Einfallswinkel in einer vertikalen Bohrung wesentlich öfter erfasst werden als steilstehende Klüfte gleicher Häufigkeit und steilstehende Klüfte deshalb in

Kapitel 5: Beschreibung der geologischen Verhältnisse

dieser Auswertung unterrepräsentiert sind. In großflächigen Aufschlüssen an der Geländeoberfläche wurde aufgrund der räumlichen Geometrie der Aufschlüsse eine größere Anzahl steilstehender Großklüfte festgestellt.

Um die Gesamtheit aller angetroffenen Klüfte einordnen und klassifizieren zu können, erfolgt eine übergeordnete Einteilung in sechs Hauptkluftrichtungen (HKR), die im Folgenden näher beschrieben und charakterisiert werden.

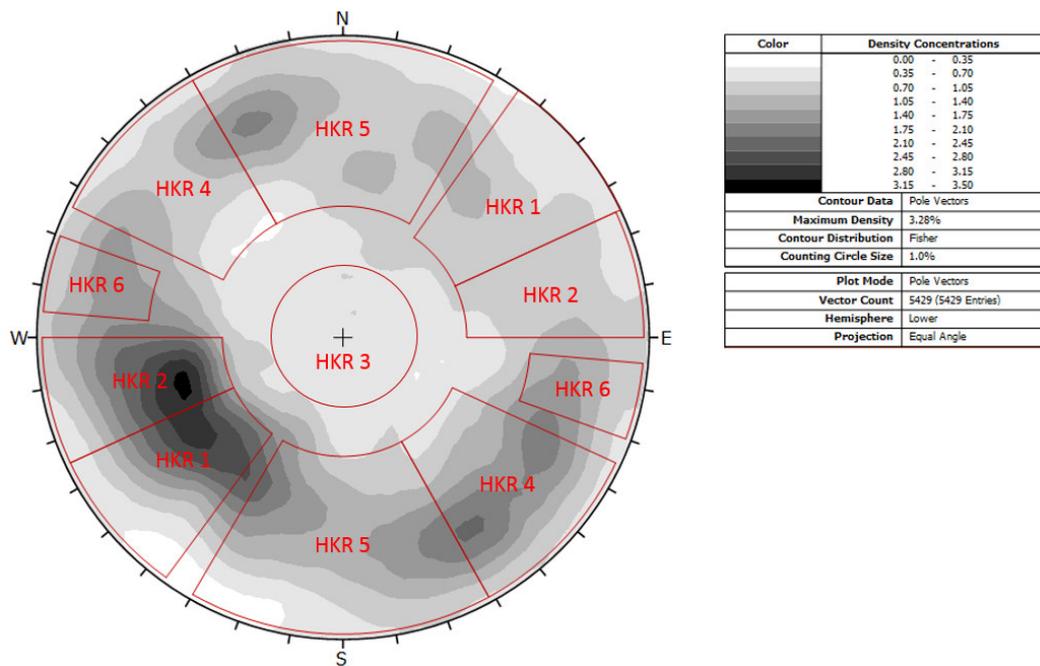


Abb. 10: Statistische Häufigkeitsverteilung der Polpunkte

(Flächennormale auf der Kluffläche projiziert auf die untere Kugelhälfte, **Achtung dies ist nicht die Einfallrichtung der Klufft**) der aufgenommenen Klüfte im Untersuchungsgebiet **Beachte:** Die Einteilung der angetroffenen Klüfte in die sechs Hauptkluftrichtungen (HKR 1 bis HKR 6).

Tab. 17: Übersicht der Hauptkluftrichtungen HKR 1 bis HKR 6, in denen die angetroffenen Klüfte klassifiziert sind

Hauptkluftrichtung (HKR)	Beschreibung	Kluffteinfällen (Clusterpunkt) der HKR (Fallrichtung / Fallwinkel)
HKR 1	Sigma 1, Schwächezone, Runsen a) Bereich 035° – 065° b) Bereich 215° - 245°	a) 60 / 60 b) 215 / 67
HKR 2	Murgtal-Lineament a) Bereich 065° - 090° b) Bereich 245° - 270°	a) 75 / 57 b) 267 / 75
HKR 3	Lagerklüfte	k.A. (kein Clusterpunkt, Klüfte homogen verteilt)

Kapitel 5: Beschreibung der geologischen Verhältnisse

HKR 4	Schwächezone herzynisch (variszisch) a) Bereich 115° - 150° b) Bereich 295° - 330°	a) 117 / 75 und 150 / 75 b) 327 / 75 und 297 / 75
HKR 5	Orthogonal zu Murg- und Rheintalstörung a) Bereich 150° - 210° b) Bereich 330° - 030°	a) 157 / 75 b) 330 / 75 und 30 / 57
HKR 6	Rheintal-Lineament a) Bereich 095° - 110° b) Bereich 275° - 290°	a) 95 / 70 b) 290 / 75

Generell zeigt sich in der Gesamtheit der Klüfte ein Klufteinfallen im Bereich 60° bis 75°. Hinsichtlich der Analyse nach den Hauptkluftrichtungen zeigt es sich, dass das dominierende Klufteinfallen zwischen 70° und 75° beträgt, jedoch bei den HKR 1 und HRK 2 speziell beim Einfallen der Klüfte in Nordost Richtung (Bereich 35° bis 90°) eine Dominanz bei ca. 60° zu finden ist.

HKR 1

Die NW-SE orientierte Hauptkluftrichtung HKR 1 wurde in fast allen untersuchten Aufschlüssen angetroffen. Die Trennflächenabstände sind nach DIN EN ISO 14689-1 häufig weitständig bis sehr weitständig, entlang von Schwächezonen gleicher Orientierung jedoch auch engständig bis außerordentlich engständig.

Es handelt sich bei den Trennflächen der HKR 1 um Klüfte, die parallel zu den im Gebiet vorhandenen, NW-SE orientierten Schwächezonen verlaufen. Aufgrund der dem nahezu parallelen Streichen bzw. Verlauf der Klüfte der HKR 1 zur Primärspannung, handelt es sich um öffnende Klüfte in Richtung Sigma 3 (senkrecht zur Primärspannung Sigma 1). Daher stellen diese Klüfte bedeutende Fluidwegsamkeiten dar. Es wurden daher vermehrt Klufbestege aus Eisen-Mangan angetroffen, die das Resultat zirkulierender hydrothermalen Wässer sind. Völlig verheilte Klüfte wurden aufgrund der öffnenden Tendenz der Klüfte selten entdeckt. Da die HKR 1 eine dominierende Kluft- und Schwächezonenrichtung darstellt, sind häufig Großklufscharen, die einen starken Durchtrennungsgrad bzw. eine deutliche Kluftverdichtung aufweisen, entdeckt worden.

Wie oben beschrieben, zeigen die Klüfte und auch Schwächezonen der HKR 1 mit einem dominierenden Klufteinfallen von ca. 60° ein etwas flacheres Einfallen als die restlichen HKRs (ausgenommen HKR 2, die dem identischen tektonischen Inventar zuzuordnen sind, siehe Kapitel 5.3).

HKR 2

Das NNW-SSE-verlaufende Murgtal prägt die Orientierung der HKR 2. Diese Trennflächen wurden hauptsächlich in den tieferen Bereichen der Erkundungsbohrungen angetroffen. Sie spiegeln das identische tektonische Kluft- bzw. Schwächezoneninventar wie die HKR 1 wieder. Beide Hauptkluftrichtungen sind durch die Primärspannung bzw. Kollisionsrichtung während der Herzynischen und Alpidischen Gebirgsbildung geöffnet worden. Da die HKR 2 dem identischen Spannungssystem, einem sich in Richtung Sigma 3 öffnenden Kluftsystem, wie die HKR 1 angehört, weist sie ähnliche Kluftabstände und Kluftigenschaften (z. B. Klufbestege aus Eisen-Mangan) auf.

Kapitel 5: Beschreibung der geologischen Verhältnisse

Die Trennflächenabstände sind nach DIN EN ISO 14689-1 häufig weitständig bis sehr weitständig, entlang von Schwächezonen gleicher Orientierung jedoch auch engständig bis außerordentlich engständig.

HKR 3

Die durch die Druckentlastung des Granitkörpers bei der Freilegung durch Erosion entwickelten, oberflächenparallel verlaufenden Trennflächen beschreibt die HKR 3. Es handelt sich hier um umlaufende und flach einfallende oder söhliche Trennflächen, die in fast allen Aufschlüssen anzutreffen sind und keine Vorzugsrichtung bezüglich des Kluffeinfallens besitzen. Sie sind häufig mittel- bis weitständig nach DIN EN ISO 14689 und zeigen eine ebene bis gewellte Oberfläche. Sie können als typische Lagerklüfte des Forbach-Granits beschrieben werden.

HKR 4

Die Hauptkluftrichtung 4 (HKR 4) steht nahezu senkrecht zur HKR 1 und ist NE-SW-orientiert. Diese HKR repräsentiert den herzynischen Trend der Klufflächen, die während der Herzynischen Gebirgsbildung entstanden und Auf- bzw. Abschiebungen darstellten. Die Trennflächen sind häufig mittelständig bis weitständig nach DIN EN ISO 14689 angeordnet und bilden große Bruchflächen. Entlang von Schwächezonen gleicher Orientierung verringert sich der Kluftabstand auf engständig bis außerordentlich engständig. In fast allen Aufschlüssen konnte die HKR 4 als dominante Trennflächenschar angetroffen werden.

Aufgrund der nahezu senkrechten Orientierung der Klufflächen der HKR 4 zur Pimärspannung haben die Klüfte eine Tendenz zum Zusammendrücken bzw. Verschließen der Kluftöffnungen. Mögliche Fluidwegsamkeiten werden daher reduziert.

Besonders dominant ist die HKR 4 im Bereich der KS BK 6 (Tiefenbereich 76,00 m u. GOK bis 140,90 m u. GOK) an welcher ein starker Vergrusungsbereich entlang einer Schwächezone erbohrt wurde.

HKR 5

Die Hauptkluftrichtung 5 (HKR 5) ist verläuft orthogonal zu Murg- bzw. Rheintalstörung und E-W orientiert. Sie repräsentiert lokale Rotationen der Spannungsfelder der HKR 1 (Trend der Primärspannungsrichtung) und HKR 4 (herzynischer Trend). HKR 5 wurde in allen Bohrkernen und in den meisten Aufschlüssen im Gelände angetroffen. Die Klüftung ist nach DIN EN ISO 14689 weitständig bis sehr weitständig. Innerhalb von Schwächezonen kann der Kluftabstand aufgrund der erhöhten Kluftdichte bis auf außerordentlich engständig nach DIN EN ISO 14689 abnehmen (u. a. KS BK 107, Tiefenbereich 150 m u. GOK).

Aufgrund der lokalen Rotation des Spannungsfeldes gehören die Klüfte der HKR 5 teilweise zum sich öffnenden Kluftsystem der Primärspannungsrichtung. Daher sind Klüfte der HKR 5, die im Randbereich zur HKR 1 lokalisiert sind, tendenziell offen und hydrothermal überprägt.

HKR 6

Die Hauptkluftrichtung 6 liegt NNE-SSW orientiert und parallel zum Rheintal. Die Trennflächenabstände sind nach DIN EN ISO 14689 weitständig bis sehr weitständig und können innerhalb von

Kapitel 5: Beschreibung der geologischen Verhältnisse

Schwächezonen aufgrund der erhöhten Kluftdichte bis auf außerordentlich engständig nach DIN EN ISO 14689 abnehmen. Besonders dominant sind die Klüfte der HKR 6 in Schwächezonebereichen, die der gleichen Orientierung entsprechen (KS BK 5).

Aufgrund der rezent vorherrschenden Primärspannungsrichtung von $\pm 145^\circ$ kommt es an den Klüften der HKR 6 zu sinsistralen Scherbewegungen. Verheilungen der Klufflächen wurden nicht beobachtet.

Die Bohrlochscans der Bohrungen der Erkundungsprogramme 2010/2011 und 2018/2019 wurden, wie bereits erläutert, über ihre vollständigen Teufenbereiche hinsichtlich des Kluffgefüges ausgewertet.

Des Weiteren fanden im Rahmen spezifischer Auswertungen des Kluffgefüges Analysen für Erkundungsbohrungen in relevanter räumlicher Distanz zu den geplanten Bauwerken in bauwerksrelevanten Bohrteufen (Bauwerksfirste +30 m bis Endteufe) statt.

Darstellungen der Gefügebrauchungen sind in den geotechnischen Längsschnitten der Anlage 2 enthalten:

- an den Bohransatzpunkten jeder Bohrung wurde die Großkreisdarstellung der Trennflächenscharen der Gesamtstrecke jeder Bohrung abgebildet
- am unteren Bohrende jeder Bohrung wurde die Großkreisdarstellung der Trennflächenscharen der Strecke 30 m über Firste der Stollen bis zur Endteufe jeder Bohrung abgebildet

Es ist zu beachten, dass bei einer differenzierten Auswertung des Trennflächengefüges für unterschiedliche Bereiche des Untersuchungsgebietes und unterschiedliche Tiefenbereiche im Gebirge lokal auch Abweichungen in der Verteilung der Häufigkeitsmaxima des Trennflächengefüges bzw. der HKRs auftreten. So dominieren Kluftrichtungen, aufgrund der Kluffverdichtung innerhalb von Schwächezonen, in Bohrungen bzw. Teufenbereiche, die im Bereich von Schwächezonen liegen und deren Orientierung widerspiegeln.

Kluffabstände

Die Kluffabstände variieren je nach Entfernung und Lage zu den Schwächezonen. So wurden Kluffabstände nach DIN EN ISO 14689-1 außerhalb von Schwächezonen häufig weitständig bis sehr weitständig registriert und entlang von Schwächezonen gleicher Orientierung zur Kluff jedoch auch engständig bis außerordentlich engständig.

Kluffweite

Die häufigste Öffnungsweite der angetroffenen Klüfte des Forbach-Granit beträgt ca. 1 mm. Nur bei wenigen Klüften liegt die Kluffweite bei 1 cm und mehr.

Vergrusungen

In allen Bohrungen finden sich Bereiche, die durch Verwitterungserscheinungen, sogenannte Vergrusungen, gekennzeichnet sind. Diese Vergrusungen sind Resultate tektonischer Auflockerung und hydrothermalen Überprägung durch zirkulierende Fluide, und können den Granit entfestigen. Diese Entfestigung bewegt sich im Bereich von leichter Vergrusung bis hin zur vollständigen Entfestigung, sodass das Gestein als Lockermaterial angesprochen werden kann.

Kapitel 5: Beschreibung der geologischen Verhältnisse

Da die Entstehung dieser Vergrusungszonen ihren Ursprung in der tektonischen Auflockerung hat, sind diese Zonen an Klüfte gebunden. Je höher die Deformation in den Klüftbereichen bzw. deren Klüftdichte im Gestein sehr hoch ist, und diese Bereiche optimal (d. h. parallel) zur derzeitigen Primärspannung liegen um eine öffnende Tendenz besitzen und somit höffig für Fluidzirkulation sind, kommt es zu starken Vergrusungen.

Vergrusungszonen die eine ähnliche räumliche Orientierung und Eigenschaften besitzen und somit einander zugeordnet werden können, sind als Schwächezonen identifiziert und im folgenden Kapitel 5.3.3 näher beschrieben.

Bei der Analyse der Orientierung der Klüfte in den Vergrusungszonen (siehe Abb. 11) sieht man eine Dominanz der Hauptklüfrichtungen HKR 2 und HKR 6.

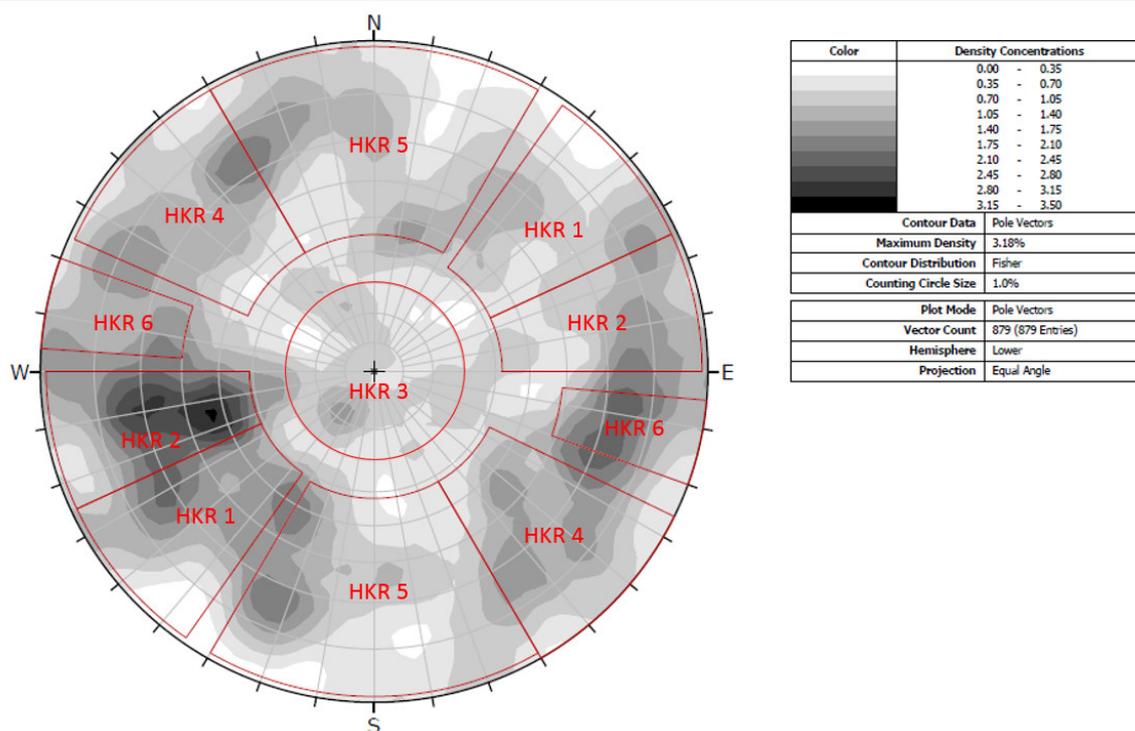


Abb. 11: Statistische Häufigkeitsverteilung der Polpunkte

(Flächennormale auf der Klüftfläche der Vergrusung projiziert auf die untere Kugelhälfte, der aufgenommenen Klüfte im Untersuchungsgebiet Beachte: Die Einteilung der angetroffenen Klüfte in die sechs Hauptklüfrichtungen (HKR 1 bis HKR 6). Dominierend sind die Vergrusungen mit der Orientierung HKR 1/HKR 2 und HKR 6.

Es muss darauf hingewiesen werden, dass in Zonen starker Vergrusung eine eindeutige Klüftidentifikation aufgrund hoher Klüftdichte und tektonischer Auflockerung nicht immer möglich war, sodass die Anzahl der Klüfte in großen Vergrusungszonen unterrepräsentiert ist. Dies betrifft besonders die Vergrusungen, die optimal zur derzeitigen Primärspannungsrichtung liegen (HKR 1). Nichtsdestotrotz zeigt die Analyse der Vergrusungszonen, dass Klüfte der HKR 2 und HKR 6 in Vergrusungszonen deutlich vertreten sind bzw. diese Hauptklüfrichtungen Vergrusungszonen bilden.

Kapitel 5: Beschreibung der geologischen Verhältnisse

Diese Hauptkluftrichtungen entsprechen den tektonischen Trends der NNW-SSE streichenden Primärspannung bzw. Kollisionsrichtung (HKR 2 und HKR 1) und dem NNE-SSW verlaufenden rheinischen Trend (HKR 6). Nach dem tektonischen Strukturinventar und der derzeitigen herrschenden Primärspannungsrichtungen sind diese Hauptkluftrichtungen als besonders höffig für Fluidzirkulation und daraufhin für eine Vergrusung einzuschätzen.

Da sich wie oben beschrieben Vergrusungszonen in Bereichen hoher tektonischer Auflockerung und Fluidhöffigkeit konzentrieren, sind Vergrusungszonen zudem besonders im oberflächennahen erosionsbedingtem Auflockerungsbereich, an großen Schwächezonen und vor allem in deren Kreuzungsbereichen zu finden. So wurden Vergrusungen mit Anteilen über 20 % an der Gesamtkernstrecke einer Bohrung bei den Bohrungen KS BK 111 (Kreuzungsbereich Schwächezonen 10, 16 und 5), KS BK 7 (Kreuzungsbereich Schwächezonen 14, 17, 16 und 10), KS BK 6 (Kreuzungsbereich Schwächezonen 14, 15 und 3) und KS BK 109 (Kreuzungsbereich Schwächezonen 7 und 9) festgestellt. Aufgrund der oberflächennah wirkenden Erosion (Auflockerung und Niederschlagswassereindring) sind oberflächennahe Bereiche besonders stark durch Vergrusungen betroffen und können Anteile von Vergrusungen an der Gesamtbohrstrecke bei weniger tiefen Bohrungen von über 50 % erreichen.

Die Darstellungen der Trennflächenauswertungen innerhalb der vergrusteten Gebirgsbereiche sind in den geotechnischen Längsschnitten Anlage 2 enthalten:

- am Bohransatzpunkt wurde die Großkreisdarstellung der Trennflächenscharen der Gesamtstrecke jeder Bohrung abgebildet.
- am unteren Bohrende wurde die Großkreisdarstellung der Trennflächenscharen der Strecke 30 m über Firste der Stollen bis zur Endteufe jeder Bohrung abgebildet.

Es ist zu beachten, dass aufgrund der hauptsächlich vertikalen Bohrrichtung bei der Abteufung der Bohrungen, vertikale bzw. parallel zur Bohrrichtung verlaufende Klüfte schwer zu erkunden sind. So kann es dazu kommen, dass diese vertikalen Klüfte in den Bohrungen unterrepräsentiert sind.

5.3.3 Schwächezonen

In der Auswertung 2018 / 2019 wurden Bereiche zu Schwächezonen zusammengefasst, in denen an Hand der Erkundungsergebnisse markante Zunahmen der Klüftigkeit bzw. Klüftdichte, bzw. der höheren Verwitterung/Vergrusung zu finden sind und die aufgrund ihrer Lage und räumlichen Orientierung als auch hinsichtlich ihrer Eigenschaft (u. a. Auflockerungsbreite) mit mindestes zwei weiteren Zonen zusammenführbar sind. Diese so ermittelten Flächen wurden dann als potentielle Schwächezonen größerer räumlicher Ausbreitungen prognostiziert.

Im Rahmen dieser Analyse wurden dreiundzwanzig potenzielle Schwächezonen ermittelt. Die Gesamtheit der Schwächezonen verläuft gemäß dem tektonischen Strukturinventar der Herzynischen bzw. Variszischen Gebirgsbildung. Drei Schwächezonen können dem herzynischen Trend (1), fünf Schwächezonen dem rheinischen Trend (2) und fünfzehn Schwächezonen der aktuellen Primärspannungsrichtung (Sigma 1, (3)) zugeordnet werden (siehe Abb. 12).

Kapitel 5: Beschreibung der geologischen Verhältnisse

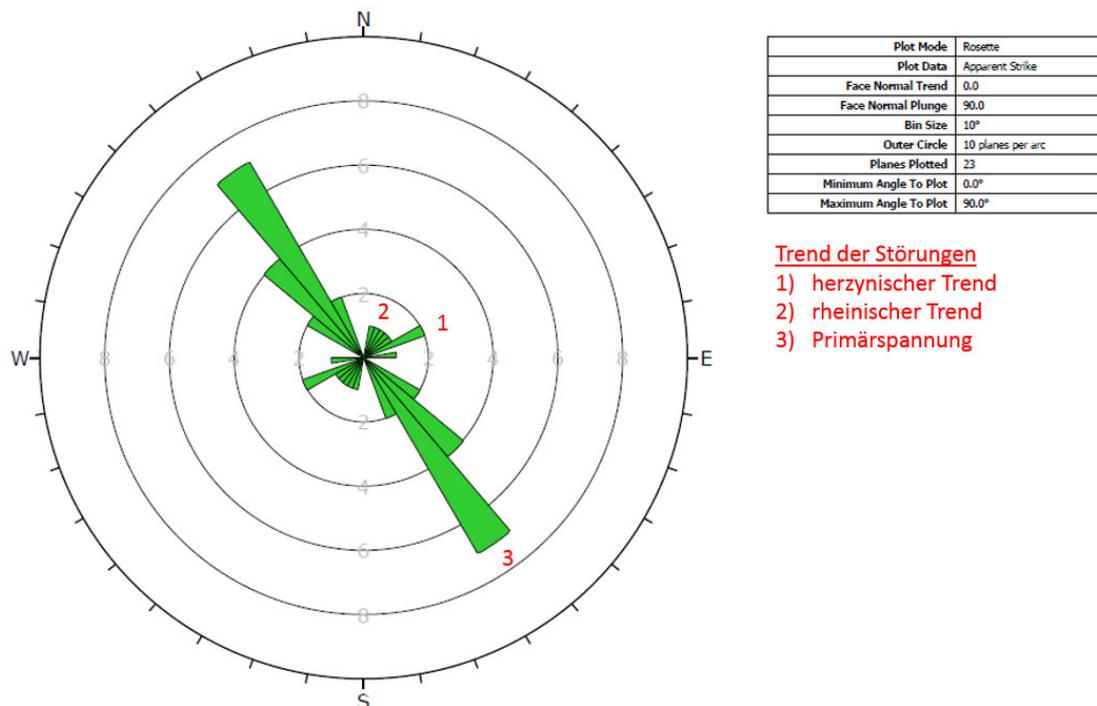


Abb. 12: Rosendiagramm der Streichrichtung der aufgefundenen Schwächezonen.

Beachte: Die Orientierung der Schwächezonen folgt dem Schwächezoneninventar der Herzynischen Gebirgsbildung (1 bis 3, siehe Kapitel 5.3). Der Trend der Primärspannung (3) dominiert.

Wie auch bei der Anzahl der Klüfte (siehe Kapitel 5.3.2) dominieren auch hier die Schwächezonen der HKR 1 und HRK 2 Orientierung, die der aktuellen Primärspannungsrichtung und den daraus induzierten Öffnen von Schwächezonen und Klüften parallel zu dieser entsprechen.

Eine eindeutige räumliche Häufung von Schwächezonen wurde nicht erkannt, sodass von einer relativ homogenen Verteilung der Schwächezonen im Untersuchungsgebiet auszugehen ist. Allerdings kommt es im Bereich des Hauptstollens (KS BK 6 bis KS BK 116H) zu mehreren Kreuzungspunkten von möglichen Schwächezonen, bei denen mit einer höheren Deformation und daher mit einer Auflockerung des Forbach-Granits in diesen Bereichen zu rechnen ist. Dies belegen auch die Ergebnisse der Vergrusungszonen (siehe Kapitel 5.3.2).

Generell sind alle Schwächezonen durch eine stark zunehmende Kluftverdichtung gekennzeichnet. Der Kluftabstand verdichtet sich von außerhalb der Schwächezone von mittelständig bis sehr weitständig bis auf engständig bis außerordentlich engständig nach DIN EN ISO 14689-1 innerhalb der Schwächezone. Innerhalb der Schwächezone stellen Klüfte, die parallel zum derzeitigen Spannungsfeld (ca. 145°, siehe Kapitel 5.4) verlaufen und somit tendenziell offen sind, Fluidwegsamkeiten dar.

In allen Erkundungsbohrungen, besonders in den Schwächezonebereichen, finden sich Verwitterungserscheinungen in Form von Vergrusungen, die mit großer Wahrscheinlichkeit aufgrund hoher tektonischer Beanspruchung in Verbindung mit dem Einwirken hydrothermale Fluiden verursacht wurden. In diesen Bereichen kann der kompetente Granit lokal vollständig zersetzt sein.

Die Breite einer Schwächezone variiert je nach mechanischer Bewegung des Gesteins an der Schwächezone und der hydrothermalen Fluideinwirkung in diesem Bereich. Im Untersuchungsgebiet konnten an den dreiundzwanzig Schwächezonen vierzehn Schwächezonebereichen ermittelt

Kapitel 5: Beschreibung der geologischen Verhältnisse

werden. Die Schwächezonebreite variiert im Bereich von ca. 0,5 m bis ca. 16,0 m. Es ist zu beachten, dass es innerhalb der Schwächezonebreite lokal zu Bereichen mit kompetenten Graniten kommen kann.

Neun Schwächezonen besitzen eine Schwächezonebreite von unter 10 m und fünf Schwächezonen über 10 m. Eine Häufung von Schwächezonen mit Breiten von über 10 m bzw. unter 10 m wurde nicht erkannt.

In der Tab. 18 sind die aufgefundenen Schwächezonen aufgelistet, ihre gemittelte Orientierung und Breite aufgeführt, sowie die Bauwerke an denen die jeweilige Schwächezone verläuft, benannt.

Aufgrund lokal variierender struktur-geologischer Bedingungen können keine gesicherten Aussagen darüber getroffen werden, bei welcher Stationierung und mit welcher exakten Orientierung die prognostizierten Schwächezonen beim Auffahren der Bauwerke angetroffen werden. Auch das Vorhandensein von Schwächezonen, die aufgrund des nur punktuellen Abteufen der Bohraufschlüsse nicht erkundet werden konnten, kann nicht ausgeschlossen werden, bzw. ist wahrscheinlich.

Tab. 18: Übersicht der prognostizierten Schwächezonen im Untersuchungsgebiet

Lf.-Nr.	Bezeichnung	Gemittelte Orientierung (Fallrichtung [°] / Fallwert [°]) und zugehörige HKR	Breite der Schwächezone [m] senkrecht zur Fläche der Schwächezone (Breite Hom F2 / Breite Hom F3)	Bauwerke im Schwächezonebereich
1	S-A11	240 / 80 (HKR 1)	k.A.	Hauptsollen (nördlicher Teil) im Bereich Auslaufbauwerk
2	S-A12	50 / 70 (HKR 1)	k.A.	keine
3	S-A1-A2-A20	38 / 69 (HKR 1)	k.A.	Hauptstollen, EAbS OS/US im Bereich Zufahrtsstollen Portalbauwerk
4	S-A2-A3	215 / 80 (HKR 1)	k.A.	Hauptstollen
5	S-A4-A23	43 / 80 (HKR 1)	k.A.	Hauptstollen
6	S-B104-A15	50 / 43 (HKR 1)	6 – 8 (4 – 5 / 2 – 3)	Nebenstollen I und II, Hauptstollen, EAbS US, Zufahrtsstollen KKW, Zugangsstollen Murg, OWS Murg
7	S-B104-B109	41 / 68 (HKR 1)	6 – 12 (4 – 11 / 1 – 3)	Nebenstollen I - IV, Hauptstollen, EAbS OS
8	S-B109	224 / 55 (HKR 1)	11 – 13 (9 – 10 / 2 - 3)	keine
9	S-B109-E	300 / 70 (HKR 4)	7 – 9 (6 – 7 / 1 – 2)	EAbS OS, Nebenstollen I - IV
10	S-B111	51 / 56 (HKR 1)	18 – 20 (16 – 17 / 2 – 3)	Hauptstollen
11	S-B1-B2-B4	53 / 56 (HKR 1)	6 – 13 (4 – 12 / 1 – 2)	OWS SB
12	S-B1-B2-B4-B103	53 / 53 (HKR 1)	2 – 7 (1 – 6 / 0 – 1)	Hilfsstollen KKW, KKW
13	S-B1-B2-B4-B103-2	45 / 56 (HKR 1)	1 – 6 (1 – 6 / 0)	EAbS OS, UWS SB, KKW
14	S-B5-B6-B107	103 / 67 (HKR 6)	10 – 19 (8 – 11 / 2 – 8)	Hauptstollen, Nebenstollen V – VI, EAbS OS/US, Schutterstollen, Zufahrtsstollen KKW
15	S-B6-B104-B107	315 / 67 (HKR 4)	1 – 7 (1 – 5 / 1 – 2)	EAbS OS, Nebenstollen V - VI

Kapitel 5: Beschreibung der geologischen Verhältnisse

16	S-B7-A10-A25	246 / 81 (HKR 2)	1 – 2 (0 / 1 – 2)	Hauptstollen
17	S-B7-A3-A22	54 / 64 (HKR 1)	6 – 7 (0 / 6 – 7)	Hauptstollen
18	S-B9-B107	59 / 68 (HKR 1)	1 – 2 (1 – 2 / 0 – 1)	Nebienstollen V, EAbS OS/US, Zufahrtsstollen KKW
19	S-G103-A5	171 / 87 (HKR 5)	k.A.	EAbS US, Zufahrtsstollen KKW, Schutterstollen
20	S-V1-N	329 / 90 (HKR 4)	k.A.	keine
21	S-V1-S	331 / 90 (HKR 5)	k.A.	keine
22	S-V2	330 / 75 (HKR 4)	k.A.	keine
23	S-B2-B3	111 / 78 (HKR 6)	2 – 3 (0 – 3 / 1 – 3)	EAbS OS

k.A. – keine Angabe, Schwächezone wurde nur an Geländeoberfläche erkundet, eine Schwächezonenerbreitenmessung war nicht möglich

5.4 Primärspannungen

Der primäre Spannungszustand ist der Spannungszustand, der vor bautechnischen Eingriffen im unverritzten Gebirge herrscht. Die Primärspannungsverhältnisse haben sich im Lauf geologischer Zeiträume entwickelt und sind von tektonischen Kräften, der Ablagerung und Verfestigung des Gesteins sowie der Geomorphologie geprägt.

Ergebnisse von Primärspannungsmessungen im Bereich der Süddeutschen Großscholle zeigen i. A. großräumig folgende Tendenzen:

- die Vertikale ist eine Hauptspannungsrichtung, die Vertikalspannung S_v entspricht i. A. dem Auflastdruck des Gebirges.
- Die größere horizontale Hauptspannung S_H ist i. A. nahezu gleich oder größer S_v .
- Die kleinere horizontale Hauptspannung S_H ist i. A. kleiner oder gleich S_v .
- Die größere horizontale Hauptspannung S_H ist in etwa NW-SE ausgerichtet.
- nahe der Oberfläche, insbesondere in der Nähe von Tälern, sind die Spannungsverhältnisse durch die Geomorphologie und verwitterungsbedingte Gebirgsentfestigung stark beeinflusst.
- in der Nähe von Schwächezonen können Primärspannungsverhältnisse auftreten, die vom großräumigen Gesamtbild abweichen.

Der Nordschwarzwald besitzt infolge der Entwicklung des Rheintalgrabens ein regional und vertikal differenziertes Primärspannungsbild, bei dem die kristallinen Gesteine an der Basis und die dem Kristallin auflagernden Sedimentgesteine gesondert zu betrachten sind.

Im Allgemeinen ist in den Sedimentgesteinen des Buntsandsteins und des Zechsteins eine durch die aktuelle Überlagerung bestimmte Vertikalspannung und eine entsprechend der topografischen Situation geprägte, von der Vertikalspannung abhängige Horizontalspannung, die i. A. geringer ist als die Vertikalspannung, vorhanden.

Die Primärspannungen im Kristallin sind durch die Abkühlung des Magmakörpers während der Verfestigung einerseits und durch die tektonischen Beanspruchungen des Gebirges in der Phase der Heraushebung aus dem Untergrund andererseits geprägt.

Kapitel 5: Beschreibung der geologischen Verhältnisse

Im Zuge der Erkundungsmaßnahmen im Jahre 2010/2011 für das Pumpspeicherwerk Forbach wurden fünf auswertbare Primärspannungsmessungen nach der Bohrlochentspannungsmethode mittels Triaxialzellen durchgeführt. Alle Primärspannungsmessungen erfolgten im Forbach-Granit im Areal des geplanten Kavernenfeldes. Die wesentlichen Ergebnisse sind grafisch in der Abb. 13 dargestellt. Die ausführlichen Messergebnisse aus dem Jahre 2010/2011 sind im entsprechenden geotechnischen Gutachten zusammengestellt.

Die Ergebnisse aus den Untersuchungen im Jahre 2010/2011 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.

Bohrung Nr.	Messteufe	S1	S2	S3	Orientierung S1		I ₁	Wurzel(J ₂)
	m	MN/m ²	MN/m ²	MN/m ²	Fallrichtung	Neigung		
KSBK4	96,0	4,96	2,68	1,87	138	1	3,17	1,60
KSBK4	143,5	7,40	3,88	2,76	149	2	4,68	2,42
KSBK5	136,7	6,80	3,62	2,50	326	2	4,31	2,23
KSBK5	154,5	5,76	4,10	2,00	141	1	3,95	1,88
KSBK 6	129,0	5,77	3,58	2,30	334	6	3,88	1,75

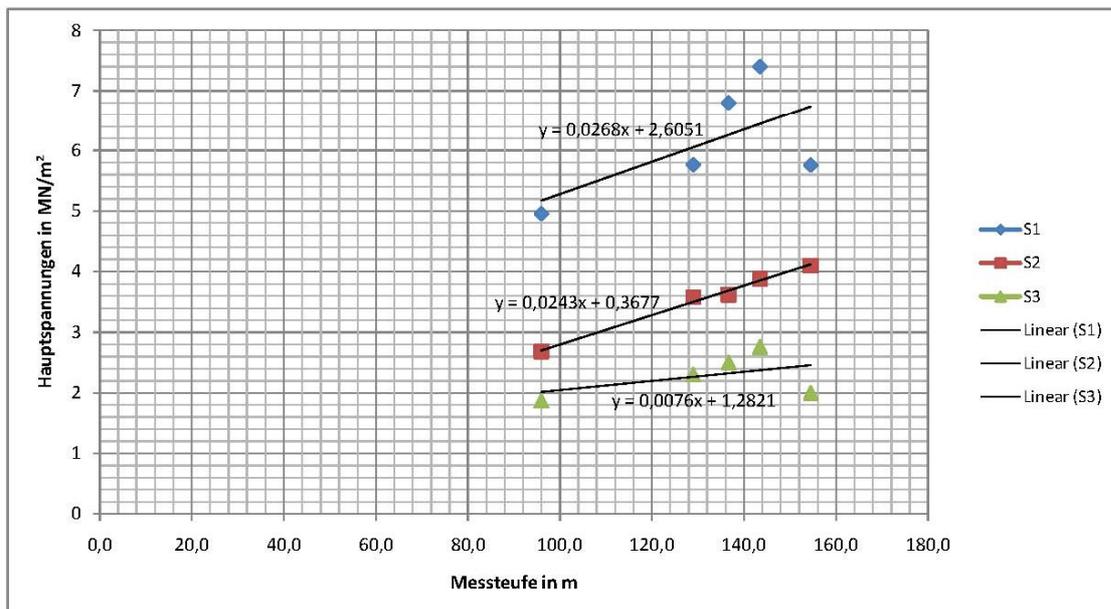


Abb. 13: Ergebnisse der Primärspannungsmessungen im Bereich des Kavernenwasserspeichers

5.5 Erdbeben

Nach der im Eurocode 8 veröffentlichten Karte sowie der Karte der Erdbebenzonen für Baden-Württemberg, M 1:350.000 des Landesvermessungsamtes Baden-Württemberg liegt das Projektgebiet in der Erdbebenzone 1. Der Bauwerksbereich ist entsprechend den bezeichneten Unterlagen der Untergrundklasse R (Gebiete mit felsartigem Gesteinsuntergrund) zuzuordnen. Des Weiteren ist der Baugrund gemäß DIN 4149:2005-04 der Baugrundklasse A (unverwitterte (bergfrische) Festgesteine mit hoher Festigkeit) bzw. teilweise der Baugrundklasse B (mäßig verwitterte Festgesteine bzw. Festgesteine mit geringer Festigkeit) zuzuordnen.

Die Erdbebenzonen beruhen auf der Berechnung der Erdbebengefährdung auf dem Niveau einer Nicht-Überschreitungswahrscheinlichkeit von 90 % innerhalb von 50 Jahren für die Erdbebenzonen-spezifischen Intensitätswerte (EMS-Skala).

In der Erdbebenzone 1 sind gemäß Tabelle 2 der DIN 4149:2005-04 rechnerisch die Intensitäten $6,5 < I < 7$ zu erwarten. Dies bedeutet, dass für die Bemessung von solchen, durch den Anwendungsbereich der DIN 4149:2005-04 erfassten Bauwerke des Hochbaus der Bemessungswert der Bodenbeschleunigung mit $0,4 \text{ m/s}^2$ anzusetzen ist.

Für Stauanlagen sind die Vorgaben gemäß DIN 19 700-10:2004-07, Kapitel 8.4 zu beachten.

Die regionalen und lokalen seismologischen Verhältnisse sind einem externen seismologischen Gutachten erfasst, siehe [17].

5.6 Räumliche Darstellung Schwächezonen

Wie bereits in Kap. 5.3.3 dargestellt, wurden im Zuge der Auswertung von Bohrkernen, Kluffinventar und den durchgeführten Versuchen Bewertung von Vergrusungsbereichen vorgenommen. Innerhalb der als Vergrusungszonen identifizierten Bereiche wurden die Hauptkluffrichtungen/-orientierungen ermittelt und diese programmgestützt ausgewertet und dargestellt.

Hierzu wurde zuerst ein digitales Geländemodell sowie bereits erarbeitete 3D-Darstellungen der geplanten Bauwerke zusammen mit den durchgeführten Bohrungen in das Programm implementiert (siehe Abb. 14).

In die räumliche Darstellung der Bohrpunkte und deren Profile wurden für Bohrabschnitte mit festgestellter Vergrusung die in den jeweiligen Bereichen charakteristischen Kluffgefüge ermittelt und in Form von entsprechen orientierten Scheiben („Tellern“) dargestellt (siehe Abb. 15).

Als nächster Schritt wurde überprüft, welche Klufforientierungen der Vergrusungszonen in ihrem räumlichen Bezug mit weiteren Vergrusungszonen übereinstimmen. Bei mehr als zwei Übereinstimmungen wurden die Vergrusungszonen zu potentiellen Schwächezonen verbunden. Anschließend wurden diese möglichen Schwächezonen mit Bezug auf die ermittelten Hauptkluffrichtungen, weiteren Bohrdaten und mit Bezug auf ihre Wahrscheinlichkeit unter Berücksichtigung der vorhandenen Erkenntnisse zur geologischen und tektonischen Entstehung des Untersuchungsgebietes hin überprüft. Ergaben sämtliche Prüfungskriterien ein schlüssiges Bild, so wurde in dem Programm eine

Kapitel 5: Beschreibung der geologischen Verhältnisse

Fläche dargestellt, die einen möglichen Verlauf der jeweiligen potentiellen Schwächezonen darstellt (s. Abb. 16 und Abb. 17).

Die dargestellten Linien sind entsprechend als Bereiche höherer Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Vergrusungsbereichen und nicht als exakt definierte Flächen anzusehen.

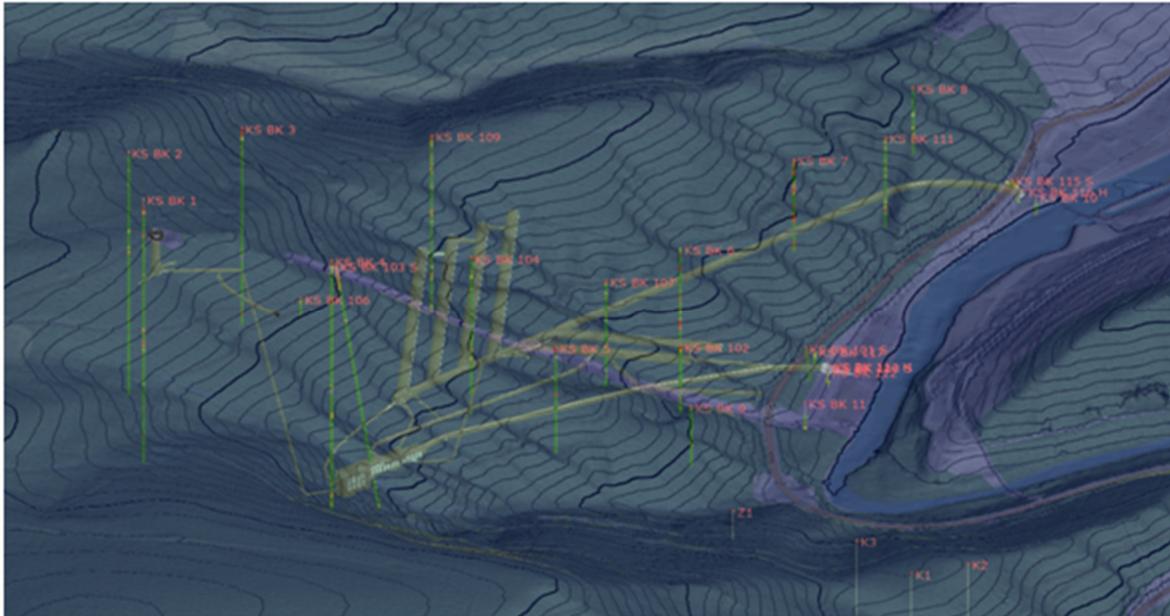


Abb. 14: Halbtransparente Darstellung der Topographie im Untersuchungsgebiet mit Bohrprofilen und schematischen Bauwerksdarstellungen

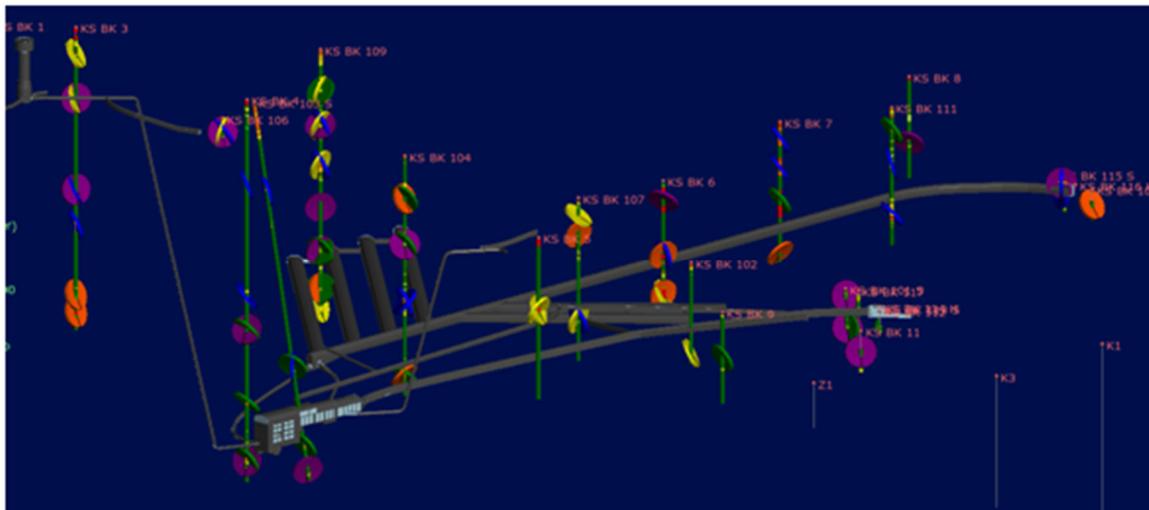


Abb. 15: Bauwerke und Bohrprofile mit den in Bereichen von Vergrusungszonen dargestellten Scheiben, welche gemäß der tiefenbezogenen ermittelten Hauptkluftrichtungen orientiert sind

Kapitel 5: Beschreibung der geologischen Verhältnisse

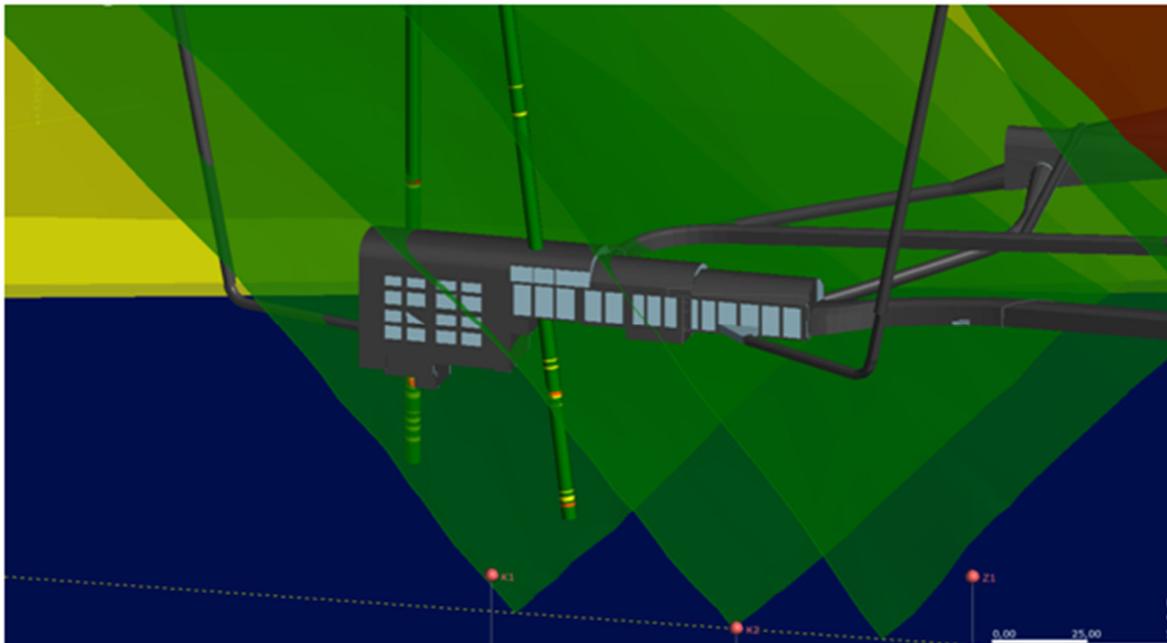


Abb. 16: Darstellung möglicher Schwächezonen im Bereich der Kraftwerkskaverne

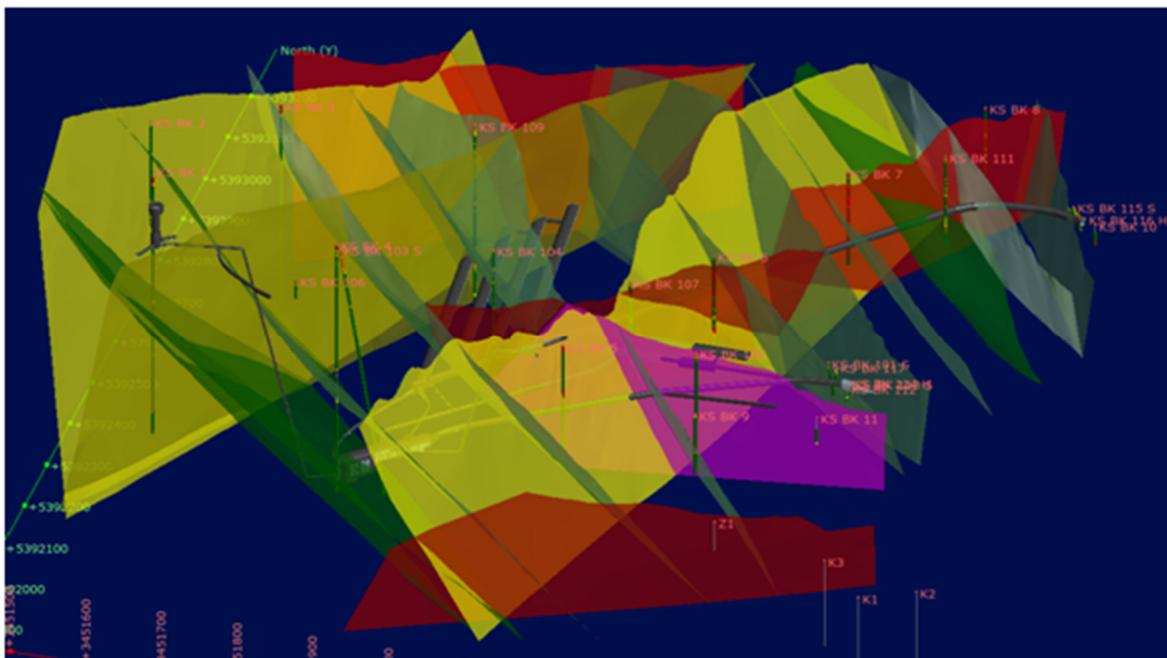


Abb. 17: Gesamtdarstellung möglicher Schwächezonen im Bereich des Untersuchungsgebietes

6 Beschreibung der hydrogeologischen Verhältnisse

6.1 Hydrostratigraphie

6.1.1 Überblick

In den verschiedenen geologischen Einheiten werden aufgrund ihrer verschiedenen Lithologie, ihrer Klüftung und ihrer räumlichen Lage unterschiedliche hydrogeologische Verhältnisse angetroffen.

Bei den Festgesteinen, die hier ausschließlich aus dem Forbach-Granit gebildet werden, ist allgemein eine sehr geringe Wasserdurchlässigkeit der Matrix festzustellen, das Wasser ist hier in der Regel adhäsiv gebunden; die Wasserzirkulation findet praktisch ausschließlich in Klüften statt.

Im Bereich der geplanten Unterstufe können grundsätzlich zwei hydrogeologische Einheiten unterschieden werden:

- Forbach-Granit (Grundwasserhemmer bis Grundwassernichtleiter, im frischen Zustand ausschließlich Klüfte als Wasserwege, im vergrusten Zustand überwiegend Porenräume als Wasserwege)
- Quartäre Lockergesteinsdecken (Porengrundwasserleiter)

Im Bericht zur Bestandsaufnahme des RP Karlsruhe im Rahmen der WRRL wird die hydrogeologische Einheit „Paläozoikum, Kristallin“ als Grundwassergeringleiter (GWG) bezeichnet und das Grundwasservorkommen im Forbach-Granit wie folgt beschrieben [27]:

„Die Grundwasserführung im Kristallin erfolgt meist oberflächennah in der Auflockerungszone der Granite und Gneise. Diese Zone wird häufig von Hangschutt überlagert, in dem ebenfalls Grundwasser zirkuliert. Die Grundwasservorkommen sind räumlich eng begrenzt und voneinander isoliert. Die Entwässerung erfolgt über Quellen mit geringer und stark schwankender Schüttung. Stellenweise findet man im Kristallin in größeren Tiefen auch Kluffgrundwasser. Wegen der längeren Verweilzeit im Untergrund weist dieses Wasser oft eine erhöhte Mineralisation auf.“

6.1.2 Forbach-Granit

6.1.2.1 Durchlässigkeiten des Forbach-Granits

Literaturangaben

Der Forbach-Granit wird allgemein als gering wasserdurchlässig angesehen, nach STOBER (1995) ist die eigentliche Gesteinsmatrix nahezu undurchlässig. Allerdings bildet das Kluftsystem im Kristallin ein zusammenhängendes Netzwerk, das sehr engständig sein kann, „so dass das Strömungsverhalten demjenigen eines homogenen isotropen Aquifer mit entsprechend hohen Durchlässigkeiten gleichkommt.“ Dies gilt jedoch nur bei entsprechend großer Skalierung über mehrere hundert Meter. Da die Kluftverteilung bei kleinräumiger Betrachtung sehr unterschiedlich sein kann, können auch die Durchlässigkeiten stark variieren.

STOBER (1995) ermittelte Transmissivitäten (T) im Kristallin des Nördlichen und Mittleren Schwarzwalds zwischen $5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ und $1 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$.

Die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) (1988) in BENDER (1995) verwendete in Modellrechnungen für die obersten Partien der Nordschwarzwälder Granitplutone Durchlässigkeiten von $1 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$; BENDER geht für das Thermalwassersystem innerhalb der Nordschwarzwälder Granitmassivs von einem kf-Wert von $1 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$ aus.

Kapitel 6: Beschreibung der hydrogeologischen Verhältnisse

Hydraulische Tests im Forbach-Granit (ohne WD-Tests)

In den folgenden Tabellen sind die insgesamt 35 durchgeführten hydraulischen Tests zusammengestellt.

Tab. 19: Ergebnisse der hydraulischen Tests im Forbach-Granit an der Unterstufe (ohne WD-Tests) im Zuge der Bohrkampagne 2010/2011

Bohrung / getesteter Abschnitt	Test Datum	ermittelte Transmissivität	Hinweise
KS BK 2 (172,0 - 370,0 m)	D/A und KPV 16. - 17.02.11	T = $9 \cdot 10^{-7}$ m ² /s (Pumpphase) T = $1,3 \cdot 10^{-6}$ m ² /s (Wiederanstieg)	Ruhepotential am 16.02.11: 5,12 m über Gelände Artesischer Überlauf, 0,11 l/min
KS BK 2 (52,2 - 370,0 m)	D/A und KPV 22.02.11	T = $4 \cdot 10^{-6}$ m ² /s (Pumpphase) T = $4 \cdot 10^{-6}$ m ² /s (Wiederanstieg)	Ruhepotential am 22.02.11: 8,45 m über Gelände Artesischer Überlauf, 1,8 l/min
KS BK 2 (11,0 - 370,0 m)	KPV 23. - 24.02.11	T = $4 \cdot 10^{-6}$ m ² /s (Pumpphase) T = $4,3 \cdot 10^{-6}$ m ² /s (Wiederanstieg)	Ruhepotential am 23.02.11: 1,80 m über Gelände Artesischer Überlauf, 0,12 l/min
KS BK 5 (0,0 - 162,0 m)	KPV 15.02.11 und 16.02.11	T = $3,0 \cdot 10^{-6}$ m ² /s (Pumpphase) T = $1,0 \cdot 10^{-4}$ m ² /s (Wiederanstieg)	Ruhewasserspiegel: 10,03 m u. GOK Ermittelte T aus der späteren Pumpphase (16.02.) liegt um den Faktor 30 unter dem Wert der früheren Pumpphase und dem Wiederanstieg. Vermutlich wurde im Laufe der Pumpphase ab einem Wasserstand von ca. 25 m u. GOK flachere Klüftbereiche trockengelegt bzw. laufen diese frei in die Bohrung aus. Somit repräsentiert der niedrigere T-Wert den Bereich unterhalb ca. 25 m, der höhere T-Wert die Ergiebigkeit der Gesamtbohrung
KS BK 5 (96,8 - 160,6 m)	KPV 17. - 18.02.11	T = $1 \cdot 10^{-6}$ m ² /s (Pumpphase) T = $1 \cdot 10^{-6}$ m ² /s (Wiederanstieg)	Ruhewasserspiegel: 8,4 m u. GOK
KS BK 5 (120,0 - 160,0 m)	PV 30.03.11 - 01.04.11	T = $1,0 \cdot 10^{-6}$ m ² /s (Pumpphase) T = $4,1 \cdot 10^{-7}$ m ² /s (Wiederanstieg)	Ruhewasserspiegel: 7,63 m u. GOK
KS BK 7 (0,0 - 139,5 m)	D/A 27.01.2011	T = $3,1 \cdot 10^{-6}$ m ² /s	Ruhewasserspiegel 2,84 m u. GOK T, kf: Abschätzung aus Wiederanstieg für Gesamtbohrloch
KS BK 9 (72,0 - 90,0 m)	D/A 24. - 25.01.11	T = $2 \cdot 10^{-5}$ m ² /s	Ruhepotential zw. 20 und 30 m über Gelände T: Abschätzung aus Druckabsenkung bei Auslauf
KS BK 10 (13,5 - 16,0 m)	KRI	T = $8,6 - 9,1 \cdot 10^{-5}$ m ² /s	

Kapitel 6: Beschreibung der hydrogeologischen Verhältnisse

Legende zu Tab. 19:

KPV: Kurzpumpversuch im offenen Bohrloch

PV: Pumpversuch in der ausgebauten Grundwassermessstelle

D/A: Druckaufbau-/Auslaufversuch im offenen Bohrloch

KRI: Konstante-Raten-Injektions-Tests

Tab. 20: Ergebnisse der hydraulischen Tests im Forbach-Granit an der Unterstufe (ohne WD-Tests) im Zuge der Bohrkampagne 2018/2019

Bohrung / getesteter Abschnitt	Test	ermittelte Transmissivität	Hinweise
	Datum		
KS BK 04 neu (336,5 – 354,0 m)	Pulse	$T = 5,7 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$	Ruhewasserspiegel: 23,50 m u. GOK
	14.01.2019		
KS KB 04 neu (354,3 – 379,0 m)	Pulse	$T = 5,0 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$	Ruhewasserspiegel: 31,61 m u. GOK
	21.01.2019		
KS BK 102 (2,9 – 12,4 m)	KPV	$T = 3,0 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$	Ruhewasserspiegel: 2,91 m u. GOK
	05.09.2018		
KS BK 102 (60,0 – 67,0 m)	DST	$T = 2,0 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$	Ruhewasserspiegel: 0,40 m ü. GOK
	13.09.2018		
KS BK 102 (75,1 – 81,7 m)	Pulse	$T = 5,3 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$	Ruhewasserspiegel: 0,80 m u. GOK
	18.09.2018		
KS BK 103s (307,8 – 314,0 m)	Pulse	$T = 8,0 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$	Ruhewasserspiegel: 18,00 m u. GOK
	08.10.2018		
KS BK 103s (314,9 – 322,0 m)	Pulse	$T = 8,8 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$	Ruhewasserspiegel: 40,45 m u. GOK
	08.11.2018		
KS BK 103s (331,0 – 339,0 m)	Pulse	$T = 6,0 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$	Ruhewasserspiegel : 31,33 m u. GOK
	14.11.2018		
KS BK 104 (80,7 – 90,2 m)	DST	$T = 4,5 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$	Ruhewasserspiegel: 2,60 m u. GOK
	07.09.2018		
KS BK 104 (171,5 178,0 m)	Pulse	$T = 5,2 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$	Ruhewasserspiegel: 0,00 m u. GOK
	24.09.2018		Eingestelltes Druckpotential über Nacht: 9,10 m über GOK (Bezugspotential für die Auswertung).
KS BK 104 (191,6 – 196,2 m)	Pulse	$T = 4,0 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$	Ruhewasserspiegel: 9,30 m ü. GOK (Druckpotential vor Öffnen des Testventils).
	28.09.2018		
KS BK 104 (214,0 – 238,0 m)	DST	$T = 1,3 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$	Unsicher, siehe KPV
	10.10.2018		Ruhewasserspiegel: 0,05 m u. GOK (ausgeglichenes Druckpotential vor DST, Bezugspotential für die Auswertung).
			Diagnostischer Plot des DST zeigt leaky-Verhältnisse, trotz Potenzialtrennung zeigt der Bohrlochwasserstand möglicherweise Einflüsse der Testsignale.
KS BK 104 (214,0 – 238,0 m)	KPV	$T = 5,2 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$	Ruhewasserspiegel: 2,00 m u. GOK (Bezugspotential für die Auswertung, extrapolierter Wiederanstieg (Theis)).
	11.10.2018		
KS BK 106 (12,7 – 27,0 m)	Slug/KRI	$T = 1,5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$	Ruhewasserspiegel: 13,58 m u. GOK

Kapitel 6: Beschreibung der hydrogeologischen Verhältnisse

Bohrung / getesteter Abschnitt	Test	ermittelte Transmissivität	Hinweise
	Datum		
	29.10.2018		
KS BK 107 (115,2 – 128,2 m)	Pulse	$T = 1,0 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$	Ruhewasserspiegel: 5,07 m ü. GOK
	30.11.2018		
KS BK 107-neu GWM (115,2 – 128,2 m)	Pumpversuch	$T = 7,7 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ (Wiederanstieg)	Ruhewasserspiegel: 3,98m u. GOK
	18.11.2019		
KS BK 109 (108,4 – 116,0 m)	DST	$T = 1,2 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$	Ruhewasserspiegel: 26,18 m u. GOK
	19.09.2019		
KS BK 109 (213,3 – 224,0 m)	Pulse	$T = 2,3 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$	Ruhewasserspiegel: 20,69 m u. GOK
	30.10.2018		
KS BK 109 (226,8 – 231,0 m)	Pulse	$T = 1,2 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$	Ruhewasserspiegel: 26,00 m u. GOK, der RWSP von 26 m wurde mittels Theis-Geradlinienverfahren extrapoliert.
	07.11.2018		Für die Bestimmung des T-Werts wurde der Trend zum Zeitpunkt des Impulses bestimmt und dieser im Anschluss vom Testsignal abgezogen.
KS BK 109 (236,0 – 241,0 m)	Pulse	$T = 1,0 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$	Ruhewasserspiegel: 18,00 m u. GOK
	13.11.2018		Bei Extrapolation der Druckkurve vor dem Setzen des 2. Impulses nach dem Theis-Geradlinienverfahren ergibt sich ein Ruhedruck im Testintervall von 22,5 m.
KS BK 111 (74,0 – 79,2 m)	Pulse	$T = 1,0 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$	Ruhewasserspiegel: 0,0 m u. GOK
	29.09.2018		Ruhepotential: 29,00 m u. GOK (Druckpotential nach Ruhedruckmessung).
KS BK 111 (84,6 – 92,2 m)	Pulse	$T = 1,2 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$	Ruhewasserspiegel: 29,00 m u. GOK
	01.10.2018		
KS BK 111 (94,0 – 99,6 m)	Pulse	$T = 9,0 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$	Ruhewasserspiegel: 28,50 m u. GOK
	08.10.2018		
KS BK 111 (106,4 – 111,1 m)	DST	$T = 1,0 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$	Ruhewasserspiegel: 29,61 m u. GOK
	10.10.2018		
KS BK 112 (16,5 – 20,3 m)	DST	$T = 1,1 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$	Ruhewasserspiegel: 9,30 m u. GOK
	13.09.2018		
KS BK 115s (14,9 – 18,4 m)	Pulse	$T = 1,0 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$	Ruhewasserspiegel: 11,10 m u. GOK
	10.10.2018		
KS BK 115s (18,8 – 24,7 m)	Slug/KRI	$T = 3,0 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ (KRI)	Ruhewasserspiegel : 13,50 m u. GOK
	15.10.2018		Slugtest gibt anfänglich hohe Wasseraufnahme wieder, KRI ist für ein größeres Gerbergsvolumen repräsentativ.

Legende:

KPV: Kurzpumpversuch im offenen Bohrloch

PV: Pumpversuch in der ausgebauten Grundwassermessstelle

Pulse: Pulse-Test

Slug: Slug-Test

DST: Drill-Stem-Test

KRI: Konstante-Raten-Injektions-Tests

Kapitel 6: Beschreibung der hydrogeologischen Verhältnisse

Aus den Transmissivitäten T wurde der kf-Wert berechnet, indem T durch die Teststreckenlänge bzw. durch die Mächtigkeit des wassererfüllten Bohrlochs/Grundwassermessstelle dividiert wurde. In der folgenden Tabelle sind die kf-Werte zusammengestellt. Bei den Kurzpumpversuchen und Pumpversuchen wurden die aus dem Wiederanstieg ermittelten Werte verwendet.

Tab. 21: Ermittelte kf-Werte im Forbach-Granit

Bohrung / getesteter Abschnitt [m uGOK]	Lithologie	kf-Wert [m/s]
KS BK 2		
KS BK 2 52,2-370,0	Granit, frisch bis mäßig verwittert	1,30E-08
KS BK 2 11,0-370,0	Granit, frisch bis mäßig verwittert, rund 10% der Teststrecke oberflächennah	1,20E-08
KS BK 2 172,0-370,0	Granit, frisch bis mäßig verwittert	6,60E-09
KS BK 5		
KS BK 5 0,0-162,0	Granit, frisch bis mäßig verwittert, rund 24 % der Teststrecke oberflächennah	6,60E-07
KS BK 5 96,8-160,6	Granit, frisch bis mäßig verwittert	1,60E-08
KS BK 5 120,0-160,0	Granit, frisch bis mäßig verwittert	1,00E-08
KS BK 7		
KS BK 7 0,0-139,5	Granit, frisch bis zersetzt, rund 28% der Teststrecke oberflächennah	2,30E-08
KS BK 9		
KS BK 9 72,0 bis 90,0	Granit – artesischer Wasseraustritt	Nicht bestimmbar
KS BK 10		
KS BK 10 13,5-16,0	Granit, frisch bis zersetzt, oberflächennah	3,50E-05
KS BK 04-neu		
KS BK 04 336,5-354,0	Granit, überwiegend frisch bis mäßig verwittert	3,30E-10
KS BK 04 354,3-379,0	Granit, überwiegend frisch bis mäßig verwittert	2,00E-10
KS BK 102		
KS BK 102 2,9-12,4	Granit, überwiegend frisch bis mäßig verwittert, oberflächennah	3,20E-06
KS BK 102 60,0-67,0	Granit, frisch bis mäßig verwittert	2,90E-08
KS BK 102 75,1-81,7	Granit, frisch bis mäßig verwittert	8,00E-11
KS BK 103		
KS BK 103s 307,8-314,0	Granit, frisch bis mäßig verwittert	1,30E-12
KS BK 103s 314,9-322,0	Granit, frisch bis mäßig verwittert	1,20E-08
KS BK 103s 331,0-339,0	Granit, frisch bis mäßig verwittert	7,50E-10
KS BK 104		
KS BK 104 80,7-90,2	Granit, überwiegend frisch bis mäßig verwittert	4,70E-09
KS BK 104 171,5-178,0	Granit, frisch bis mäßig verwittert	8,00E-10
KS BK 104 191,6-196,2	Granit, frisch bis mäßig verwittert	8,70E-12
KS BK 104 214,0-238,0	Granit, überwiegend frisch bis mäßig verwittert	2,20E-08*
KS BK 106		
KS KB 106 12,7-27,0	Granit, überwiegend frisch bis mäßig verwittert, oberflächennah	1,00E-06
KS BK 107		
KS BK 107 115,2-128,2	Granit, überwiegend frisch bis mäßig verwittert	7,70E-10

Kapitel 6: Beschreibung der hydrogeologischen Verhältnisse

KS BK 107-neu GWM 6,0 bis 22,0	Granit, frisch bis stark verwittert, oberflächennah	4,80E-07
KS BK 109		
KS BK 109 108,4-116,0	Granit, überwiegend stark verwittert	1,60E-09
KS BK 109 213,3-224,0	Granit, überwiegend mäßig verwittert	6,50E-10
KS BK 109 226,8-231,0	Granit, frisch bis mäßig verwittert	2,90E-11
KS BK 109 236,0-241,0	Granit, überwiegend frisch bis mäßig verwittert	2,00E-11
KS BK 111		
KS BK 111 74,0-79,2	Granit, überwiegend frisch bis mäßig verwittert	1,90E-10
KS BK 111 84,6-92,2	Granit, überwiegend frisch bis mäßig verwittert	1,60E-10
KS BK 111 94,0-99,6	Granit, überwiegend mäßig verwittert	1,60E-10
KS BK 111 106,4 - 111,1	Granit, überwiegend stark verwittert	2,10E-09
KS BK 112		
KS BK 112 16,5-20,3	Granit, überwiegend frisch bis mäßig verwittert, oberflächennah	2,90E-06
KS BK 115		
KS BK 115s 14,9-18,4	Granit, überwiegend frisch bis mäßig verwittert, oberflächennah	2,90E-09
KS BK 115s 18,8-24,7	Granit, überwiegend frisch bis mäßig verwittert, oberflächennah	5,10E-06

* Aus Kurzpumpversuch, DST-Ergebnis wegen Unsicherheit nicht berücksichtigt

Die im Rahmen der beiden Bohrkampagnen 2010/2011 und 2018/2019 in hydraulischen Tests (ohne WD-Tests) ermittelten kf-Werte liegen zwischen $3,5 \cdot 10^{-5}$ m/s und $1,3 \cdot 10^{-12}$ m/s.

Im **tieferen Granit unterhalb von 30 m u. GOK** wurden kf-Werte zwischen $2,9 \cdot 10^{-8}$ m/s und $1,3 \cdot 10^{-12}$ m/s ermittelt, die Versuche, die teilweise den oberflächennahen Granit mit erfassten, sind hierbei nicht berücksichtigt. Das arithmetische Mittel unter Berücksichtigung der Länge der Teststrecken liegt bei $2,5 \cdot 10^{-10}$ m/s. Der weitaus größte Teil der Teststrecken lag dabei im frischen bis angewitterten Granit (w0 bis w2, wenig geklüftet).

Eine Abhängigkeit vom Verwitterungsgrad ist nicht zu erkennen. Allerdings gehen höhere Durchlässigkeiten mit einer höheren Kluftdichte einher, die bevorzugt in **Schwächezonen** auftritt [19]:

Während der Bohrarbeiten wurde versucht, hydraulische Tests gezielt in den verschiedenen Gebirgstypen zu platzieren. Für das stark vergrusste Gebirge gelang dies in folgenden Abschnitten:

Tab. 22: Hydraulische Tests in vergrusteten Abschnitten der Bohrungen

Bohrung	Hydraul. Test / Testabschnitt [m uGOK]	Vergrustes Gebirge [m uGOK]	Kf-Wert [m/s]
KS BK 109	Pulse / 213,3 bis 224	207 - 216	6,50E-10
KS BK 111	Pulse / 94,0 bis 99,6	87 - 118	1,60E-10
KS BK 111	DST / 106,4 bis 111,1	87 - 118	2,10E-09
KS BK 4-neu	Pulse, DST / 354,3 bis 379	355 - 370	2,00E-10

Damit weisen die hydraulischen Tests nicht auf eine erhöhte Gebirgsdurchlässigkeit im Bereich der vergrusteten Granite hin.

Kapitel 6: Beschreibung der hydrogeologischen Verhältnisse

Auch umfangreiche Auswertungen im Rahmen der Studienarbeit von P. Riede [19] konnten keine Abhängigkeit des kf-Wertes vom Verwitterungsgrad erkennen lassen.

Die von Riede vorgenommene Gegenüberstellung des kf-Wertes und der Kluftanzahl (ermittelt mit dem Bohrlochscannersystem ETIBS) in den jeweiligen Teststrecken zeigt indes, dass höhere Durchlässigkeiten mit einer höheren Kluftdichte einhergehen. Da höhere Kluftdichten bevorzugt in Schwächezonen auftreten, kann somit eine erhöhte Durchlässigkeit in diesen Zonen gegenüber dem intakten frischen Gebirge erwartet werden.

Für den **oberflächennah anstehenden Granit** ist erwartungsgemäß mit einer um 2 bis 3 Zehnerpotenzen höheren Durchlässigkeit gegenüber dem tieferen Bereich zu rechnen. Die kf-Werte, die ausschließlich in Teststrecken bis maximal 25 m u. GOK ermittelt wurden, liegen zwischen $3,5 * 10^{-5}$ m/s und $2,9 * 10^{-9}$ m/s. Das arithmetische Mittel für den kf-Wert unter Berücksichtigung der Länge der Teststrecken liegt bei **$5 * 10^{-7}$ m/s** (der in KS BK 10 ermittelte kf-Wert von $3,5 * 10^{-5}$ m/s ist hierbei unberücksichtigt, da dieser über eine Konstante-Rate-Injektion ermittelt werden musste, der Versuch also im nicht grundwassererfüllten Fels erfolgte).

WD-Tests im Forbach-Granit

Im Forbach-Granit wurden 2010/2011 28 WD-Tests durchgeführt und 2018/2019 durch 25 weitere WD-Tests ergänzt.

2018/2019 wurden überwiegend Teststrecken für die WD-Tests ausgewählt, die zuvor mittels Ventiltest untersucht wurden. Hierdurch war ein direkter Vergleich zwischen den aus den Ventiltests ermittelten kf-Werten und den aus WD-Tests mittels verschiedener Verfahren abgeleiteten kf-Werten möglich. Es zeigte sich, dass keine eindeutige Korrelation zwischen den mit unterschiedlichen Methoden ermittelten kf-Werten vorliegt und dass folglich die WD-Tests bei den im Untersuchungsgebiet vorherrschenden Gebirgsverhältnissen nicht zur Bestimmung von kf-Werten herangezogen werden können [19].

Die Ergebnisse der WD-Tests werden daher im Folgenden nur für Aussagen zur Dichtigkeit des vorhandenen Trennflächengefüges herangezogen.

Kapitel 6: Beschreibung der hydrogeologischen Verhältnisse

Tab. 23: Ergebnisse der WD-Tests im Zuge der Bohrkampagne 2010/2011

Bohrung / getesteter Abschnitt	Datum	Lugeon-Wert bei max. Druckstufe [l/(min*m)] bei 10 bar	Vorherrschender Verwitterungsgrad
KS BK 01 (19,0 – 20,2 m)	12.01.2011	6,094	w3-w5
KS BK 01 (373,4 – 377,9 m)	29.01.2011	0,107	w0-w1
KS BK 01 (382,3- 386,5 m)	30.01.2011	0,151	w0
KS BK 02 (11,3 – 15,0 m)	13.01.2011	2,523	w0-w2
KS BK 02 (343,0 – 348,0 m)	04.02.2011	0,0	w0-w1
KS BK 02 (352,0 – 357,0 m)	05.02.2011	0,0	w0
KS BK 03 (18,3 – 21,0 m)	12.01.2011	0,092	w1-w2
KS BK 03 (277,2 – 282,0 m)	28.02.2011	0,0	w4-w5
KS BK 03 (280,5 – 288,0 m)	02.03.2011	0,020	w4-w5
KS BK 04 (285,0 – 289,2 m)	14.02.2011	0,490	w0-w1
KS BK 02 (293,5 – 298,0 m)	15.02.2011	0,403	w0-w1
KS BK 04 (297,4 – 304,0 m)	16.02.2011	0,071	w1-w2
KS BK 05 (124,0 – 128,0 m)	15.02.2011	0,028	w0-w1
KS BK 05 (138,0 – 142,8 m)	08.02.2011	0,011	w0-w1
KS BK 06 (106,0 – 109,7 m)	14.03.2011	0,230	w2-w3
KS BK 06 (133,0 – 140,9 m)	22.03.2011	0,0	w0
KS BK 07 (97,0 – 105,8 m)	20.01.2011	0,0	w0-w2
KS BK 07 (105,9 – 111,1 m)	21.01.2011	0,0	w0-w1
KS BK 08 (64,0 – 69,0 m)	18.01.2011	0,535	w2-w3
KS BK 08 (74,0 – 79,0 m)	20.01.2011	0,014	w0-w1
KS BK 08 (82,0 – 87,0 m)	31.01.2011	0,038	w0-w1
KS BK 09 (55,0 – 58,0 m)	17.01.2011	0,175	w2-w3
KS BK 09 (57,0 – 64,0 m)	18.01.2011	0,006	w0-w1
KS BK 09 (64,0 – 70,0 m)	18.01.2011	0,007	w0-w1
KS BK 10 (16,9 – 22,0 m)	04.02.2011	8,863	w1-w2
KS BK 11 (20,8 – 25,6 m)	10.03.2011	0,881	w0-w2
KS BK 11 (35,0 – 39,5 m)	15.03.2011	0,241	w2-w3
KS BK 05 (129,0 – 136,5 m)	04.02.2011	0,156	w0-w1

Kapitel 6: Beschreibung der hydrogeologischen Verhältnisse

Tab. 24: Ergebnisse der WD-Tests im Zuge der Bohrkampagne 2018/2019

Bohrung / getesteter Abschnitt	Datum	Lugeon-Wert bei max. Druckstufe [l/(min*m)] bei 10 bar	Vorherrschende Verwitterungsgrade
KS BK 4-neu (328,0 – 337,0 m)	18.12.2018	0,007	w0-w2
KS BK 4-neu (336,5 – 354,0 m)	14.01.2019	0,0013	w0-w2
KS BK 4-neu (354,3 – 379,0 m)	21.01.2019	0,0012	w1-w4
KS BK 101 (27,0 – 32,0 m)	21.11.2018	0,002	w0-w3
KS BK 101 (46,7 – 53,0 m)	05.12.2018	0,0008	w0-w2
KS BK 102 (60,0 – 67,0 m)	14.09.2018	0,345	w0-w1
KS BK 102 (75,1 – 81,7 m)	18.09.2018	0,0	w0-w2
KS BK 103 (307,8 – 314,0 m)	09.10.2018	0,0	w0-w2
KS BK 103 (314,9 – 322,0 m)	09.11.2018	0,0	w0-w2
KS BK 103 (331,0 – 339,0 m)	15.11.2018	0,0	w0-w2
KS BK 104 (80,7 – 90,2 m)	07.09.2018	0,126	w1-w2
KS BK 104 (171,5 – 178,0 m)	25.09.2018	0,0	w0-w2
KS BK 104 (191,6 – 196,2 m)	29.09.2018	0,0	w0-w2
KS BK 107 (107,7 – 114,1 m)	27.11.2018	0,002	w0-w2
KS BK 107 (121,7 – 128,2 m)	03.12.2018	0,013	w1-w2
KS BK 109 (108,4 – 116,0 m)	19.09.2018	0,111	w3-w4
KS BK 109 (213,3 – 224,0 m)	30.10.2018	0,007	w2-w3
KS BK 109 (226,8 – 231,0 m)	07.11.2018	0,0014	w0-w1
KS BK 109 (236,0 – 241,0 m)	13.11.2018	0,0018	w2-w3
KS BK 111 (74,0 – 79,2 m)	29.09.2018	0,001	w1-w2
KS BK 111 (84,6 – 92,2 m)	02.10.2018	0,0	w2-w3
KS BK 111 (94,0 – 99,6 m)	09.10.2018	0,0	w2-w3
KS BK 111 (106,4 – 111,1 m)	11.10.2018	0,032	w3-w4
KS BK 112 (16,5 – 20,3 m)	14.09.2018	2,189	w1-w3
KS BK 115 (6,7 – 12,0 m)	09.10.2018	1,019	w2-w3

Kapitel 6: Beschreibung der hydrogeologischen Verhältnisse

Tieferer Forbach-Granit, frisch bis mäßig verwittert (w0 bis w2) bzw. Homogenbereich F 1 (siehe Kapitel 9.2)

(16 WD-Tests 2010/2011 und 12 WD-Tests 2018/2019)

Der frische bis mäßig verwitterte Granit zeigt Lugeon-Werte von 0 bis maximal 0,49.

Tendenziell war ein Verschluss von Klüften während der Versuchsdurchführung, ferner ein vollkommen elastisches Verhalten des Gebirges festzustellen.

Tieferer Forbach-Granit, überwiegend mäßig verwittert (w1 bis w3) bzw. Homogenbereich F 2 (siehe Kapitel 9.2)

(5 WD-Tests 2010/2011 und 8 WD-Tests 2018/2019)

Die Lugeon-Werte des überwiegend mäßig verwitterten Granits liegen zwischen 0 und maximal 0,54.

Tieferer Forbach-Granit, stark verwittert bis zersetzt (w3 bis w5) bzw. Homogenbereich F 3 (siehe Kapitel 9.2)

(2 WD-Tests 2010/2011 und 2 WD-Tests 2018/2019)

Der stark verwitterte Granit zeigt Lugeon-Werte von 0 bis 0,11.

Überraschend erscheint hier, dass der stark verwitterte Granit Lugeon-Werte derselben Größenordnung wie der frische bis mäßig verwitterte Granit aufweist. Das könnte mit dem Abdichten von Klüften durch zersetztes Material erklärt werden.

Sehr dichte Gebirgsabschnitte mit Lugeon = 0 treten in sämtlichen Verwitterungsgraden bzw. Homogenbereichen auf.

Oberflächennaher aufgelockerter Forbach-Granit in allen Verwitterungsgraden (w0 bis w5)

(6 WD-Tests 2010/2011 und 3 WD-Tests 2018/2019)

Die Lugeon-Werte des oberflächennah aufgelockerten Granits, bei dem größere Klüftöffnungsweiten anzunehmen sind, liegen zwischen 0,002 und maximal 8,86. Wie zu erwarten liegen die Lugeon-Werte insgesamt deutlich über den Lugeonwerten des tieferen Granits.

Höhere Lugeonwerte gehen also nicht mit einer Zunahme des Verwitterungsgrades sondern mit einer Zunahme der Klüftöffnungsweiten einher.

Flowmeter-Messungen

Zur Identifizierung von Zuflüssen in das Bohrloch wurden in mehreren Bohrungen Flowmeter-Messungen durchgeführt. Die Ergebnisse finden sich in den Anlagen 4.3.1.3

Die Messungen zeigen, dass insgesamt nur sehr geringe Zuflüsse zu den Bohrlöchern stattfanden. Die Zuflüsse, die an Klüfte gebunden sind und sich daher sehr unregelmäßig über die Teststrecke verteilen, lagen im Ruhezustand ausnahmslos keine Zuflüsse > 10l/min (Ansprechschwelle des flowmeters), im angeregten Zustand meist unterhalb von 10 l/min bzw. 0,17 l/s. Allenfalls existieren sehr geringe Wasserwegsamkeiten über vereinzelte partielle Klüftöffnungen. Selbst in stark geklüfteten Abschnitten (z.B. KSBK 104, KSBK 109) waren nur solch geringe Wasserzutritte zu verzeichnen, dass Förderraten von 0,36 l/s zum Trockenfallen der Pumpen führten.

Als maximaler Einzelzufluss wurden 0,42 l/s in KS BK 5 gemessen. Im Umfeld der in KS BK 109 angetroffenen Schwächezonen wurden zwischen 200 m u. GOK und 220 m u. GOK zehn Einzelzuflüsse festgestellt. Eine Gesamt-Zuflussrate wurde nicht ermittelt, liegt aber bei Ansatz von maximal 0,17 l/s je Zufluss nicht über 1,7 l/s.

Kapitel 6: Beschreibung der hydrogeologischen Verhältnisse

In KS BK 102 konnte ein nach oben gerichtetes hydraulisches Potential nachgewiesen werden.

Damit sind zwar entlang der Klüfte in den Schwächezonen höhere Durchlässigkeiten gegenüber dem umgebenden intakten Gebirge zu erwarten, jedoch sind diese immer noch sehr gering.

Zusammenfassung

Die hydraulischen Tests belegen, dass die Gebirgsdurchlässigkeiten i. W. von der oberflächennahen Gebirgsauflockerung und der Klüftigkeit bestimmt werden.

Ob die Klüfte zur Erhöhung der Durchlässigkeit beitragen, hängt von ihrer Kluffweite, Klufffüllung und räumlichen Ausdehnung ab.

Stark verwitterter bis zersetzter Granit in größeren Tiefen weist nicht zwingend eine höhere Durchlässigkeit auf. Dies kann damit erklärt werden, dass etwaige Klüfte durch zersetztes, toniges Material verfüllt sind. Während der kurzzeitigen lokalen Ventiltests erfolgt in der Regel kein Freispülen der zugesetzten Klüfte. Beim Auffahren unterirdischer Bauwerke im Sprengvortrieb ist jedoch mit Auflockerungen und einem Freispülen der Klüfte zu rechnen. Daher müssen für die weiteren Betrachtungen höhere kf-Werte in Schwächezonen und Bereichen höherer Kluffdichte angesetzt werden. Anstelle eines einzelnen kf-Werts ist die Angabe einer Spannbreite zielführender, um die möglichen Ausprägungen in Bezug auf die Gebirgsdurchlässigkeit umfänglich zu erfassen. Als oberer Wert für Schwächezonen und Bereiche mit höherer Kluffdichte wird der kf-Wert für den oberflächennahen Granit, als unterer Wert der maximale gemessene kf-Wert im tieferen Granit angesetzt.

Für weitere Betrachtungen werden dem Forbach-Granit daher folgende Durchlässigkeiten zugeordnet:

Forbach-Granit, unterhalb 30 m u. GOK außerhalb von Schwächezonen bzw. Bereichen erhöhter Kluffdichten:	$2,5 \cdot 10^{-10}$ m/s
Forbach-Granit, unterhalb 30 m u. GOK in Schwächezonen und Bereichen erhöhter Kluffdichten:	$3 \cdot 10^{-8}$ bis $5 \cdot 10^{-7}$ m/s
Forbach-Granit, oberflächennah (bis zu 30 m u. GOK)	$5 \cdot 10^{-7}$ m/s

Es ist nicht davon auszugehen, dass großräumig mit höheren Durchlässigkeiten entlang weit reichender Schwächezonen zu rechnen ist: weder wurden in den Bohrungen zum Pumpspeicherwerk Forbach offene Klüfte mit erhöhtem Wasserandrang festgestellt, noch ergaben die bestehenden Stollenbauwerke (Raumünzachstollen, Murgstollen, Schwarzenbachstollen, Franzosenstollen) Hinweise auf hohe Wasserzutritte: Im detailliert aufgenommenen Franzosenstollen wurden maximale Zutritte von 0,01 l/s gemessen. Im 5,6 km langen Murgstollen wurden im Querungsbereich der Holderbachstörung zwar vermehrt mittlere Wasserzutritte verzeichnet, die aber zusammen mit weiteren kleineren Wasserzutritten aus anderen Abschnitten nur zu einem Gesamtabfluss von rund 3l/s führten.

6.1.2.2 Grundwasservorkommen und angetroffene Wasserspiegel im Forbach-Granit

Das Kluffnetz im Granit an der Unterstufe ist nahezu vollständig grundwassererfüllt. Während der Bohrarbeiten wurden in den Bohrungen KS BK 2, KS BK 9 und KS BK 107 sogar artesische Grundwasserverhältnisse angetroffen. Erklärbar sind solche Verhältnisse durch den tiefen Einschnitt der Murg in den grundwasserführenden Granitkörper. Das bis auf rund 1.000 mNN hinaufreichende Einzugsgebiet sorgt für ein hohes hydrostatisches Potential, das aufgrund der geringen

Kapitel 6: Beschreibung der hydrogeologischen Verhältnisse

Durchlässigkeiten im Granit nicht in gleichem Maße abgebaut werden kann, wie sich das Lagepotential (= Geländeoberkante) infolge der Erosion der Murg im steilen Murgtal verringert.

Die Packerpumpversuche in KS BK 2 mit unterschiedlichen Teststrecken haben gezeigt, dass die artesischen Druckverhältnisse in verschiedenen Abschnitten angetroffen wurden. Im tieferen Granit ist folglich ein nach oben gerichtetes hydraulisches Gefälle vorhanden.

Grundwasserganglinie KS BK 5

Seit 26.04.2011 werden die Grundwasserstände in der als Grundwassermessstell ausgebauten Bohrung KS BK 5 in 14-tägigem Rhythmus beobachtet.

KS BK 5 ist im Forbach-Granit zwischen 120 m u. GOK und 160 m u. GOK (316,6 mNN bis 276,6 mNN) verfiltert.

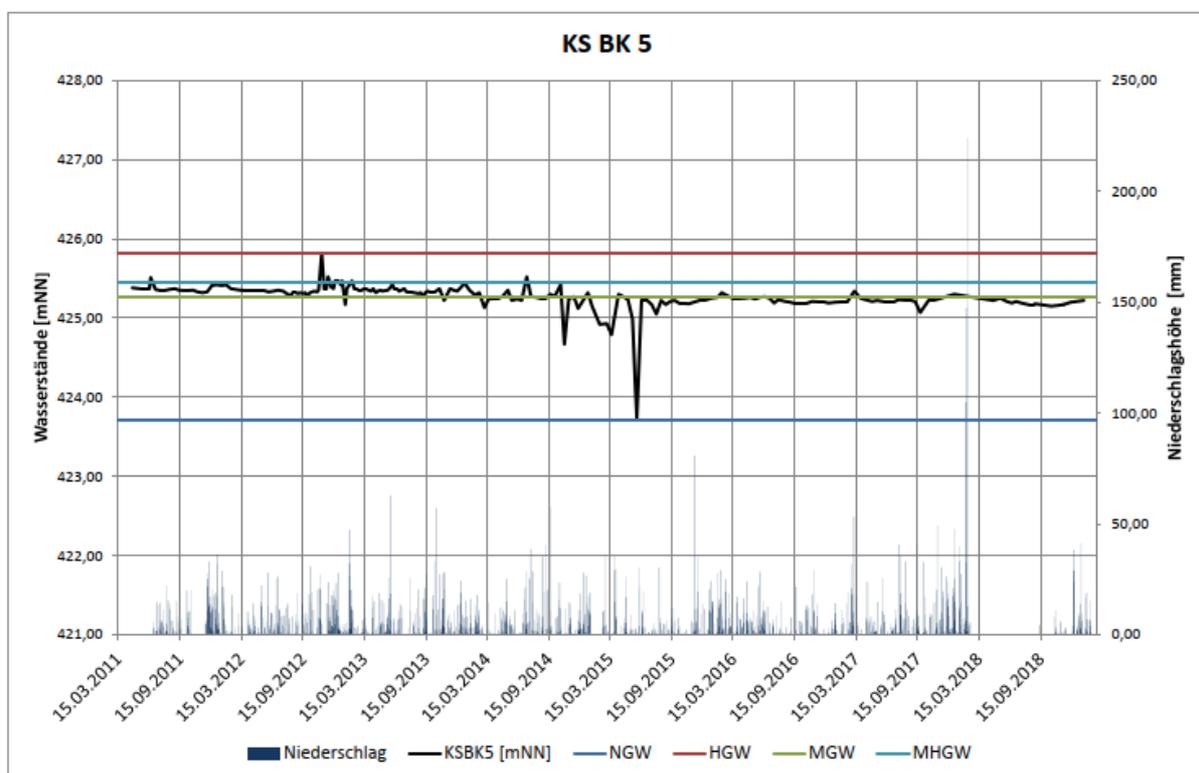


Abb. 18: Grundwasserganglinie KS BK 5

Anmerkung: in Anlage 5.3.3 sind die Grafiken in besserer Qualität zu finden

NGW: Niedrigster gemessener Grundwasserstand

HGW: Höchster gemessener Grundwasserstand

MGW: Mittlerer Grundwasserstand (arithm. Mittel der Messreihe)

MHGW: Mittlerer langjähriger Grundwasserhochstand (arithm. Mittel der jährlichen HGW)

Kapitel 6: Beschreibung der hydrogeologischen Verhältnisse

Piezometermessungen

Die Ausbaudaten der vorhandenen Piezometermessstellen sind in Tab. 7 zusammengestellt.

Die Messdaten der Piezometermessstelle KS BK 102 finden sich in Anlage 5.3.2.1.

Am 25.01./14.02.2011 wurden in KS BK 4 und KS BK 9 elektrische Piezometer mit Datalogger eingebaut. KS BK 4 wurde im Herbst 2018 überbohrt und als neue tiefere Piezometermessstelle KS BK 4-neu ausgebaut. Die Messdatenaufzeichnungen beginnen am 18.02.2019.

Als weitere Piezometermessstelle mit Datalogger kam seit Dezember 2018 die Messstelle KS BK 104 hinzu.

Die Messdaten der elektrischen Piezometer finden sich in Anlage 5.3.2.2. Die Anlage liegt aufgrund ihres Datenumfangs nur digital dem Gutachten bei. Anlage 5.3.3 enthält die dazugehörigen Ganglinien.

Eine erste Zwischenauswertung mit Piezometerauslesung am 09.06.2011 ergab folgendes überraschende Bild (siehe hierzu die folgenden Abbildungen 19 und 20).

In **KS BK 4** konnte beobachtet werden,

- dass der Piezometer sehr kurzfristige Druckspiegelschwankungen mit Amplituden zwischen 0,2 und 0,4 m aufzeichnet
- dass diese Druckspiegelschwankungen nahezu parallel zu den Wasserspiegelschwankungen in der Schwarzenbachtalsperre (SBTS) verlaufen: der Piezometer erfasst anscheinend den Druckabfall/-aufbau im System Schwarzenbachtalsperre - Verbindungsstollen - Wasserschloss Schwarzenbachstollen, der mit der allmählichen Entleerung/Befüllung der Schwarzenbachtalsperre einhergeht

Die Messungen in **KS BK 9** ergaben annähernd dasselbe Bild:

- Wie in KS BK 4 waren auch hier kurzfristige Druckspiegelschwankungen zu beobachten; der zeitliche Verlauf war nahezu identisch mit KS BK 4, lediglich die Amplituden fielen etwas geringer aus (0,15 m bis 0,3 m)

Kapitel 6: Beschreibung der hydrogeologischen Verhältnisse

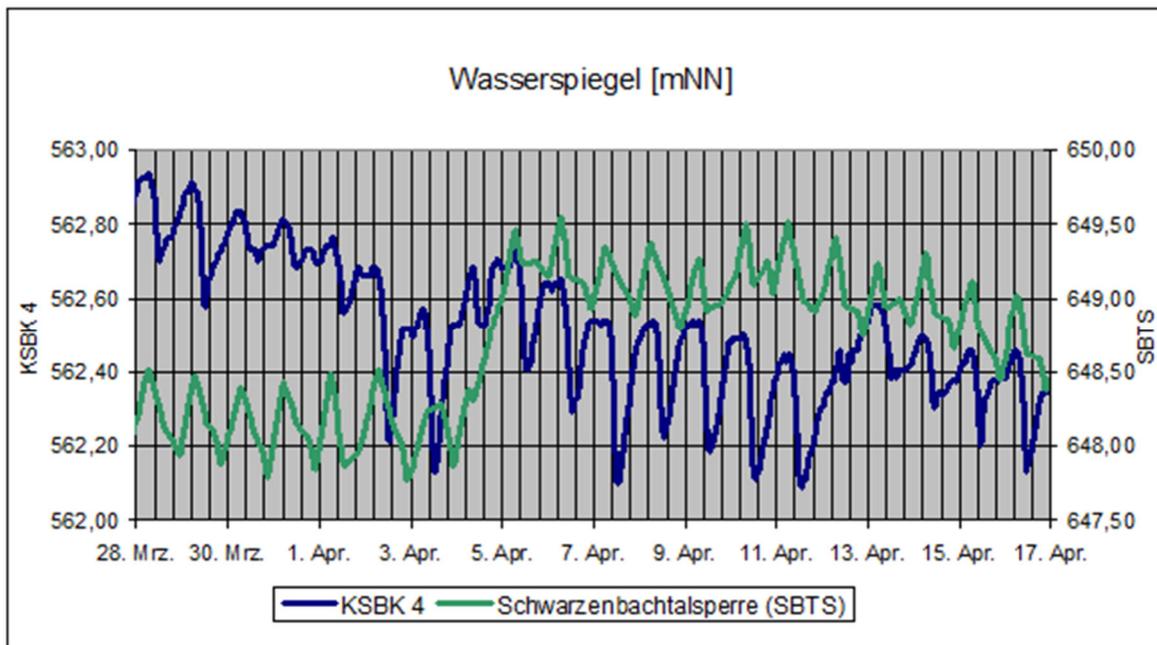


Abb. 19: Gegenüberstellung Grundwasserspiegel KS BK 4 und Seespiegel Schwarzenbachtalsperre, 28.03.2011 bis 17.04.2011

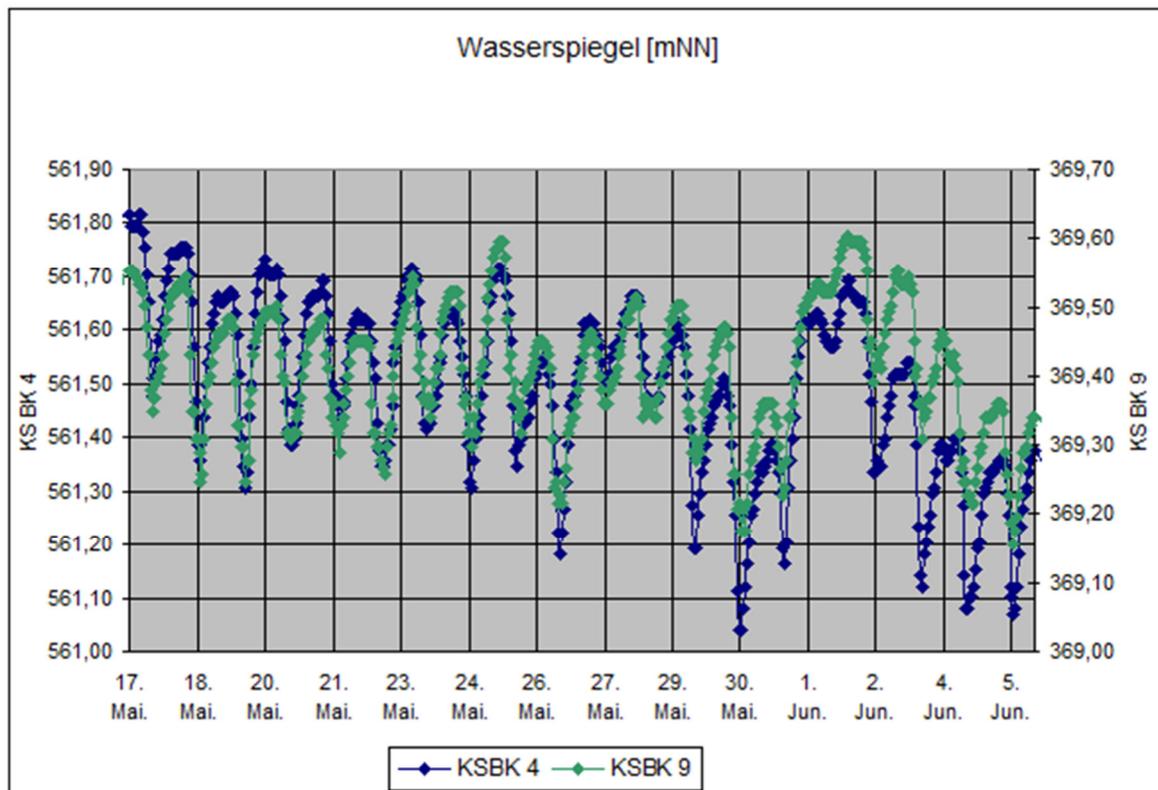


Abb. 20: Gegenüberstellung Grundwasserspiegel KS KB 4 und KS BK 9, 17.05.2011 bis 06.06.2011

Eine genauere Auswertung der Pegelstände des Wasserschlosses Schwarzenbachstollen, des Wasserschlosses Murgstollen sowie der über die Verbindungsstollen angeschlossenen Gewässer Schwarzenbachtalsperre und Murg/Sammelbecken Kirschbaumwasen ergab, dass alle vier Pegel betriebsbedingt und wegen ihrer hydraulischen Zusammenhänge nahezu zeitgleich reagieren.

Kapitel 6: Beschreibung der hydrogeologischen Verhältnisse

Diese Beobachtungen lassen den Schluss zu, dass das Kluftsystem im Granit vollständig wassererfüllt ist, so dass sich die unterschiedlichen hydraulischen Drücke im System Schwarzenbachtalsperre - Schwarzenbachstollen - Wasserschloss Schwarzenbachstollen und im System Murg/Sammelbecken Kirschbaumwasen - Murgstollen - Wasserschloss Murgstollen auf den wassergesättigten granitischen Körper übertragen. Dies steht im Einklang mit der Aussage von STÖBER (1995), dass im Nordschwarzwälder Granit ein netzförmiges verbundenes Kluftsystem ausgebildet ist. Bei hinreichend großer Skalierung kann das Gebirge als homogen und isotrop angesehen werden. Da die Klüfte meist jedoch nur sehr geringe Öffnungsweiten besitzen, ist allerdings die Wasserdurchlässigkeit des Aquifers insgesamt sehr gering.

Neben den kurzfristigen Druckänderungen im Gebirge infolge des Kraftwerksbetriebs sind die Piezometermessdaten von klimatischen Faktoren beeinflusst.

An den Messreihen über einen Zeitraum von knapp 10 Jahren sind die jahreszeitlichen Schwankungen und die mittelfristigen Entwicklungen abzulesen (siehe Anlage 5.3.3).

KS BK 4 weist einen zyklischen Verlauf mit Minima zwischen August und Oktober und Maxima zwischen Januar und April auf. Ein hydraulischer Kontakt zum oberflächennahen Grundwasserleiter im Hangschutt und aufgelockerten Forbach-Granit ist denkbar, da KS BK 4 bereits ab 28 m u. GOK mit Filterkies verfüllt war.

KS BK 4-neu wurde Ende 2018 in Betrieb genommen. Die Filterkiesschüttung mit dem eingebauten Piezometer befindet sich zwischen 335 und 350 m uGOK. Trotz dieser großen Tiefe sind jahreszeitliche Schwankungen erkennbar.

Die Ganglinie von **KS BK 9** zeigt nur eine sehr schwache jahreszeitliche Schwankung. Auffällig ist, dass der Grundwasserstand in KS BK 9 seit Beginn der Messreihen nahezu kontinuierlich anstieg; und zwar um rund 5 m in sieben Jahren. Solch ein Anstieg ist weder in den anderen Messstellen noch in den Pegeln der Gewässer und Wasserschlösser zu verzeichnen. Da sich die beiden in KS BK 9 eingebauten Sensoren gleich verhalten, ist eine elektrische Drift in den Sensoren auszuschließen. Die Ursache liegt möglicherweise darin, dass sich das umgebende hydraulische Potential infolge des nahezu undurchlässigen Gebirges nur sehr stark verzögert im Bohrloch einstellen konnte, auch wenn sich die hydraulischen Druckänderungen aus dem Kraftwerksbetrieb in den Piezometermessungen nachweisen lassen. Seit 2018 scheint der Wasserdruck in der Messstelle den Umgebungsdruck erreicht zu haben. In 2019 und 2020 sind die jahreszeitlichen Verläufe mit Höchstständen im ausgehenden Winter erkennbar, obwohl sich auch hier die Filterkiesschüttung in größerer Tiefe befindet (zwischen 75 und 90 m uGOK).

Die Grundwassermessstelle **KS BK 5**, die 14-tägig mittels Lichtlot gemessen wird und ab 20 m uGOK verfüllt ist, zeichnet die Ganglinien aus KSBK 4 und KSBK 9 nur schwach nach. Grund dafür sind die ungenauere Messmethode bei einer sehr geringen Schwankungsbreite und die größeren Mess-Intervalle. Dennoch können Minima im September und Maxima im Februar/März erkannt werden.

KS BK 104 wurde Ende 2018 in Betrieb genommen. Die Piezometermessstelle erfasst den oberflächennahen Granit, der aufgrund seiner höheren Klüftigkeit noch in gutem Austausch mit dem Hangschuttwasser steht. Die Filterkiesschüttung reicht von 4 m uGOK bis 14 m uGOK. Auffällig ist, dass die Ganglinie ein von den tiefen Messstellen stark abweichendes Bild mit einem Maximum im Sommer und einem Minimum im Dezember zeigt.

In der folgenden Abbildung sind die Ganglinien der vier Messstellen für einen ausgewählten Zeitraum gegenübergestellt.

Kapitel 6: Beschreibung der hydrogeologischen Verhältnisse

Anhand der Gegenüberstellung der vier Ganglinien lässt sich nochmals verdeutlichen, dass die im tieferen Granit verfilterten Messstellen einen anderen jahreszeitlichen Verlauf der Wasserspiegel aufweisen als die oberflächennahe Messstelle KS BK 104.

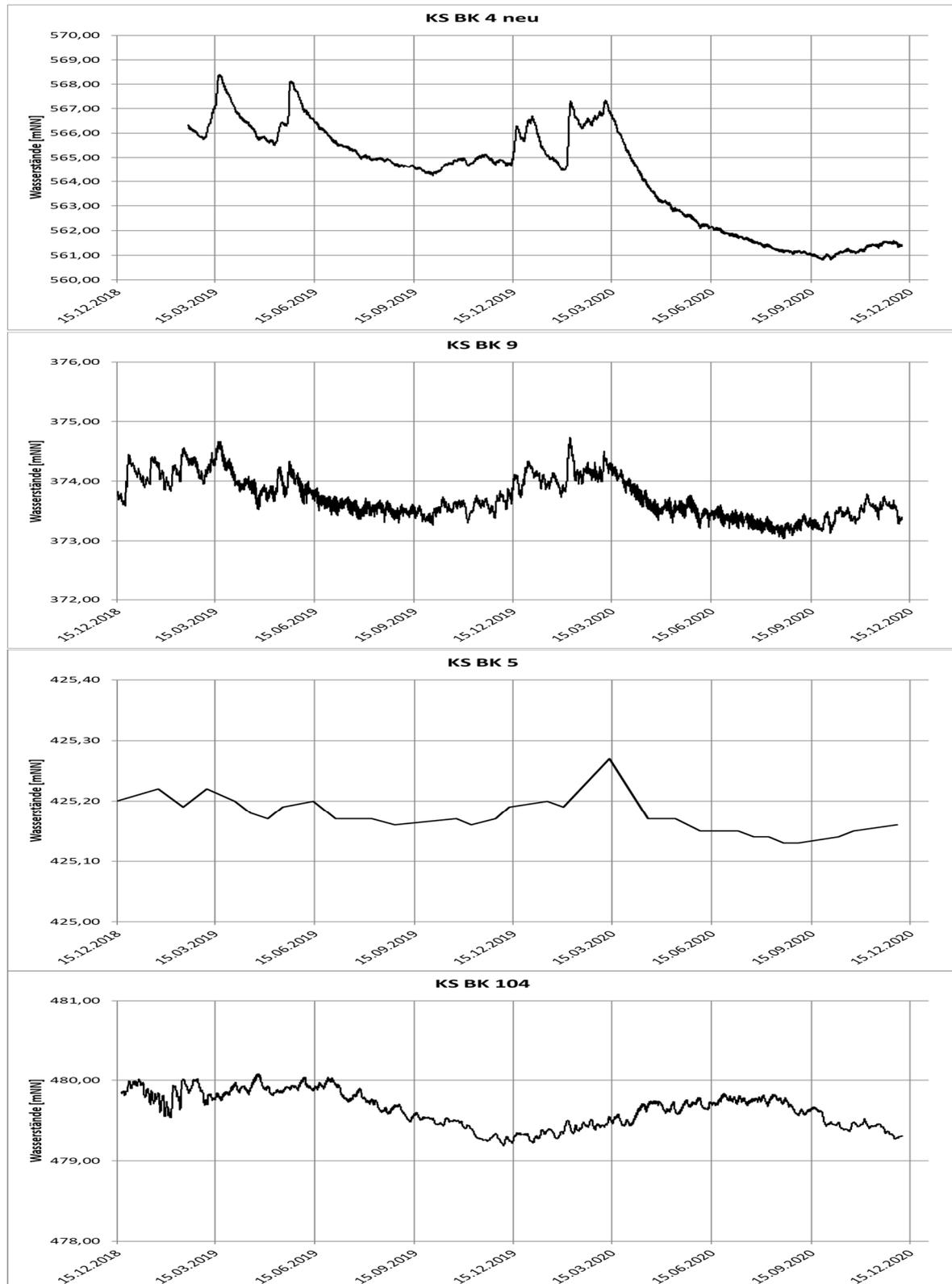


Abb. 21: Gegenüberstellung Grundwasserganglinien KS BK 4-neu, KS BK9, KS BK 5 und KS BK 104, 15.12.2018 bis 31.12.2020

Kapitel 6: Beschreibung der hydrogeologischen Verhältnisse

Eine Erklärung kann nur sein, dass die Druckspiegelschwankungen im tieferen Granit von anderen Faktoren beeinflusst werden als die Grundwasserstände im Hangschuttaquifer.

Möglicherweise wird der hydraulische Druck, der auf dem granitischen Grundwasser lastet und gemessen wird, durch den großen Grundwasserkörper im Deckgebirge erzeugt. Das Deckgebirge steht westlich von Forbach bei den Streitmannsköpfen an. Die Grundwasservorkommen im Deckgebirge und im Granit sind über Klüfte verbunden, auch wenn an der Grenze Deck-/Grundgebirge ein Sprung in der Gebirgsdurchlässigkeit auftritt. Durch das netzförmig verbundene wassererfüllte Kluftsystem im Granit könnten die Drücke entsprechend weiträumig übertragen werden.

Zu dieser Interpretation passt das abweichende Verhalten in KS BK 104: Diese Messstelle ist vom Hangschuttaquifer geprägt, der nur eine geringe Mächtigkeit aufweist. Hierdurch sind die Grundwasserschwankungen und insbesondere die maximalen Grundwasserstände limitiert. Zudem weist er als Porengrundwasserleiter gegenüber Kluftgrundwasserleitern eine hohe Speicherfähigkeit auf, was zu einer nur langsamen Entleerung führt, wodurch seine Grundwasserganglinien geringere Amplituden und zeitliche Dämpfungen und Streckungen gegenüber einem Kluftaquifer, wie er im Deckgebirge vorliegt, aufweisen.

Ob diese weitreichende Interpretation tatsächlich der Realität entspricht, müssen weitere Messungen zeigen.

Tab. 25: Grundwasser-Kenndaten der Grundwassermessstellen im Forbach-Granit,

Teil a) 2010/11

Messstellen aus Bohrprogramm 2010/2011	KS BK 4 alt	KS BK 5	KS BK 9
Ausbau	elektr. Piezometer Datalogger	4,5 Zoll-Grundwasser- messstelle	elektr. Piezometer Datalogger
Geländeoberkante [mNN]	596,1	436,6	362,1
Filterstrecke bzw. Filterkies- schüttung für Piezometer [m uGOK]	28,0 – 320,0	20,0 – 90,0 120,0 – 160,0	75,0 – 90,0
Messzeitraum / -intervall	15.03.2011 - 01.08.2016 stündlich	seit 26.04.2011 14-tägig	seit 15.03.2011 stündlich
NGW [mNN]	559,5	423,72	368,79
HGW [mNN]	564,27	425,82	374,74
MGW [mNN]	561,94	425,26	373,18
MHW [mNN]	563,67	425,41	373,18
Flurabstand [m u. GOK] bezogen auf MGW	34,16	10,78	-9,88 artesisch

Kapitel 6: Beschreibung der hydrogeologischen Verhältnisse

Fortsetzung Tab.25: Teil b) 2018/219

Messstellen aus Bohrprogramm 2018/2019	KS BK 4 neu	KS BK 102	KS BK 104	KS BK 107-neu GWM / PM
Ausbau	elektr. Piezometer Datalogger	pneumat. Piezometer	elektr. Piezometer Datalogger	5 Zoll-GWM pneumat. Piezometer
Geländeoberkante [mNN]	596,1	380,6	483	423,9
Filterstrecke bzw. Filterkies-schüttung für Piezometer [m uGOK]	335,0 – 350,0	5,5 – 10,0	4,0 – 14,0	6,0 – 22,0 116,0 – 130,0
Messzeitraum / -intervall	seit 18.02.2018 stündlich	seit 26.02.2019 Einzelmessungen / geplant 14-tägig	seit 18.12.2018 stündlich	seit 23.10.2019 Einzelmessungen / geplant 14-tägig
NGW [mNN]	566,01	377,86	479,54	421,18
HGW [mNN]	566,35	377,86	480,02	421,18
MGW [mNN]	566,14	377,86	479,85	421,18
MHWG [mNN]	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Flurabstand [m u. GOK] bezogen auf MGW	25,86		3,15	
Bemerkungen				Zwei getrennte Messstellen: GWM und Piezometermessstelle

NGW: Niedrigster gemessener Grundwasserstand

HGW: Höchster gemessener Grundwasserstand

MGW: Mittlerer Grundwasserstand (arithm. Mittel der Messreihe)

MHWG: Mittlerer langjähriger Grundwasserhochstand (arithm. Mittel der jährlichen HGW)

n. b.: nicht bestimmbar

6.1.3 Quartäre Lockergesteinsdecken

Im rund 1 m bis 2 m mächtigen **Hangschutt** der Talflanke, der den Forbach-Granit flächendeckend überdeckt, fließt hangparallel das versickernde Niederschlagswasser als sogenannter Zwischenabfluss oder „interflow“ dem Murgtal zu. Der Durchlässigkeitsbeiwert k_f wird mit 10^{-4} m/s angenommen.

Als Übergänge zum tieferen, überwiegend frischen Forbach-Granit tritt bis ca. 5 m Tiefe stark verwitterter Granit und bis ca. 30 m Tiefe mäßig verwitterter Granit auf. Die hydraulischen Versuche zeigten erhöhte Durchlässigkeiten bis in eine Tiefe von rund 25 m u. GOK, was v. a. auf eine erhöhte Gebirgsauflockerung zurückzuführen ist. Teile dieses aufgelockerten Gebirges können daher noch am Zwischenabfluss beteiligt sein. Ebenso besteht eine hydraulische Verbindung zwischen

Kapitel 6: Beschreibung der hydrogeologischen Verhältnisse

den Grundwasservorkommen im Hangschutt und im Granit. Aufgrund der sehr großen Durchlässigkeitsunterschiede findet jedoch ein vertikaler Austausch nur sehr untergeordnet statt und das Wasser im Hangschutt fließt ganz überwiegend hangparallel ab.

Am Talfuß ist eine Schotterterrasse aus **Murgschottern** ausgebildet, die ebenfalls wasserführend ist. Die Grundwassermessstellen KS BK 11 und KS BK 112 erschließen den quartären Grundwasserleiter innerhalb der Murgschotter. Die Mächtigkeit der Murgschotter einschl. überlagernder Anteile an Hangschutt bzw. Auffüllung beträgt hier 15 m bis 18 m, der Flurabstand liegt bei 11 m bis 17 m. Ein Einfluss der Wasserführung der Murg auf die Grundwasserstände ist anzunehmen.

Tab. 26: Ergebnisse der hydraulischen Tests im Quartär

Bohrung / Filterstrecke	Test Datum	ermittelte Transmissivität	kf-Werte	Hinweise
KS BK 11 (10,0 - 39,0 m)	PV 24.03.2011	T = $1,4 \cdot 10^{-3}$ m ² /s (Pumpphase) T = $1,5 \cdot 10^{-3}$ m ² /s (Wiederanstieg)	$5,8 \cdot 10^{-5}$ m/s (Pumpphase) $6,3 \cdot 10^{-5}$ m/s (Wiederanstieg)	Ruhewasserspiegel: 15,02 m u. GOK PV erfasste quartären Porengrundwasserleiter und granitischen Kluftgrundwasserleiter (Grenze Lockergestein / Granit bei 18,10 m u. GOK)
KS BK 112 (10,0 – 14,0 m)	PV 18.12.2018	T = $9,2 \cdot 10^{-3}$ m ² /s (Pumpphase) T = $9,0 \cdot 10^{-3}$ m ² /s (Wiederanstieg)	$3,3 \cdot 10^{-3}$ m/s (Pumpphase) $3,2 \cdot 10^{-3}$ m/s (Wiederanstieg)	Ruhewasserspiegel: 11,20 m u. GOK

Die Pumpversuche in den ausgebauten Grundwassermessstellen KS BK 11 und KS BK 112 ergaben kf-Werte von $6,3 \cdot 10^{-5}$ bzw. $3,2 \cdot 10^{-3}$ m/s für den Wiederanstieg, wobei der kf-Wert in KS BK 11 wegen der Verfilterung im Murgschotter und im Granit gegenüber dem im Murgschotter zu erwartenden kf-Wert herabgesetzt ist.

Für die Murgschotter werden daher kf-Werte zwischen 10^{-2} m/s und 10^{-4} m/s erwartet.

Grundwasserabstiche

Seit 26.04.2011 werden die Grundwasserstände der als Grundwassermessstelle ausgebauten Bohrungen KS BK 11 in 14-tägigem Rhythmus beobachtet.

KS BK 11 ist zwischen 10 m u. GOK und 39 m u. GOK (304,2 mNN bis 275,2 mNN) verfiltert und erfasst sowohl den Forbach-Granit, der ab 18,1 m u. GOK ansteht, als auch die überlagernden Murgschotter. Der Vergleich mit der Grundwasserganglinie in KS BK 5 zeigt, dass KS BK 11 überwiegend von den Grundwasserverhältnissen im Quartär beeinflusst ist; zum einen sind die absoluten Schwankungsbreiten in KS BK 11 deutlich höher als in KS BK 5 und zum anderen sind auch die jahreszeitlichen Schwankungen ausgeprägter.

Kapitel 6: Beschreibung der hydrogeologischen Verhältnisse

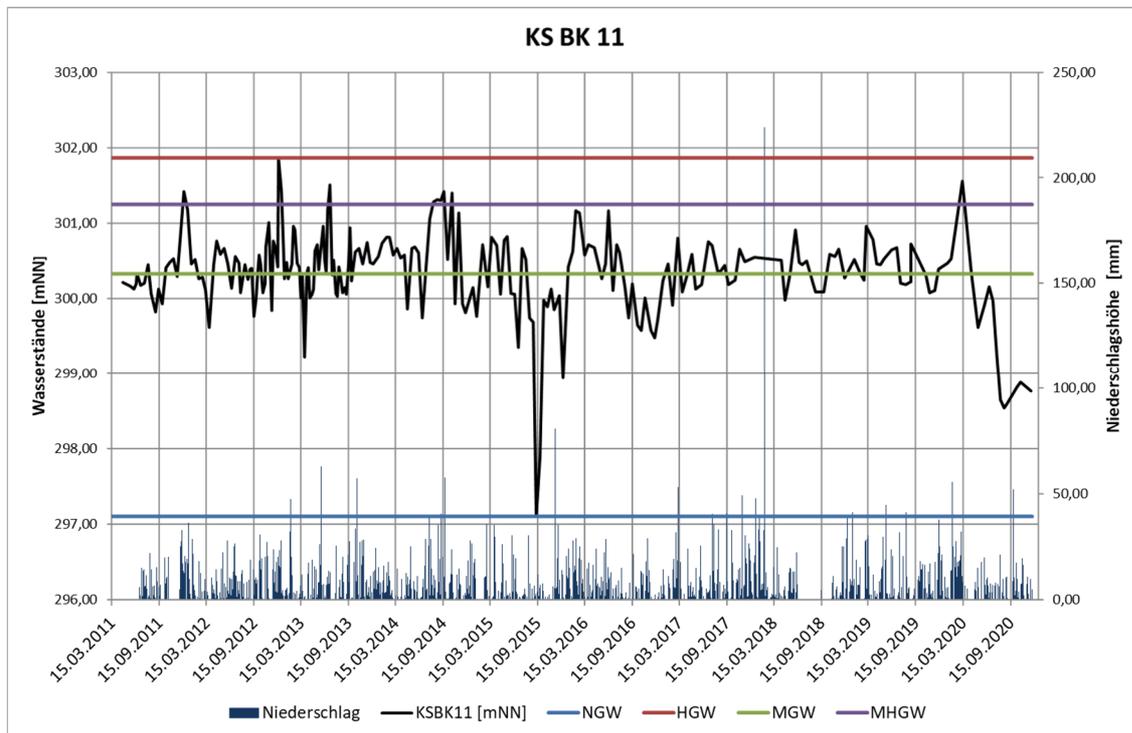


Abb. 22: Grundwasserganglinie KS BK 11

Anmerkung: in Anlage 5.3.3 sind die Grafiken in besserer Qualität zu finden

NGW: Niedrigster gemessener Grundwasserstand

HGW: Höchster gemessener Grundwasserstand

MGW: Mittlerer Grundwasserstand (arithm. Mittel der Messreihe)

MHGW: Mittlerer langjähriger Grundwasserhochstand (arithm. Mittel der jährlichen HGW)

Für KS BK 112 liegen seit Oktober 2019 14-tägige Messungen vor (Anlage 5.3.1). Die Grundwasserganglinie von KS BK 112 läuft annähernd parallel zur Grundwasserganglinie in KS BK 11.

Die Werte liegen trotz der geringen Entfernung zur KS BK 11 einige Dezimeter unter denen in KS BK 11. Möglicherweise liegt die Ursache im unterschiedlichen Ausbau. KS BK 112 ist ausschließlich im Quartär verfiltrert, KS BK 11 ist im Quartär und im oberflächennahen Granit verfiltrert und wird so auch vom Grundwasser im Granit - mit höherem hydraulischem Potential - beeinflusst.

Kapitel 6: Beschreibung der hydrogeologischen Verhältnisse

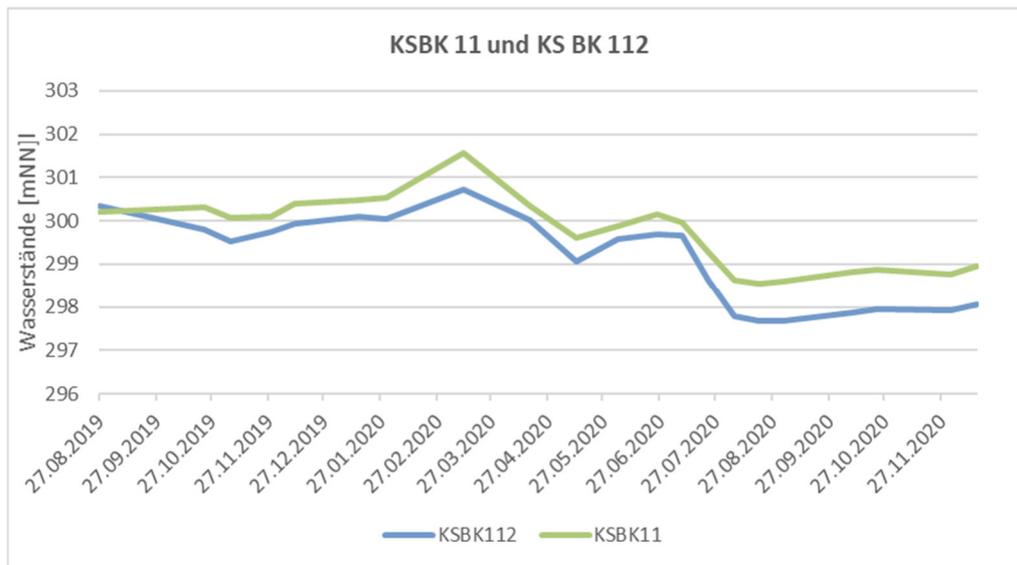


Abb. 23: Vergleich Grundwasserganglinien KS BK 11 und KS BK 112

Tab. 27: Grundwasser-Kenndaten der Grundwassermessstellen im Quartär

	KS BK 11	KS BK 112
Ausbau	3 Zoll-Grundwassermessstelle	5 Zoll-Grundwassermessstelle
Geländeoberkante [mNN]	314,2	311,2
Filterstrecke [m uGOK]	10,0 39,0	10,0 – 14,0
Messzeitraum / -intervall	seit 26.04.2011	seit 26.02.2019
	14-tägig	Einzelmessungen / geplant 14-tägig
NGW [mNN]	297,10	299,94
HGW [mNN]	301,86	300,46
MGW [mNN]	300,32	300,2
MHWG [mNN]	301,24	n.b.
Flurabstand [m u. GOK] bezogen auf MGW	13,88	11,05
Bemerkungen	teilweise im Granit verfiltert, durch Murg beeinflusst	durch Murg beeinflusst

NGW: Niedrigster gemessener Grundwasserstand

HGW: Höchster gemessener Grundwasserstand

MGW: Mittlerer Grundwasserstand (arithm. Mittel der Messreihe)

MHWG: Mittlerer langjähriger Grundwasserhochstand (arithm. Mittel der jährlichen HGW)

n. b.: nicht bestimmbar

6.2 Quellaustritte

Die geplante Unterstufe liegt unmittelbar westlich des Rudolf-Fettweis-Werkes im Murgtal. Nach den Untersuchungen im Rahmen des PWAB-Projektes PW 89.074 in HINDERER und EINSELE (1992) kann im nahegelegenen Seebacheinzugsgebiet grundsätzlich von unterschiedlichen Abflusskomponenten ausgegangen werden, den Grundwasserabfluss über die Trennflächen im Festgestein und den Deckschichtenabfluss oder Interflow innerhalb der quartären Lockergesteine, wobei nach SEEGER (1986) hierin auch ein Anteil von Oberflächenabfluss enthalten ist (siehe Abb. 24).

Aufgrund vergleichbaren geologischen Aufbaus (oberflächennah stärker geklüftetes Festgestein, von flächenhaft verbreitetem Hangschutt überdeckt) und ähnlicher klimatologischer Verhältnisse wie im Seebach-Einzugsgebiet kann für das Einzugsgebiet der Murg ebenfalls von den zwei Abflusskomponenten Grundwasserabfluss und Deckschichtenabfluss ausgegangen werden.

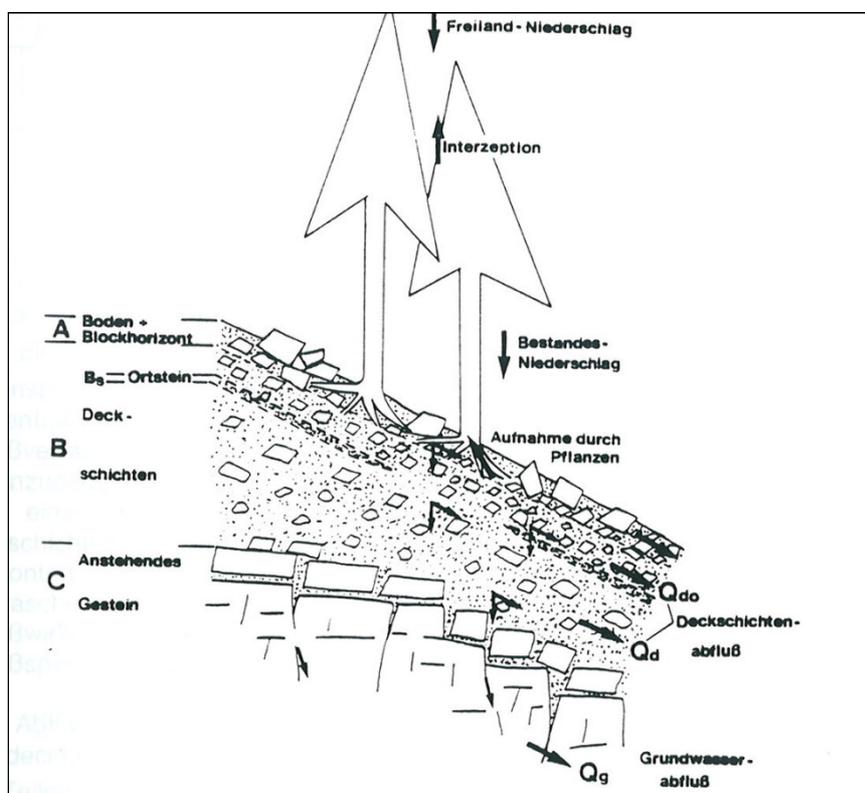


Abb. 24: Schema des Abflussverhaltens im nahegelegenen Seebachgebiet nach HINDERER und EINSELE (1992)

Am Seekopf besteht das Festgestein aus den Sandsteinen des Buntsandsteins und Zechsteins (sogenanntes „Deckgebirge“), die den Forbach-Granit („kristalliner Sockel“) überlagern. An der Grenze zwischen Deckgebirge und kristallinem Sockel ist ein bedeutsamer Quellhorizont mit zahlreichen Quellaustritten ausgebildet.

Im Bereich der geplanten Unterstufe fehlt das Deckgebirge. Hangaufwärts in südwestlicher Richtung sind im Bereich des Furfels noch Reste des Deckgebirges erhalten. Die Grenze zwischen Deckgebirge und kristallinem Sockel liegt auf rund 720 mNN. Auch hier ist der bedeutsame Quellhorizont feststellbar, an dem der überwiegende Teil des Grundwasserabflusses aus dem Deckgebirge austritt und in Oberflächengewässern abgeführt wird. Ein Teil der Wasseraustritte gelangt

Kapitel 6: Beschreibung der hydrogeologischen Verhältnisse

aber nicht direkt an die Oberfläche, sondern tritt in die Schuttdecken über, um als Deckschichtenabfluss talwärts zu fließen. Die Fließkomponente tritt dann teilweise an morphologisch vorgeprägten Stellen (z. B. Hanganschnitte, Steilhänge, Tälchen) wieder an die Oberfläche.

Im Umkreis von Nordost über West bis Süd der geplanten Unterstufe sind zahlreiche Quellen feststellbar. Die Quellen können nach den eigenen Untersuchungen in zwei Gruppen zusammengefasst werden:

- Quellaustritte innerhalb des Forbach-Granites oberhalb, nördlich und südlich der geplanten Unterstufe mit Kraftwerkskaverne und Stollensystem
- Quellaustritte am Übergang Deckgebirge / kristalliner Sockel nordwestlich bis südlich der geplanten Unterstufe

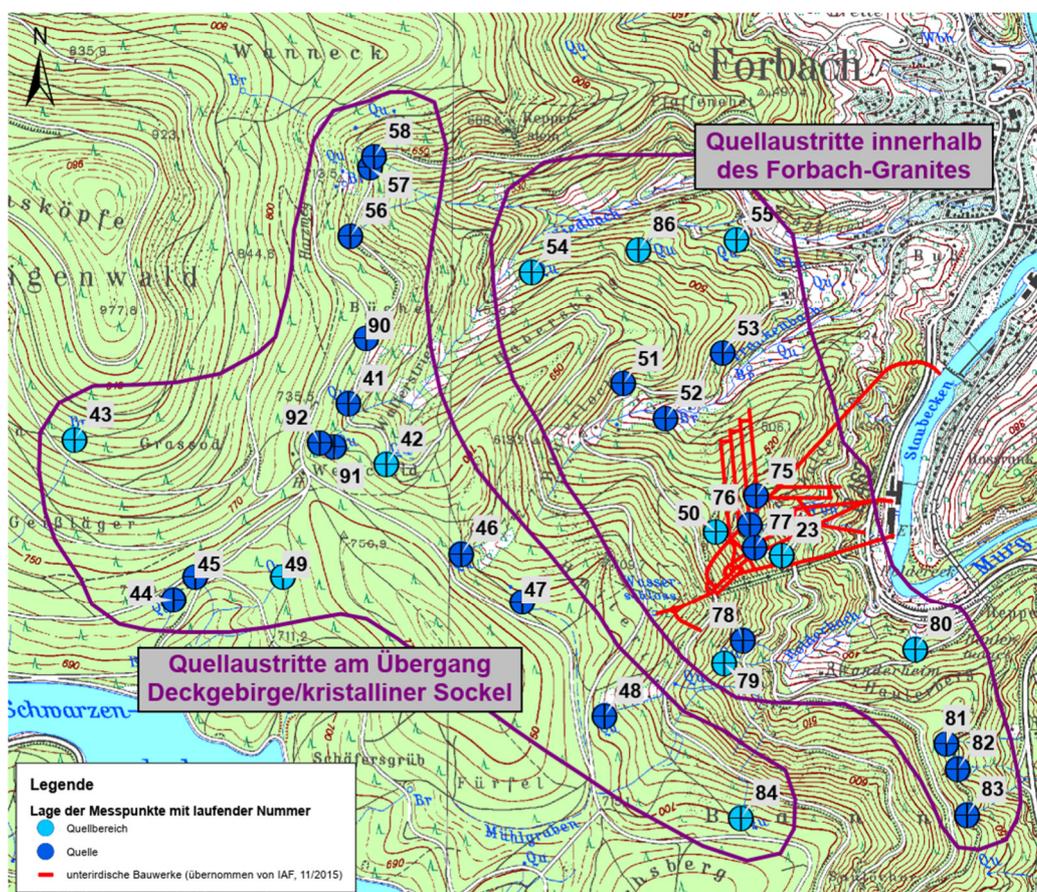


Abb. 25: Ausschnitt aus Lageplan Anlage 1.3 (unmaßstäblich): Bezeichnung der Quellgruppe

Die Quellen wurden in einer ersten Übersichtskartierung von Februar bis Mai 2011 begangen und die Leitfähigkeit sowie die Temperatur gemessen. 2012 und 2013 kamen noch einzelnen Quellen im Gebiet um de Seekopf hinzu, die für den Neubau Unterstufe nicht relevant sind. Vollständigkeitshalber sind alle zwischen 2011 und 2013 erfassten Quellen in dem Lageplan in Anlage 1.3 dargestellt. Die Grund- und Messdaten finden sich in Anlage 5.1.1.1 und Anlage 5.1.2.1.

Im Oktober 2018 und April 2019 fand eine Detailkartierung im Bereich der geplanten Unterstufe statt, die zum Ziel hatte, die Quellkartierung zu vervollständigen und die Quellen besser charakterisieren zu können.

Kapitel 6: Beschreibung der hydrogeologischen Verhältnisse

Die Grund- und Messdaten der Detailkartierung finden sich in Anlage 5.1.1.2 und Anlage 5.1.2.2.

Der Detaillageplan in Anlage 1.4 enthält sämtliche erfassten Quellen im Bereich der Unterstufe.

Ein Einfluss hydrothermalen Komponenten konnte anhand der Messungen nicht festgestellt werden.

Quellaustritte innerhalb des Forbach-Granits

Im Baubereich der geplanten Unterstufe nördlich bis östlich der Kraftwerkskaverne entspringen mehrere in der Regel schwach schüttende Quellen aus dem Forbach-Granit. Es handelt sich entweder um schwach schüttende Quellbereiche mit diffusen Wasseraustritten oder um schwach bis mäßig schüttende Wasseraustritte aus Blockhalden.

Die Quellen speisen kleine Wasserläufe, die sich zu einem kleinen, zum Teil tief eingeschnittenen Bach vereinigen (siehe Kapitel 6.2).

Nordwestlich der Nebenstollen I bis IV entlang des Frankenbaches treten ebenfalls schwach schüttende Quellen aus Hangschutt oder in Wiesenbereichen aus.

Südlich der geplanten Kraftwerkskaverne entspringen schwach schüttende Quellen aus Blockhalden, deren Wasserläufe sich zum Holderbach vereinigen.

Die Schüttungen sind in der Regel gering, die Austritte oft flächig über vernässte Bereiche verteilt. Dies ist durch den durch Blockschutt gebildeten Untergrund bedingt.

Ein Teil der Quellen versiegt im Jahresverlauf. Dies konnte insbesondere durch die Detailkartierung Oktober 2018 (mit vorangegangener ausgeprägter Trockenzeit) und April 2019 (mit vorausgegangenem, wenn auch wenig ergiebigen Niederschlägen) bestätigt werden. Die variierenden Schüttungen und das Versiegen von Quellen belegen, dass die Quellen maßgeblich von kurzzeitigen Fließkomponenten aus Niederschlag und Deckschichtenabfluss) gespeist werden.

Die Temperaturen lagen zwischen 4,8° C (Messung im Februar 2011) und 13,1° C (Messung im April 2011); die deutliche Beeinflussung von der Lufttemperatur belegt, dass die Quellwässer oberflächennah im Hangschutt flossen, ehe sie am Messpunkt zu Tage traten.

Die Quellwässer aus dem kristallinen Grundgebirge weisen Leitfähigkeiten zwischen 26 µS/cm und 67 µS/cm auf. Die Leitfähigkeiten waren im April 2019 durchweg geringer als im Oktober 2018. Dies ist ein weiteres Indiz dafür, dass die Quellen je nach Witterung einen mehr oder weniger großen Anteil an versickernden Niederschlägen unmittelbar oberhalb der Quellaustritte haben.

Neben den sehr kurzfristigen Fließkomponenten aus diesen direkt oberhalb der Quellaustritte versickernden Niederschlägen und aus der Schneeschmelze treten etwas längerfristige Fließkomponenten auf, die aus zu sickerndem Deckschichtenabfluss weiter hangaufwärts herrühren und die Quellen zeitlich etwas länger schütten lassen. Nicht gänzlich ausgeschlossen werden können zudem aus dem Gebirge austretende Wässer (vor allem im Bereich der Schichtgrenze Deckgebirge / kristalliner Sockel), die in die Deckschichten übertreten und darin hangabwärts fließen. Ihr Anteil ist aber nach den vorliegenden Erkenntnissen gering.

Hinweise auf direkt aus dem Granit an die Oberfläche tretenden Wässern konnten nicht gefunden werden.

Kapitel 6: Beschreibung der hydrogeologischen Verhältnisse

Quellaustritte am Übergang Deckgebirge / kristalliner Sockel

Der Übergang vom Deckgebirge (Tigersandstein-Formation) zum kristallinen Sockel aus Forbach-Granit stellt im ganzen Nordschwarzwald einen oft ergiebigen Quellhorizont dar. Die Quellen werden vom Grundwasser des Deckgebirges gespeist und treten als typische Schichtquellen oberhalb des erosiv angeschnittenen kristallinen Sockels oder ein wenig unterhalb dieser Grenze im Bereich von Hangschuttmassen aus.

Auch nordwestlich bis südwestlich der geplanten Unterstufe entspringen am Fuß der Streitmannsköpfe, des Fürfels und des Lachsberges auf einer Höhenlage von ca. 700 mNN bis 720 mNN zahlreiche Quellen.

Insgesamt wurden am Übergang vom Deckgebirge (Tigersandstein-Formation) zum kristallinen Sockel aus Forbach-Granit 15 Quellaustritte kartiert.

Die der geplanten Kraftwerkskaverne nächstgelegenen Quellen befinden sich rund 600 m westlich davon.

Teilweise handelt es sich um kleine Quellsümpfe mit Schüttungen unter 0,1 l/s, teilweise liegen kräftig schüttende Quellen mit ca. 5 l/s vor.

Einige der kartierten Quellen stellen reine Schichtquellen dar mit recht konstanten Schüttungsraten und gleichbleibenden Temperaturen von rund 7° C. Zu diesen als „Basisquellen“ bezeichneten Quellen gehört auch die Höfelsbrunnquelle (Nr. 90), die wasserwirtschaftlich genutzt wird.

Die meisten kartierten Quellen werden aber teilweise bis vorwiegend aus im Hangschutt abfließendem oberflächennahem Wasser (sog. „Deckschichtenabfluss“) gespeist. Dies erklärt die z. T. großen Unterschiede in den gemessenen Leitfähigkeiten und Temperaturen der erfassten Quellen: Die Leitfähigkeiten lagen insgesamt zwischen 30 bis 80 $\mu\text{S}/\text{cm}$, und die Temperaturen lagen zwischen 4° C und 10,8° C.

6.3 Oberflächengewässer

Im Bereich der geplanten Unterstufe existieren als großes Fließgewässer die **Murg** sowie als Stillgewässer das **Ausgleichsbecken des Rudolf-Fettweis-Werkes**.

Der Westhang des Murgtals bei Forbach wird über mehrere kleine Bachläufe zur Murg bzw. zum Ausgleichsbecken hin entwässert.

Die namenlosen kleinen Bachläufe, die nördlich der geplanten Unterstufe in den **Frankenbach** bzw. den **Wiedbach** und südlich der Unterstufe in den **Holderbach** münden, werden i. W. von den Quellaustritten im Westhang des Murgtals gespeist.

Die Quellen direkt oberhalb der geplanten unterirdischen Bauwerke münden in ein zum Teil tief eingeschnittenes Fließgewässer, das direkt in das Ausgleichsbecken des Rudolf-Fettweis-Werkes mündet und im Folgenden als „**Löschteich-Bach**“ bezeichnet wird. Oberhalb des untersten Forstweges ist der Bach mit einem kleinen Wehr aufgestaut. Das Wasser fließt bei geringen bis mittleren Abflüssen in einen Wasserbehälter, der der Löschwasserversorgung des Rudolf-Fettweis-Werkes dient. Da der Behälter im Regelfall gefüllt ist, fließt das Wasser unterhalb des Behälters sofort wieder dem Bach zu. Stärkere Abflüsse können den Behältereinlauf überfließen und verbleiben im Bachbett.

Kapitel 6: Beschreibung der hydrogeologischen Verhältnisse

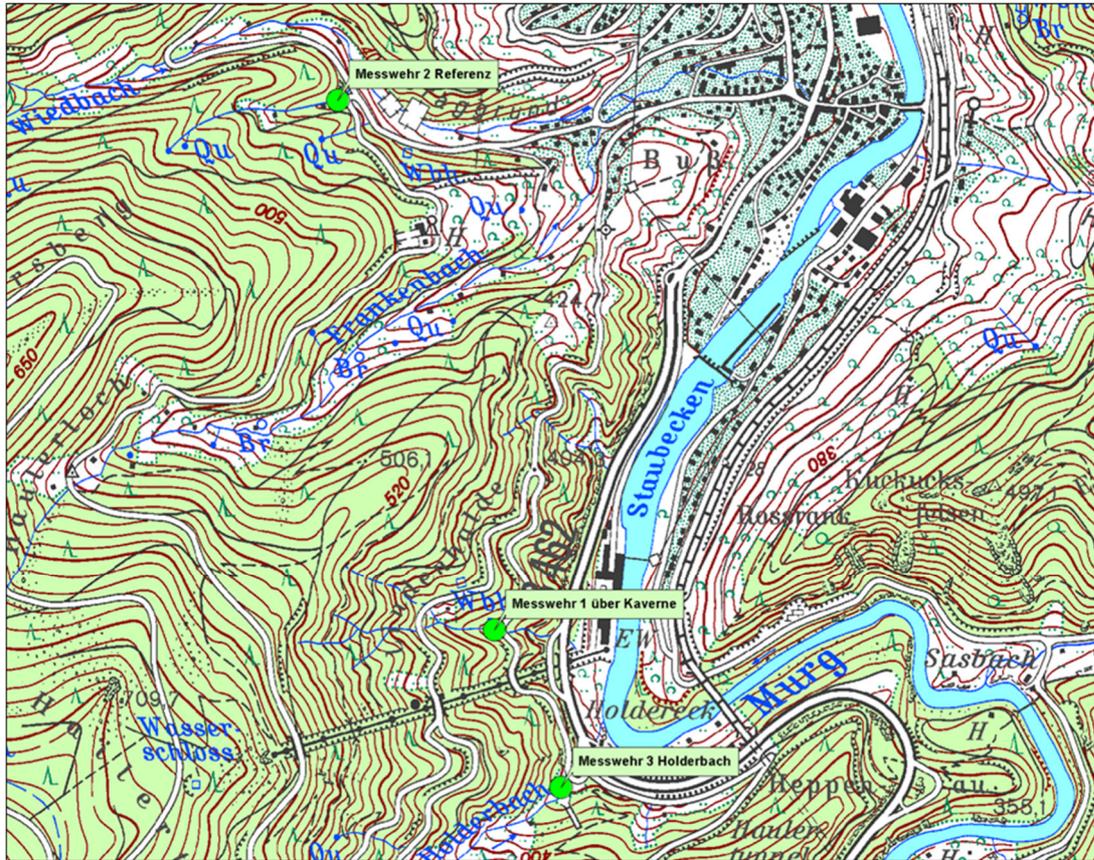


Abb. 26: Lage der Messwehre

An drei Bachläufen (Löschteich-Bach, Holderbach und kleiner Bachlauf zum Wiedbach) wurden zwischen September 2011 und September 2013 wöchentlich Abflussmessungen durchgeführt (siehe Kapitel 4.6.2). Die Messungen können als Grundlage der Beweissicherung der hydrologisch-hydrogeologischen Situation vor Beginn untertägiger Bauarbeiten dienen.

Messwehr 1 "Löschteich" erfasst den wesentlichen oberirdischen Abfluss aus dem Baubereich der geplanten Unterstufe

Messwehr 2 "Referenz" dient als vom Bauvorhaben unbeeinflusste Referenzmessstelle,

Messwehr 3 "Holderbach" erfasst den Abfluss des Holderbaches, unter dem der ursprünglich geplante Zufahrtsstollen zum Kavernenwasserspeicher verlief.

Das Messprinzip, eine Fotodokumentation und die Messergebnisse sind in Anlage 5.4 zusammengestellt.

Kapitel 6: Beschreibung der hydrogeologischen Verhältnisse

Tab. 28: Kennzahlen der wöchentlichen Abflussmessungen, Messzeitraum: 06.09.2011 bis 20.09.2013

Messstelle	Abfluss [l/s]	Leitfähigkeit [µs/cm]	pH-Wert	Temperatur [° C]
Messwehr 1 "Löschteich"	0,5 - 19,0	36,3 - 51,4	6,0 - 8,0	0,5 - 16,4
Messwehr 2 "Referenz"	0,4 - 17,0	41,0 - 55,6	4,9 - 7,3	2,2 - 15,0
Messwehr 3 "Holderbach"	1,0 - 67,9*	32,1 - 46,8	5,5 - 7,9	0,3 - 16,7

* Das Messwehr wurde nach Schneeschmelze und Starkregen im Dezember 2012 überströmt.

Alle drei Bäche werden von Quellen, die innerhalb des Forbach-Granits entspringen, gespeist. Sie waren ganzjährig wasserführend.

Die Abflussmengen lagen zwischen 0,4 l/s und über 67,9 l/s. Abflussspitzen treten sehr kurzfristig auf und gehen auch sehr rasch zurück.

In Abb. 27 ist der Abfluss am Messwehr 1 den Niederschlägen und Schneehöhen gegenübergestellt. Die Messstationen liegen zwar in größerer Entfernung von den Messwehren, dennoch ist von ähnlichen Verhältnissen auszugehen. Den folgenden Aussagen wird zu Grunde gelegt, dass die Regenverteilung in Forbach und an der Schwarzenbachtalsperre annähernd gleich ist: Damit lässt sich an der Graphik gut erkennen, dass bereits unmittelbar nach stärkeren Niederschlägen der Abfluss zunimmt. Da die Messperioden unterschiedlich sind (Niederschläge werden täglich aufgezeichnet, die Abflussmengen wurden nur wöchentlich erfasst), folgt in der Grafik nicht jedem Starkregen eine Abflussspitze; dies zeigt, wie rasch der Abfluss auf Niederschläge reagiert und ebenfalls rasch wieder zurückgeht. Besonders deutlich wird in der Grafik auch der Zusammenhang zwischen Schneeschmelze und Oberflächenabfluss.

Die Leitfähigkeiten lagen zwischen 32 µS/cm und 56 µS/cm und waren damit erwartungsgemäß gering, da die Bachläufe aus niedrig mineralisierten Niederschlags- und Grundwässern (v. a. Hangschuttwässern) gespeist werden. Bei sprunghaft ansteigenden Abflüssen fällt die Leitfähigkeit oftmals ab, was mit der Zunahme an sehr niedrig mineralisiertem Schmelz- und Regenwasser erklärt werden kann. Dementsprechend kann bei länger anhaltenden regenarmen Zeiten und sinkenden Abflussmengen (z. B. Oktober/November 2011 und Juli/August 2012) ein leichter Anstieg der Leitfähigkeit festgestellt werden. Die Ursache liegt darin, dass der Anteil an Wasser ansteigt, das längere Fließwege zurücklegte und so mehr Mineralien aufnehmen konnte. Insgesamt sind die Unterschiede aber nicht sehr groß.

Die pH-Werte lagen zwischen 4,9 und 8,0 und damit im schwach sauren bis schwach alkalischen Bereich. Eindeutige Zusammenhänge zwischen pH-Wert und Abflussmengen sind nicht erkennbar.

Der Jahresgang der Gewässertemperaturen folgt der mittleren Lufttemperatur, die gemessenen Temperaturen verlaufen zyklisch zwischen Werten von bis über 16°C im Juli/August und bis unter 1°C von Januar bis März.

Vergleicht man die Messreihen der drei Messwehre untereinander, zeigen sich geringfügige Unterschiede:

Der Holderbach führt die größte Wassermenge; sein Abfluss-Spitzenwert betrug das 3,5- bis 4-fache der Spitzenwerte der beiden anderen Bachläufe. Dies ist damit zu erklären, dass der Holderbach das größte oberirdische Einzugsgebiet der drei Bachläufe besitzt.

Kapitel 6: Beschreibung der hydrogeologischen Verhältnisse

Das Wasser des Holderbach wies auch die niedrigsten Leitfähigkeiten auf, das Wasser am Messwehr 2 "Referenz" die höchsten. Zudem wurden am Messwehr 2 etwas niedrigere pH-Werte gemessen als an den beiden anderen Messwehren, und es zeigt gegenüber den Messwehren 1 und 3 etwas geringere Temperaturdifferenzen. Höhere Leitfähigkeit und geringere Temperaturdifferenzen sind bei Quellwässern zwar ein Hinweis auf höhere Anteile an längerfristigen Fließkomponenten, hier an den oberirdischen Abflüssen können die Unterschiede aber auch allein aus den Unterschieden der oberirdischen Einzugsgebiete erklärt werden.

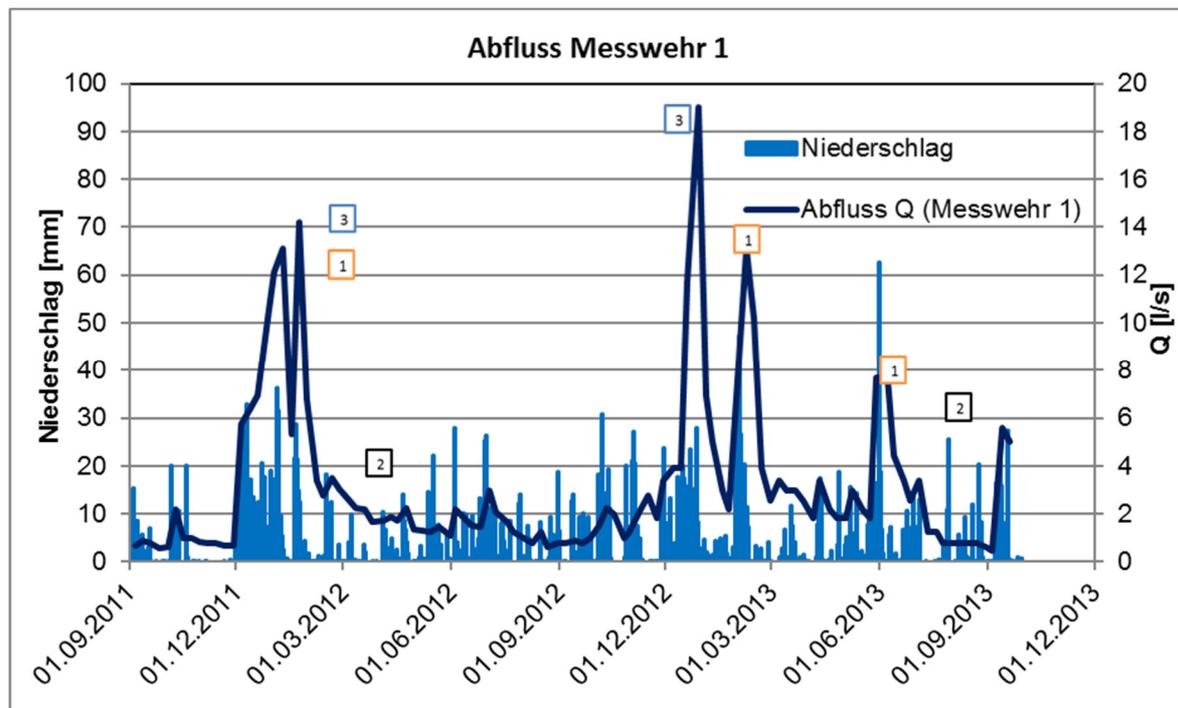


Abb. 27: Gegenüberstellung Niederschläge und Abfluss am Messwehr 1 "Löschteich"

Schneehöhe: Daten des DWD, Station Freudenstadt

Regen: Daten der EnBW, Station Schwarzenbachtalsperre

Beispielhaft herausgegriffene Situationen: 1 Abflussspitze nach Regenereignis bzw. Schneeschmelze nicht erfasst, vermutlich wegen zu großer Messintervalle 2 Abflussspitze nach Regenereignis 3 Abflussspitzen nach Schneeschmelze

Kapitel 6: Beschreibung der hydrogeologischen Verhältnisse

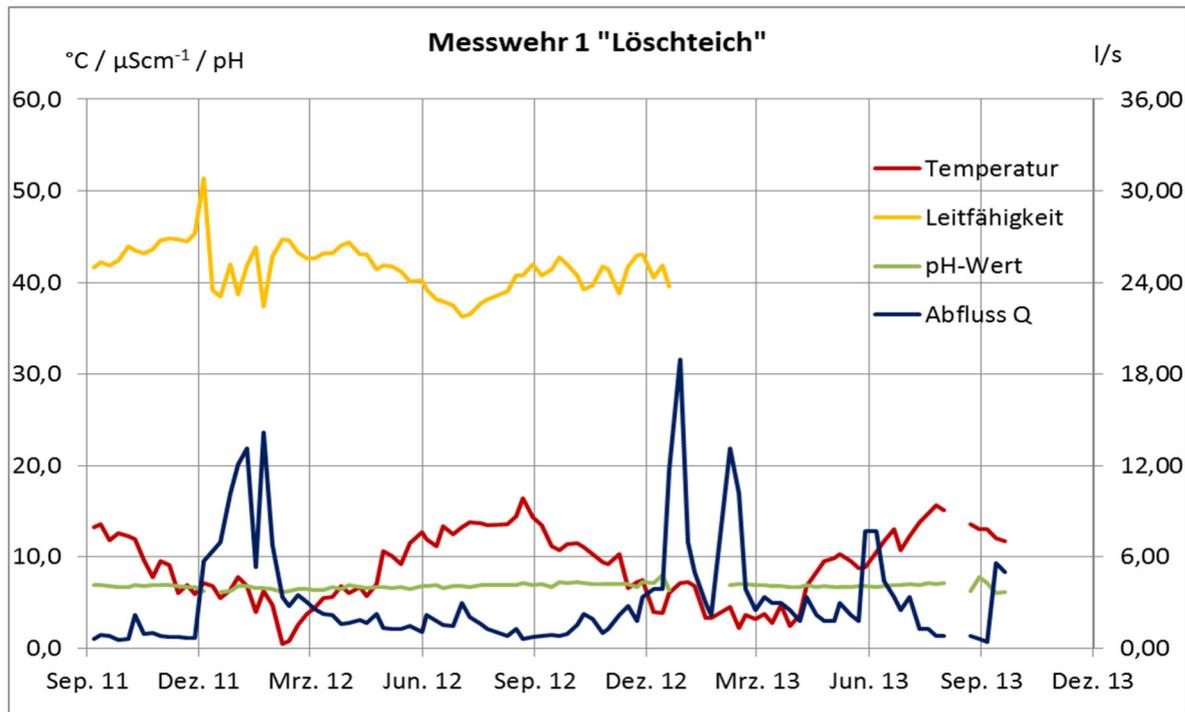


Abb. 28: Messreihe der Messwehrs 1 "Löschteich"

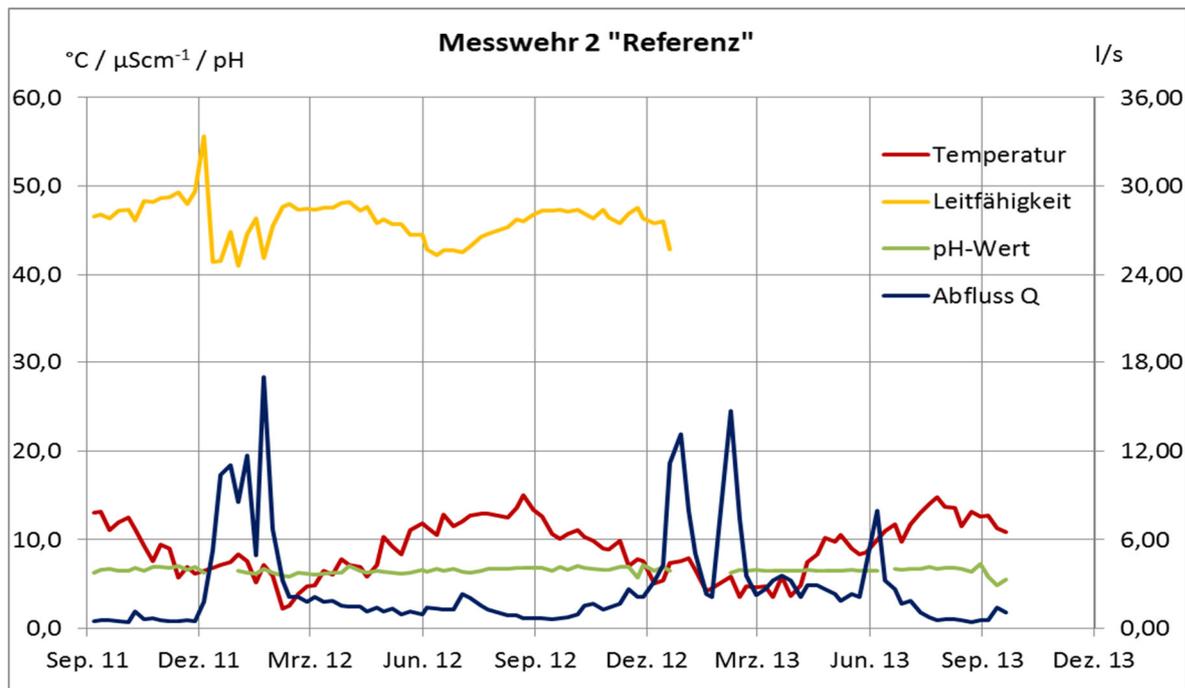
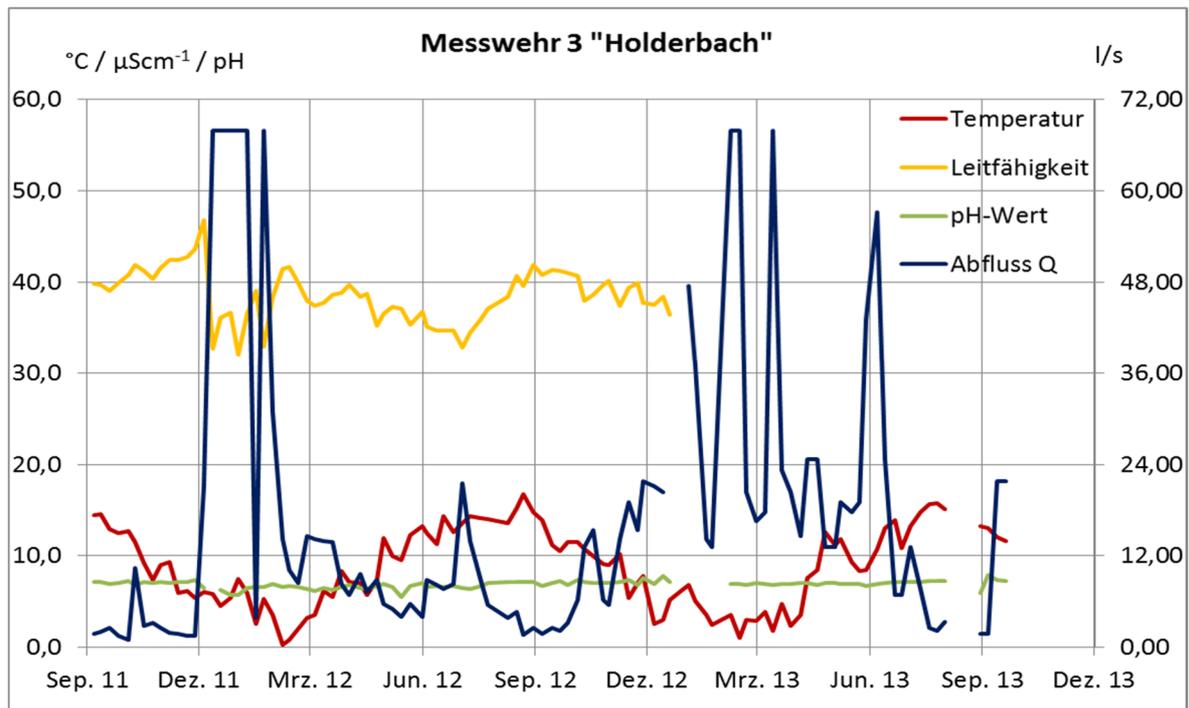


Abb. 29: Messreihe des Messwehrs 2 "Referenz"

Kapitel 6: Beschreibung der hydrogeologischen Verhältnisse

**Abb. 30: Messreihen des Messwehrs 3 "Holderbach"**

6.4 Wasserchemismus

6.4.1 Hydrochemische Charakterisierung des Grundwassers

Das Grundwasser aus dem Kristallin-Aquifer wird von BIEHLER, 1995 als gering mineralisiertes Hydrogencarbonatwasser klassifiziert. Es zeichnet sich folglich durch eine geringe Leitfähigkeit und geringe Wasserhärte aus. Der pH-Wert liegt im schwach sauren bis schwach basischen Bereich.

Bereits im Zuge des Bohrprogramms 2010/2011 fanden Grundwasseruntersuchungen statt, die durch weitere Untersuchungen abgesichert werden sollten.

Kapitel 6: Beschreibung der hydrogeologischen Verhältnisse

Tab. 29: Probenahme Grundwasser

Entnahmestelle	Entnahmetiefe bzw. Filterstrecke [m u. GOK]	Entnahmeart	Datum / Probennehmer	Stratigraphische Herkunft des Wassers
KS BK 5	0,00 – 162,00	Pumpprobe im Zuge eines Kurzpumpversuchs im offenen Bohrloch	16.02.2011 / Mailänder Consult	Forbach-Granit
KS BK 9	0,00	Schöpfprobe aus Standrohr	24.01.2011 / Mailänder Consult	Forbach-Granit
KS BK 5	120,00 – 160,00	Pumpprobe aus ausgebauter Grundwassermessstelle	11.12.2018 / HPC	Forbach-Granit
KS BK 112	9,80 – 13,80	Pumpprobe im Zuge eines Pumpversuchs in der ausgebauten Grundwassermessstelle	18.12.2018 / HPC	Murgschotter
KS BK 107-neu GWM	6,00 – 22,00	Pumpprobe im Zuge eines Pumpversuchs in der ausgebauten Grundwassermessstelle	19.11.2019 / HPC	Forbach-Granit, oberflächenah

Die Probenahmeprotokolle und Laborberichte sind als Anlage 4.3.2, 5.2.1, Anlage 5.2.3 und Anlage 5.2.4 beigefügt.

Abb. 31 zeigt die nach den Umrechnungsfaktoren von HÖLTING (1989) ermittelten Äquivalent-Ionenkonzentrationen der Hauptbestandteile der vier Grundwasserproben. Parallel verlaufende Kurven bedeuten gleiche Äquivalent-Ionenverteilungen, unabhängig von der Konzentration.

Die Grundwasserproben stammen mit Ausnahme der Probe aus KS BK 112 alle aus dem Granit und weisen daher ähnliche Äquivalent-Ionenkonzentrationen auf. Die Probe aus KS BK 112 fällt durch höhere Natrium- und Chlorid-Gehalte auf, die möglicherweise auf Streusalzeintrag aus der oberhalb der Messstelle gelegenen Bundesstraße B 462 stammen.

In Abb. 32 sind die für die hydrochemische Charakterisierung des Grundwassers maßgeblichen Äquivalent-Ionenkonzentrationen als Schöller-Diagramm dargestellt.

Kapitel 6: Beschreibung der hydrogeologischen Verhältnisse

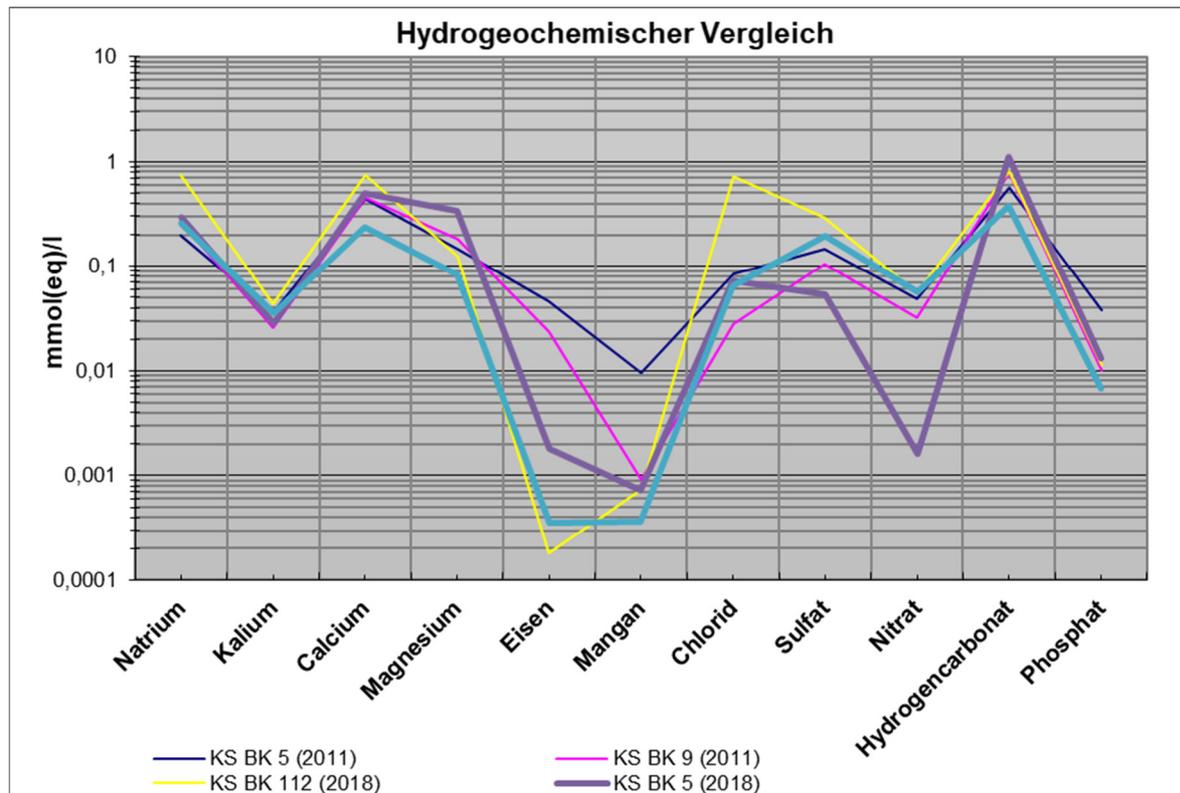


Abb. 31: Äquivalent-Ionenkonzentrationen der Grundwasserproben

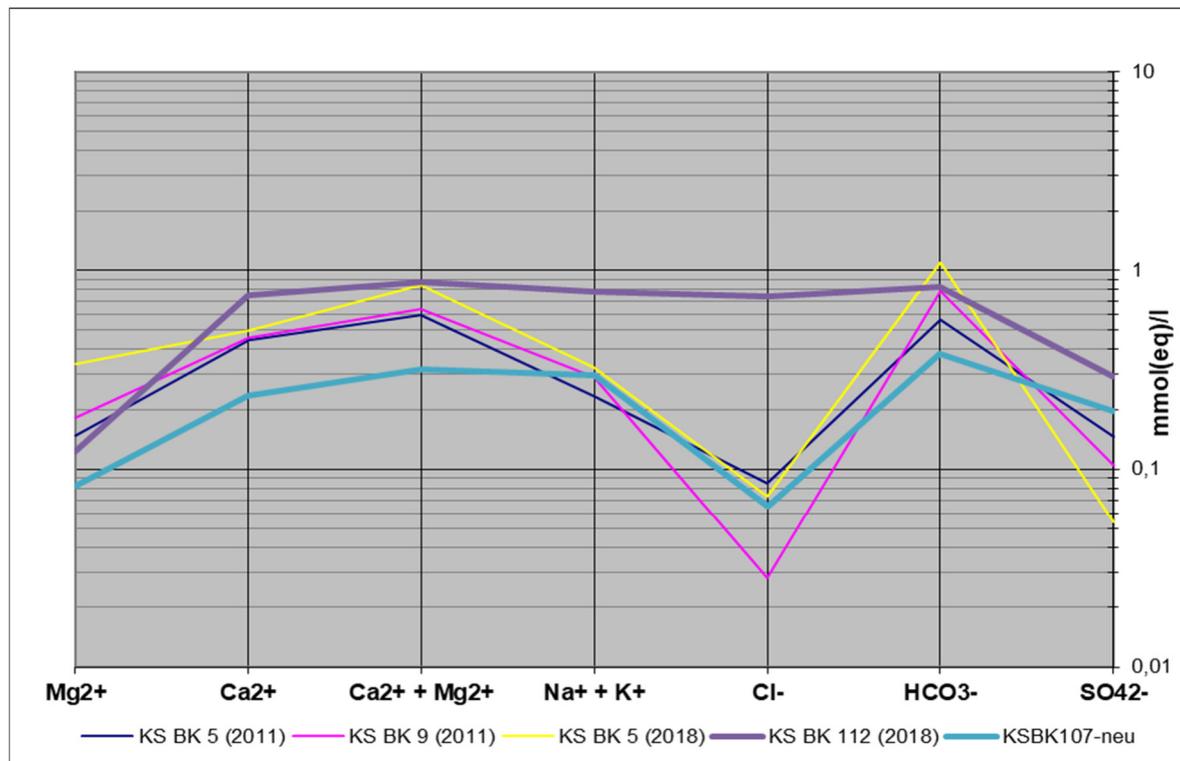


Abb. 32: SCHOELLER-Diagramm, Äquivalent-Ionenkonzentrationen zur hydrochemischen Charakterisierung der Grundwasserproben

Kapitel 6: Beschreibung der hydrogeologischen Verhältnisse

Zur weiteren Charakterisierung des Grundwassers wurde aus den Äquivalent-Ionenkonzentrationen der prozentuale Anteil der einzelnen Ionen an der Summe der Kationen- bzw. der Anionen-Äquivalente errechnet und gemäß FURTA & LANGGUTH (1967) in HÖLTING (2009) in die entsprechende Gruppe qualitativ eingeteilt.

Nach dieser Einteilung ist das Wasser aus dem Granit im Bereich der geplanten Unterstufe als überwiegend hydrogencarbonatisches Erdalkali-Wasser mit höherem Alkaligehalt zu charakterisieren.

6.4.2 Betonaggressivität des Grundwassers

Zur Bewertung der Betonaggressivität des Grundwassers fanden bohrbegleitend zu der Bohrkampagne 2018/2019 Untersuchungen statt. Diese Untersuchungen wurden ergänzend zu den 2010/2011 und 2014 erhobenen Daten ausgewertet. Die Laborberichte sind in Anlage 5.2.1, Anlage 5.2.3 und Anlage 5.2.4 enthalten.

Neben diesen Ergebnissen werden auch die Ergebnisse aus Wasseruntersuchungen an der geplanten Oberstufe "Seekopf" aus 2011 und 2014 zur Bewertung der Betonaggressivität herangezogen [16].

Die Beurteilung der Betonaggressivität der Grundwässer erfolgt nach DIN 4030-1:2008-06: Beurteilung betonangreifender Wässer, Böden und Gase - Teil 1: Grundlagen und Grenzwerte. Die hierfür relevanten Grenzwerte sind in Tab. 30 dargestellt.

Tab. 30: Grenzwerte bei chemischem Angriff durch natürliche Grundwasser nach DIN 4030-1:2008-06

Expositionsklasse ¹⁾		XA1	XA2	XA3
pH-Wert	-	6,5 - 5,5	5,5 - 4,5	4,5 - 4,0
Ammonium (NH ₄ ⁺)	mg/l	15 - 30	30 - 60	60 - 100
Magnesium (Mg ²⁺)	mg/l	300 - 1000	1000 - 3000	> 3000
Sulfat (SO ₄ ²⁻)	mg/l	200 - 600	600 - 3000	> 3000 und ≤ 6000
CO ₂ (kalklösend)	mg/l	15 - 40	40 - 100	> 100

¹⁾ Die Klasseneinteilung gilt für chemisch angreifende natürliche Grundwässer mit einer Wassertemperatur zwischen 5°C und 25°C und einer Fließgeschwindigkeit des Wassers, die klein genug ist, um näherungsweise hydrostatische Bedingungen anzunehmen.

Kapitel 6: Beschreibung der hydrogeologischen Verhältnisse

Betonaggressivität

Das Grundwasser im tieferen Forbach-Granit (KS BK 5, KS BK 9) ist aufgrund des pH-Werts und/oder des kalklösenden CO₂-Gehaltes in einer von vier Proben der Expositionsklasse XA1 nach DIN 4030-1 zuzuordnen. Sollte sich bei weiteren Messungen der niedrige pH-Wert und der hohe Gehalt an kalklösendem CO₂ weiterhin nicht bestätigen, läge keine Expositionsklasse vor und das Grundwasser könnte als nicht betonangreifend klassifiziert werden.

Oberflächennahes, atmosphärisch beeinflusstes Grundwasser wurde am Seekopf untersucht (SK BK 8); die Ergebnisse zeigen, dass dieses Wasser aufgrund seines kalklösenden CO₂-Gehaltes die Expositionsklasse XA2 erreichen kann.

Auch für das quartäre Grundwasser an der Unterstufe muss von der Expositionsklasse XA1 bis XA2 ausgegangen werden.

Oberflächennahes, atmosphärisch beeinflusstes Grundwasser wurde am Seekopf untersucht (SK BK 8); die Ergebnisse zeigen, dass dieses Wasser aufgrund seines kalklösenden CO₂-Gehaltes die Expositionsklasse XA2 erreichen kann.

Das Grundwasser im Forbach-Granit hat eine sehr geringe Carbonathärte (CaO < 30 mg/l), was zur Weichwasserkorrosion führen kann.

Tab. 31: Analyseenergebnisse und Expositionsklassen Grundwässer

Wasserprobe		KS BK 5 (2014)	KS BK 5 (2011)	KS BK 9 (2011)	KS BK 5 (2018)	KS BK 112 (2018)	SK BK 8 (2014)	SK BK 8 (2011)
		Forbach-Granit Unterstufe Tieferes Gebirge				Quartär	Forbach-Granit Oberstufe Seekopf oberflächennah	
pH-Wert	-	6,4	7,7	7,1	7,3	6,6	7,8	7,2
Ammonium (NH ⁴⁺)	mg/l	<3	<0,05	<0,05	<0,03	<0,03	<3	<0,05
Magnesium (Mg ²⁺)	mg/l	1,4	1,8	2,2	4,1	1,5	4	4,7
Sulfat (SO ₄ ²⁻)	mg/l	13	7	5	2,6	14	8,9	7
CO ₂ (kalklösend)	mg/l	17,2	<5	8,8	7	21	2	53
Expositionsklasse chemischer Angriff nach DIN 4030-1		XA1	keine	keine	keine	XA1	keine	XA2

Zur Beurteilung der Korrosionswahrscheinlichkeit für unlegierten und niedriglegierten Stahl wurden die Proben KS BK 5 und KS BK 112 von 2018 nach DIN 50929 T3 untersucht. Die Korrosionswahrscheinlichkeit der Wasserprobe KS BK 5 wurde als sehr gering eingestuft, während die der Wasserprobe KS BK 112 aus dem quartären Grundwasserleiter als gering (Flächenkorrosion) bis mittel (Mulden- und Lockkorrosion) klassifiziert wurde.

Kapitel 6: Beschreibung der hydrogeologischen Verhältnisse

6.4.3 Einleitung des Grundwassers in Oberflächengewässer

Gemäß Trinkwasserverordnung (TVO, 2001) sind folgende Befunde auffällig:

In beiden Grundwasserproben aus den Bohrungen KS BK 5 und KS BK 9 von 2011 überschritten die Eisenkonzentrationen den Grenzwert der TVO. Die Probe KS BK 5 lag zudem über dem Grenzwert für Mangan und Aluminium. Der erhöhte Aluminium-Gehalt konnte in der Nachbeprobung 2014 jedoch nicht bestätigt werden, die Konzentration lag deutlich unter dem Grenzwert gemäß TVO.

Die Untersuchungen von 2018/2019 zeigen für die Wasserproben aus KS BK 5 und KS BK 112 keine Überschreitung der Grenzwerte der TVO.

Eisen, Mangan und Aluminium sind fischtoxisch und können Algen und Daphnien schädigen. Erhöhte Gehalte sind nach Vorliegen der Ergebnisse aus 2018 nicht mehr zu erwarten. Aufgrund der früheren Befunde können erhöhte Werte jedoch nicht generell ausgeschlossen werden. Vor Einleitung von baubedingt anfallendem Grundwasser in Oberflächengewässer ist gegebenenfalls eine Enteisenerungs-/Entmanganisierung und eine Erhöhung des pH-Werts erforderlich.

6.4.4 Eignung von Oberflächenwasser als Zugabewasser für Beton und Prüfung der Korrosionswahrscheinlichkeit

Am 26.09.2012 wurden durch das Labor Geochem, Dr. Ritter an der Schwarzenbachtalsperre und am Ausgleichsbecken des Rudolf-Fettweis-Werks in Forbach Oberflächenwasserproben genommen und nach DIN EN 1008 sowie DIN 50929 T3 untersucht. Analysenberichte finden sich in Anlage 5.2.3.

Beide Wasserproben zeigten bei der Probennahme eine bräunliche Färbung, waren jedoch klar. Die Färbung ist auf Huminstoffe zurückzuführen.

Die Ergebnisse zeigen folgendes Bild:

Eignung als Zugabewasser für Beton nach DIN EN 1008

Die Wasserproben aus beiden Oberflächengewässern zeigen pH-Werte im neutralen Bereich und sehr niedrige elektrische Leitfähigkeiten. Durch die sehr niedrige Ionenfracht sind die Wässer als sehr niedrig mineralisiert einzustufen. Als Bestandteil, der das Erhärten oder andere Eigenschaften des Betons ungünstig beeinflussen kann, ist der Huminstoffgehalt zu erwähnen. Dieser kann die Brauchbarkeit als Zugabewasser für die Betonherstellung einschränken.

Korrosionswahrscheinlichkeit nach DIN 50929 T3:

Für beide Wasserproben gibt es für alle zu erwartenden Bauwerkskonfigurationen geringe oder sehr geringe Wahrscheinlichkeiten der Korrosion. Für einzelne Bauwerke muss jeweils eine Beurteilung nach DIN 50929 anhand der in Anlage 5.2.3 enthaltenen Tabelle durchgeführt werden.

6.5 Wasserschutzgebiete und Wassernutzungen

Die geplante Unterstufe liegt außerhalb von Wasserschutzgebieten. Auch eingetragene Wasserrechte für Kleinwassernutzungen liegen nicht vor.

Kapitel 6: Beschreibung der hydrogeologischen Verhältnisse

Im weiteren Umfeld der geplanten Unterstufe und des Energieableitungstollens befindet sich, unterhalb der Streitmannsköpfe, das Wasserschutzgebiet Nr. 105 "Gemeinde Forbach, Blindsee-Wulzenberg-Fliegenloch-Höfelsbrunnenquelle".

Die geplanten unterirdischen Bauwerke der Unterstufe liegen mehr als 1,3 km östlich bis südöstlich der Zone II der Höfelsbrunnenquelle.

Das Heilquellenschutzgebiet für die Thermalquellen in Baden-Baden (Schutzgebietsnummer 211007) liegt ca. 4 km nordwestlich der geplanten Unterstufe. Der westliche Teil der unterirdischen Bauwerke liegt noch innerhalb des Untersuchungsraums des LGRB für die Neuabgrenzung des Heilquellenschutzgebiet.

An der Baustelleneinrichtungsfläche Heiligenwald, ca. 1,5 km südlich der Kraftwerkskaverne befindet sich das Wasserschutzgebiet Nr. 110 "Gemeinde Forbach, Schneiderskopfquelle". Nach Planungsstand Juli 2015 wird das Wasserschutzgebiet von bauzeitlich genutzten Wegen zur Baustelleneinrichtungsfläche Heiligenwald gequert. Die Schneiderskopfquelle wird derzeit nicht für die Trinkwasserversorgung genutzt.

Einige der Quellen entspringen im Bereich von Waldwiesen, wo sie früher zur Wiesenwässerung genutzt wurden.

6.6 Wasserbilanz

Von der LUBW wurden am 07.05.2019 für Forbach die folgenden Wasserhaushaltsdaten bereitgestellt:

Tab. 32: Wasserhaushaltsdaten der LUBW für Forbach

Haushaltsgröße	Langjähriges Mittel 1991 - 2015 [mm/a]
Niederschlag (ND)	1.427,6
Verdunstung (V)	714,9
Oberflächenabfluss	115,7
Sickerung aus Boden	599,6
Grundwasserneubildung	222,4
Gesamtabfluss (= ND - V)	712,7

Der Wasser- und Bodenatlas Baden-Württemberg (2012) weist für den Bereich der Unterstufe eine Grundwasserneubildung von > 400 mm/a bis 500 mm/a aus, d. s. 13 l/s bis 16 l/s pro km².

7 Hydrogeologisches Standort-Modell

Abgeleitet aus den Beobachtungen am Seekopf ergibt sich an der Unterstufe aufgrund gleicher Geologie und klimatischer Verhältnisse des Einzugsgebietes folgendes Bild:

Auf der im Einzugsgebiet der geplanten Unterstufe gelegenen Hochfläche der Streitmannsköpfe, wo die Sandsteine des Deckgebirges anstehen, erfolgt vermutlich wie am Seekopf, bis in mehrere Dekameter Tiefe ein rasches Eindringen von Niederschlagswasser über zahlreich vorhandene offene Klüfte in den Sandsteinen.

Der überwiegende Teil des in den Sandsteinen versickernden Niederschlagswassers speist die "Basisquellen" der Quelllinie an der Grenze Deckgebirge (Tigersandstein-Formation)/Forbach-Granit. Der Hauptquellhorizont liegt auf einer Höhenlage von ca. 700 mNN. Hier sind die Quellen mit der höchsten Schüttung zu finden. Einige dieser Quellen werden wasserwirtschaftlich genutzt (Wasserschutzgebiet Nr. 105 "Gemeinde Forbach, Blindsee-Wulzenberg-Fliegenloch-Höfelsbrunnenquelle").

Die oberirdischen und unterirdischen Bauwerke reichen nicht bis zu dieser an der Geländeoberfläche liegenden Grenze; die Untertagebauwerke werden nur vom Granit und den quartären Lockergesteinsdecken überlagert.

Ein kleiner Teil des in den Sandsteinen versickernden Niederschlagswassers versickert in die Klüfte des Granits und sorgt für die Wasserführung des Forbach-Granits.

Auch ein Teil des Niederschlags, der auf die Berghänge aus Granit fällt, speist das Grundwasser im Forbach-Granit. Allerdings fließt hier der weitaus überwiegende Teil hangparallel in den Schuttdecken (Hangschutt, Fließerden) als sogenannter Zwischenabfluss oder "interflow" talwärts. Dieser Zwischenabfluss wird zudem von Wasseraustritten aus dem Bereich der Basisquellen (Grenzbereich Tigersandstein-Formation / Forbach-Granit) gespeist.

Somit sind an der Geländeoberfläche über den geplanten unterirdischen Bauwerken zwar einige Quellaustritte feststellbar, die aber im Vergleich zu den "Basisquellen" eine geringe Schüttung aufweisen und oft als Blockschuttquellen ausgebildet sind. Sie werden vermutlich ausschließlich aus dem Zwischenabfluss gespeist. Ein Grundwasseranteil aus dem granitischen Kluffgrundwasserleiter ist in diesen Quellen nicht bis allenfalls sehr gering anzunehmen.

Hinweise auf direkt aus dem Granit an die Oberfläche tretenden Wässern konnten nicht gefunden werden. Quellen, die vorwiegend oder gar ausschließlich aus längere Zeit im Granit zirkuliertem Grundwasser gespeist werden, waren somit nicht nachweisbar.

Grundwasser im tieferen Forbach-Granit

Das Grundwasser im tieferen Forbach-Granit wurde durch vier Grundwassermessstellen erschlossen, davon drei Piezometermessstellen. Ihre Filterstrecken bzw. Filterkiesschüttungen, in denen die Piezometer eingebaut sind, liegen im Tiefenbereich der geplanten Untertagebauwerke.

Die gemessenen Grundwasserspiegel zeichnen erwartungsgemäß in etwa den Geländeverlauf nach, d. h. der Gebirgswasserspiegel fällt ungefähr parallel zum topographischen Gefälle zum Murgtal hin ab. Die Murg stellt den Grundwasservorfluter dar.

Aufgrund der ausgeprägten Topographie und der geringen Gebirgsdurchlässigkeit kann es im Forbach-Granit zu artesischen Verhältnissen und nach oben gerichteten hydraulischen Potentialen kommen.

Die gemessenen maximalen Schwankungsbreiten der Grundwasserganglinien lagen bei rund 2 m, den kontinuierlichen Anstieg in KS BK 9 um rund 5 m zwischen 211 und 2018 ausgenommen.

Für den Forbach-Granit kann davon ausgegangen werden, dass sein Kluftsystem nahezu vollständig wassererfüllt ist. Bei hinreichend großer Skalierung kann das Gebirge als homogen und isotrop angesehen werden.

Die Klüfte im tiefen Granit besitzen nur sehr geringe Öffnungsweiten, daher ist die Wasserdurchlässigkeit im tiefen Granit insgesamt sehr gering. Dadurch ist beim Bau unterirdischer Bauwerke mit insgesamt sehr geringen Zuflussraten zu rechnen. Für die kataklastischen Zonen (Schwächezonen mit vergrustem Granit und höherer Kluftdichte), wie sie typischerweise im Forbach-Granit auftreten, können höhere Durchlässigkeiten gegenüber dem umgebenden intakten Gebirge nicht ausgeschlossen werden. Durchgängige Großklüfte mit erhöhter Wasserwegsamkeit konnten allerdings nicht nachgewiesen werden.

Die Grundwasserganglinien zeigen trotz der sehr geringen Durchlässigkeit des Forbachgranits und der großen Tiefe der Messstellen jahreszeitliche Schwankungen. Eine mögliche Erklärung dafür ist, dass der hydraulische Druck, der auf dem tieferen granitischen Grundwasser lastet, durch den großen Grundwasserkörper im weiter westlich anstehenden Deckgebirge erzeugt wird. Die Grundwasservorkommen im Deckgebirge und im Granit sind über Klüfte verbunden, auch wenn an der Grenze Deck-/Grundgebirge ein Sprung in der Gebirgsdurchlässigkeit auftritt, was zur Ausbildung des ausgeprägten Quellhorizonts an der Grenze Deckgebirge / Granit führt. Durch das netzförmig verbundene wassererfüllte Kluftsystem im Granit können die Drücke aus dem auflastenden Grundwasser des Deckgebirges entsprechend weiträumig im tiefen Granit übertragen werden.

Grundwasserführung im Hangschutt (Zwischenabfluss)

Der Hangschutt ist in der Regel teilweise mit Grundwasser erfüllt. Da der Porengrundwasserleiter gegenüber Kluftgrundwasserleitern eine hohe Speicherfähigkeit aufweist, entleert sich dieser nur langsam, wodurch seine Grundwasserganglinien geringe Amplituden und zeitliche Streckungen aufweisen.

Die Ganglinie im Hangschuttaquifer weicht deutlich von den Ganglinien im tieferen Granit ab. Damit werden Grundwasserstände im Hangschuttaquifer von anderen Faktoren beeinflusst als die Druckspiegelschwankungen im tieferen Granit.

Kapitel 7: Hydrogeologisches Standort-Modell

Tab. 33: Hydrogeologische Gliederung im Bereich der Unterstufe

Stratigraphische Einheit Erbohrte Mächtigkeiten	Wasserwegsamkeiten / Durchlässigkeiten	Grundwasservorkommen		Hydrochemie
		Teilweise grundwassererfüllt	Grundwasserleiter / Deckschichtenabfluss	
Quartäre Deckschichten / Schuttdecken (0,6 bis 4,5 m)	Porenwasserleiter $k_f = 10^{-2} - 10^{-6} \text{ m/s}$	Teilweise grundwassererfüllt	Grundwasserleiter / Deckschichtenabfluss	sehr gering mineralisiert
Oberflächennaher Forbach-Granit (GFO) Bis ca. 30 m Tiefe	Übergang vom Porengrundwasserleiter zum Klüftgrundwasserleiter $k_f = 10^{-5} \text{ bis } 10^{-9} \text{ m/s}$ im Mittel $5 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$	Überwiegend grundwassererfüllt	Übergang Grundwasserleiter / Grundwasserhemmer	Gering mineralisiertes Erdalkali-Hydrogencarbonat-Wasser mit höherem Alkaligehalt
Tieferer Forbach-Granit (GFO) Ab ca. 30 m Tiefe	Dreidimensionales Kluftnetz Frisches, ungestörtes Gebirge: $k_f = 10^{-8} \text{ bis } 10^{-12} \text{ m/s}$ im Mittel $2,5 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}$ Schwächezonen, Bereiche höherer Klüftigkeit: $k_f = 3 \cdot 10^{-8} \text{ bis } 5 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$	grundwassererfüllt	Grundwasserhemmer bis Grundwasser-Nichtleiter	Gering mineralisiertes Erdalkali-Hydrogencarbonat-Wasser mit höherem Alkaligehalt

8 Untersuchungsergebnisse der Feld- und Laborversuche

Zur genaueren Charakterisierung und ingenieurgeologischen Beurteilung des Gesteins wurden sowohl Feldversuche (in-situ) in den Bohrlöchern, als auch Laborversuche an Gesteinsproben im Labor durchgeführt.

8.1 Oberflächengeophysikalische Untersuchungen

Im Dezember 2018 wurden im Portalbereich der Bauwerke Zugangsstollen Murg und Schwarzenbach sowie beim Zufahrtsstollen mit Portalgebäude und beim Auslaufbauwerk sieben oberflächennahe Reflexions- und Refraktionsseismikprofile aufgenommen; die Lage der Profile ist der Anlage 1 1.1 zu entnehmen.

Die geophysikalischen Profile wurden in Verbindung mit direkten Aufschlüssen (Kernbohrungen und Schürfe) ausgewertet und die Ergebnisse in Form von geotechnischen Längsschnitten dargestellt (siehe Anlagen 2.1.13 bis 2.1.16).

Es ist darauf hinzuweisen, dass seismische Profile indirekte Aussagen über den Untergrund liefern, die nur in Verbindung mit direkten Aufschlüssen (u. a. Bohrungen und Schürfe) belastbare Ergebnisse liefern. Unter der Beachtung der Auflösung der angeregten seismischen Wellen von etwa 2 m bis 3 m im Lockergestein bzw. etwa 20 m im Festgestein (siehe Kapitel 4.3.1) wurden die Reflexions- und Refraktionsseismikprofile ausgewertet.

8.1.1 Zugangsstollen Murg

Das Seismikprofil im Bereich des Voreinschnitts des Zugangsstollen Murg (GP 2018/101) verläuft ausgehend von einem Waldstraße steil aufwärts durch einen Talbereich, nahezu parallel zum Voreinschnitt, besitzt eine horizontale Länge von etwa 130 m und lässt eine Erkundungstiefe von ca. 50 m u. GOK zu. Auf seinem Verlauf kreuzt das Profil den Bereich der Bohrung KS BK 5 und den Schurf SCH 2018/101.

Die Lockergesteinsüberdeckung bestehend aus Mutter- bzw. Oberboden und quartären Hangschutt (Q1) erreicht im Voreinschnitt des Zugangsstollen Murg, abgesehen vom Schwächezonbereich der Schwächezone 14 (siehe Kapitel 5.3.3) im Bereich der KS BK 5, Mächtigkeiten von 2 m bis 5 m (siehe Anlage 2.1.13). Im Bereich der Schwächezone 14, die schräg zum Zugangsstollen Murg in NNE – SSW Richtung verläuft, werden aufgrund tektonischer Auflockerung Lockergesteinsmächtigkeiten von bis zu 10 m erwartet.

Ab einer Tiefe von 2 m u. GOK bis 5 m u. GOK steht im Voreinschnittsbereich der Forbach-Granit in Form des Gebirgstyps G3 an, der Mächtigkeiten von 5 m bis 10 m erreicht. Im Anschluss an den Gebirgstyp G3 folgt im Liegenden der Gebirgstyp G1/G2 ab einer Tiefe von etwa 7 m.

Im Bereich des Zugangsstollen Murg verlaufen zwei nahezu parallel orientierte Schwächezonen (Schwächezone 14 und Schwächezone 15), die eine Mächtigkeit von etwa 10 m (Schwächezone 14) und etwa 5 m (Schwächezone 15) besitzen (siehe Anlage 1.1).

8.1.2 Zugangsstollen Schwarzenbach

Entlang des Voreinschnitts des Zugangsstollens Schwarzenbach befindet sich das Profil GP 2018/102, das durch den Bereich des Schurfs SCH 2018/102 und KS BK 106 verläuft. Das Profil hat eine horizontalen Länge von rund 150 m und eine Erkundungstiefe von ca. 40 m.

Kapitel 8: Untersuchungsergebnisse der Feld- und Laborversuche

Mit Mächtigkeiten von 2 m bis 5 m zeigt die Lockergesteinsüberdeckung (Mutter- bzw. Oberboden und quartären Hangschutt) im Bereich des Voreinschnitts des Schwarzenbachwerk ähnliche Schichtdicken wie im Bereich des Zugangsstollen Murg.

Im Liegenden der Lockergesteinsüberdeckung steht der Forbach-Granit (Gebirgstyp G3) an. Nach den Erkundungsergebnissen der Oberflächenseismik beträgt die Mächtigkeit des Gebirgstyps G3 10 m bis 15 m. Unterhalb des Gebirgstyp G3 steht ab einer Tiefe von rund 20 m u. GOK der Forbach-Granit in Form des Gebirgstyps G1/G2 an (siehe Kap. 5.2.1).

Im Bereich des Voreinschnitts verläuft subparallel zum Voreinschnitt die Schwächezone 13, die aufgrund des ebenfalls subparallelen Verlaufs zum geophysikalischen Profil nicht eindeutig aufgelöst werden kann. Die Schwächezone 13 besitzt eine Schwächezonemächtigkeit von bis zu 6 m und wird im nordwestlichen Grenzbereich des geophysikalischen Profils von der rund 6 m mächtigen Schwächezone 9 nahezu senkrecht zum Profil gekreuzt (siehe Anlage 1.1).

8.1.3 Zufahrtsstollen mit Portalgebäude

Im Bereich des Zufahrtsstollens mit Portalgebäude wurden aufgrund von topographischen Gegebenheiten, einer optimalen Orientierung zur Schwächezonenauflösung und einer idealen Energieeinspeisung der seismischen Wellen Profile senkrecht zum Portalbereich gewählt.

Um trotzdem Tiefenaussagen entlang des Voreinschnitts zu erlangen, wurden daraufhin drei, mit einem horizontalen Abstand von 10 m bis 30 m zueinander, nahezu parallel zueinander und zur B462 verlaufende und versetzten Profile GP 2018/103/1, GP 2018/103/2 und GP 2018/103/3 aufgenommen. Die Profile GP 2018/103/1 und GP 2018/103/2 verlaufend direkt westlich und östlich angrenzend an der B462. Auf dem Niveau des Rudolf-Fettweis-Werk wurde das Profil GP 2018/103/3 ausgelegt.

Oberhalb bzw. im Hangenden des Zufahrtsstollens zeigt die oberflächennah anstehende Auffüllung (A2.1) eine Mächtigkeit von rund 1 m im Bereich der KS BK 101S bis zu 5 m im Bereich der KS BK 117. Geomorphologisch und anthropogen (Geländemodellierung) bedingt nimmt die Lockergesteinsmächtigkeit (Auffüllung und Murgschotter) talseitig bis auf 14,80 m im Bereich der KS BK 112 zu.

Unterhalb der Lockergesteine steht der Forbach-Granit in Form des Gebirgstyps G3 mit einer Mächtigkeit von 5 m bis 10 m an. Ab einer Tiefe von bis zu 10 m unterhalb des geplanten Portalgebäudes (ca. 20 m u. GOK im Bereich KS BK 112 GM) folgt der Gebirgstyp G1/G2 des Forbach-Granits.

Im Bereich des Zufahrtsstollens mit Portalgebäude verläuft die Schwächezone 3, die den Zufahrtsstollen in einem spitzen Winkel schneidet (siehe Anlage 1.1).

8.1.4 Auslaufbauwerk

Das entlang des Voreinschnittes des Hauptstollens am Auslaufbauwerk wurden zwei nahezu senkrecht zum Voreinschnitt verlaufende Seismikprofile (GP 2018/104/1 und GP 2018/104/2) direkt westlich und östlich angrenzend zur B462 aufgenommen (siehe Anlage 1.1).

Die Lockergesteinsüberdeckung im Bereich der Bundesstraße B462, die hauptsächlich aus anthropogener Auffüllung besteht, beträgt auf der gesamten Länge des Geophysikprofils GP 2018/104/1 rund 1 m bis 2 m. Weiter talwärts nimmt die Lockergesteinsüberdeckung, die nun aus anthropogener Auffüllung und quartären Hangschutt besteht, bis auf 10 m zu (GP 2018/104/2).

Kapitel 8: Untersuchungsergebnisse der Feld- und Laborversuche

Unterhalb der Lockergesteinsüberdeckung steht der Forbach-Granit in Form des Gebirgstyps G3 (siehe Kapitel 5.2) an. Seine Mächtigkeit variiert auf der gesamten Länge der beiden Geophysikprofile, ausgenommen eines rund 20 m breiten Schwächezone, zwischen 5 m bis 10 m. Im Bereich der Schwächezone, die den Voreinschnitt des Auslaufbauwerks spitzwinklig kreuzt, treten Mächtigkeiten von über 20 m auf. Im Liegenden des Gebirgstyps G3 steht ab einer Tiefe von 15 m u. GOK bis 20 m u. GOK der Gebirgstyp G1/G2 (siehe Kapitel 5.2) an.

Im Bereich des Voreinschnitts verläuft die Schwächezone 1, die den Hauptsollen in diesem Bereich spitzwinklig schneidet (siehe Anlage 1.1).

8.2 Bohrlochuntersuchungen

8.2.1 Optische und geophysikalische Bohrlochuntersuchungen

Im Rahmen der Erkundung zum Kavernenwasserspeicher Forbach wurde in 22 Bohrungen (KS BK 1 bis KS BK 7 und KS BK 9 bis KS BK 11, KS BK 101S bis KS BK 116H) eine Befahrung des offenen, wasserunerfüllten Bohrlochs mit einem optischen Bohrlochscanner (ETIBS) durchgeführt. Mit Hilfe der ETIBS-Befahrung wurde die Raumlage von Trenn-, Kluft- und Schwächezonenflächen ermittelt. Die ausführlichen Versuchsbeschreibungen sowie die Auswertung des durchgeführten Einzelversuchs sind in Anlage 6 zu finden.

Weiterhin wurde in den Bohrungen (KS BK 2 bis KS BK 6, KS BK 8 und KS BK 9, KS BK 101S bis KS BK 116H) im grundwassererfüllten Bohrloch akustische Bohrlochwanduntersuchungen durchgeführt. Mit Hilfe des akustischen Scanners wurde auch im grundwassererfüllten Gebirge die Raumlage von Trenn-, Kluft- und Schwächezonenflächen ermittelt. Die ausführlichen Versuchsbeschreibungen sowie die Auswertung des durchgeführten Einzelversuchs sind ebenfalls in Anlage 6 zu finden.

Basierend auf den durchgeführten Bohrlochuntersuchungen wurden vorhandene Klüfte im Forbach-Granit aufgenommen und analysiert. Die Auswertung dieser Kluftanalyse ist im Kapitel 5.3.2 beschrieben und in der Anlage 6 aufgeführt.

8.2.2 Bohrlaufweitungsversuche (BAVs)

Die Bohrlaufweitungsversuche wurden im Zuge der Bohrerkundung im Herbst 2018 alle im Forbach-Granit durchgeführt. Ziel war es, für die 4 Gebirgstypen Gebirgsverformungskennwerte zu ermitteln. Insgesamt wurden 11 Bohrlaufweitungsversuche in den Bohrungen KS BK 102, KS BK 103S, KS BK 104, KS BK 107, KS BK 109 und KS BK 4neu durchgeführt. Die Versuchsergebnisse sind in Anlage 7.2 zusammengestellt. Bei der Versuchsdurchführung ergab sich, dass für die Gebirgstypen G1, G2 und G4 Versuche durchgeführt werden konnten. Für die Gebirgstypen G1 und G2 wurden Versuche mit der Dilatometersonde durchgeführt. Der Versuch im Gebirgstyp G4 wurde mit der Seitendrucksonde durchgeführt.

In der Tab. 34 sind die ausgewerteten Moduli (Mittelwerte) für die verschiedenen Gebirgstypen und Laststufen zusammengestellt. Für die Bewertung des Gebirgsverformungsverhaltens des Granits im Bereich der Bauwerke des PSW Forbach werden die in Tab. 34 angegeben. Die 3. Laststufen des Entlastungsmoduls werden als die charakteristischen in situ Verformungskennwerte als maßgebend angesehen.

Kapitel 8: Untersuchungsergebnisse der Feld- und Laborversuche

Diese lauten für:

Granit G1:	27.125 MN/m ²
Granit G2:	17.300 MN/m ²
Granit G3:	nicht bestimmt
Granit G4:	670 MN/m ²

Diese in situ ermittelten Verformungskennwerte des Gebirges stimmen recht gut mit den aus Laborversuchen und nach dem Hoek & Brown ermittelten Gebirgsverformungsverhalten überein (vgl. Kapitel 9).

Tab. 34: Ergebnisse der Bohrlochaufweitungsversuche

Angaben zu den Schichtabfolgen und der Gesteinsbeschaffenheit			Versuchsdaten und –Ergebnisse					
Stratigraphische Einheit	Gesteinsart gemäß DIN 4022, T1; DIN 4023 und Aufschlussprofile	Gebirgs-typ	Ver-suchs-An-zahl	Last-stufe	Belas-tungs-modul	Wiederbelas-tungsmodul	Erstbelas-tungsmodul	Ent-las-tungs-modul
					[MN/m ²]			
GFO	Granit	G1	2	1	2372	15338	2372	24755
				2	12543	21550	12144	38994
				3	14282	-	10061	27125
	Granit	G2	8	1	2536	13097	2536	21721
				2	11250	15613	13527	21263
				3	10779	-	10062	17296
	Granit	G3	0	1	-	-	-	-
				2	-	-	-	-
				3	-	-	-	-
	Granit	G4	1	1	65	154	65	285
				2	181	234	199	412
				3	296	-	365	670

8.3 Boden- und felsmechanische Laborversuche

8.3.1 Probennahme und Bohrgutansprache

Um die aufgeschlossenen und relevanten Gesteine ingenieurgeologisch beurteilen zu können und deren boden- und felsmechanische Eigenschaften zu bestimmen wurden gestörte und ungestörte Proben genommen.

Die Entnahme der Fels- und Bodenproben erfolgte unmittelbar nach der Bohrkerngewinnung direkt auf der Baustelle.

Die lithologische Beschreibung der in den Bohrungen angetroffenen Gesteine sowie der Proben beruht auf der Feldansprache. Die Bohrgut- bzw. Probenansprache erfolgte in Anlehnung an DIN

Kapitel 8: Untersuchungsergebnisse der Feld- und Laborversuche

4022, DIN EN ISO 14 688-1:2003-01, DIN EN ISO 14 688-2:2004(D), DIN EN ISO 14 689-1:2004-04, DIN 4023 und DIN 18 300. Die bei der Bohrgutansprache gewonnenen Ergebnisse wurden in die Aufschlussprofile, welche in der Anlage 3.2 dokumentiert sind, eingetragen. Eine ausführliche Erläuterung der erfassten Daten befindet sich in der Anlage 3.1.

Die lithologische Unterteilung der Gesteine wurde mit den bei der Feldaufnahme zur Verfügung stehenden Hilfsmitteln durch die qualitative Bestimmung der Ritzbarkeit, der Farbe, des Kluges und des Geruchs ohne chemische Analyse durchgeführt. Zudem wurde eine Einteilung anhand des Verwitterungsgrades und demnach entsprechend der Homogenbereiche vorgenommen. Hierfür wurden die Bohrkerne alle 10 cm mit einem Schmidt-Rückprallhammer abgeklopft. Anhand der Rückprallwerte R wurden die Bohrkernabschnitte in 4 Verwitterungsklassen (w0 bis w1, w1 bis w2, w2 bis w3, w3 bis w4) eingeteilt, welche schließlich bei der Feldansprache mit einbezogen wurden. Des Weiteren wurde der RQD der Bohrkerne ermittelt.

Im Rahmen des geomechanischen Versuchsprogramms 2018 zum Kavernenwasserspeicher Forbach wurden die bautechnisch relevanten Locker- und Festgesteine hinsichtlich ihrer geotechnischen Eigenschaften untersucht, wobei folgende Versuche durchgeführt wurden:

- Wassergehaltsbestimmungen
- Korngrößenbestimmungen an Lockergestein
- Bestimmung der Dichten an Festgesteinen
- Bestimmung der einaxialen Druckfestigkeit an Festgesteinen, einschließlich Poissonzahl
- Bestimmung der triaxialen Scherfestigkeit an Festgesteinen
- Bestimmung der Zugfestigkeit (Brazilian Tests)
- Frost-Tauwechselversuche
- Bestimmung der Abrasivität
- Mineralogische/Tonmineralogische und Geochemische Untersuchungen
- Physikalische Eigenschaften von gebrochenem Granitmaterial

Es wurden im weitesten folgende Gesteinsarten bzw. Bodenarten untersucht:

Quartär

Hangschutt

Murgschotter

Granit

Zweiglimmergranit

Im Folgenden wird die Auswertung der Laborversuchsergebnisse jeweils anhand der stratigraphischen Einheit, der Lithologie und dem Gebirgstyp (Homogenbereich) dargestellt. Es wurden Versuchsergebnisse von Proben aus den Bohrungen KS BK 01 (2010) bis KS BK 115, sowie die Schürfe SCH 2018/101 und SCH 2018/102 berücksichtigt. Zur Auswertung wurden neben den 2018 durchgeführten Laborversuchen auch die Ergebnisse der Erkundungen von 2010 herangezogen (KS BK 1 bis KS BK 11).

Kapitel 8: Untersuchungsergebnisse der Feld- und Laborversuche

Die Beschreibung der Versuchsdurchführungen sowie zusammenfassende Ergebnistabellen sind im Laborversuchsbericht in Anlage 8.3 zu finden. Die einzelnen Versuchsprotokolle sind der Anlage 8.2 zu entnehmen. Eine Übersichtstabelle aller Versuchsergebnisse findet sich in Anlage 8.1.

8.3.2 Wassergehalt

Die Wassergehaltsbestimmungen wurden im Rahmen der Beurteilung bautechnischer Eigenschaften bei der Auswertung von Laborversuchen an Festgesteinen (einaxiale und dreiaxiale Druckversuche, Zugfestigkeit etc.) nach DIN 18 121 durchgeführt. Die Versuchsbeschreibung der Wassergehaltsbestimmungen von Proben ist im Laborversuchsbericht und den zusammenfassenden Ergebnistabellen den Versuchsprotokollen in den Anlage 8.1 bis Anlage 8.3 zu finden.

Lockergesteine

Im Rahmen der Erkundung wurden an bis zu 3 Lockergesteinsproben je Stratigraphischer Einheit aus insgesamt 3 Bohrungen (siehe Anlage 8.3) Wassergehaltsbestimmungen durchgeführt. Die Auswertung der Versuchsergebnisse nach Stratigraphie, Gesteinsart und Verwitterungsgrad ist in Tab. 35 dokumentiert.

Tab. 35: Statistische Auswertung der Ergebnisse von Wassergehaltsbestimmungen an Auffüllungen und quartären Lockergesteinen

Angaben zu den Schichtabfolgen und der Bodenbeschaffenheit			Versuchsdaten und -ergebnisse	
Stratigraphische Einheit	Bodengruppen gemäß DIN 18 196	Gebirgstyp	Statistische Kenngrößen	Wassergehalt
				[%]
yA	U	-	Anzahl	2
			min	4,90
			max	5,10
			Mittelw.	5,00
			Std.abw.	0,14
q (ungegliedert)	U, GU	-	Anzahl	3
			min	2,40
			max	8,70
			Mittelw.	4,93
			Std.abw.	3,33

Legende:

- yA = Anthropogene Auffüllung
q = Quartär (ungegliedert)

Kapitel 8: Untersuchungsergebnisse der Feld- und Laborversuche

Die Auffüllungen (yA) und die quartären Lockergesteine (q) zeigen einen mittleren Wassergehalt von ca. 5 Gew.-%.

An drei Proben von Hangschutt und einer Probe von oberflächennahem Granit aus den Schürfen SCH 2018/101 und SCH 2018/102 wurden ebenfalls Wassergehaltsbestimmungen durchgeführt. Die Auswertung der Versuchsergebnisse nach Stratigraphie, Gesteinsart und Verwitterungsgrad ist in Tab. 36 dokumentiert.

Tab. 36: Statistische Auswertung der Ergebnisse von Wassergehaltsbestimmungen an Hangschutt und oberflächennahen Granit

Angaben zu den Schichtabfolgen und der Bodenbeschaffenheit			Versuchsdaten und -ergebnisse	
Stratigraphische Einheit	Bodengruppen gemäß DIN 18 196	Gebirgstyp	Statistische Kenngrößen	Wassergehalt
				[%]
qu	GI, GU	-	Anzahl	3
			min	4,80
			max	19,80
			Mittelw.	13,37
			Std.abw.	7,72
GFO	GU	4	Anzahl	1
			min	-
			max	-
			Mittelw.	11,40
			Std.abw.	-

Legende:

qu = Hangschutt

GFO = Forbach-Granit

4 = stark verwittert - vollständig verwittert

Der beprobte Hangschutt zeigt nach den Laboruntersuchungen einen mittleren Wassergehalt von 13,37 Gew.-%, die Probe des oberflächennahen Granits zeigt einen Wassergehalt von 11,4 Gew.-%.

Festgesteine

Im Rahmen der Erkundung wurden an 70 Festgesteinsproben aus 17 Bohrungen (Siehe Anhang 8.3) Wassergehaltsbestimmungen durchgeführt. Die Auswertung der Versuchsergebnisse nach Stratigraphie, Gesteinsart und Verwitterungsgrad findet sich in Tab. 37.

Kapitel 8: Untersuchungsergebnisse der Feld- und Laborversuche

Tab. 37: Statistische Auswertung der Ergebnisse von Wassergehaltbestimmungen an Festgesteinsproben

Angaben zu den Schichtabfolgen und der Gesteinsbeschaffenheit			Versuchsdaten und -ergebnisse	
Stratigraphische Einheit	Gesteinsart gemäß DIN 4022, T1; DIN 4023 und Aufschlussprofile	Gebirgstyp	Statistische Kenngrößen	Wassergehalt
				[%]
GFO	Granit	1	Anzahl	38
			min	0,10
			max	1,90
			Mittelw.	0,58
			Std. abw.	0,39
	Granit	2	Anzahl	13
			min	0,10
			max	1,80
			Mittelw.	0,72
	Granit	3	Anzahl	13
			min	0,60
			max	8,10
			Mittelw.	1,89
	Granit	4	Anzahl	6
			min	0,60
			max	2,60
Mittelw.			1,21	
			Std. abw.	0,76

Legende:

- GFO = Forbach-Granit
 4 = stark verwittert - vollständig verwittert
 3 = mäßig verwittert - stark verwittert
 2 = angewittert - mäßig verwittert
 1 = unangewittert - leicht angewittert

Granit

Der mittlere Wassergehalt des unverwitterten Granits (GFO) liegt bei 0,58 Gew.-%, die des angewitterten Granits (GFO) 0,72 Gew.-%, bei mäßig bis stark verwittertem Granit liegt der Wert bei 1,89 Gew.-% und bei vollständig verwittertem Granit bei 1,21 Gew.-%.

Bei allen untersuchten Proben lässt sich mit Zunahme des Verwitterungsgrades eine Zunahme des Wassergehalts dokumentieren.

8.3.3 Korngrößenverteilung

Quartär (ungegliedert) und Auffüllung

Aus den Bohrkernen der Bohrungen KS BK 112, KS BK 113 und KS BK 114 wurden an Probe aus den Auffüllungen und dem ungegliederten Quartär die Korngrößenverteilung nach DIN 18 196 ermittelt. Das Ergebnis der Korngrößenverteilung ist in Tab. 38 dargestellt.

Tab. 38: Statistische Auswertung der Ergebnisse von Kornverteilungen an Auffüllungen und quartären Lockergesteinen (ungegliedert)

Angaben zu den Schichtabfolgen und der Bodenbeschaffenheit		Versuchsdaten und -ergebnisse						
Stratigraphische Einheit	Bodengruppen gemäß DIN 18 196	Statistische Kenngrößen	$a_{T/U}$ [%]		a_s [%]		$a_{G/X}$ [%]	
			von	bis	von	bis	von	bis
yA	U	Anzahl	2					
		Wert	46,8	77,5	11,8	26,8	10,7	26,4
q (ungegliedert)	U, GU	Anzahl	4					
		Wert	14,4	82,7	8,5	32,1	8,8	71,9

Legende:

yA = Anthropogene Auffüllung

q = Quartär (ungegliedert)

$a_{T/U}$ = Ton/Schluff-Anteil

a_s = Sandanteil

$a_{G/X}$ = Kies/Stein-Anteil

Bei den untersuchten Böden handelt es sich nach DIN 18196 um Böden der Bodengruppe U/GU.

Hangschutt und Festgestein (oberflächennah)

Aus den Schürfen SCH 2018/101 und SCH 2018102 wurden an Proben aus dem quartären Hangschutt die Korngrößenverteilung nach DIN 18 196 ermittelt. Die Ergebnisse der Korngrößenverteilung sind in Tab. 39 dargestellt.

Kapitel 8: Untersuchungsergebnisse der Feld- und Laborversuche

Tab. 39: Statistische Auswertung der Ergebnisse von Kornverteilungen für Hangschutt und oberflächennahen, stark verwitterten Granit

Angaben zu den Schichtabfolgen und der Bodenbeschaffenheit		Versuchsdaten und -ergebnisse						
Stratigraphische Einheit	Bodengruppen gemäß DIN 18 196	Statistische Kenngrößen	$a_{T/U}$ [%]		a_s [%]		$a_{G/X}$ [%]	
			von	bis	von	bis	von	bis
qu	GI, GU, SU*	Anzahl	5					
		Wert	8,5	15,7	24,5	50,9	33,3	67,0
GFO (w4)	GU	Anzahl	1					
		Wert	11,3		29,1		59,6	

Legende:

- qu = Hangschutt
 GFO = Forbach-Granit
 $a_{T/U}$ = Ton/Schluff-Anteil
 a_s = Sandanteil
 $a_{G/X}$ = Kies/Stein-Anteil

Bei den untersuchten Böden handelt es sich nach DIN 18196 um Böden der Bodengruppe GU/GI/SU*.

Festgesteine vergrust

Aus dem Bohrkernen der Bohrung KS BK 06 wurde aus drei Probe aus dem vergrusten GFO die Korngrößenverteilung nach DIN 18 196 ermittelt. Das Ergebnis der Korngrößenverteilung ist in Tab. 40 dargestellt.

Tab. 40: Statistische Auswertung der Ergebnisse für Kornverteilungen von vergrusten Graniten

Angaben zu den Schichtabfolgen und der Bodenbeschaffenheit		Versuchsdaten und -ergebnisse						
Stratigraphische Einheit	Bodengruppen gemäß DIN 18 196	Statistische Kenngrößen	$a_{T/U}$ [%]		a_s [%]		$a_{G/X}$ [%]	
			von	bis	von	bis	von	bis
GFO (vergrust)	GE	Anzahl	3					
		Wert	0,0	0,4	16,0	25,0	75,0	84,0

Legende:

- GFO = Forbach-Granit
 $a_{T/U}$ = Ton/Schluff-Anteil
 a_s = Sandanteil
 $a_{G/X}$ = Kies/Stein-Anteil

Bei dem untersuchten Boden handelt es sich nach DIN 18196 um Böden der Bodengruppe GE.

Kapitel 8: Untersuchungsergebnisse der Feld- und Laborversuche

8.3.4 Dichten

Im Zuge der Erkundung des Kavernenwasserspeichers Forbach wurden Dichtebestimmungen (Feuchtdichte) an Festgesteinen nach DIN 18 125 durchgeführt.

Die Versuchsbeschreibung der durchgeführten Dichtebestimmungen von Festgesteinen ist mit zusammenfassenden Ergebnistabellen im Laborversuchsbericht in Anlage 8.3 dokumentiert. Die einzelnen Versuchsprotokolle sind in Anlage 8.2 zu finden.

Festgesteine

An 65 Festgesteinsproben aus 18 Bohrungen (2010 und 2018) wurden Dichtebestimmungen (Feuchtdichte) durchgeführt. Die statistische Auswertung der Versuchsergebnisse ist nach Stratigraphie, Gesteinsart und Verwitterungsgrad in Tab. 41 dargestellt.

Tab. 41: Statistische Auswertung der Ergebnisse der Dichtebestimmung (Feuchtdichte) an Festgesteinsproben

Angaben zu den Schichtabfolgen und der Gesteinsbeschaffenheit			Versuchsdaten und -ergebnisse	
Stratigraphische Einheit	Gesteinsart gemäß DIN 4022, T1; DIN 4023 und Aufschlussprofile	Gebirgstyp	Statistische Kenngrößen	Feuchtdichte ρ
				[t/m ³]
GFO	Granit / (Aplit)	1	Anzahl	28
			min	2,38
			max	2,64
			Mittelw.	2,58
			Std.abw.	0,07
	Granit / (Aplit)	2	Anzahl	14
			min	2,42
			max	2,65
			Mittelw.	2,58
	Granit	3	Anzahl	15
			min	2,40
			max	2,61
			Mittelw.	2,50
	Granit	4	Anzahl	8
			min	2,09
			max	2,36
Mittelw.			2,23	
Std.abw.			0,10	

Legende:

GFO = Forbach-Granit

w1 = angewittert

w3 = stark verwittert

w0 = unverwittert = frisch

w2 = mäßig verwittert

Kapitel 8: Untersuchungsergebnisse der Feld- und Laborversuche

Die frischen bis angewitterten (w_0 bis w_1) Granitgesteine des Forbach-Granits (GFO) zeigen Feuchtdichten zwischen $2,38 \text{ t/m}^3$ und $2,63 \text{ t/m}^3$. Der Mittelwert liegt bei $2,58 \text{ t/m}^3$. Aplit zeigt eine Feuchtdichte von $2,41 \text{ t/m}^3$.

Die mäßig bis stark verwitterten (w_2 bis w_3) Granitgesteine (auch Aplit) des Forbach-Granits (GFO) zeigen Feuchtdichten zwischen $2,36 \text{ t/m}^3$ und $2,6 \text{ t/m}^3$. Der Mittelwert liegt bei $2,49 \text{ t/m}^3$.

Quartär (ungegliedert) und Auffüllung

An 3 Festgesteinsproben aus 2 Bohrungen (KS BK 112 und KS BK 113) wurden Dichtebestimmungen (Feuchtdichte) durchgeführt. Die statistische Auswertung der Versuchsergebnisse ist nach Stratigraphie und Bodengruppe in Tab. 42 dargestellt.

Tab. 42: Statistische Auswertung der Ergebnisse der Dichtebestimmung (Feuchtdichte) an Auffüllungen und quartären Lockergesteinen (ungegliedert)

Angaben zu den Schichtabfolgen und der Bodenbeschaffenheit			Versuchsdaten und -ergebnisse	
Stratigraphische Einheit	Bodengruppen gemäß DIN 18 196	Gebirgstyp	Statistische Kenngrößen	Feuchtdichte ρ
				[t/m^3]
yA	U	-	Anzahl	2
			min	1,92
			max	1,99
			Mittelw.	1,96
			Std.abw.	0,05
q (ungegliedert)	U, GU	-	Anzahl	1
			min	1,86
			max	1,86
			Mittelw.	1,86
			Std.abw.	-

Dabei zeigen die Auffüllungen Feuchtdichten zwischen $1,92 \text{ t/m}^3$ und $1,99 \text{ t/m}^3$ und die Probe des Quartärs (ungegliedert) eine Feuchtdichte von $1,96 \text{ t/m}^3$.

Quartär (Hangschutt)

An einer Probe aus dem Schurf SCH 2018/101 wurde die Feuchtdichte des Hangschutts bestimmt. Die statistische Auswertung der Versuchsergebnisse ist nach Stratigraphie und Bodengruppe in Tab. 43 dargestellt.

Tab. 43: Statistische Auswertung der Ergebnisse der Dichtebestimmung (Feuchtdichte) an Hangschutt

Angaben zu den Schichtabfolgen und der Bodenbeschaffenheit			Versuchsdaten und -ergebnisse	
Stratigraphische Einheit	Bodengruppen gemäß DIN 18 196	Gebirgstyp	Statistische Kenngrößen	Feuchtdichte ρ
				[t/m ³]
qu	GI, GU	-	Anzahl	1
			min	2,04
			max	2,04
			Mittelw.	2,04
			Std.abw.	-

Der Hangschutt aus Schurf SCH 2018/101 zeigte eine Feuchtdichte von 2,04 t/m³.

8.3.5 Einaxiale Druckversuche

Im Zuge der Erkundung der Kaverne Forbach wurden zur Untersuchung der Festigkeits- und Verformungseigenschaften an 25 Festgesteinsproben aus 6 Bohrungen (2018) einaxiale Druckversuche gemäß der Empfehlung Nr. 1 der DGGT durchgeführt. Zusätzlich wurden die Ergebnisse der einaxialen Druckversuche aus den Erkundungen von 2010 (26 Proben aus 11 Bohrungen) herangezogen.

Die Versuchsbeschreibung der durchgeführten einaxialen Druckversuche von Festgesteinen ist mit zusammenfassenden Ergebnistabellen im Laborversuchsbericht in Anlage 8.3 dokumentiert. Die einzelnen Versuchsprotokolle sind in Anlage 8.2 zu finden.

Die statistische Auswertung der Versuchsergebnisse des Einaxialversuchs und des Wiederbelastungsmodul ist nach Stratigraphie, Gesteinsart und Verwitterungsgrad in Tab. 44 dargestellt.

Tab. 44: Statistische Auswertung der Ergebnisse der einaxialen Druckversuche

Angaben zu den Schichtabfolgen und der Gesteinsbeschaffenheit			Versuchsdaten und -ergebnisse			
Stratigraphische Einheit	Gesteinsart gemäß DIN 4022, T1; DIN 4023 und Aufschlussprofile	Gebirgstyp	Statistische Kenngrößen	Wiederbelastungsmodul V	Einaxiale Druckfestigkeit σ_u	Querdehnzahl
				[MN/m ²]		[-]
GFO	Granit / (Aplit)	1	Anzahl	21	21	2
			min	12694	26	0,23
			max	70872	167	0,27
			Mittelw.	39513	86	0,25
			Std.abw.	15936	41	-
	Granit / (Aplit)	2	Anzahl	10	10	2
			min	14729	25	0,27

Kapitel 8: Untersuchungsergebnisse der Feld- und Laborversuche

			max	50898	141	0,31
			Mittelw.	32089	84	0,29
			Std.abw.	15364	48	-
	Granit	3	Anzahl	9	9	1
			min	4276	7	-
			max	30782	75	-
			Mittelw.	18116	38	0,25
			Std.abw.	8534	20	-
	Granit	4	Anzahl	5	5	1
			min	419	5	-
			max	9840	19	-
			Mittelw.	4308	10	0,24
			Std.abw.	3477	6	-

Legende:

- GFO = Forbach-Granit
- 4 = stark verwittert - vollständig verwittert
- 3 = mäßig verwittert - stark verwittert
- 2 = angewittert - mäßig verwittert
- 1 = unangewittert - leicht angewittert

Bei den 21 frischen bis leicht angewitterten Grundgebirgsproben (G1) des Forbach-Granits wurden Wiederbelastungsmodul V_{40-60} zwischen 12.694 MN/m² und 70.872 MN/m² ermittelt. Die einaxialen Druckfestigkeiten lagen zwischen 26 MN/m² und 167 MN/m².

Bei den verwitterten Granitproben (G2) wurde ein Wiederbelastungsmodul V_{40-60} zwischen 14.729 MN/m² und 50.898 MN/m² ermittelt. Die einaxialen Druckfestigkeiten lagen zwischen 25 MN/m² und 141 MN/m². Die Proben mit einaxialen Druckfestigkeiten von ca. 5 MN/m² wurden z. T. in der Nähe von Vergrusungszonen genommen, die teilweise oberflächennah, aber teilweise auch im mehreren hundert Meter Tiefe liegen.

Die mäßig bis stark verwitterten Proben (G3) und die vollständig verwitterten Proben (G4) zeigen deutlich geringere Werte. Für G3 wurden Wiederbelastungsmodul V_{40-60} zwischen 4.276 MN/m² und 30.782 MN/m² und Druckfestigkeiten zwischen 7 MN/m² und 75 MN/m² ermittelt. Für G4 Wiederbelastungsmodul V_{40-60} zwischen 419 MN/m² und 9.840 MN/m² und Druckfestigkeiten zwischen 5 MN/m² und 19 MN/m².

Die in den Versuchen ermittelten Querdehnungszahlen liegen zwischen 0,23 bis 0,31.

8.3.6 Dreiaxiale Druckversuche

Zur Bestimmung der Festigkeits- und Verformungseigenschaften der Gesteine des geplanten Kavernenwasserspeichers wurden dreiaxiale Druckversuche gemäß der DIN 18137-1:2011-04 UU durchgeführt. Dabei handelt es sich um undrainierte, unkonsolidierte (UU) Scherversuche mittels denen der Reibungswinkel φ_u und die Kohäsion c_u bestimmt wurden.

Zusätzlich wurden die Ergebnisse der triaxialen Druckversuche aus den Erkundungen von 2010 (8 Proben aus 7 Bohrungen) herangezogen.

Kapitel 8: Untersuchungsergebnisse der Feld- und Laborversuche

Die Versuchsbeschreibung der durchgeführten triaxialen Druckversuche von Festgesteinen ist mit zusammenfassenden Ergebnistabellen im Laborversuchsbericht in Anlage 8.3 dokumentiert. Die einzelnen Versuchsprotokolle sind in Anlage 8.2 zu finden.

Eine Zusammenstellung der Versuchsergebnisse nach Stratigraphie, Gesteinsart und Verwitterungsgrad ist in Tab. 45 erfolgt.

Kapitel 8: Untersuchungsergebnisse der Feld- und Laborversuche

Tab. 45: Zusammenstellung der dreiaxialen Druckversuche an Festgesteinsproben

Angaben zu den Schichtabfolgen und der Gesteinsbeschaffenheit			Versuchsdaten und -ergebnisse		
Stratigraphische Einheit	Gesteinsart gemäß DIN 4022, T1; DIN 4023 und Aufschlussprofile	Gebirgstyp	Statistische Kenngrößen	Reibungswinkel φ_u	Kohäsion c_u
				[°]	[MN/m ²]
GFO	Granit	1	Anzahl	8	8
			min	27	1
			max	67	22
			Mittelw.	48	10
			Std.abw.	16	8
	Granit	2	Anzahl	4	4
			min	31	1
			max	42	11
			Mittelw.	37	7
			Std.abw.	5	5
	Granit	3	Anzahl	2	2
			min	38	3
			max	38	4
			Mittelw.	38	4
			Std.abw.	0	1
	Granit	4	Anzahl	0	0
			min	-	-
			max	-	-
			Mittelw.	-	-
			Std.abw.	-	-

Legende:

GFO = Forbach-Granit

4 = stark verwittert - vollständig verwittert

3 = mäßig verwittert - stark verwittert

2 = angewittert - mäßig verwittert

1 = unangewittert - leicht angewittert

Für frische, unverwitterte Granite (G1) wurden an 8 Proben Reibungswinkel zwischen 27° bis 67° ermittelt, die Kohäsion liegt bei 1 MN/m² bis 22 MN/m².

Ein leicht angewitterter Granit (G2) zeigt an 4 Proben einen Reibungswinkel von 31° bis 42° bei einer Kohäsion von 1 MN/m² bis 11 MN/m².

Für einen angewitterten Granit (Nähe von größerer Vergrusungszone), wurde ein Reibungswinkel von 61,2° ermittelt. Die Kohäsion liegt bei 0,9 MN/m² und die Einachsfestigkeit bei 7,1 MN/m².

Die zwei Proben des mäßig bis stark verwitterten Granits zeigen Reibungswinkel von 38° und eine Kohäsion zwischen 3 MN/m² und 4 MN/m².

Für den Gesteinstyp G4, stark verwittert, konnten keine Triaxialversuche durchgeführt werden.

Kapitel 8: Untersuchungsergebnisse der Feld- und Laborversuche

8.3.7 Indirekte Bestimmung der Zugfestigkeit

Zur Untersuchung der Gesteinszugfestigkeit wurden an 29 Festgesteinsproben des Granits aus Bohrungen (2010 und 2018) Spaltzugversuche, sog. Brazilian-Test gemäß der Empfehlung Nr. 10 der DGGT durchgeführt.

Die Versuchsbeschreibung der durchgeführten Spaltzugversuche ist mit der zusammenfassenden Ergebnistabelle im Laborversuchsbericht in Anlage 8.3 dokumentiert. Die einzelnen Versuchsprotokolle sind in Anlage 8.2 zu finden.

Die statistische Auswertung der Versuchsergebnisse nach Stratigraphie, Gesteinsart und Verwitterungsgrad ist in Tab. 46 enthalten.

Tab. 46: Statistische Auswertung der Ergebnisse der Zugfestigkeitsbestimmung an Granitproben

Angaben zu den Schichtabfolgen und der Gesteinsbeschaffenheit			Versuchsdaten und -ergebnisse	
Stratigraphische Einheit	Gesteinsart gemäß DIN 4022, T1; DIN 4023 und Aufschlussprofile	Gebirgstyp	Statistische Kenngrößen	Zugfestigkeit σ_t
				[MN/m ²]
GFO	Granit	1	Anzahl	13
			min	2,31
			max	7,72
			Mittelw.	6,10
			Std.abw.	1,44
	Granit	2	Anzahl	6
			min	4,24
			max	7,95
			Mittelw.	6,50
			Std.abw.	1,34
	Granit	3	Anzahl	5
			min	1,87
			max	3,14
			Mittelw.	2,67
			Std.abw.	0,51
	Granit	4	Anzahl	5
			min	0,38
			max	2,69
			Mittelw.	1,00
			Std.abw.	0,97

Legende:

- GFO = Forbach-Granit
 4 = stark verwittert - vollständig verwittert
 3 = mäßig verwittert - stark verwittert
 2 = angewittert - mäßig verwittert
 1 = unangewittert - leicht angewittert

Kapitel 8: Untersuchungsergebnisse der Feld- und Laborversuche

Die Zugfestigkeit für unverwitterten Granit (G1) liegt zwischen 2,3 MN/m² und 7,7 MN/m². Der Mittelwert liegt bei 6,1 MN/m².

Die für leicht bis mäßig verwitterten Granit (G2) bei 4,2 MN/m² bis 8,0 MN/m².

Für den Granit des Gesteinstyp G3 wurde eine Zugfestigkeit von 1,9 MN/m² bis 3,1 MN/m² ermittelt, für G4, stark bis vollständig verwitterten Granit liegt diese zwischen 0,4 MN/m² und 2,7 MN/m².

8.3.8 Verwitterungsbeständigkeit (Frostwiderstand, DIN EN 1367-1)

Im Zuge der Erkundung 2018/2019 Forbach Unterstufe wurden an insgesamt 18 Festgesteinsproben der Frostwiderstand nach DIN EN 1367-1 durchgeführt. Der Versuch dient zur Prüfung des Verhaltens des Gesteins bei Frost und wird in Verbindung mit anderen Prüfungen als Beurteilungsgrundlage für die Verwitterungsbeständigkeit der 4 Granittypen G1 bis G4 herangezogen. Die Versuchsergebnisse ergaben für Gesteinskörnungen für

- Granit G1 einen Frostwiderstand F zwischen 0,2 bis 0,3 Massen-% und die Frostkategorie F₁
- Granit G2 einen Frostwiderstand F zwischen 0,3 bis 2,1 Massen-% und die Frostkategorie F₁, untergeordnet F₄
- Granit G3 einen Frostwiderstand F zwischen 3,6 bis 7,6 Massen-% und die Frostkategorie F₄, untergeordnet F₈
- Granit G4 konnten keine Proben hergestellt werden. Material ist nicht frostsicher.

Die Beschreibung der Versuchsdurchführung ist dem Laborversuchsbericht (Anlage 8.3) zu entnehmen. Die zugehörigen Versuchsprotokolle sind ebenfalls in Anlage 8.3 zu finden.

8.3.9 Abrasivität

Zur Bestimmung der Abrasivität des Forbach-Granits im Bereich Kavernenwasserspeicher wurden 5 CAI-Tests (CERCHAR, 1986) an Festgesteinsproben durchgeführt.

Die Versuchsbeschreibung der durchgeführten CAI-Tests ist mit zusammenfassenden Ergebnistabellen im Laborversuchsbericht in Anlage 8.3 dokumentiert. Die einzelnen Versuchsprotokolle sind in Anlage 8.2 zu finden.

Eine Zusammenstellung der Versuchsergebnisse nach Gesteinsart und Verwitterungsgrad ist in Tab. 47 erfolgt.

Die Auswertung der CAI Tests zeigen, dass der Granit bei den Gebirgstypen G1 bis G3 als sehr abrasiv bewertet werden kann. Für G4 zeigen sich, aufgrund der bereits fortgeschrittenen Verwitterung, schwach abrasive Werte.

Tab. 47: Ergebnisse der Abrasivitätstests für Granit

Angaben zu den Schichtabfolgen und der Gesteinsbeschaffenheit			Versuchsdaten und -ergebnisse		
Stratigraphische Einheit	Gesteinsart gemäß DIN 4022, T1; DIN 4023 und Aufschlussprofile	Gebirgstyp	Statistische Kenngrößen	CAI	Klassifizierung (CERCHAR, 1986)
				[-]	[-]
GFO	Granit	1	Anzahl	9	-
			min	2,90	sehr abrasiv
			max	4,50	extrem abrasiv
			Mittelw.	3,69	sehr abrasiv
			Std.abw.	0,51	-
	Granit	2	Anzahl	7	-
			min	1,70	abrasiv
			max	4,30	extrem abrasiv
			Mittelw.	3,30	sehr abrasiv
			Std.abw.	0,80	-
	Granit	3	Anzahl	5	-
			min	1,60	abrasiv
			max	4,20	extrem abrasiv
			Mittelw.	2,86	sehr abrasiv
			Std.abw.	0,97	-
	Granit	4	Anzahl	1	-
			min	-	-
			max	-	-
			Mittelw.	0,60	schwach abrasiv
			Std.abw.	-	-

8.3.10 Wasseraufnahme nach DIN EN 13755

Die Wasseraufnahmefähigkeit wurde an 18 Kernproben für die 4 Granittypen untersucht. Der Versuch dient zur Prüfung des Verhaltens des Gesteins bei Wasseraufnahme und wird in Verbindung mit anderen Prüfungen als Beurteilungsgrundlage für die Frostbeständigkeit der 4 Granittypen G1 bis G4 herangezogen. Nach den Technischen Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen der FGSV 613 bedeutet das Erreichen der Kategorie $WA_{cm0,5}$ bei der vorliegenden Prüfung, dass von einer ausreichenden Widerstandsfähigkeit der Gesteinskörnung gegen Frostbeanspruchung auszugehen ist. Die Versuchsergebnisse ergaben für Gesteinskörnungen nur für den Granittyp G1 teilweise eine ausreichende Frostsicherheit. Die Ergebnisse für die Granittypen G1 bis G4 ergaben für:

- Granit G1: Kategorie $WA_{cm0,5}$ teilweise erfüllt
- Granit G2: Kategorie $WA_{cm0,5}$ nicht erfüllt
- Granit G3: Kategorie $WA_{cm0,5}$ nicht erfüllt
- Granit G4: Kategorie $WA_{cm0,5}$ nicht erfüllt

Kapitel 8: Untersuchungsergebnisse der Feld- und Laborversuche

Die zugehörigen Einzelergebnisse sind in Anlage 8.3 zu finden. Unseres Erachtens sind für die Gesteinskörnungen weitere, vertiefende Untersuchungen erforderlich.

8.3.11 Physikalische Eigenschaften Körnung nach DIN EN 1097

Die Zertrümmerungseigenschaften der Gesteinskörnungen wurde nach DIN EN 1097-2 wurde an je einer Probe für die Granittypen G1 bis G3 untersucht. Die Untersuchung wurde nach dem Los-Angeles-Prüfverfahren durchgeführt. Die Prüfkornklasse lag bei 10 /14 mm. Für die Granittypen G1 bis G4 ergab sich:

- Granit G1: Los-Angeles-Koeffizient LA₁ [M.-%]: 28
- Granit G2: Los-Angeles-Koeffizient LA₁ [M.-%]: 35
- Granit G3: Los-Angeles-Koeffizient LA₁ [M.-%]: 38

Nach den Technischen Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen der FGSV 613, Anhang A muss ein Granit einen Los-Angeles-Koeffizient (LA) von LA₃₀ erreichen, LA₃₅ und LA₃₈ sind nicht zulässig. Daraus folgt, dass nur der Granit G1 einen ausreichenden Widerstand gegen Zertrümmerung erbringt.

Die Untersuchung der Hitzebeständigkeit nach DIN EN 1097-5 wurden ebenfalls je an einer Probe für die Granittypen G1 bis G3 untersucht. Nach den Untersuchungen ergab sich nach der Hitzebeanspruchung ein LA-Koeffizient folgende Koeffizienten:

- Granit G1: Los-Angeles-Koeffizient LA₂ [M.-%]: 34
- Granit G2: Los-Angeles-Koeffizient LA₂ [M.-%]: 36
- Granit G3: Los-Angeles-Koeffizient LA₂ [M.-%]: 39

Dies bedeutet, dass der Festigkeitsverlust für den Granittyp G1 von 6 Massen-% und je 1 Massen-% bei den Granittypen G2 und G3.

Die visuelle Beurteilung des Gehalts an organischen Verunreinigungen durch das Labor ergab für die Granittypen G1 bis G4 keine groben organischen Verunreinigungen.

Die Einzelergebnisse für den Widerstand gegen Zertrümmerung, die Hitzebeständigkeit und die organischen Verunreinigungen sind in Anlage 8.3 zu finden.

Zusammenfassend ergibt sich gemäß den derzeit durchgeführten Versuchen für die Beurteilung des Granits als Zuschlagsstoff von Beton, dass nicht alle Gebirgstypen als Zuschlagstoff geeignet sind.

Es wird jedoch darauf hingewiesen, dass entsprechend der natürlichen Verteilung im Abbauprozess anfallende Mischungen von Gesteinskörnungen aus verschiedenen Granitgebirgstypen bei entsprechender Aufbereitung / Separierung für bestimmte Betons geeignet sind. Über Konzepte zur Aufbereitung des aus dem Vortrieb anfallenden Granits und die geplanten Zemente in der Bauphase liegen derzeit keine Angaben vor.

Gegebenenfalls sollten zu einem späteren Zeitpunkt weitere Untersuchungen an Gesteinstypmischungen entsprechend den wahrscheinlichen bzw. ungünstigen Anteilen / Verteilungen der Gebirgstypen durchgeführt werden.

Kapitel 8: Untersuchungsergebnisse der Feld- und Laborversuche

8.4 Mineralogie

Zur geochemischen und mineralogischen Charakterisierung des Forbach-Granits und der einzelnen Gebirgstypen wurden 12 Proben mittels Röntgendiffraktometrie (XRD), Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) und Dünnschliffanalyse untersucht.

8.4.1 Röntgendiffraktometrie (XRD)

Zur Bestimmung der mineralogischen Zusammensetzung der Gebirgstypen wurden sieben Proben mittels Röntgendiffraktometrie (XRD) untersucht. Dabei wurde eine Probe des Gebirgstyps 1 untersucht und je zwei Proben der Gebirgstypen 2, 3 und 4. Um die Mineralgehalte zu quantifizieren, wurden die Ergebnisse aus den röntgendiffraktometrischen Untersuchungen nach Rietveld ausgewertet. Der daraus abgeleitete Mineralbestand der einzelnen Proben ist in

Tab. 48 dargestellt. Der entsprechende Versuchsbericht ist Anlage 9.3 zu entnehmen. Nähere Erläuterungen zum Bericht bzw. zur Ermittlung der hier gelisteten Mineralbestände sind in Anlage 8.3 aufgeführt.

Tab. 48: Quantitative mineralogische Zusammensetzung von Graniten berechnet nach Rietveld aus Röntgenbeugungsversuchen.

Angaben zu den Schichtabfolgen und der Gesteinsbeschaffenheit			Versuchsdaten und -ergebnisse						
Stratigraphische Einheit	Gesteinsart gemäß DIN 4022, T1; DIN 4023 und Aufschlussprofile	Gebirgstyp	Mineralbestand als Ergebnis der Rietveld-Rechnung in Gew.-%						
			Quarz	Plagioklas	Kalifeldspat	Hämatit	Glimmer/Illit	Chlorit/Smektit	Kaolinit
GFO	Granit	1	35	30	20	<1	10	n.d.	11
GFO	Granit	2	33	27	30	1	7	n.d.	3
			35	21	26	<1	12	n.d.	5
GFO	Granit	3	40	2	31	<1	24	n.d.	3
			40	17	18	1	17	n.d.	8
GFO	Granit	4	38	4	26	1	13	12	6
			2	<1	27	2	58	n.d.	11

Legende:

- GFO = Forbach-Granit
 4 = stark verwittert - vollständig verwittert
 3 = mäßig verwittert - stark verwittert
 2 = angewittert - mäßig verwittert
 1 = unangewittert - leicht angewittert
 n.d. = Bestand verneint durch Rietveld

Der Granit des Gebirgstyps 1 besteht somit nach Tab. 49 hauptsächlich aus den Mineralen Quarz (35 Gew.-%) und Plagioklas (30 Gew.-%). Untergeordnet finden sich Kalifeldspat, Kaolinit und Glimmer bzw. Illit. An dieser Stelle sei angemerkt, dass der Gehalt von Biotit sowie Muskovit, welcher hier zusammenfassend mit weiteren Mineralen als Glimmer angegeben wird, in der Anlage

Kapitel 8: Untersuchungsergebnisse der Feld- und Laborversuche

9.1 separat aufgeführt ist. Des Weiteren ist im Gebirgstyp 1 Spuren von Hämatit zu finden. Die Minerale Chlorit und Smektit wurden durch die Rietveld-Analyse verneint.

Im Gebirgstyp 2 besteht der Granit ebenfalls zum größten Teil aus dem Mineral Quarz mit einem Anteil von 33 Gew.-% bis 35 Gew.-%. Plagioklas (21 Gew.-% bis 27 Gew.-%) und Kalifeldspat (26 Gew.-% bis 30 Gew.-%) sind zu etwa gleichen Teilen im Granit vertreten. Glimmer bzw. Illit und Kaolinit sind nur untergeordnet vorhanden. Ebenso finden sich wie im Gebirgstyp lediglich Spuren von Hämatit. Die Anwesenheit von Chlorit und Smektit wurde im Gebirgstyp 2 ebenfalls durch die Rietveld-Analyse verneint.

Auch der stärker vergrusste und zum Teil alterierte Granit des Gebirgstyps 3 zeichnet sich mit 40 Gew.-% durch hohe Quarzgehalte aus. Die Minerale Plagioklas (2 Gew.-% bis 31 Gew.-%) und Kalifeldspat (18 Gew.-% bis 31 Gew.-%) sind mit zum Teil stark schwankenden Gehalten vertreten. Mit 17 Gew.-% bis 24 Gew.-% treten Glimmer bzw. Illit im Gebirgstyp 3 stärker in den Vordergrund. Kaolinit ist nach wie vor unterrepräsentiert. Hämatit ist auch im Gebirgstyp 3 nur in Spuren vorhanden. Die Rietveld-Analyse konnte das Vorkommen von Chlorit bzw. Smektit nicht bestätigen.

Die berechnete prozentuale Verteilung der Minerale in den Proben des stark vergrusteten und teilweise deutlich alterierten Granits des Gebirgstyps 4, unterscheidet sich zu den Gebirgstypen 1, 2 und 3 zum Teil erheblich. Des Weiteren weisen die Proben auch im Vergleich untereinander eine stark unterschiedliche Zusammensetzung auf. Die Quarzgehalte liegen bei 2 Gew.-% und 38 Gew.-%. In der Probe mit geringem Quarzanteil findet sich Glimmer bzw. Illit mit 58 Gew.-% als Hauptbestandteil. Plagioklas tritt mit weniger als 1 Gew.-% bis 4 Gew.-% stark in den Hintergrund. Des Weiteren konnten mit 12 Gew.-% untergeordnet Gehalte von Chlorit bzw. Smektit im Granit des Gebirgstyp 4 festgestellt werden. Hämatit findet sich auch hier nur in Spuren. Kaolinit tritt als Nebenbestandteil auf.

Neben den in diesem Gutachten beschriebenen Ergebnissen sind in [26], Kapitel 8.4.1 weitere, an Gesteinen des Forbach-Granits durchgeführte röntgendiffraktometrische Versuche, zur Bestimmung des Mineralgehalts beschrieben und ausgewertet.

8.4.2 Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA)

Für die nähere geochemische Charakterisierung des Granits des Gebirgstyps 1 und 4, sowie eines Kluffelags wurden energiedispersive (EDX) Röntgenfluoreszenzanalysen an drei Proben durchgeführt. Die Proben wurden im Zuge der Erkundung der Raumordnungsuntersuchung im Jahre 2010/2011 analysiert und wurden aus den Bohrungen KS BK 4 und KS BK 6 gewonnen. Die entsprechenden Laborversuchsberichte sind [26], Anlage 9.3 zu entnehmen. Tab. 49 zeigt die Ergebnisse der Röntgenfluoreszenzanalyse in Form der chemischen Zusammensetzung der untersuchten Proben sowie deren Spurenelement-Gehalte.

Kapitel 8: Untersuchungsergebnisse der Feld- und Laborversuche

Tab. 49: Ergebnisse der Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA)

Chemische Zusammensetzung	Einheit	KS BK 4 (Kluftbelag)	KS BK 4 (Gebirgstyp 1)	KS BK 6 (Gebirgstyp 4)
		303,4 m	283,0 m	107,7 m
P ₂ O ₅	(%)	0,8	-	0,2
K ₂ O	(%)	4,8	5,1	3,4
CaO	(%)	1,2	0,5	0,3
TiO ₂	(%)	0,17	0,19	0,03
MnO	(%)	0,41	0,01	0,05
Fe ₂ O ₃	(%)	8,07	0,84	4,18
Cu	ppm	11	11	9
Zn	ppm	55	64	45
Ga	ppm	26	25	36
As	ppm	47	3	11
Rb	ppm	440	399	417
Sr	ppm	31	30	13
Y	ppm	6	5	3
Zr	ppm	57	61	13
Nb	ppm	15	19	2
Ba	ppm	765	383	395
La	ppm	18	18	12
Ce	ppm	34	42	24
Pb	ppm	27	27	12

Legende

ppm = mg/kg TS

Die Ergebnisse der Röntgenfluoreszenzanalyse zeigen zwischen dem frischen Granit des Gebirgstyps 1, dem verwitterten (vergrusten) Granit des Gebirgstyp 4 und dem Kluftbelag eine geochemische Verwandtschaft. Die Gehalte der Spurenelemente Cu, Zn, Rb, Y, La, Ce sind nahezu gleich, wobei beim Granit des Gebirgstyp 4 eine geringfügige Abreicherung zu beobachten ist. Phosphat (P₂O₅) ist im Ausgangsgestein nicht vorhanden aber findet sich im vergrusten Granit des Gebirgstyp 4 und im Kluftbelag. Im diesem ist zudem eine Anreicherung von CaO, MnO, Fe₂O₃, As und Ba zu beobachten. Im Granit des Gebirgstyp 4 ist hingegen eine starke Abreicherung der Elemente K₂O, CaO, TiO₂ und eine Anreicherung von Fe₂O₃ zu beobachten. Diese Beobachtungen sprechen für einen kluftbezogenen Alterierungsprozess mit hydrothermaleem Ursprung.

8.4.3 Dünnschliffanalysen

Zur Bestimmung der Mineralvergesellschaftung im Granit und der Erfassung von strukturellen Elementen im Korngefüge auf mikroskopischer Ebene, wurden Untersuchungen an sechs Dünnschliffen durchgeführt. Der Schwerpunkt der Betrachtung lag auf der Charakterisierung der Mikrorisse im Granit der Gebirgstypen 2, 3 und 4. Die Risse wurden in Bezug auf Verteilung, Ausprägung und Füllung untersucht. Aufgrund der überaus feinkörnigen Mineralphasen innerhalb der Mikrorisse war eine Analyse mittels Rasterelektronenmikroskop (REM) unumgänglich. Im Folgenden werden die Ergebnisse im Wesentlichen zusammengefasst. Der entsprechende Laborbericht ist Anlage 9.1 zu entnehmen. Nähere Erläuterungen zur Vorgehensweise und Untersuchungsmethodik sind in Anlage 8.3 beschrieben.

Die beiden im Gebirgstyp 2 untersuchten Proben werden durch hohe Quarz- und Kalifeldspatgehalte gekennzeichnet. Weitere Bestandteile sind Albit und Muscovit. Die Proben werden von zahlreichen Rissen bzw. Rissnetzwerken durchzogen. Die im Gestein vorhandenen Mikrorisse weisen Breiten von 10 µm – 90 µm auf. Besonders in Feldspäten finden sich jedoch auch Risse mit Breiten mit bis zu 600 µm. Häufig sind die Risse mit massigem Hämatit verheilt und infolge dessen vollständig geschlossen. Es konnten allerdings auch offene und unvollständig gefüllte Risse beobachtet werden. Diese sind meist mit feinschuppigem Illit und unregelmäßig geformten Anreicherungen von Hämatit gefüllt.

Im Granit des Gebirgstyp 3 bilden Quarz, Kalifeldspat, Muskovit und stark alterierter Albit die Hauptphasen. Alle Minerale werden durchweg von feinen und unregelmäßig verlaufenden Mikrorissen durchzogen. Diese zeigen überwiegend konstante Breiten von 5 µm bis 70 µm und sind zum größten Teil offen bzw. selten mit Hämatit verfüllt. Besonders innerhalb der Feldspäte finden sich in diesen stark alterierten Bereichen vermehrt Neubildungen von Illit. Weiterhin können breitere Risse mit ca. 150 µm Breite beobachtet werden. Diese sind in der Regel vollständig mit Quarz verheilt und wirken unalteriert.

Hauptgemengteile der untersuchten Granite im Gebirgstyp 4 sind in erster Linie Kalifeldspat und Muscovit. Quarz ist in einer der Proben nur untergeordnet vorhanden. In beiden Proben sind feine und unregelmäßige, weit verzweigte Rissnetzwerke zu erkennen. Diese weisen stark schwankende Breiten von 5 µm bis 80 µm und Breiten von bis zu 500 µm auf. Die Risse sind überwiegend unvollständig mit Hämatit verheilt. Die alterierten Randzonen der Rissnetzwerke sind im Feldspat und Muscovit besonders stark ausgeprägt vorhanden. In diesen Bereichen bestehen die Rissfüllungen hauptsächlich aus den Mineralen Illit und Kaolinit.

Tendenziell sind die Mikrorisse in den wenig verwitterten Graniten überwiegend und vollständig mit Hämatit verheilt. Mit zunehmenden Verwitterungsgrad nimmt die Anzahl an geöffneten und unvollständig verheilten Rissen zu. In den verwitterten bzw. vergrusten Graniten treten verstärkt Illit und Kaolinit als Rissfüllung auf.

8.5 Wasser-Druck-Versuche (WD-Versuche)

In Kapitel 6.1.2.1 sind die Ergebnisse der Lugeon-Werte aus den Einzelversuchen für den Zeitraum 2011 und 2018 zusammengestellt und Durchlässigkeitsbewertung für die verschiedenen Gebirgstypen aus den WD-Tests durchgeführt. Das Ergebnis dabei ist, dass für den frischen Granit und den verwitterten Granit keine großen Unterschiede in den Lugeon-Werten ermittelt werden konnte.

Die Auswertung der WD-Tests hinsichtlich des Musters der Lugeon - Werte in den 5 Stufen eines WD-Tests nach Housby (1990) kann in 5 Typen eingeteilt werden: laminares Fließen in der Kluft,

Kapitel 8: Untersuchungsergebnisse der Feld- und Laborversuche

turbulentes Fließen in der Kluft, Fließen durch Aufweiten der Kluft, Fließen durch Erosion der Kluftfüllung und Fließverhalten beim Auffüllen der Kluft. Zusätzlich wurde bei der statistischen Auswertung noch die Versuche berücksichtigt bei denen keine Auswertung möglich war, weil das Gebirge dicht war.

Die Auswertung von 54 WD-Tests aus den Jahren 2011 und 2018 erbrachte folgende Verteilung der Typen nach Houlsby (1990):

Typ laminares Fließen:	kein Ergebnis (0%)
Typ turbulentes Fließen:	10 Versuche (18,5%)
Typ Aufweiten der Kluft:	17 Versuche (31,4%)
Typ Erosion der Kluftfüllung:	1 Versuch (1,9%)
Typ Auffüllung der Kluft:	13 Versuche (24,1%)
Gebirge dicht:	13 Versuche (24,1%)

Die Auswertung der Versuche zeigt, dass von den untersuchten Abschnitten ca. 24 % der Klüfte dicht sind und ca. 31 % der Klüfte erst durch den Wasserdruck aufgeweitet wurden. Weitere 24 % der untersuchten Klüfte konnten lediglich aufgefüllt werden. Bei einer oberflächennahen Kluft (1,9 % der untersuchten Menge) erfolgte eine Erosion der Kluftfüllung. Bei 18,5 % der Klüfte wurde sowohl in oberflächennahen wie auch in tiefen Klüften turbulentes Fließen festgestellt. Laminares Fließen wurde bei keinem untersuchten Abschnitt mit Klüften festgestellt.

9 Baugrundbeurteilung und felsmechanische Charakterisierung

9.1 Beschreibung und Charakterisierung der geotechnischen Gebirgseinheiten

Die ingenieurgeologische Erkundung und die boden- und felsmechanische Untersuchung hat ergeben, dass das Grundgebirge und das Deckgebirge sowie die quartäre Lockergesteinsüberlagerung in verschiedenen Gebirgstypen und Lockergesteinsklassen vorliegen.

Grundgebirge

Im Grundgebirge ist zwischen den frischen Graniten, mäßig verwittertem Granit und dem stark verwitterten Granit zu unterscheiden. Die Gesteinstypen besitzen unterschiedliche Festigkeiten des Gesteins, dadurch dass die Kornbindung vom frischen Granit bis zum verwitterten Granit immer mehr abnimmt und im Bereich des verwitterten Gesteinstyps fast Lockergesteinscharakter hat. Die verwitterten Granitbereiche kommen sowohl an der Geländeoberfläche, als auch in den tieferen Bereichen des Gebirges vor und sind dort unregelmäßig verteilt.

Gebirgstypen des Granits

Granit, frisch

Die Trennflächen sind im Gebirgsverband des unverwitterten Granits eingespannt, die Klüfte geschlossen, der RQD größer 75 %, meist 90 % bis 100 %. Lokal können auch Gebirgsparien mit einem RQD zwischen 40 % und 60 % auftreten. Der Verwitterungsgrad liegt bei w0 bis w1 nach DIN 14 689.

Granit, überwiegend mäßig verwittert

Bei überwiegend mäßig verwittertem Granit ist der RQD >65 % und der Verwitterungsgrad liegt bei w2 bis w3 nach DIN 14 689. Die Klüfte sind z. T. mit Eisen und Mangan belegt. Der Gebirgsverband ist weniger kompakt. Dieser Gebirgstyp kommt oberflächennah, im Bereich der Aufwitterungszone der heutigen Geländeoberfläche, aber auch in tieferen Bereichen des Gebirges (Bauwerksbereich), in der Nähe von Vergrusungszonen und in Klüftverdichtungsbereichen, wie in der KS BK 3 (Tiefe 281 m bis 284,5 m), vor.

Granit stark verwittert

Bei stark verwittertem Granit ist die Kornbindung gelockert, der Gebirgsverband ist entfestigt, die Klüfte sind z. T. mit Ton oder Kaolinit belegt (vergruster Granit). Der verwitterte Granittyp kommt oberflächennah, im Bereich der Aufwitterungszone der heutigen Geländeoberfläche (z. B. Krafthausschacht, Einlauf-/Auslaufbauwerk siehe Anlage 3.2 und Anlage 3.3), aber auch in tieferen Bereichen des Gebirges (Bauwerksbereich), in sogenannten Vergrusungszonen und in Klüftverdichtungsbereichen vor. Da sich die Vergrusungsbereiche mit punktuellen Aufschlüssen nicht konkret festlegen lassen, wird im Bewertungsband (Anlage 2) mit "lokal w3 bis 4" auf diese Vergrusungsbereiche hingewiesen.

9.2 Bautechnische Klassifizierung (Homogenbereiche)

Im Folgenden werden für die im Kapitel 9.1 beschriebenen Gebirgstypen des Granits auf Grundlage der ermittelten boden- und felsmechanischen Gesteinsparameter die bautechnischen Klassifizierungen angegeben. Die Unterteilung in die jeweiligen Homogenbereiche erfolgte für das Festgestein (F) anhand der jeweiligen Gebirgsfestigkeit.

Die untersuchten Lockergesteine wurden ebenfalls in Homogenbereiche (Hangschutt Q und Auffüllungen A) unterteilt.

Gemäß den gültigen ATV-Normen der VOB-Teil C Ergänzungsband 2015 ist der Baugrund in Bezug auf Bauleistungen in Homogenbereiche einzuteilen. Die Einteilung der Homogenbereiche ergibt sich aus den in den einzelnen Normen geforderten Angaben zu geomechanischen Parametern. Seitens des Gutachters kann zum jetzigen Zeitpunkt nur abgeschätzt werden, welche Bauleistungen anfallen und welche ATV-Normen bzgl. der Einteilung des Baugrundes in Homogenbereiche zur Anwendung kommen. Hierbei handelt es sich voraussichtlich um:

DIN 18300: Erdarbeiten

DIN 18301 Bohrarbeiten

DIN 18312 Untertagebau

DIN 18321 Düsenstrahl

Auf Grundlage der durchgeführten Untersuchungen lässt sich das Baugebiet, aufbauend auf dem geologischen Schichtenmodell, in 8 Homogenbereiche gemäß VOB-Teil C einteilen. Eine im Sinne der aktuellen ATV-Normen umfassende tabellarische Charakterisierung der Homogenbereiche ist in der Anlage 10 zu finden.

Homogenbereiche im Festgestein

Homogenbereich F1:

Der Homogenbereich F1 umfasst die Gebirgstypen G1 und G2, darunter fällt:

- Granit, frisch bis gering verwittert, w0, w1, RQD >75 %, meist 90 % bis 100 %
- Granit, gering bis überwiegend mäßig verwittert, w1, w2, RQD >75 %, meist 90 % bis 100 %

Da die beiden Gebirgstypen in sehr engen Wechslern auftreten und optisch kaum auseinanderzuhalten sind und ähnliche geotechnische Kennwerte aufweisen, wurden sie zu einem Homogenbereich zusammengefasst.

Homogenbereich F2:

Der Homogenbereich F2 umfasst den Gebirgstyp G3:

- Granit, überwiegend mäßig verwittert, w2, (w3), RQD >65 %

Homogenbereich F3:

Der Homogenbereich F3 umfasst den Gebirgstyp G4:

- Granit, stark verwittert, z. T. zersetzt, w3, (w4), RQD <65 %

Homogenbereiche im Lockergestein

Homogenbereich Q1:

Der Homogenbereich Q1 umfasst den Gebirgstyp L_G

- Hangschutt Granit/Granitlockergestein

Homogenbereich Q2:

Der Homogenbereich Q2 umfasst den Gebirgstyp L_G

- Flussschotter/Murgschotter

Homogenbereich A 2.1:

Der Homogenbereich A 2.1 umfasst den Gebirgstyp L_A

- Auffüllung, Kies, stark sandig

Homogenbereich A 2.2:

Der Homogenbereich A 2.2 umfasst den Gebirgstyp L_A

- Kies, stark sandig, Schluff

Homogenbereich A 2.3:

Der Homogenbereich A 2.3 umfasst den Gebirgstyp L_A

- Auffüllung, Schluff, sandig

Für die Homogenbereiche A 2.1 bis A 2.3 wurde in Anlage 10 ein zusammenfassendes Datenblatt erstellt.

9.3 Charakteristische Kennwerte für geotechnische Berechnungen

Bei der bautechnischen Beurteilung und den Kennwerten für den Festgesteinsuntergrund ist zu unterscheiden zwischen den

- Gesteinseigenschaften
- Trennflächeneigenschaften
- Gebirgseigenschaften

Das Gestein beschreibende Kennwerte wie z. B. die einachsige Druckfestigkeit wurden direkt durch Laborversuche an Gesteinsprüfkörpern gewonnen. Als wichtige, das Festigkeits- und Verformungsverhalten charakterisierende Kenngröße wurde die einachsige Druckfestigkeit an Bohrkernen aus jeder der zu betrachtenden Gebirgseinheiten bestimmt. An den Prüfkörpern wurden jeweils die einachsige Druckfestigkeit (σ_u), der Verformungsmodul E 40 - 60 sowie Dichte und Wassergehalt bestimmt. Die im Wesentlichen aus den Einzelversuchen abgeleiteten charakteristischen Werte liegen i. A. unter dem arithmetischen Mittelwert der aus den Versuchen ermittelten Einzelwerte. Charakteristische Werte z. B. der Druckfestigkeit können u. U. auch geringer sein als der niedrigste in den Versuchen bestimmte Wert. Dies ist der Tatsache geschuldet, dass systembedingt im Bohrgut kleinstückig anfallende Bohrkern nicht untersucht werden können.

Die Scherfestigkeit des Gesteins wurde in dreiachsigen Druckversuchen an Bohrkernen bestimmt. Dabei wurden die Laborversuchsergebnisse aus den Jahren 2010, 2013 und 2018/2019 in die vorliegenden Betrachtungen mit einbezogen.

Kapitel 9: Baugrundbeurteilung und felsmechanische Charakterisierung

Labor- oder Feldversuche zur Ermittlung geomechanischer Parameter von Trennflächen (Klüfte, Schichtflächen, Schwächezonen) wurden im Zuge der Nachuntersuchung 2013 an wenigen Trennflächen und den Untersuchungen 2018/2019 durchgeführt und sind ebenfalls in die vorliegenden Betrachtungen mit einbezogen. Die Angaben für die Trennflächenparameter beruhen deshalb neben den Laborversuchen auf einer konservativen Schätzung der Parameter unter Einbeziehung andernorts bei vergleichbaren Gebirgsverhältnissen gewonnener Kennwerte.

Feld- oder Laborversuche zur Ermittlung geomechanischer Kennwerte des Gebirgsverbandes wurden nicht durchgeführt. Die Kennwerte des Gebirgsverbandes wurden deshalb auf Grundlage eines halbempirischen Bruchkriteriums nach Hoek and Brown (Hoek & Brown, 1997) sowie nach Mohr – Coulomb abgeschätzt. Für die Abschätzung der Gebirgsdruckfestigkeit nach Hoek & Brown werden drei Eingangswerte benötigt.

- Die einachsige Druckfestigkeit des Gesteins (σ_u)
- Die gesteinsabhängige Konstante m_i
- Der Geological Strength Index GSI

Mit der aus statistischen Auswertung zahlreicher Versuchsergebnisse abgeleiteten empirischen Beziehung:

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_u \{m_b (\sigma'_3 / \sigma_u) + s\}^a$$

mit

$$m_b = m_i \exp \left\{ \frac{GSI-100}{28-14D} \right\}$$

$$s = \exp \frac{GSI-100}{9-3D}$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} (e^{-GSI/15} - e^{-20/3})$$

Für die einachsige Druckfestigkeit des Gesteins wurde jeweils der als charakteristisch für die Gebirgseinheit festgelegte Wert angesetzt.

Für die Konstante m_i werden in **RocLab** für verschiedene Gesteine Bandbreiten angegeben. Als konservativer Schätzwert wurde dabei im vorliegenden Fall für die Kennwertermittlung ein m_i -Wert von 30 angesetzt. Für den Schwächezonengrad D wurde für den Bohrkern D = 0 angesetzt.

Der GSI-Wert beinhaltet eine Bewertung des Grades der Zerlegung des Gebirges durch Trennflächen sowie der Trennflächeneigenschaften. Es wurden für die verschiedenen Gebirgstypen folgende GSI-Werte angesetzt:

Granit G1:	66
Granit G2:	60
Granit G3:	56
Granit G4:	43

Kapitel 9: Baugrundbeurteilung und felsmechanische Charakterisierung

Neben den Parametern des Hoek-Brown-Kriteriums werden auch die Parameter des Mohr – Coulomb – Kriteriums φ' und c' angegeben. Da die Mohr-Coulomb-Parameter spannungsabhängig sind, werden diese für verschiedene Spannungszustände entsprechend einer Gebirgsüberlagerung von 10 m und 100 m angegeben.

Die ermittelten Gebirgskennwerte gelten für ein global betrachtet isotropes Gebirge.

Die Kennwerte für Festgestein, Gebirgsverband und Trennflächen werden für 4 Gebirgstypen getrennt angegeben. Diese wurden nach stratigrafisch-lithologischen Merkmalen und dem Grad der Verwitterung und der Zerlegung gewählt.

Die Kennwerte der Lockergesteine beruhen auf Laboruntersuchungen der Jahre 2010 und 2018/2019. Neben den Laborversuchen beruhen die Lockergesteinskennwerte auf einer konservativen Schätzung der Parameter unter Einbeziehung andernorts bei vergleichbaren Bodenverhältnissen gewonnener Kennwerte.

Die Angaben zu den Querdehnungsziffern wurden im Labor durch Versuche an Kernen ermittelt. Die Messungen ergaben Querdehnungsziffern zwischen 0,24 und 0,29.

Die Angaben zu den Querdehnungsziffern werden derzeit im Labor durch Versuche an Kernen noch überprüft. Messungen mit Durchschallung im Jahre 2019 ergaben Querdehnungsziffern zwischen 0,23 und 0,28.

Des Weiteren werden den beschriebenen Gebirgstypen G1 bis G4 und den Lockergesteinsschichten (Hangschutt, Murgschotter, Auffüllungen) nach EC7 Homogenbereiche (siehe Kapitel 9.2) zugeordnet:

Festgestein

G1 und G2 werden zu Homogenbereich F1 zusammengefasst und für F1 zusammenfassend Kennwerte angegeben.

G3 wird zu Homogenbereich F2

G4 wird zu Homogenbereich F3

Lockergestein

Hangschutt (Granitmaterial) wird zu Homogenbereich Q1

Flussschotter (Murg) wird zu Q2

Auffüllung, Kies, stark sandig wird zu Homogenbereich A2.1

Auffüllung, Kies, stark sandig, Schluff wird zu Homogenbereich A2.2

Auffüllung, Schluff, sandig wird zu Homogenbereich A2.3

Die Lockergesteins-Homogenbereiche Q1 und Q2 bzw. die Auffüllungen A 2.11 bis A 2.3 wurden entsprechend den Bodenansprachen der quartären Lockergesteine und Auffüllungen gewählt.

Die Kennwerte der Lockergesteine sind im Anschluss an die Gebirgstypen aufgelistet.

In den folgenden Kennwertangaben werden zunächst die charakteristischen Kennwerte für die Gebirgstypen G1 bis G4 und die Lockergesteine angegeben. Danach folgen die Kennwertangaben für die Homogenbereiche.

G1 - Granit, frisch bis gering verwittert, w0 bis w1, RQD >75 %, meist 90 % bis 100 %**Gesteinskennwerte**

Einaxiale Druckfestigkeit	σ_u	= 86	MPa
Zugfestigkeit	σ_t	= - 6,10	MPa
Elastizitätsmodul	E_{40-60}	= 39.500	MPa
Dichte	ρ	= 2,58 g/cm ³	
Poisson-Zahl	ν	= 0,25 [-]	

Gebirgskennwerte

Einaxiale Druckfestigkeit	σ_{uG}	= 13	MPa
Zugfestigkeit	σ_{tG}	= - 0,22	MPa
Verformungsmodul	V_G	= 26.000	MPa

Hoek-Brown - Kriterium: $mb = 8,91$ $s = 0,02$ $a = 0,5$

Mohr-Coulomb - Kriterium (10 m):

Kohäsion	c_G	= 1,0	MPa
Reibungswinkel	φ_G	= 71	Grad

Mohr-Coulomb - Kriterium (100 m):

Kohäsion	c_G	= 1,5	MPa
Reibungswinkel	φ_G	= 64	Grad

Trennflächenkennwerte

Klüfte 10 m:

Kohäsion	c_{KI}	= 0,02 MPa (aus Verzahnung)	
Reibungswinkel	φ_{KI}	= 42	Grad
Restreibungswinkel	φ_{res}	= 34	Grad

Klüfte 100 m:

Kohäsion	c_{KI}	= 0,2	MPa (aus Verzahnung)
----------	----------	-------	----------------------

Kapitel 9: Baugrundbeurteilung und felsmechanische Charakterisierung

Reibungswinkel	φ_{KI}	= 40	Grad
Restreibungswinkel	φ_{res}	= 34	Grad

G 2 Granit, gering bis mäßig verwittert, w1 bis w2, RQD >65 %, meist 70 % bis 80 %**Gesteinskennwerte**

Einaxiale Druckfestigkeit	σ_u	= 84	MPa
Zugfestigkeit	σ_t	= - 6,50	MPa
Elastizitätsmodul	E_{40-60}	= 32.000	MPa
Dichte	ρ	= 2,58 g/cm ³	
Poisson-Zahl	ν	= 0,25 [-]	

Gebirgskennwerte

Einaxiale Druckfestigkeit	σ_{uG}	= 9	MPa
Zugfestigkeit	σ_{tG}	= - 0,14	MPa
Verformungsmodul	V_G	= 16.500	MPa

Hoek-Brown - Kriterium: $mb = 7,19$ $s = 0,01$ $a = 0,5$

Mohr-Coulomb - Kriterium (10 m):

Kohäsion	c_G	= 0,7	MPa
Reibungswinkel	φ_G	= 71	Grad

Mohr-Coulomb - Kriterium (100 m):

Kohäsion	c_G	= 1,2	MPa
Reibungswinkel	φ_G	= 63	Grad

Trennflächenkennwerte

Klüfte 10 m:

Kohäsion	c_{KI}	= 0,01 MPa (aus Verzahnung)	
Reibungswinkel	φ_{KI}	= 38	Grad
Restreibungswinkel	φ_{res}	= 34	Grad

Klüfte 100 m:

Kohäsion	c_{KI}	= 0,1	MPa (aus Verzahnung)
----------	----------	-------	----------------------

Kapitel 9: Baugrundbeurteilung und felsmechanische Charakterisierung

Reibungswinkel	φ_{KI}	= 38	Grad
Restreibungswinkel	φ_{res}	= 34	Grad

G 3 Granit, überwiegend mäßig verwittert w2 bis w3, RQD >65 %**Gesteinskennwerte**

Einaxiale Druckfestigkeit	σ_u	= 38	MPa
Zugfestigkeit	σ_t	= - 2,67	MPa
Elastizitätsmodul	E_{40-60}	= 18.000	MPa
Dichte	ρ	= 2,50 g/cm ³	
Poisson-Zahl	ν	= 0,25 [-]	

Gebirgskennwerte

Einaxiale Druckfestigkeit	σ_{uG}	= 3	MPa
Zugfestigkeit	σ_{tG}	= - 0,05	MPa
Verformungsmodul	V_G	= 7.500	MPa

Hoek-Brown - Kriterium: $mb = 6,23$ $s = 0,00753$ $a = 0,5$

Mohr-Coulomb - Kriterium (10 m):

Kohäsion	c_G	= 0,3	MPa
Reibungswinkel	φ_G	= 69	Grad

Mohr-Coulomb - Kriterium (100 m):

Kohäsion	c_G	= 0,75	MPa
Reibungswinkel	φ_G	= 57	Grad

Trennflächenkennwerte

Klüfte 10 m:

Kohäsion	c_{KI}	= 0,01	MPa (aus Verzahnung)
Reibungswinkel	φ_{KI}	= 37	Grad
Restreibungswinkel	φ_{res}	= 27	Grad

Kapitel 9: Baugrundbeurteilung und felsmechanische Charakterisierung

Klüfte 100 m:

Kohäsion	c_{KI}	= 0,05	MPa (aus Verzahnung)
Reibungswinkel	φ_{KI}	= 35	Grad
Restreibungswinkel	φ_{res}	= 27	Grad

G 4 Granit, stark verwittert, z. T. zersetzt (w3 bis w4), RQD <65 %**Gesteinskennwerte**

Einaxiale Druckfestigkeit	σ_u	= 10	MPa
Zugfestigkeit	σ_t	= - 1,0	MPa
Elastizitätsmodul	E_{40-60}	= 4.500	MPa
Dichte	ρ	= 2,23	g/cm ³
Poisson-Zahl	ν	= 0,3	[-]

Gebirgskennwerte

Einaxiale Druckfestigkeit	σ_{uG}	= 0,4	MPa
Zugfestigkeit	σ_{tG}	= - 0,005	MPa
Verformungsmodul	V_G	= 900	MPa

Hoek-Brown - Kriterium: $mb = 3,92$ $s = 0,00178$ $a = 0,51$

Mohr-Coulomb - Kriterium (10 m):

Kohäsion	c_G	= 0,08	MPa
Reibungswinkel	φ_G	= 61	Grad

Mohr-Coulomb - Kriterium (100 m):

Kohäsion	c_G	= 0,34	MPa
Reibungswinkel	φ_G	= 45	Grad

Trennflächenkennwerte

Klüfte 10 m:

Kohäsion	c_{KI}	= 0,005	MPa
Reibungswinkel	φ_{KI}	= 30	Grad

Kapitel 9: Baugrundbeurteilung und felsmechanische Charakterisierung

Restreibungswinkel $\varphi_{res} = 20$ Grad

Klüfte 100 m:

Kohäsion $c_{KI} = 0,05$ MPa

Reibungswinkel $\varphi_{KI} = 27$ Grad

Restreibungswinkel $\varphi_{res} = 20$ Grad

Charakteristische Kennwerte von Lockergesteinen

In Tab. 50 sind die Charakteristischen Kennwerte der im Untersuchungsgebiet angetroffenen Lockergesteine dargestellt.

Tab. 50: Charakteristische Werte der quartären Ablagerungen und Auffüllungen

Schicht	Wichte [kN/m ³]	φ' [°]	c' [kPa]	E_v [MPa]
Hangschutt, aus Granitmaterial, sandig – kiesig, steinig	22,0	38	0 ... 2	40 ... 60
Flussschotter, sandig, kiesig, steinig (Granit)	22,5	40	0	50 ... 100
Auffüllung, Kies, stark sandig	21,0	35	0..2	50...100
Auffüllung, Kies, stark sandig, Schluff	20	32	5..10	30..50
Auffüllung, Schluff, sandig	19,5	27,5	10..20	5...15

Homogenbereiche**Homogenbereich F1 (zusammengesetzt aus G1 und G2)****Gesteinskennwerte**

Einaxiale Druckfestigkeit	σ_u	= 85	MPa
Zugfestigkeit	σ_t	= - 6,5	MPa
Elastizitätsmodul	E_{40-60}	= 35.000	MPa
Dichte	ρ	= 2,58	g/cm ³
Poisson-Zahl	ν	= 0,24	[-]

Gebirgskennwerte

Einaxiale Druckfestigkeit	σ_{uG}	= 11	MPa
Zugfestigkeit	σ_{tG}	= - 0,18	MPa
Verformungsmodul	V_G	= 17.500	MPa
Mantelreibung	$q_{s,k}$	= 1.200	kN/m ²

Hoek-Brown - Kriterium: **mb** = 8,91 **s** = 0,02 **a** = 0,5

Mohr-Coulomb - Kriterium (10 m):

Kohäsion	c_G	= 0,8	MPa
Reibungswinkel	φ_G	= 71	Grad

Mohr-Coulomb - Kriterium (100 m):

Kohäsion	c_G	= 1,3	MPa
Reibungswinkel	φ_G	= 63	Grad

Trennflächenkennwerte

Klüfte 10 m:

Kohäsion	c_{KI}	= 0,02	MPa (aus Verzahnung)
Reibungswinkel	φ_{KI}	= 40	Grad
Restreibungswinkel	φ_{res}	= 34	Grad

Kapitel 9: Baugrundbeurteilung und felsmechanische Charakterisierung

Klüfte 100 m:

Kohäsion	c_{KI}	= 0,1	MPa (aus Verzahnung)
Reibungswinkel	φ_{KI}	= 38	Grad
Restreibungswinkel	φ_{res}	= 34	Grad

Homogenbereich F2 (entspricht G3)**Gesteinskennwerte**

Einaxiale Druckfestigkeit	σ_u	= 38	MPa
Zugfestigkeit	σ_t	= - 2,67	MPa
Elastizitätsmodul	E_{40-60}	= 18.000	MPa
Dichte	ρ	= 2,50 g/cm ³	
Poisson-Zahl	ν	= 0,25 [-]	

Gebirgskennwerte

Einaxiale Druckfestigkeit	σ_{uG}	= 3	MPa
Zugfestigkeit	σ_{tG}	= - 0,05	MPa
Verformungsmodul	V_G	= 7.500	MPa
Mantelreibung	$q_{s,k}$	= 500	kN/m ²

Hoek-Brown - Kriterium: $mb = 6,23$ $s = 0,00753$ $a = 0,5$

Mohr-Coulomb - Kriterium (10 m):

Kohäsion	c_G	= 0,3	MPa
Reibungswinkel	φ_G	= 69	Grad

Mohr-Coulomb - Kriterium (100 m):

Kohäsion	c_G	= 0,75	MPa
Reibungswinkel	φ_G	= 57	Grad

Trennflächenkennwerte

Klüfte 10 m:

Kohäsion	c_{KI}	= 0,01	MPa (aus Verzahnung)
Reibungswinkel	φ_{KI}	= 37	Grad

Kapitel 9: Baugrundbeurteilung und felsmechanische Charakterisierung

Restreibungswinkel	φ_{res}	= 27	Grad
--------------------	-----------------	------	------

Klüfte 100 m:

Kohäsion	c_{KI}	= 0,05	MPa (aus Verzahnung)
----------	----------	--------	----------------------

Reibungswinkel	φ_{KI}	= 35	Grad
----------------	----------------	------	------

Restreibungswinkel	φ_{res}	= 27	Grad
--------------------	-----------------	------	------

Homogenbereich F3 (entspricht G4)**Gesteinskennwerte**

Einaxiale Druckfestigkeit	σ_u	= 10	MPa
---------------------------	------------	------	-----

Zugfestigkeit	σ_t	= - 1,0	MPa
---------------	------------	---------	-----

Elastizitätsmodul	E_{40-60}	= 4.500	MPa
-------------------	-------------	---------	-----

Dichte	ρ	= 2,23	g/cm ³
--------	--------	--------	-------------------

Poisson-Zahl	ν	= 0,3	[-]
--------------	-------	-------	-------

Gebirgskennwerte

Einaxiale Druckfestigkeit	σ_{uG}	= 0,4	MPa
---------------------------	---------------	-------	-----

Zugfestigkeit	σ_{tG}	= - 0,005	MPa
---------------	---------------	-----------	-----

Verformungsmodul	V_G	= 900	MPa
------------------	-------	-------	-----

Mantelreibung	$q_{s,k}$	= 250	kN/m ²
---------------	-----------	-------	-------------------

Hoek-Brown - Kriterium:	$mb = 3,92$	$s = 0,00178$	$a = 0,51$
-------------------------	-------------	---------------	------------

Mohr-Coulomb - Kriterium (10 m):

Kohäsion	c_G	= 0,08	MPa
----------	-------	--------	-----

Reibungswinkel	φ_G	= 61	Grad
----------------	-------------	------	------

Mohr-Coulomb - Kriterium (100 m):

Kohäsion	c_G	= 0,34	MPa
----------	-------	--------	-----

Reibungswinkel	φ_G	= 45	Grad
----------------	-------------	------	------

Kapitel 9: Baugrundbeurteilung und felsmechanische Charakterisierung

Trennflächenkennwerte

Klüfte 10 m:

Kohäsion	c_{KI}	= 0,005	MPa
Reibungswinkel	φ_{KI}	= 30	Grad
Restreibungswinkel	φ_{res}	= 20	Grad

Klüfte 100 m:

Kohäsion	c_{KI}	= 0,05	MPa
Reibungswinkel	φ_{KI}	= 27	Grad
Restreibungswinkel	φ_{res}	= 20	Grad

Homogenbereiche Lockergesteine

Die für die Lockergesteine charakteristischen Kennwerte sind in Tab. 51 zusammengestellt.

Tab. 51: Homogenbereiche der quartären Ablagerungen und Auffüllungen

Homogenbereich	Schicht	Wichte [kN/m ³]	φ' [°]	c' [kPa]	E_v [MPa]	Mantelreibung $q_{s,k}$ [kN/m ²]
Q1	Hangschutt, aus Granitmaterial, sandig – kiesig, steinig	22,0	38	0 ... 2	40 ... 60	40
Q2	Flussschotter, sandig, kiesig, steinig (Granit)	22,5	40	0	50 ... 100	120
A2.1	Auffüllung, Kies, stark sandig	21,0	35	0..2	50...100	60
A2.2	Auffüllung, Kies, stark sandig, Schluff	20	32	5..10	30..50	40
A2.3	Auffüllung, Schluff, sandig	19,5	27,5	10..20	5...15	-

10 Grundwasserverhältnisse in Bezug auf die einzelnen Bauwerke

10.1 Allgemeines

Zur Beurteilung der hydrogeologischen Verhältnisse wurden im Bereich der geplanten Bauwerke bereits in der ersten Erkundungsphase 2011 mehrere Grundwassermessstellen eingerichtet und die Grundwasserstände seit Januar 2011 gemessen (siehe Kapitel 4). In der Erkundungsphase 2018/ 2019 wurden weitere Grundwassermessstellen eingerichtet und seit Anfang 2019 gemessen. Zur Grundwasserbeurteilung wurden alle Messungen seit 2011 herangezogen. Die Grundwassermessungen der Erkundungsphase 2019 beruhen auf Daten, die erst über einen hydrogeologisch kurzen Zeitraum beobachtet wurden. Die Werte lassen daher die Angabe eines Bemessungswasserspiegels nicht zu. Die Angaben zu den Grundwasserhöhen können für die einzelnen Bauwerke nur als Tageswasserspiegel angegeben werden.

Die Grundwasserkörper sind anhand der Tageswasserspiegel in den geotechnischen Längsschnitten (Anlage 2.1.1 bis Anlage 2.1.18) eingezeichnet.

Im Forbach-Granit ist über die gesamte Mächtigkeit des zu durchfahrenden Gebirges mit Kluftwasseranfall zu rechnen, d. h. in allen Untertagebauwerken ist bauzeitlich mit Wasseranfall zu rechnen. Es wird davon ausgegangen, dass die Durchlässigkeiten des Granits in allen Stollen und der Kraftwerkskaverne aufgrund der Überlagerung geringer sind als in den oberflächennahen Aushubbereichen (bis ca. 30 m) der Stollenportale und der Baugrube des Einlauf- bzw. Auslaufbauwerks.

10.2 Bauzeitlicher und permanenter Wasseranfall

Aufgrund der hydraulischen Versuche zur Bestimmung der Durchlässigkeit der einzelnen Gebirgs-einheiten aus den Jahren 2011 und 2019 werden zur Abschätzung des Wasseranfalls in der Bau-phase folgende Durchlässigkeiten angesetzt:

Forbach-Granit, unterhalb 30 m u. GOK außerhalb von Schwächezonen bzw. Bereichen erhöhter Kluftdichten: $2,5 \cdot 10^{-10}$ m/s. Forbach-Granit, unterhalb 30 m u. GOK in Schwächezonen und Bereichen erhöhter Kluftdichten: $5 \cdot 10^{-7}$ m/s bis $3 \cdot 10^{-8}$ m/s. Forbach-Granit, oberflächennah (bis zu 30 m u. GOK): $5 \cdot 10^{-7}$ m/s

Der bauzeitliche Wasseranfall wurde mit der Formel von Herth & Amdts (1994) errechnet. Die Reichweitenabschätzung für die jeweiligen Absenkungen wurden nach Sichardt (1928) vorgenommen. Danach ergaben sich für den Granit bei einer Absenkung von 350 m und einer Durchlässigkeit von $2,5 \cdot 10^{-10}$ m/s eine Reichweite der Absenkung von ca. 10 m bis 20 m .

Für durchlässigere Granitbereiche in Schwächezonen und Bereiche erhöhter Kluftdichten wurden kf-Werte von $5 \cdot 10^{-7}$ m/s bis $3 \cdot 10^{-8}$ m/s angesetzt. Als Mächtigkeit dieser Schwächezonen wurden auf der sicheren Seite liegend dreißig Meter je Schwächezone angenommen. Für die Haupt- und Nebestollen des Kavernenwasserspeichers wurden als Gesamtlänge der Schwächezonen 80 m (Nebestollen I bis IV) bzw. 100 m (Nebestollen V bis VI) angesetzt.

Zur Berechnung der Reichweite der Grundwasserabsenkung und des Wasseranfalls je Bauwerk wurden die Lage und Anzahl der Schwächezonen entsprechend ihrem modellierten Verlauf berücksichtigt.

Die Reichweitenabschätzung nach Sichardt (1928) ergab in den Schwächezonen in Abhängigkeit von der erwarteten maximalen Grundwasserabsenkung Werte bei einem kf-Wert von $3 \cdot 10^{-8}$ m/s zwischen 20 m und 155 m. Für einen kf-Wert von $5 \cdot 10^{-7}$ m/s ergaben sich Reichweiten zwischen 85 m und 630 m (siehe auch Kap. 13.2).

Kapitel 10: Grundwasserverhältnisse in Bezug auf die einzelnen Bauwerke

In den geotechnischen Längsschnitten der Anlage 2.1 sind auf der sicheren Seite liegend die zu erwartenden Wassermengen bei einem $k_f = 2,5 \cdot 10^{-10}$ m/s für den Homogenbereich F1 und $k_f = 5 \cdot 10^{-7}$ m/s bis $3 \cdot 10^{-8}$ m/s für die Homogenbereiche F2 und F3 eingetragen.

Mit den oben beschriebenen Grundwasserhöhen und Gebirgs-Durchlässigkeiten werden nach der Formel von Herth & Amdts folgende Wasseranfallraten für die Bauphase abgeschätzt:

Nebenstollen I bis IV des Kavernenwasserspeichers im Granit: ca. 2 l/s bis 5 l/s je Stollen, für Nebenstollen V und VI inklusive Schutterstollen jeweils ca. 2 l/s bis 7 l/s. Lokal muss mit einem Wasseranfall für die Nebenstollen I bis VI und den Schutterstollen von bis zu 8 l/s gerechnet werden

Hauptstollen des Kavernenwasserspeichers im Granit: ca. 4 l/s bis 14 l/s. Zufahrtsstollen inklusive Schutterstollen im Granit: ca. 2 l/s bis 7 l/s. Energieableitungsstollen (OS bis Station 0+500, siehe Anlage 2.1.6) im Granit: ca. 2 l/s bis 10 l/s. Energieableitungsstollen (US) im Granit: 1 l/s bis 4 l/s, lokal bis 8 l/s, Oberwasserstollen inklusive Schrägschacht und Zugangsstollen des Murgwasserwegs: ca. 1 l/s bis 10 l/s.

Oberwasserstollen inklusive Schrägschacht und Zugangsstollen des Schwarzenbachwasserwegs im Granit: ca. 4 l/s bis 9 l/s max.32 l/s. Unterwasserschacht inklusive Hilfsstollen des Murgwasserwegs im Granit: ca. 1 l/s bis 3 l/s (lokal bis zu 8 l/s). Unterwasserschacht inklusive Hilfsstollen des Schwarzenbachwasserwegs im Granit : ca. 2 l/s bis 9 l/s (lokal bis zu 12 l/s). Kraftwerkskaverne im Granit: 5 l/s bis 20 l/s (lokal bis zu 25 l/s).

Baugrube Ein-/Auslaufbauwerk: bei Ansatz einer Durchlässigkeit von 10^{-6} m/s: ca. 5 l/s.

Baugrube Portalgebäude Zufahrtsstollen: bei Ansatz einer Durchlässigkeit von 10^{-6} m/s: ca. 1 l/s.

In der Summe ergibt sich ein bauzeitlicher Wasseranfall zwischen 34 l/s und 143 l/s im Granit. Werden die Stollen zeitlich verzögert aufgefahren und das Gebirge dadurch vorentwässert, so kann sich der Wasseranfall auf 14 l/s bis 60 l/s verringern (vgl. Kapitel 13.6).

In Vortriebsabschnitten mit Kluftverdichtungszone, d. h. Abschnitte mit erhöhter Durchlässigkeit des Gebirges, kann sich der Wasseranfall in den Vortrieben deutlich erhöhen.

Es wird davon ausgegangen, dass für den Betriebsfall alle Bereiche der Stollenbauwerke mit stärkeren Wasserzutritten abgedichtet werden. Deshalb wird im Betriebsfall der Wasseranfall in den Stollen lediglich aus dem Wasseranfall des normalen Kluftsystems des Granits bestehen.

Da die Stollen des Kavernensystems über das normale Kluftsystem den Gebirgskörper über dem Stollensystem langfristig entwässern werden, wird nach der Grundwasserabsenkung dem Stollensystem nur noch Kluftwasser zulaufen können, das über die Grundwasserneubildungsrate über dem Stollensystem in den Gebirgskörper gelangt.

Bei einer Neubildungsrate von 222 mm/a (siehe Kapitel 6.6) und einem Einzugsgebiet des Stollensystems von 33,5 ha (dies ist der ermittelte Wirkraum für einen k_f -Wert von $3 \cdot 10^{-8}$ m/s entlang der Schwächezone – siehe Kap. 13.2) liegt der langfristige Wasseranfall im Stollensystem, ohne Abdichtung von durchlässigeren Gebirgsbereichen, rechnerisch bei 2,4 l/s.

Aufgrund der relativ kurzen Messzeit können derzeit für langfristige Prognosen, z. B. Höchstwasserstände für die nächsten 100 Jahre (HW 100), keine Bemessungswasserspiegel angegeben werden. Es werden deshalb charakteristische Grundwasserhöhen auf der Grundlage der Messungen zwischen den Jahren 2011 bis 2019 angegeben.

Es wird davon ausgegangen, dass für alle Untertagebauwerke der niedrigste Wasserspiegel dem Betriebswasserspiegel des Rückhaltebeckens des Rudolf-Fettweis-Werkes entspricht und somit auf ca. 295,5 mNN liegt.

Kapitel 10: Grundwasserverhältnisse in Bezug auf die einzelnen Bauwerke

10.3 Charakteristische Grundwasserhöhen für die Bauwerke der Kaverne Forbach

Granit Nebenstollen I bis VI

Top des GW-Körpers: max. 500 mNN (im Bereich maximaler Gebirgsüberdeckung des Stollensystems)

Granit Kraftwerkskaverne

Top des GW-Körpers: max. 567 mNN

Granit Hauptstollen Kavernenwasserspeicher

Top des GW-Körpers: max. 515 mNN (im Bereich maximaler Gebirgsüberdeckung)

Granit Energieableitungstollen US/OS (bis Stat. 0+400 m)

Top des GW-Körpers: max. 450 mNN (im Bereich maximaler Gebirgsüberdeckung)

Granit Energieableitungstollen US

Top des GW-Körpers: max. 545 mNN (im Bereich maximaler Gebirgsüberdeckung)

Granit Oberwasserstollen Murg

Top des GW-Körpers: max. 515 mNN (im Bereich maximaler Gebirgsüberdeckung)

Granit Oberwasserstollen Schwarzenbach

Top des GW-Körpers: max. 645 mNN (im Bereich maximaler Gebirgsüberdeckung)

Granit Unterwasserstollen Murg

Top des GW-Körpers: max. 535 mNN (im Bereich maximaler Gebirgsüberdeckung)

Granit Unterwasserstollen Schwarzenbach

Top des GW-Körpers: max. 565 mNN (im Bereich maximaler Gebirgsüberdeckung)

Einlauf-/Auslaufbauwerk

Top des GW-Körpers: ca. 301,5 mNN (Stauziel Betriebswasserspiegel)

Granit Zufahrtsstollen

Top des GW-Körpers: ca. 510 mNN

Für die in Tab.1 unter sonstige Bauwerke aufgeführten Stollen, kann davon ausgegangen werden, dass durch den Bau der Hauptbauwerke das Gebirge bereits eine zumindest teilweise Entwässerung erfuhr. Dementsprechend kann die Grundwasserüberdeckung in der Bauphase für diese Bauwerke nicht prognostiziert werden.

Statistisch abgesicherte Bemessungswasserstände können erst nach mehrjährigen kontinuierlichen Grundwasserspiegelmessungen ermittelt werden.

11 Bautechnische Empfehlungen

11.0 Allgemein

Im Folgenden werden aus den zur Erkundung des Baugrundes durchgeführten Aufschlüsse und Versuche ermittelten Ergebnisse und abgeleiteten Schlussfolgerungen zu Bautechnische Empfehlungen für die einzelnen Teilbauwerke des Neubaus der Unterstufe PSW Forbach beschrieben.

Die nachfolgend beschriebenen und dargestellten Gefügedaten mit deren Raumlage und Häufigkeitsverteilung beruhen überwiegend auf den durchgeführten Scannerbefahrungen der Bohrlöcher. In den ermittelten Raumdaten lotrecht abgeteufter Bohrungen sind, wie bereits im Kapitel 5.3 beschreiben, steilstehende Klüfte gegenüber Trennflächen mit flacherem Einfallen unterrepräsentiert. Aus den Auswertungen der Gefügedaten der durchgeführten Kartierungen und Schrägbohrungen ergibt sich bei der Ermittlung der Häufigkeitsverteilung ein insgesamt etwas steileres Einfallen der Trennflächen. Dieser Sachverhalt sollte bei den weiteren Betrachtungen und Planungen berücksichtigt werden. In den nachfolgenden Kapiteln wird jedoch ausschließlich mit den tatsächlich aus den jeweiligen Erkundungen ermittelten Raumdaten und Häufigkeiten gearbeitet.

Weiterhin wird hier ergänzend zu den Aussagen im Kapitel 5.2 nochmals darauf hingewiesen, dass die in den Erkundungen festgestellten Vergrusungszonen sehr unregelmäßig und in kleinräumigen Wechsel, bzw. geringmächtigen Übergangszonen zu dem intakten und hydrothermal nicht überprägten Gebirge festgestellt wurden. Die durch das Strömen von heißen Wässern induzierte hydrothermale Alteration ist überwiegend an Inhomogenitäten im Gebirge (Klüfte, Schwächezonen, etc.) gebunden, in ihrer Raumlage und Ausbildung/Intensität jedoch sehr stark wechselnd. Aussagen bzgl. der tatsächlichen Erstreckung und Mächtigkeit dieser Vergrusungszonen im weiteren Umfeld der Erkundungen sind mit entsprechend hohen Unsicherheiten versehen. Erschienen einzelne Vergrusungszonen bzgl. ihrer Ausbildung und Trennflächenorientierungen über mehrere Aufschlüsse hinweg als vergleichbar, so wurden sie als großräumiger auftretende Schwächezonen interpretiert. Es soll hier nochmals darauf hingewiesen werden, dass die Existenz dieser einzelnen Schwächezonen zwar anhand der durchgeführten Erkundungen nachgewiesen wurden, deren genaue Lage, Verlauf und Ausbildung durch das Gebirge jedoch nicht. Entsprechend stellen die dargestellten Schwächezonen lediglich eine aus den vorliegenden Ergebnissen abgeleitete Interpretation und keine tatsächlich im Bauwerksbereich nachgewiesenen Schwächezonen dar.

11.1 Kraftwerkskaverne

11.1.1 Bauwerksdaten

Die maßgebenden Bauwerksdaten zu dem Kavernenteil Schwarzenbachwerk und dem Kavernenteil Transformatoren beider Kraftwerke entsprechend dem aktuellen Planungsstand sind in Tab. 52 zusammengestellt.

Kapitel 11: Bautechnische Empfehlungen

Tab. 52: Bauwerksdaten Kavernenteil Schwarzenbachwerk und Kavernenteil Transformatoren

Niveau Kavernenfirste (Kavernenteil Schwarzenbachwerk)	289,00 mNN
Niveau Kavernensohle (Kavernenteil Schwarzenbachwerk)	251,20 mNN / 256,10 mNN
Niveau Kavernenfirste (Kavernenteil Transformatoren)	289,00 mNN
Niveau Kavernensohle (Kavernenteil Transformatoren)	271,10 mNN
Niveau Laufradmitte / Achse Druckstollen	260,00 mNN
Länge / Breite Kavernenteil Schwarzenbachwerk	41,30 m / 18,90 m
Länge / Breite Kavernenteil Transformatoren	47,35 m / 18,90 m
Länge / Breite Kavernenteil Murgwerk	34,00 m / 10,20 m
Niveau Kavernenfirste (Kavernenteil Murgwerk)	286,50 mNN
Niveau Kavernensohle (Kavernenteil Murgwerk)	271,90 mNN
Niveau Sohle Zufahrtsstollen	271,90 mNN
Gebirgsüberdeckung über der Kavernenfirste	ca. 310 m
Streichrichtung der Kavernenachse	45° NE

Die Lage und Orientierung des Kavernenteils Schwarzenbachwerk und Kavernenteil Transformatoren sind im Lageplan der Anlage 1.1 dargestellt. Die Kavernenachse ist SW-NE gerichtet. Im Südwestabschnitt und tiefsten Teil der Kaverne wird die Pump-Turbine des Schwarzenbachwerks untergebracht, im Nordostabschnitt werden 3 Maschinen des Murgwerks installiert. Zwischen den beiden Kraftwerken werden Transformatoren und elektrotechnische Anlagen installiert. Der Zufahrtsstollen verbindet alle Bereiche der Kaverne mit dem Eingangsbauwerk im Murgtal und mit dem Energieableitungsstollen. Im südwestlichen Bereich der Kaverne wird eine Kranbahn im Kavernendach installiert. Das Kavernenteil des Murgwerks erhält eine eigene Kranbahn (siehe Abb. 33 und Abb. 34).

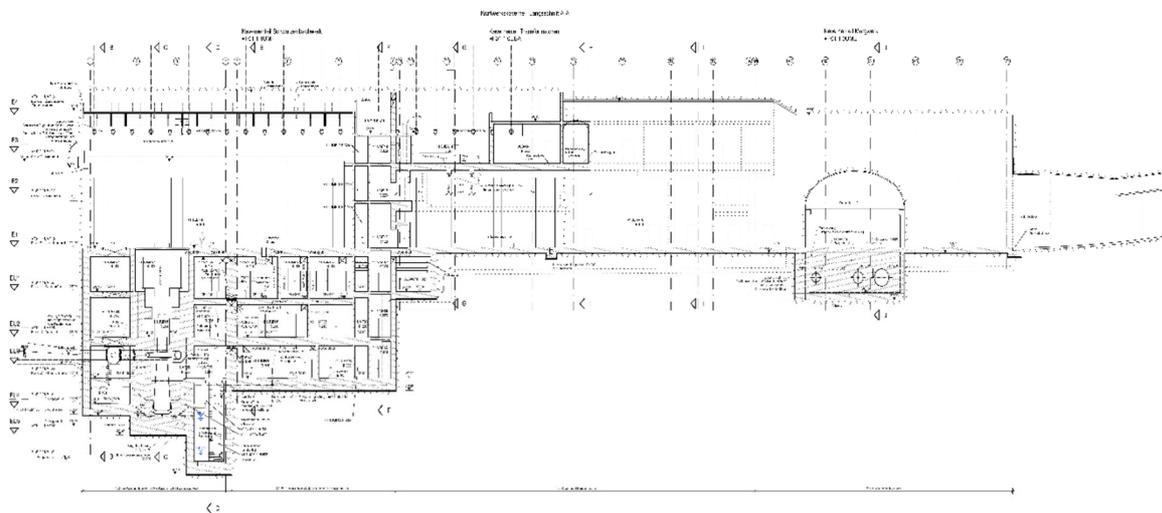


Abb. 33: Kavernenteil Schwarzenbachwerk und Kavernenteil Transformatoren - Längsschnitt

Kapitel 11: Bautechnische Empfehlungen

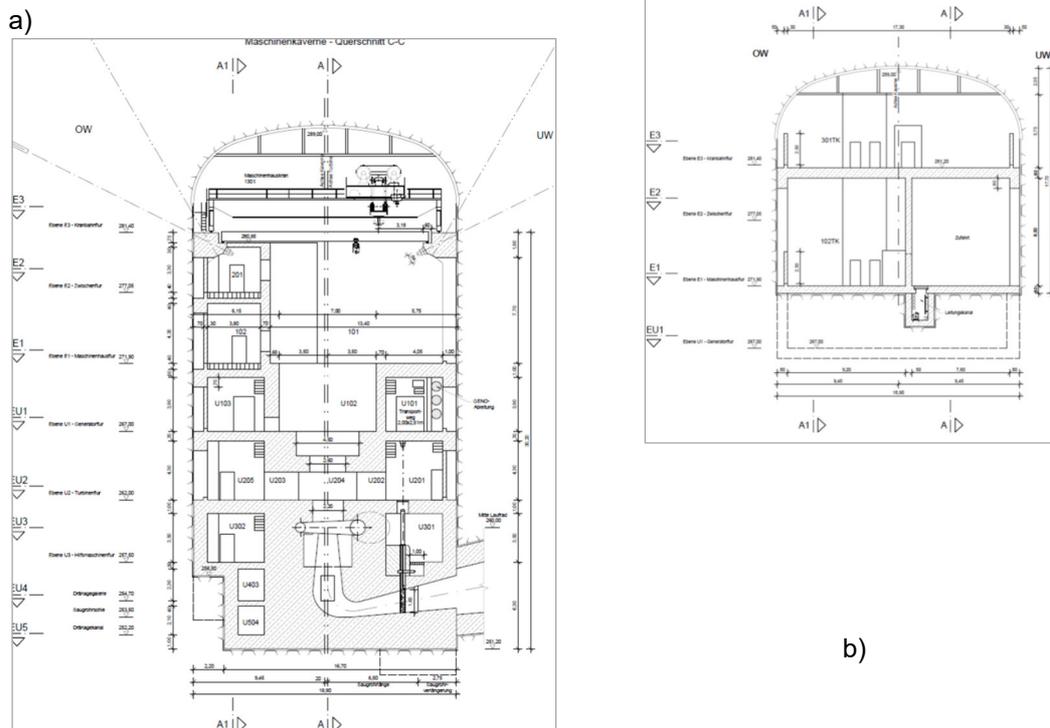


Abb. 34: Kavernenteil Schwarzenbachwerk und Kavernenteil Transformatoren - Charakteristische Querschnitte

11.1.2 Geologische und hydrogeologische Situation

Aufgrund der vorliegenden Aufschlussresultate der Bohrungen KS BK 4 und KS BK 103S wird das Kavernenteil Schwarzenbachwerk und das Kavernenteil Transformatoren vollständig im Forbach-Granit zu liegen kommen.

Eine Beschreibung der allgemeinen geologischen und hydrogeologischen Situation ist in den Kapiteln 5 und 6 enthalten. Die felsmechanische Charakterisierung der beim Bau der Kaverne aufzufahrenden Gesteine ist im Kapitel 9 und eine bauwerksbezogene Beschreibung der Grundwasserhältnisse im Kapitel 10 zu finden. Ein geologisch/hydrologischer Längsschnitt der Kraftwerkskaverne mit tunnelbautechnischen Bewertungsband befindet sich in der Anlage 2.1.1.

Demnach ist zu erwarten, dass der im Bereich der Kraftwerkskaverne anstehende Forbach-Granit überwiegend frisch bis angewittert (Homogenbereich F1) vorliegt. Abschnittsweise ist jedoch auch mit stärker tektonisch beanspruchten und durch hydrothermale Alteration zusätzlich vergrustem Gebirge zu rechnen; welches einen geringeren Trennflächenabstand und einen höheren Verwitterungsgrad und deutlich geringere Gebirgsfestigkeit aufweist als frischer Granit und mit einer Einstufung in die Homogenbereiche F2 und F3 einhergeht. Konnten diese Vergrusungszonen bzgl. ihrer Ausbildung und Trennflächenorientierungen über mehrere Aufschlüsse hinweg nachverfolgt werden, wurden sie als großräumiger auftretende Schwächezonbereiche interpretiert. Die Existenz dieser Schwächezonbereiche konnte anhand der durchgeführten Erkundungen nachgewiesen werden, deren genaue Lage, Verlauf und Ausbildung durch das Gebirge jedoch nicht. Entsprechend stellen die in der Anlage 2.1.1 dargestellten Schwächezonbereiche lediglich eine aus den vorliegenden Ergebnissen abgeleitete Interpretation und keine tatsächlich im Kavernenbereich nachgewiesenen Schwächezon dar.

Kapitel 11: Bautechnische Empfehlungen

Die Erkundungsbohrungen KS BK 4 und KS BK 103S, welche in direkter Nähe, bzw. innerhalb der geplanten Kraftwerkskaverne niedergebracht wurden, schlossen mehrere Vergrusungszonen auf, die durchschnittlich Mächtigkeiten im Dezimeter- bis Meterbereich haben, jedoch vereinzelt auch Mächtigkeiten von 2 m bis 4 m auftreten können. Der Anteil an vergrustem Gebirge liegt nach den Erkundungen bei 4 % bis 12 %. Lokale Über-, bzw. Unterschreitungen dieser Anteile an Homogenbereich F2 und F3 können nicht ausgeschlossen werden.

Auch großräumiger auftretenden Strukturen konnten im Bereich der Kraftwerkskaverne ermittelt werden. So liegen in dem relevanten Gebirgsabschnitt vermutlich drei der Hauptkluftrichtung HKR 1 zuzuordnenden Schwächezonengebiete (S-B1-B4, S-B1-B4-B103, S-B1-B2-B4-B103). Die Schwächezonengebiete konnten in den Aufschlüssen mit Mächtigkeiten zwischen 1 und 11 Metern erkundet werden, von denen der überwiegende Teil jedoch dem Homogenbereich F2 zuzuordnen ist. Zusammenhängende Mächtigkeiten des Homogenbereiches F3 lagen zwischen 0,6 m und 1,5 m. Auch hier sind Überschreitungen dieser aus den Aufschlußergebnissen abgeleiteten Mächtigkeiten nicht auszuschließen.

Im Forbach-Granit sind Aplit-Gänge vorhanden, die überwiegend an der rheinischen Hauptkluftrichtung (HKR 6, auch HKR 4) orientiert sind und steil in östliche Richtung einfallen. Größere Aplit-Gänge sind in der geologischen Karte dokumentiert. Dezimeter- bis meterbreite Aplit-Gänge wurden auch in den Erkundungsbohrungen aufgeschlossen. Aufgrund der vorliegenden Aufschlussergebnisse stellen die Aplit-Gänge bzw. die Kontaktflächen zum Granit keine geomechanisch relevanten Diskontinuitäten dar.

Der mittlere Bergwasserandrang wird als gering eingestuft.

Es ist jedoch nicht ausgeschlossen, dass einzelne vergruste oder tektonisch gestörte Gebirgsbereiche durchlässiger sind. In diesem Fall kann der Wasseranfall im Bereich der Kaverne kurzzeitig bis zu 25 l/s erreichen.

11.1.3 Gebirgsspannungen

Die Ergebnisse der im Zuge des Erkundungsprogramms 2010/2011 durchgeführten Primärspannungsmessungen sind in Kapitel 5.4 beschrieben, grafisch dargestellt und bewertet.

Das Kavernenteil Schwarzenbachwerk und das Kavernenteil Transformatoren wird nach derzeitiger Planung in Gebirgsbereichen mit Überlagerungsmächtigkeiten zwischen ca. 310 m und ca. 250 m zu liegen kommen. Aus technischen Gründen war es nicht möglich, die Primärspannungen in Teufen >150 m zu messen. Zur Abschätzung der Primärspannungen in Tiefen >150 m erscheint es aus Gutachtersicht vertretbar, die Ergebnisse der Primärspannungsmessungen zu extrapolieren. Das Ergebnis ist in der Abb. 35 dargestellt.

Kapitel 11: Bautechnische Empfehlungen

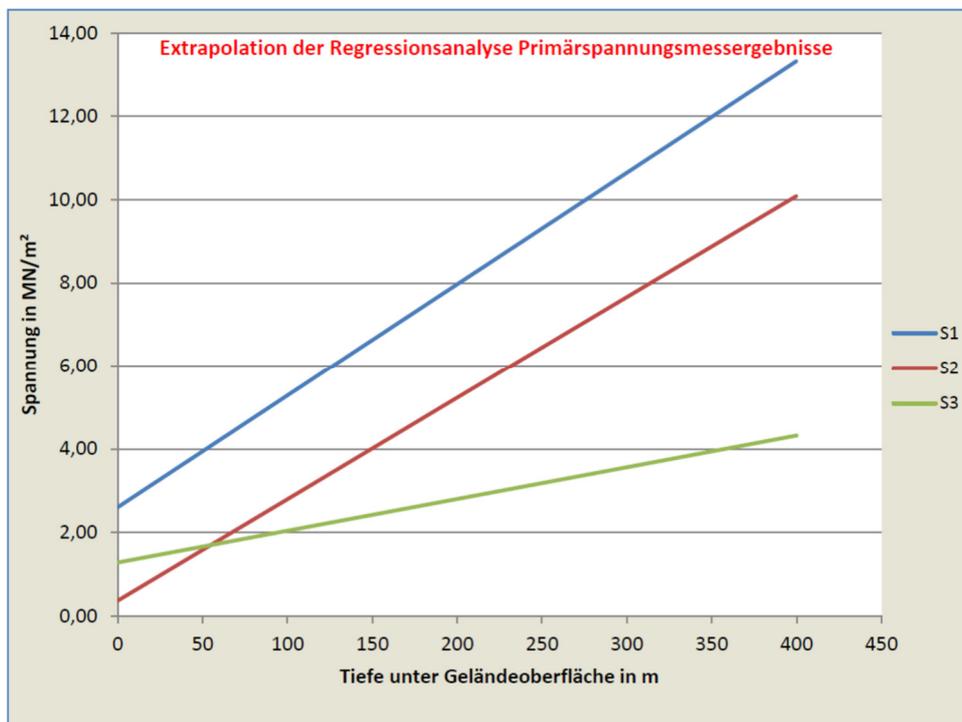


Abb. 35: Extrapolation der Primärspannungsmessergebnisse für den Teufenbereich des Kavernenteil Schwarzenbachwerk und Kavernenteil Transformatoren

Demzufolge ist für gebirgsmechanische Berechnungen davon auszugehen, dass die größte Hauptspannung S1 in etwa horizontal und senkrecht zur Achse des Kavernenteil Schwarzenbachwerk und Kavernenteil Transformatoren orientiert ist, die mittlere Hauptspannung S2 in etwa vertikal und die kleinste Hauptspannung S3 in etwa horizontal und parallel zur Kavernenachse.

Die Teufenabhängigkeit der Primärspannungen kann näherungsweise durch die linearen Beziehungen

$$S1 = 2,6051 + 0,0268 * z \quad \text{MN/m}^2$$

$$S2 = 0,3677 + 0,0243 * z \quad \text{MN/m}^2$$

$$S3 = 1,2821 + 0,0076 * z \quad \text{MN/m}^2 \quad (\text{mit } z = \text{Tiefe unter Gelände})$$

beschrieben werden.

11.1.4 Bauverfahren / Vortriebsverfahren

Das Kavernenteil Schwarzenbachwerk und das Kavernenteil Transformatoren sind vertikal in mehrere Stockwerke bzw. Flurebenen unterteilt, wobei der Maschinenhausflur eine Zentrale Ebene darstellt, auf der der Zufahrtsstollen in den Kavernenteil Schwarzenbachwerk einmündet und eine höhengleiche Verbindung zum Kavernenteil Transformatoren und zum Kavernenteil Murgwerk besteht.

Aufgrund der Größe und der geometrischen Form des Kavernenteils Schwarzenbachwerk und des Kavernenteils Transformatoren, des Zufahrtsstollens und der zahlreichen Wasserstollen und Hilfssstollen, sowie aufgrund der Gebirgsbeschaffenheit muss der Ausbruch und die Profilierung der Hohlräume konventionell mittels Sprengvortrieb erfolgen. Für die bauzeitliche Sicherung kommen üblicherweise Spritzbeton und Felsnägel zur Anwendung. Örtlich und fallweise können Sondermaßnahmen (z. B. Vorspannanker) zur temporären Sicherung des Felshohlraumes und zur temporären

Kapitel 11: Bautechnische Empfehlungen

und permanenten Lastabtragung der Kranlasten im Gebirge erforderlich werden. Für den Baubetrieb wird ein (ggf. auch mehrere) Zugangsstollen benötigt, der einen ausreichend großen Querschnitt für begegnenden Baustellenverkehr (Schuttern, Materialanlieferung, Personenverkehr u. a.) aufweist und die Lutten der Ortsbrustbewetterung der Sprengvortriebe aufnehmen kann.

11.1.5 Aushubarbeiten / Vortriebsklassen / Felssicherung

Der Felsausbruch für die Erstellung der Felskaverne beginnt zweckmäßigerweise nach dem Auffahren des Zufahrtsstollens im Bereich der Kavernenfirste, z. B. mit einem zentralen Firststollen, der anschließend seitlich bis zur vollen Breite der Kavernenkalotte aufgeweitet wird. In Abhängigkeit von den felsmechanischen Eigenschaften des umgebenden Gebirges sind temporäre Sicherungsmaßnahmen (wie z. B. Spritzbeton und Felsnägel) unmittelbar nach dem Lösen des Felses vorzusehen. Die Länge, Stärke und Orientierung der Felsnägel sowie die Stärke des Spritzbetons sind entsprechend den statischen Erfordernissen auf der Grundlage einer nach jedem Abschlag durchzuführenden geologisch-geotechnischen Ortsbrustkartierung festzulegen. Hierzu werden im Rahmen der Ausschreibung Vortriebsklassen bzw. Sicherungsklassen definiert, für die der spezifische Sicherungsaufwand und die Abschlagslängen festgelegt werden.

Nachdem die Kavernenfirste hergestellt und gesichert ist, kann die nächste Aushubebene durch das Herstellen von temporären Bermen ausgehoben und der an der Außenkontur der Kaverne freigelegte Fels entsprechend den geologisch-geotechnischen Verhältnissen gesichert werden.

Sofern zu diesem Zeitpunkt das Profil für den Unterwasserstollen des Schwarzenbachwerks an der Kavernensole bereits durchgängig bis zum Hauptstollen des Kavernenwasserspeicher ausgebrochen ist und von dort eine Verbindung nach obertage zur Verfügung steht, kann das Schuttermaterial des Kavernenausbruchs über diese Verbindung abtransportiert werden. Zur Übergabe des Schuttermaterials der Teilvortriebe der Kaverne würde dann lediglich noch ein Schutterschacht benötigt, der z. B. als Blindschacht an der Stirnwand des Kavernenteils Schwarzenbachwerk ausgebrochen wird.

Aufgrund des Trennflächengefüges ist beim Sprengvortrieb gefügebeeinflusster Mehrausbruch zu erwarten. Insbesondere in Schwäche- und Zerrüttungszonen sowie im Bereich der Vergrünungszonen können sich durch engständige Klüftung Klüftkörper bilden, die bevorzugt im Kalottenbereich in den (noch) ungesicherten Abschlag hineinfallen oder -gleiten und zu Mehrausbruch führen können.

Eine Abschätzung der möglichen und bevorzugt zu erwartenden Gleitkeile und potenziellen Ablöseflächen beim Vortrieb ist durch eine Gefügeanalyse mit Hilfe der Lagenkugel möglich (siehe Abb. 36).

Kapitel 11: Bautechnische Empfehlungen

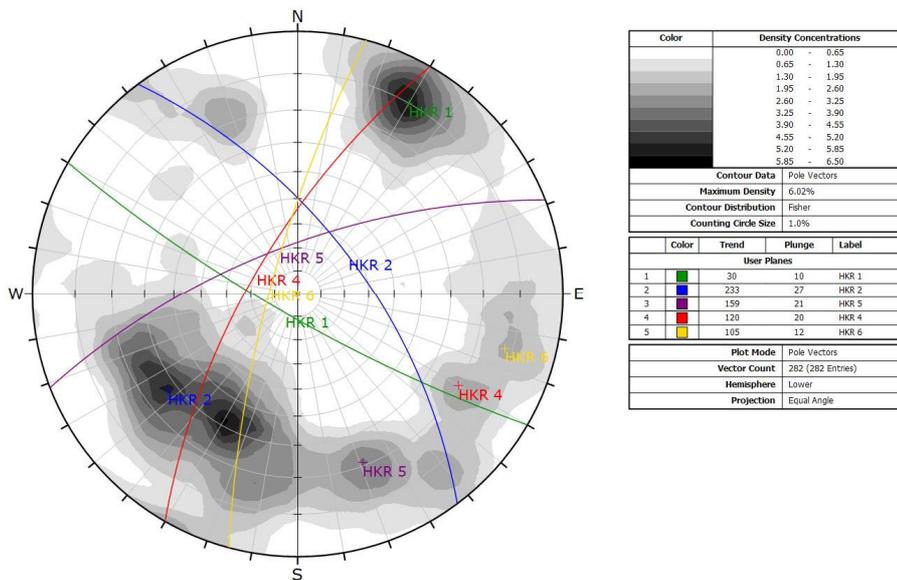


Abb. 36: Maßgebendes Trennflächengefüge für das Kavernenteil Schwarzenbachwerk und Kavernenteil Transformatoren

Wenn man davon ausgeht, dass das Gefügediagramm der Abb. 36 repräsentativ für das Granitgebirge im Bereich des Kavernenteil Schwarzenbachwerk und des Kavernenteils Transformatoren ist, wird deutlich, dass als relevante Hauptkluftrichtungen die HKR 1, HKR 4 und HKR 5 anzusehen ist. In den Erkundungen wenig häufig traten die Hauptkluftrichtungen HKR 2 und HKR 6 in Erscheinung. Eine tabellarische Darstellung der Orientierung der relevanten Hauptkluftrichtungen ist der Tab. 53 zu entnehmen. Die Auflistungsreihenfolge in der Tabelle ist auf der aus den Bohrergebnissen angetroffenen Häufigkeit/Anzahl der Hauptkluftrichtungen abgeleitet.

Tab. 53: Relevante Hauptkluftrichtungen mit Einfallsrichtung und -winkel (Clar) Kaverne

Hauptkluftrichtung	Einfallsrichtung/-winkel nach Clar (max. Häufigkeit)	Relative Maxima Einfallrichtung [konjugierte Lagerung]	Relative Maxima Einfallswinkel [konjugierte Lagerung]
1	210 / 80	200 – 225 [10 – 40]	70 – 90 [50 – 70]
4	300 / 70	290 – 315 [150 – 170]	65 – 80 [65 – 80]
5	339 / 69	320 – 350	60 - 80
2	53 / 63	40 - 75	55 - 75
6	285 / 78	265 – 295	70 - 85
3	Anzahl Klüfte zu gering zur Ausbildung relativer Maxima		

Kapitel 11: Bautechnische Empfehlungen

Zu beachten ist, dass die im Granit vergleichsweise häufig festgestellten Aplit-Gänge eine Raumstellung entsprechend der Gefügefläche HKR 6 auch HKR 4 (siehe Kapitel 5.3.2) aufweisen. Dezimeter- bis meterbreite Aplit-Gänge wurden auch in den Erkundungsbohrungen aufgeschlossen. Aufgrund der vorliegenden Aufschlussresultate stellen die Aplit-Gänge bzw. die Kontaktflächen zum Granit keine geomechanisch relevanten Diskontinuitäten dar.

Um rechtzeitig ungünstige felsmechanische Konfigurationen (z. B. Vergrusungszonen und/oder standsicherheitsgefährdende Trennflächen) zu erkennen und geeignete Maßnahmen ergreifen zu können, ist eine ständige und sorgfältige felsmechanische Kartierung aller Vortriebe und die zeitnahe Erstellung/Aktualisierung der Gebirgsmodelle erforderlich.

Die Sicherung der Kavernenwände muss Berme für Berme auf der Grundlage der felsmechanischen Kartierung festgelegt und sofort ausgeführt werden. Die Sicherung großer Felskeile mit vorgespannten Ankern muss mit deutlichem Zeitvorlauf vor dem Ausbruch des Keilfußes an der Kavernenwand erfolgen.

11.1.6 Bauzeitliche Entwässerung

Das im Zuge des Kavernenaushubs zutretende Bergwasser ist zu fassen und über eine entsprechend dem Vortriebsstand nachgeführte Bauwasserhaltung (zweckmäßigerweise als Sohlkanal im Tiefpunkt des Ausbruchsquerschnitts angeordnet) zu einem bauzeitlichen Auffangbehälter im Tiefpunkt des Vortriebsbereichs abzuleiten. Von dort kann das Wasser in einer Druckleitung aus dem Vortriebsbereich herausgepumpt, in einer Aufbereitungsanlage entsprechend den Auflagen der Behörden aufbereitet und in den behördlich genehmigten Vorfluter eingeleitet werden.

Die geohydraulische Situation im Kavernenbereich wird gemäß aktuellem Kenntnisstand so eingeschätzt, dass beim Ausbruch der Kaverne nur geringe Wassermengen (im Mittel ≤ 15 l/s) anfallen werden, wobei die drainierende Wirkung zum Zeitpunkt des Ausbruchs bereits vorhandener Zugangsstollen nicht berücksichtigt ist.

Sofern beim Vortrieb stark wasserführende Großklüfte, Schwächezonen- und Zerrüttungszonen angeschnitten werden, sind die Wasserzutritte durch Abschlauungen u. ä. gezielt zu fassen, um baubetriebliche Erschwernisse durch Wasser zu vermeiden und die erforderlichen gebirgsmechanischen Sicherungsmaßnahmen zu erleichtern. Sofern ergiebige Wasserzutritte nicht nach kurzer Zeit versiegen, wird empfohlen, die Zuläufe mittels Injektionsbohrungen zu reduzieren. Die Injektionsbohrungen, Injektionsmengen und Veränderungen der Schüttungen sind zu dokumentieren. Auf der Grundlage dieser Daten ist dann zeitnah ein gesamtheitliches Konzept für die Behandlung der wasserführenden Klüfte und Klüftzonen im Hinblick auf den Betrieb der Krafthauskaverne zu erstellen.

11.1.7 Ausbau der Kavernen

Das Maschinenhaus, die Trafostation und alle für den Betrieb der Krafthausanlage erforderlichen Ausrüstungen werden in einem Stahlbetonbauwerk untergebracht. Das Bauwerk erhält eine zentrale, über die gesamte Kavernenlänge durchgängige Flurebene (Maschinenhausflur) und 2 weitere Flure oberhalb sowie bis zu 6 Flure darunter, die durch Innenwände unterteilt werden. Unterhalb des Turbinenflurs (2. Flurebene unterhalb des Maschinenhausflurs) werden die Außenwände des Bauwerks gegen die (in der Regel mit Spritzbeton gesicherte) Ausbruchsleibung der Kaverne betoniert. Durch den Innenausbau der Kaverne entsteht somit im unteren Teil eine kraftschlüssige massive Aussteifung der im Bauzustand offenen Kavernenform. Das Dach des Kavernenteils Schwar-

Kapitel 11: Bautechnische Empfehlungen

zenbachwerk und das Dach des Kavernenteils Transformatoren sollen nicht mit einem Stahlbetongewölbe ausgekleidet werden. Auch zwischen dem Niveau Kranbahnflur und Niveau Turbinenflur ist die Kaverne nicht vollflächig mit einer Stahlbetonaußenwand ausgekleidet. Dem zufolge muss sichergestellt werden, dass im ausgebauten Zustand der Kaverne zuströmendes Bergwasser durch Drainagen gefasst, in einem Pumpensumpf gesammelt und aus dem Kavernenbereich abgepumpt wird.

Die permanente Sicherung des Felsgewölbes in der Firste und der Felswände zwischen dem Kranbahnflur und dem Turbinenflur muss durch eine Systemankerung in Verbindung mit einer Spritzbetonaußenschale erzeugt werden. Ggf. werden zusätzlich Vorspannanker zur Felssicherung und oder zur Rückverhängung der bauzeitlich und für den Betrieb erforderlichen Kranbahn unter dem Kavernendach benötigt.

11.1.8 Bemessungswasserspiegel

Das Kavernenteil Schwarzenbachwerk und das Kavernenteil Transformatoren hat im mittleren und oberen Querschnittsbereich keine geschlossene Außenschale und wirkt dementsprechend als Gebirgsdrainage. Der untere Teil des Kavernenteils Schwarzenbachwerk erhält eine massive Innenschale aus Stahlbeton, die Gebirgswasserdruck aufnehmen kann. Als Bemessungswasserspiegel für die Innenschale des Kavernenteils Schwarzenbachwerk wird das Niveau des Turbinenflurs (262,00 mNN) angenommen, da entsprechend dem Ausbaukonzept für das Kavernenteil Schwarzenbachwerk und das Kavernenteil Transformatoren oberhalb dieses Niveaus eine permanente Gebirgsdrainierung erforderlich ist.

11.2 Nebenstollen I bis VI des Kavernenspeichers

11.2.1 Bauwerksdaten

Die maßgebenden Bauwerksdaten zu den Nebenstollen des Kavernenspeichers entsprechend dem aktuellem Planungsstand sind in Tab. 54 zusammengestellt.

Tab. 54: Bauwerksdaten Nebenstollen Kavernenspeicher

Anzahl der Nebenstollen	4
Achsabstand	36 m
Stollenlänge Stollen I bis IV	ca. 345 m
Stauziel	301,60 mNN
Absenkziel	295,50 mNN
Stollenfirste	ca. 302,70 mNN
Stollensohle (Totraumgraben)	variabel : > 293,02 mNN
Lichte Weite	15,90 m
Lichte Höhe	7,95 m + Tiefe Totraumgraben (max. 2,5 m)
Minimale / maximale Gebirgsüberdeckung	ca. 196 m / ca. 230 m

Die Nebenstollen des Kavernenwasserspeichers erzeugen den größten Teil des Speichervolumens des Kavernenwasserspeichers (Nebenstollen I bis VI insges. 200.000 m³). Sie zweigen vom Hauptstollen Kavernenwasserspeicher, dessen Achse ca. 45° gegen Nord (über Ost) streicht, fächerförmig ab. Die Achsabstände in Bezug auf die Hauptstollenachse betragen einheitlich 48,71 m. Die Nebenstollen I bis IV verlaufen nördlich des Hauptstollens Kavernenwasserspeicher parallel

Kapitel 11: Bautechnische Empfehlungen

zueinander etwa in Nord-Süd-Richtung (ca. 355° gegen Nord über Ost) mit einem Achsabstand von 36 m. (Pfeilerbreite zwischen zwei Nebentollen ca. 20 m).

Die jeweils parallel zu einander liegenden Nebentollen werden am hinteren Ende durch Querstollen (Spülstollen) miteinander verbunden. Die Spülstollen sind jeweils ca. 20 m lang, ca. 3,4 m breit und ca. 4,7 m hoch. Die Nebentollen besitzen einen asymmetrischen und entlang des Stollens variablen Querschnitt, welcher im oberen Teil quasisymmetrisch als liegende "Halbellipse" ausgebildet ist, durch die das operative Speichervolumen bestimmt wird und welcher im unteren, asymmetrisch und variabel ausgebildeten Teil als Fließgerinne (Totraumgraben) bei der Speicherentleerung und als Fahrweg für Radfahrzeuge dient (siehe Abb. 37). Die Sohlen der Totraumgräben der Nebentollen haben ein Längsgefälle von ca. 0,7 % bzw. ca. 1,0 % in Richtung des Hauptstollens Kavernenwasserspeicher.

Die Überlagerung über der Firste der Nebentollen variiert zwischen ca. 196 m und ca. 230 m.

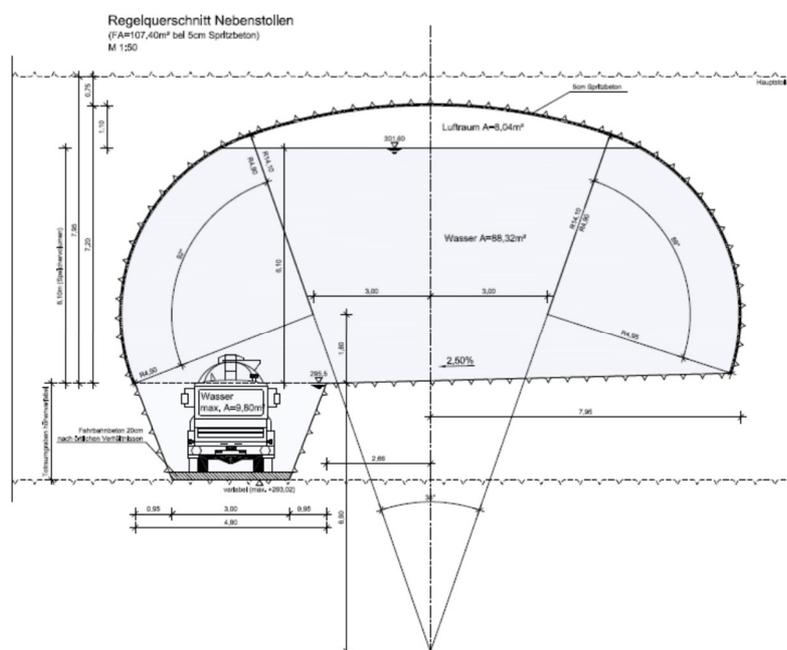


Abb. 37: Kavernenwasserspeicher - Regelquerschnitt Nebentollen

11.2.2 Geologische und hydrogeologische Situation

Die für die Bewertung der geologischen und hydrogeologischen Verhältnisse im Bereich des Stollenfeldes herangezogenen Aufschlussbohrungen KS BK 104PM und KS BK 109 sind in der Anlage 3 dokumentiert.

Eine Beschreibung der allgemeinen geologischen und hydrogeologischen Situation ist in den Kapiteln 5 und 6 enthalten. Die felsmechanische Charakterisierung der beim Bau der Nebentollen aufzufahrenden Gesteine ist im Kapitel 9 und eine bauwerksbezogene Beschreibung der Grundwasserhältnisse im Kapitel 10 zu finden. Ein geologisch/hydrologischer Längsschnitt durch das Feld der Speicherkavernen mit tunnelbautechnischen Bewertungsband befindet sich in der Anlage 2.1.2.

Kapitel 11: Bautechnische Empfehlungen

Dem entsprechend ist davon auszugehen, dass die Nebenstollen des geplanten Kavernenwasserspeichers überwiegend im frischen bis angewitterten Forbach-Granit des Homogenbereiches F1 aufzufahren sein werden. Dieser besitzt im Allgemeinen eine hohe Gesteins- und Gebirgsfestigkeit (siehe Kapitel 9), Allerdings ist abschnittsweise mit stärker tektonisch beanspruchten und durch hydrothermale Alteration zusätzlich vergrustem Gebirge zu rechnen; entsprechend weisen die Vergrusungszonen einen geringeren Trennflächenabstand und einen höheren Verwitterungsgrad auf, was mit einer Verringerung der Gebirgsfestigkeit und einer Einstufung in die Homogenbereiche F2 und F3 einher geht. Konnten diese Vergrusungszonen bzgl. ihrer Ausbildung und Trennflächenorientierungen über mehrere Aufschlüsse hinweg nachverfolgt werden, wurden sie als großräumiger auftretende Schwächezonengebiete interpretiert. Die Existenz dieser Schwächezonengebiete konnte anhand der durchgeführten Erkundungen nachgewiesen werden, deren genaue Lage, Verlauf und Ausbildung durch das Gebirge jedoch nicht. Entsprechend stellen die in der Anlage 2.1.2 dargestellten Schwächezonengebiete lediglich eine aus den vorliegenden Ergebnissen abgeleitete Interpretation und keine tatsächlich im Stollenbereich nachgewiesenen Schwächezonen dar.

Im Bereich der Nebenstollen I bis IV wurden in für die Stollen relevanten Tiefenbereichen mehrere Vergrusungszonen angetroffen, die in den Bohrungen KS BK 104 und KS BK 109 Einstufungen zwischen 11 % und 31 % der Bohrstrecke und somit des Gesteins in die Homogenbereich F2 und F3 notwendig machen. Lokale Über-, bzw. Unterschreitungen dieser Anteile an Homogenbereich F2 und F3 können nicht ausgeschlossen werden. In den Aufschlußbohrungen liegen die Vergrusungsbereiche überwiegend in Mächtigkeiten im Dezimeter- bis Meterbereich vor, vereinzelt können jedoch auch Mächtigkeiten von 4 m bis 6 m auftreten.

Aus großräumiger auftretenden Strukturen können in dem für die Nebenstollen I bis IV relevanten Gebirgsabschnitt drei Schwächezonengebiete vermutet werden, von denen zwei (S-B104-A15 und S-B104-B109) der Hauptkluftrichtung HKR 1 und eine (S-B109-E-H6) der HKR 6 zuzuordnen sind. Die Schwächezonengebiete konnten in den Aufschlüssen mit Mächtigkeiten zwischen 4 m und 11 m erkundet werden, von den der überwiegenden Teil jedoch dem Homogenbereich F2 zuzuordnen ist. Zusammenhängende Mächtigkeiten des Homogenbereiches F3 lagen zwischen 0,6 m und 2,5 m. Auch hier sind Überschreitungen dieser aus den Aufschlußergebnissen abgeleiteten Mächtigkeiten nicht auszuschließen.

Eine erhöhte Gebirgsdurchlässigkeit bzw. erhöhter Bergwasserandrang ist in den Vergrusungszonen/Schwächezonengebieten nach den vorliegenden Untersuchungsergebnissen nicht zu erwarten.

Die Gebirgsdurchlässigkeit wird generell als gering eingestuft.

11.2.3 Gebirgsspannungen

Zur Abschätzung der Primärspannungssituation im Feld der Kavernenspeicher können die Angaben in Kapitel 11.1.3 sinngemäß für Überlagerungsmächtigkeiten zwischen 125 m und 230 m übernommen werden.

Durch die parallele Anordnung der 4 Nebenstollen mit einem Achsabstand von 36 m findet eine Umlagerung der Gebirgsauflast auf die 3 Gebirgspfeiler zwischen den Nebenstollen statt. Ausgehend von einer Reichweite der Gewölbewirkung des einzelnen Hohlraums in der Größenordnung von 1 Stollendurchmesser $D = 2 \cdot R$ ($= 2 \cdot 8 \text{ m}$) errechnet sich der Faktor f für die mittlere Lasterhöhung auf die Gebirgspfeiler der Nebenstollen I bis IV aufgrund der Kammer/Pfeiler-Anordnung zu:

$$f_1 = (3 \cdot 36 + 2 \cdot 3 \cdot 8) / (3 \cdot (36 - 2 \cdot 8) + 2 \cdot 3 \cdot 8) = 1,44.$$

Kapitel 11: Bautechnische Empfehlungen

Bei Standsicherheitsberechnungen für einen Gebirgspfeiler sind die aus den gemessenen Primärspannungen gemäß den Formeln in Kapitel 11.1.3 berechneten Werte für S2 mit dem Faktor f zu beaufschlagen.

Zusätzlich findet an der Stollenlaibung (z. B. an den Ulmen) noch eine Spannungskonzentration statt, die rein theoretisch den 2-fachen, im Extremfall den 3-fachen Wert der mittleren Vertikalspannung im Gebirgspfeiler annehmen kann. Zusätzliche Spannungskonzentrationen treten dann noch an den Stollenden sowie in den Verschneidungsbereichen mit den Spülstollen und mit dem Hauptstollen Kavernenwasserspeicher auf.

11.2.4 Bauverfahren / Vortriebsverfahren

Für den Bau der Nebenstollen des Kavernenwasserspeichers wird aufgrund der Stollenquerschnittsgeometrie und der geotechnischen Eigenschaften des aufzufahrenden Gebirges aus tunnelbautechnischer Sicht ein zyklischer Vortrieb, vorzugsweise ein Sprengvortrieb empfohlen; abschnittsweise (z. B. in Vergrusungszonen/Schwächezonebereichen) kann ggf. auch ein Baggervortrieb erforderlich werden. Ein Fräsvortrieb ist aufgrund der Gesteinsfestigkeit und Abrasivität des frischen oder gering verwitterten Granits nicht möglich bzw. wäre unwirtschaftlich. Eine Auffahrung mittels Tunnelvortriebsmaschine (TVM) scheidet wegen der Stollenquerschnittsgeometrie und der vergleichsweise kurzen Stollenlängen (≤ 345 m) aus baubetrieblichen und wirtschaftlichen Gründen aus.

Hinsichtlich des Vortriebs der Nebenstollen bietet sich eine Erschließung über den Hauptstollen Kavernenwasserspeicher an. Aus bauphysikalischer Sicht ist es vorteilhaft, mit dem Vortrieb der Nebenstollen erst dann zu beginnen, wenn der Schutterstollen Nebenstollen bis zum Nebenstollen V vorgetrieben ist, oder der Hauptstollen Kavernenwasserspeicher, von der Murgseite aufgefahren, zur Verfügung steht und die Bewetterung sowie die bauzeitliche Entwässerung der Baustelle über diese Verbindungen möglich geworden ist. Aufgrund der Querschnittshöhe und -form (lichte Höhe = ca. 7,9 m zuzüglich des Totraumgrabens, lichte Weite = ca. 15,9 m) ist bei den Nebenstollen eine Unterteilung des Ausbruchquerschnitts erforderlich.

11.2.5 Aushubarbeiten / Vortriebsklassen / Felssicherung

Die zu durchörternden Gebirgsbereiche in den Nebenstollen und die zu erwartenden Vortriebsklassen sind in der Anlage 2.1.2 dargestellt.

Bei einer Spritzbetonbauweise (Lösen durch Sprengen, ggf. Baggern) werden die Vortriebsklassen entsprechend Kapitel 3.2.1 der DIN 18312 (Allgemeine Vortriebsklassen) beschrieben. In Bereichen mit intakten Gebirgsverhältnissen des Homogenbereiches F1 kann die Vortriebsklasse VK4, gemäß DIN 18312 zur Anwendung kommen. In ausgeprägten Schwächezonen (Homogenbereich F2 und F3) sollte die Ausbruchsklasse VK6 gemäß DIN 18312 Einsatz finden. Weisen die Schwächezonenbereiche in Vortriebsrichtung Mächtigkeiten von >10 m auf, sollte der Vortrieb mit VK7 erfolgen.

Als reguläre Sicherungsmittel sind Felsdübel bzw. Felsanker (SN-Anker) und bewehrter Spritzbeton in Betracht zu ziehen. Im Einzelfall kann es erforderlich werden, versagensgefährdete Stollenbereiche durch Vorspannanker oder Gewölbekonstruktionen aus Stahlbeton zu sichern.

Die durchgeführten Erkundungen zeigen ein häufiges, jedoch unregelmäßiges und ohne, bzw. sehr geringen Übergangsbereiche Auftreten von vergrusten Bereichen (Homogenbereiche F2/F3). Zur Absicherung einer ausreichenden Vortriebssicherung werden daher Vorerkundungen des Gebirges während des Vortriebs als sinnvoll erachtet. Dies könnte beispielsweise durch auf 10 m verlängerte Sprengbohrungen o. ä. erfolgen.

Kapitel 11: Bautechnische Empfehlungen

Aufgrund der erhöhten Gebirgsdrücke im Bereich des Kavernen-Stollensystems können sich ggf. zusätzliche Sicherungsmittel ergeben, aus denen sich ein erhöhter Sicherheitsaufwand und ggf. eine Verschiebungen der Vortriebsklassen um 1 Stufe nach oben ergeben.

Aufgrund des Trennflächengefüges ist beim Sprengvortrieb gefügebeflusster Mehrausbruch zu erwarten. Die Gefügeauswertung der Bohrungen im Kavernenwasserspeicherbereich zeigt, dass die dominierenden Kluftscharen HKR 1, HKR 2, HKR 4 und untergeordnet HKR 5 in etwa parallel bis stumpfwinklig (HKR 5: spitzwinklig) zu den Stollenachsen der Nebenstollen I bis IV streichen. Die HKR 1 und HKR 4 kommen dabei neben ihrer Haupteinfallsrichtung untergeordnet auch in konjugierter Lagerung vor. Eine Darstellung der aus den Aufschlüssen im Tiefenbereich der Stollen angetroffenen Trennflächenverteilung ist in Abb. 38 dargestellt.

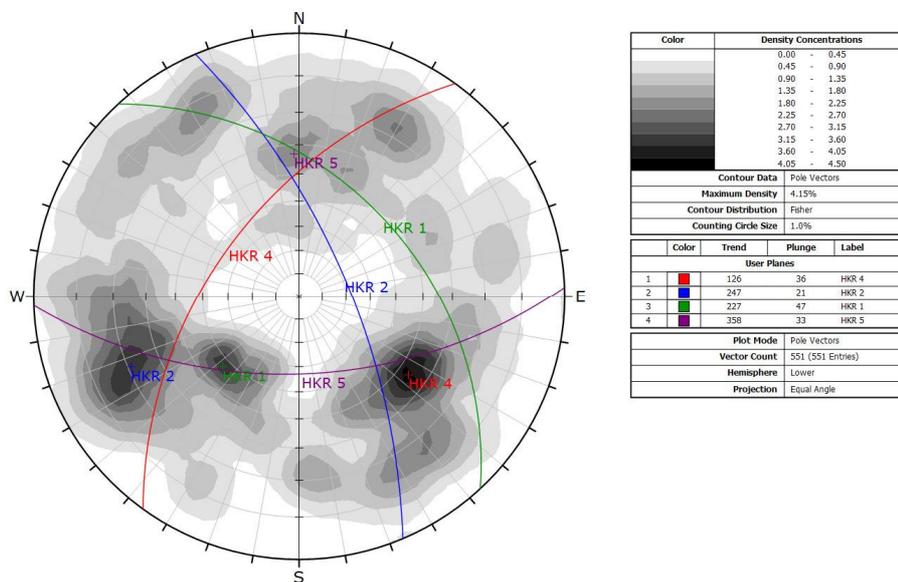


Abb. 38: Gefügedaten Nebenstollen I bis IV

Eine tabellarische Darstellung der Orientierung der relevanten Hauptkluftrichtungen ist der Tab. 55 zu entnehmen. Die Auflistungsreihenfolge in der Tabelle ist auf der aus den Bohrergebnissen angetroffenen Häufigkeit/Anzahl der Hauptkluftrichtungen abgeleitet.

Tab. 55: Relevante Hauptkluftrichtungen mit Einfallsrichtung und -winkel (Clar) Nebenstollen I-IV

Hauptkluftrichtung	Einfallsrichtung/-winkel nach Clar (max. Häufigkeit)	Relative Maxima Einfallrichtung [konjugierte Lagerung]	Relative Maxima Einfallswinkel [konjugierte Lagerung]
4	306 / 54	290 – 320 [145 – 160]	45 – 75 [70-85]
2	67 / 70	60 – 95	55 – 85
1	47 / 43	30 – 60 [195 – 220]	30 – 50 [65 – 80]
5	178 / 56	165 – 210	50 - 70
3/6	Anzahl Klüfte zu gering zur Ausbildung relativer Maxima		

Im südlichen und mittleren Stollenabschnitt der Nebenstollen I bis IV treten dabei zwei vermutete Schwächezonen der Hauptkluftrichtung 1 und am nördlichen Ende ein HKR 6-orientierter Schwächezonenbereich auf.

Infolge der Überlagerung der Gebirgstraggewölbe im Gebirgspfeiler zwischen den Nebenstollen ist hier mit erhöhtem vertikalen Gebirgsdruck zu rechnen. Dies ist beim Vortrieb der Spülstollen und bei der Beurteilung des Sicherungsaufwandes unter Berücksichtigung der Felskeilbildung durch Trennflächenverschneidungen zu beachten.

Im frischen Granit ist nach derzeitigem Kenntnisstand eine Querschnittunterteilung aus gebirgsmechanischen Gründen nicht zwingend erforderlich. In vergrusten oder durch engständige Klüftung stark zerlegten Gebirgsbereichen kann jedoch eine Unterteilung des Ausbruchsquerschnitts auch aus gebirgsmechanischer Sicht erforderlich werden (A-Unterklassen gemäß DIN 18312). Aufgrund der elliptischen Querschnittsform wären dabei vorausseilende Seiten- oder Ulmenstollen mit anschließendem Aushub des Mittelpfeilers zweckmäßig. Der Totwassergraben kann bzw. sollte unabhängig von einer möglichen Querschnittunterteilung der Kalotte nach dem Auffahren der Kalotte ausgebrochen und gesichert werden.

Um die vor genannten Fragestellungen abgesichert zu erfassen und damit Kostensicherheit für den Hauptvortrieb zu erlangen, wird empfohlen, im Vorfeld des großräumigen Vortriebs der Kavernenstollen einen Erkundungsstollen mit vergleichsweise kleinem Querschnitt aufzufahren.

11.2.6 Bauzeitliche Entwässerung

Das an den Stollenwänden zutretende Bergwasser ist zu fassen und über eine entsprechend dem Vortriebsstand nachgeführte Bauwasserhaltung (zweckmäßigerweise als Sohlkanal im Tiefpunkt des Stollenquerschnitts angeordnet) zu einem bauzeitlichen Auffangbehälter im Tiefpunkt des Hauptstollens Kavernenwasserspeicher abzuleiten. Von dort kann das Wasser in freiem Gefälle (sofern der Hauptstollen Kavernenwasserspeicher durchgängig bis zur Murg aufgefahren ist) oder in einer Druckleitung (z. B. über den Schutterstollen) aus dem Stollen herausgepumpt, in einer Aufbereitungsanlage entsprechend den Auflagen der Behörden aufbereitet und in die Murg eingeleitet werden.

Kapitel 11: Bautechnische Empfehlungen

Die Ergebnisse der Baugrunduntersuchungen zeigen, dass beim Vortrieb der Nebenstollen nur geringe Wassermengen (ca. 2 l/s bis 5 l/s pro Stollen) zu erwarten sind. Der in den einzelnen Stollenabschnitten zu erwartende Wasserandrang ist dem Kapitel 10 bzw. der Anlage 2.1.2 zu entnehmen.

Sofern beim Vortrieb stark wasserführende Großklüfte, Schwächezonen- und Zerrüttungszonen angeschnitten werden, sind die Wasserzutritte durch Abschlauungen u. ä. gezielt zu fassen, um baubetriebliche Erschwernisse durch Wasser zu vermeiden und die erforderlichen gebirgsmechanischen Sicherungsmaßnahmen zu erleichtern. Auch wenn die Wasserzutritte nach gewisser Zeit versiegen sollten, sind sie funktionsfähig zu erhalten und zu kartieren. Auf der Grundlage der Kartierung und der erhobenen Abflussmessdaten ist nach Vortriebsende ein gesamtheitliches Konzept für die Behandlung der wasserführenden Klüfte und Klüftzonen im Hinblick auf den Betrieb des Kavernenwasserspeichers zu erstellen.

11.2.7 Ausbau der Nebenstollen

Ein Ausbau in Form einer statisch wirksamen Innenschale ist für die Nebenstollen des Kavernenspeichers und die sie verbindenden Spülstollen nicht vorgesehen und im Bereich des frischen bzw. gering verwitterten Granits aus felsmechanischer Sicht im Allgemeinen auch nicht erforderlich.

In den Stollenabschnitten, in denen der Granit stark verwittert bzw. in vergruster Form (Homogenbereiche F2 und F3) ansteht und dem zufolge der Zerlegungsgrad groß, die Klüftabstände klein sind und das Korngefüge des Gesteins geschwächt ist, wird empfohlen, die ohnehin für die Vortriebssicherung erforderliche Spritzbetonschale zu einer permanenten Sicherung der Stollenlaibung auszubauen:

- a) zur Vermeidung des allmählichen Herauslösens von losen Klüftkörpern im Firstbereich allein durch Schwerkraft
- b) zur Sicherung des Gebirges gegen Strömungsdruck z. B. bei Absenkung des Stauspiegels
- c) als "Erosionsschutz" bei Wasserbewegungen und Luftströmungen im Stollen selbst

Des Weiteren wird empfohlen, die bei Entleerungsvorgängen durch fließendes Wasser im Stollen stark beanspruchten Bereiche (z. B. Sohlbereich, Einmündung der Nebenstollen, Einmündung der Spülstollen, Verzweigung des Hauptstollens Kavernenwasserspeicher zum Kavernenkraftwerk) mit einem "Erosionsschutz" zu versehen.

Die Sicherung kann mit Hilfe von bewehrtem Spritzbeton in Verbindung mit Felsnägeln erfolgen. Zur Vermeidung des Aufbaus eines äußeren Wasserdrucks werden rasterförmig angeordnete Perforationen der Spritzbetonschale als sinnvoll angesehen.

11.2.8 Bemessungswasserspiegel

Alle Stollen des Kavernenwasserspeichers, auch der Hauptstollen, sind als hydraulisch offenes System geplant, d. h. der Wasserspiegel im Stollen kommuniziert mit dem Gebirgswasser. Grundsätzlich wirkt das Stollensystem als Drainage für das Bergwasser und es findet eine Wasserströmung über Klüfte in Richtung des Stollensystems statt. In Abhängigkeit vom Füllzustand der Stollen kann es im Nahbereich jedes Stollens aber auch zu einer Infiltration in das Gebirge und damit zu einer Umkehr der Strömungsrichtung kommen. Dort, wo der Hauptstollen Kavernenwasserspeicher aus tunnelstatischen und gebirgsmechanischen Gründen (zumindest abschnittsweise) mit einer Auskleidung versehen werden muss, ist der Ausbau hydraulisch durchlässig zu gestalten, um den Aufbau eines äußeren Wasserdrucks zu vermeiden. Demzufolge ist der höchste Füllstand des

Kapitel 11: Bautechnische Empfehlungen

Kavernenwasserspeichers (301,60 mNN) als Bemessungswasserspiegel für Einbauten in den Nebenstollen zu betrachten. Für gebirgsmechanische Berechnungen unter Berücksichtigung großräumiger Strömungsvorgänge sind differenzierte Betrachtungen erforderlich.

11.3 Nebenstollen V und VI des Kavernenspeichers

11.3.1 Bauwerksdaten

Die maßgebenden Bauwerksdaten zu den Nebenstollen des Kavernenspeichers entsprechend dem aktuellem Planungsstand sind in Tab. 56 zusammengestellt.

Tab. 56: Bauwerksdaten Nebenstollen v und VI

Anzahl der Nebenstollen	2
Achsabstand	36 m
Stollenlänge Stollen V + VI	ca. 215 m
Stauziel	301,60 mNN
Absenkziel	295,50 mNN
Stollenfirste	ca. 302,70 mNN
Stollensohle (Totraumgraben)	variabel : > 293,02 mNN
Lichte Weite	15,90 m
Lichte Höhe	7,95 m + Tiefe Totraumgraben (max. 2,5 m)
Minimale / maximale Gebirgsüberdeckung	ca. 125 m / ca. 196 m

Die Nebenstollen des Kavernenwasserspeichers erzeugen den größten Teil des Speichervolumens des Kavernenwasserspeichers (Nebenstollen I bis VI insges. 200.000 m³). Sie zweigen vom Hauptstollen Kavernenwasserspeicher, dessen Achse ca. 45° gegen Nord (über Ost) streicht, fächerförmig ab. Die Achsabstände in Bezug auf die Hauptstollenachse betragen einheitlich 48,71 m. Die Nebenstollen V und VI verlaufen östlich des Hauptstollens Kavernenwasserspeicher in West - Ost Richtung parallel zu einander mit einem Achsabstand von 36 m (Pfeilerbreite zwischen Nebenstollen V und VI ca. 20 m).

Die jeweils parallel zu einander liegenden Nebenstollen werden am hinteren Ende durch Querstollen (Spülstollen) miteinander verbunden. Die Spülstollen sind jeweils ca. 20 m lang, ca. 3,4 m breit und ca. 4,7 m hoch. Die Nebenstollen besitzen einen asymmetrischen und entlang des Stollens variablen Querschnitt, welcher im oberen Teil quasisymmetrisch als liegende "Halbellipse" ausgebildet ist, durch die das operative Speichervolumen bestimmt wird und welcher im unteren, asymmetrisch und variabel ausgebildeten Teil als Fließgerinne (Totraumgraben) bei der Speicherentleerung und als Fahrweg für Radfahrzeuge dient (siehe Abb. 39). Die Sohlen der Totraumgräben der Nebenstollen haben ein Längsgefälle von ca. 0,7 % bzw. ca. 1,0 % in Richtung des Hauptstollens Kavernenwasserspeicher.

Die Überlagerung über der Firste der Nebenstollen variiert zwischen ca. 125 m und ca. 230 m.

Kapitel 11: Bautechnische Empfehlungen

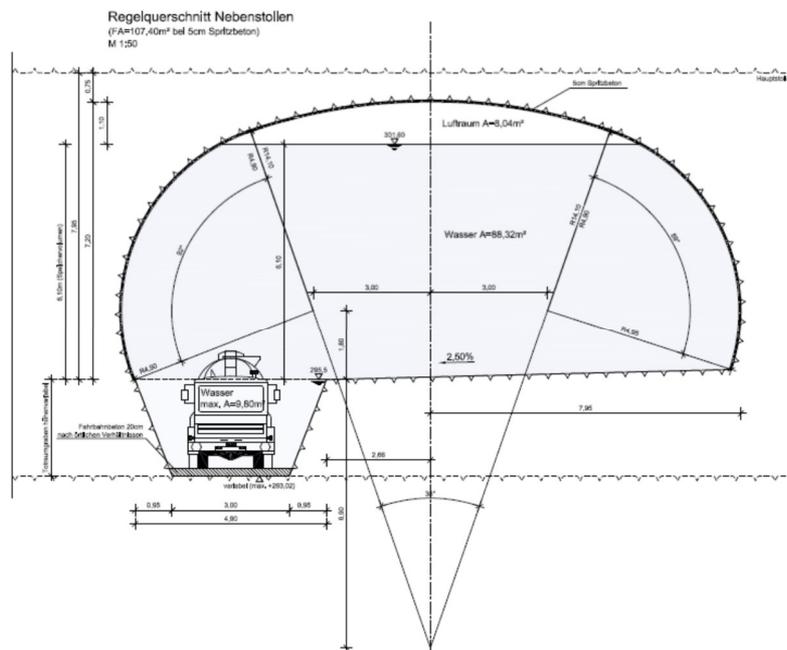


Abb. 39: Kavernenwasserspeicher - Regelquerschnitt Nebenstollen

11.3.2 Geologische und hydrogeologische Situation

Die für die Bewertung der geologischen und hydrologischen Situation im Bereich des Stollenfeldes herangezogenen Aufschlussbohrungen KS BK 6, KS BK 102, KS BK 104 und KS BK 107 sind in der Anlage 3 dokumentiert.

Eine Beschreibung der allgemeinen geologischen und hydrogeologischen Situation ist in den Kapiteln 5 und 6 enthalten. Die felsmechanische Charakterisierung der beim Bau der Kaverne aufzufahrenden Gesteine ist im Kapitel 9 und eine bauwerksbezogene Beschreibung der Grundwasserhältnisse im Kapitel 10 zu finden. Ein geotechnischer Längsschnitt durch das Feld der Speicherkavernen befindet sich in der Anlage 2.1.3.

Dem entsprechend ist davon auszugehen, dass die Nebenstollen des geplanten Kavernenwasserspeichers überwiegend im frischen bis angewitterten Forbach-Granit des Homogenbereiches F1 aufzufahren sein werden. Dieser besitzt im Allgemeinen eine hohe Gesteins- und Gebirgsfestigkeit (siehe Kapitel 9). Allerdings ist abschnittsweise mit stärker tektonisch beanspruchten und durch hydrothermale Alteration zusätzlich vergrustem Gebirge zu rechnen; entsprechend weisen die Vergrusungszonen einen geringeren Trennflächenabstand und einen höheren Verwitterungsgrad auf, was mit einer Verringerung der Gebirgsfestigkeit und einer Einstufung in die Homogenbereiche F2 und F3 einher geht. Konnten diese Vergrusungszonen bzgl. ihrer Ausbildung und Trennflächenorientierungen über mehrere Aufschlüsse hinweg nachverfolgt werden, wurden sie als großräumiger auftretende Schwächezonbereiche interpretiert. Die Existenz dieser Schwächezonbereiche konnte anhand der durchgeführten Erkundungen nachgewiesen werden, deren genaue Lage, Verlauf und Ausbildung durch das Gebirge jedoch nicht. Entsprechend stellen die in der Anlage 2.1.3 dargestellten Schwächezonbereiche lediglich eine aus den vorliegenden Ergebnissen abgeleitete Interpretation und keine tatsächlich in den Stollenbereichen nachgewiesenen Schwächezon dar.

Kapitel 11: Bautechnische Empfehlungen

Im Bereich der Nebenstollen V und VI wurden in für die Stollen relevanten Tiefenbereichen mehrere Vergrusungszonen angetroffen, die in den herangezogenen Bohrungen Einstufungen zwischen 7 % und 44 % der Bohrstrecke und somit des Gesteins in die Homogenbereich F2 und F3 notwendig machen. Lokale Über-, bzw. Unterschreitungen dieser Anteile an Homogenbereich F2 und F3 können nicht ausgeschlossen werden. In den südlich der Nebenstollen gelegenen Aufschlußbohrungen liegen die Vergrusungsbereiche überwiegend in Mächtigkeiten im Dezimeterbereich vor. In der nördlich der Nebenstollen V und VI gelegenen KS BK 6 wurde über die gesamte Bohrlänge Vergrusungsbereiche mit Mächtigkeiten von 3 m bis 6 m ermittelt. Zwischen ca. 285 mNN und 305 mNN wurde auf etwa 20 m eine durchgängige Vergrusungs-/Schwächezone festgestellt. Hier ist das Gestein sehr stark vergrust und weist teilweise Lockergesteinscharakter (Sand/Kies) auf.

Aus großräumiger auftretenden Strukturen können in dem für die Nebenstollen V und VI relevanten Gebirgsabschnitt drei Schwächezonengebiete vermutet werden, die den Hauptkluftrichtungen HKR 1 (S-B9-B107), der HKR 4 (S-B6-B104-B107) und der HKR 6 (S-B5-B6-B107) zuzuordnen sind. Die Schwächezonengebiete konnten in den Aufschlüssen mit Mächtigkeiten zwischen 1 m bis 11 m erkundet werden, von denen der überwiegende Teil jedoch dem Homogenbereich F2 zuzuordnen ist. Zusammenhängende Mächtigkeiten des Homogenbereiches F3 kamen bis zu 8 m vor. Auch hier sind Überschreitungen dieser aus den Aufschlußergebnissen abgeleiteten Mächtigkeiten nicht auszuschließen.

Eine erhöhte Gebirgsdurchlässigkeit bzw. erhöhter Bergwasserandrang ist in den Vergrusungszonen/Schwächezonengebieten nach den vorliegenden Untersuchungsergebnissen nicht zu erwarten.

11.3.3 Gebirgsspannungen

Zur Abschätzung der Primärspannungssituation im Feld der Kavernenspeicher können die Angaben in Kapitel 11.1.3 sinngemäß für Überlagerungsmächtigkeiten zwischen 125 m und 230 m übernommen werden.

Durch die parallele Anordnung der 2 Nebenstollen mit einem Achsabstand von 36 m findet eine Umlagerung der Gebirgsauflast auf den Gebirgspfeiler zwischen den Nebenstollen statt. Ausgehend von einer Reichweite der Gewölbewirkung des einzelnen Hohlraums in der Größenordnung von 1 Stollendurchmesser $D = 2 \cdot R$ ($= 2 \cdot 8 \text{ m}$) errechnet sich der Faktor f für die mittlere Lasterhöhung auf den Gebirgspfeiler der Nebenstollen V bis VI aufgrund der Kammer/Pfeiler-Anordnung zu:

$$f_2 = (1 \cdot 36 + 2 \cdot 3 \cdot 8) / (1 \cdot (36 - 2 \cdot 8) + 2 \cdot 3 \cdot 8) = 1,24.$$

Bei Standsicherheitsberechnungen für einen Gebirgspfeiler sind die aus den gemessenen Primärspannungen gemäß den Formeln in Kapitel 11.1.3 berechneten Werte für S_2 mit dem Faktor f zu beaufschlagen.

Zusätzlich findet an der Stollenlaibung (z. B. an den Ulmen) noch eine Spannungskonzentration statt, die rein theoretisch den 2-fachen, im Extremfall den 3-fachen Wert der mittleren Vertikalspannung im Gebirgspfeiler annehmen kann. Zusätzliche Spannungskonzentrationen treten dann noch an den Stollenden sowie in den Verschneidungsbereichen mit den Spülstollen und mit dem Hauptstollen Kavernenwasserspeicher auf.

11.3.4 Bauverfahren / Vortriebsverfahren

Für den Bau der Nebenstollen des Kavernenwasserspeichers wird aufgrund der Stollenquerschnittsgeometrie und der geotechnischen Eigenschaften des aufzufahrenden Gebirges aus tunnelbautechnischer Sicht ein zyklischer Vortrieb, vorzugsweise ein Sprengvortrieb empfohlen; abschnittsweise (z. B. in Vergrusungszonen) kann ggf. auch ein Baggervortrieb erforderlich werden. Ein Fräsvortrieb ist aufgrund der Gesteinsfestigkeit und Abrasivität des frischen oder gering verwitterten Granits nicht möglich bzw. wäre unwirtschaftlich. Eine Auffahrung mittels Tunnelvortriebsmaschine (TVM) scheidet wegen der Stollenquerschnittsgeometrie und der vergleichsweise kurzen Stollenlängen (≤ 215 m) aus baubetrieblichen und wirtschaftlichen Gründen aus.

Hinsichtlich des Vortriebs der Nebenstollen bietet sich eine Erschließung über den Hauptstollen Kavernenwasserspeicher an. Aus bauleistungsrechtlicher Sicht ist es vorteilhaft, mit dem Vortrieb der Nebenstollen erst dann zu beginnen, wenn der Schutterstollen Nebenstollen bis zum Nebenstollen V vorgetrieben ist, oder der Hauptstollen Kavernenwasserspeicher, von der Murgseite aufgefahren, zur Verfügung steht und die Bewetterung sowie die bauzeitliche Entwässerung der Baustelle über diese Verbindungen möglich geworden ist. Aufgrund der Querschnittshöhe und -form (lichte Höhe = ca. 7,9 m zuzüglich des Totraumgrabens, lichte Weite = ca. 15,9 m) ist bei den Nebenstollen eine Unterteilung des Ausbruchquerschnitts erforderlich.

11.3.5 Aushubarbeiten / Vortriebsklassen / Felssicherung

Die zu durchörternden Gebirgsbereiche in den Nebenstollen und die zu erwartenden Vortriebsklassen sind in der Anlage 2.1.3 dargestellt.

Bei einer Spritzbetonbauweise (Lösen durch Sprengen, ggf. Baggern) werden die Vortriebsklassen entsprechend Kapitel 3.2.1 der DIN 18312 (Allgemeine Vortriebsklassen) beschrieben. In Bereichen mit intakten Gebirgsverhältnissen des Homogenbereiches F1 kann die Vortriebsklasse VK4, gemäß DIN 18312 zur Anwendung kommen. In ausgeprägten Schwächezonen (Homogenbereich F2 und F3) sollte die Ausbruchsklasse VK6 gemäß DIN 18312 zum Einsatz kommen. Weisen die Schwächezonenbereiche in Vortriebsrichtung Mächtigkeiten von >10 m auf, sollte der Vortrieb mit VK7 erfolgen. Sollten die in der KS BK 6 festgestellten starken und mächtigen Vergrusungen bis in das Umfeld der Nebenstollen vorhanden sein, müssten hier ggf. Zusatzmaßnahmen zur Sicherung des Vortriebs eingeplant werden.

Als reguläre Sicherungsmittel sind Felsdübel bzw. Felsanker (SN-Anker) und bewehrter Spritzbeton in Betracht zu ziehen. Im Einzelfall kann es erforderlich werden, versagensgefährdete Stollenbereiche durch Vorspannanker oder Gewölbekonstruktionen aus Stahlbeton zu sichern.

Die durchgeführten Erkundungen zeigen ein häufiges, jedoch unregelmäßiges und ohne, bzw. sehr geringen Übergangsbereiche Auftreten von vergrusteten Bereichen (Homogenbereiche F2/F3). Zur Absicherung einer ausreichenden Vortriebssicherung werden daher Vorerkundungen des Gebirges während des Vortriebs als sinnvoll erachtet. Dies könnte beispielsweise durch auf 10 m verlängerte Sprengbohrungen o. ä. erfolgen. Alternativ könnte auf Grund der relativen Größe des Stollendurchmessers zur Absicherung der einzusetzenden Vortriebsklassen und zur Planung einer gewissen Kostensicherheit für den Hauptvortrieb im Vorfeld des großräumigen Vortriebs der Kavernenstollen einen Erkundungsstollen mit vergleichsweise kleinem Querschnitt aufgefahren werden.

Aufgrund der erhöhten Gebirgsdrücke im Bereich des Kavernen-Stollensystems können sich ggf. zusätzliche Sicherungsmittel ergeben, aus denen sich ein erhöhter Sicherheitsaufwand und ggf. eine Verschiebung der Vortriebsklassen um 1 Stufe nach oben ergeben.

Kapitel 11: Bautechnische Empfehlungen

Aufgrund des Trennflächengefüges ist beim Sprengvortrieb gefügebeeinflusster Mehrausbruch zu erwarten. Die Gefügeauswertung der Bohrungen im Bereich der Nebenstollen V und VI (Abb. 40) zeigt, dass alle Hauptkluftrichtungen angetroffen wurden, HKR 3 und HKR 5 jedoch etwas untergeordnet auftreten. HKR 1 und HKR 4 kommen dabei neben ihrer Haupteinfallsrichtung auch in konjugierter Lagerung vor.

Die relevanten Hauptkluftrichtungen liegen überwiegend senkrecht bis stumpfwinklig zur Stollenachse der Nebenstollen V und VI, lediglich die HKR 4 fällt spitzwinklig zur Stollenachse ein.

Nach den durchgeführten Erkundungen wird für die Nebenstollen IV und V das Antreffen von HKR 1- bis HKR 4- und HKR 6-orientierten Schwächezonebereiche abgeleitet.

Infolge der Überlagerung der Gebirgstraggewölbe im Gebirgs Pfeiler zwischen den Nebenstollen ist hier mit erhöhtem vertikalen Gebirgsdruck zu rechnen. Dies ist beim Vortrieb der Spülstollen und bei der Beurteilung des Sicherungsaufwandes unter Berücksichtigung der Felskeilbildung durch Trennflächenverschneidungen zu beachten.

Im frischen Granit (Homogenbereich F1) ist nach derzeitigem Kenntnisstand eine Querschnittsunterteilung aus gebirgsmechanischen Gründen nicht zwingend erforderlich. In vergrusten oder durch engständige Klüftung stark zerlegten Gebirgsbereichen kann jedoch eine Unterteilung des Ausbruchsquerschnitts auch aus gebirgsmechanischer Sicht erforderlich werden (A-Unterklassen gemäß DIN 18312). Aufgrund der elliptischen Querschnittsform wären dabei vorausseilende Seiten- oder Ulmenstollen mit anschließendem Aushub des Mittelpfeilers zweckmäßig. Der Totwassergraben kann bzw. sollte unabhängig von einer möglichen Querschnittsunterteilung der Kalotte nach dem Auffahren der Kalotte ausgebrochen und gesichert werden.

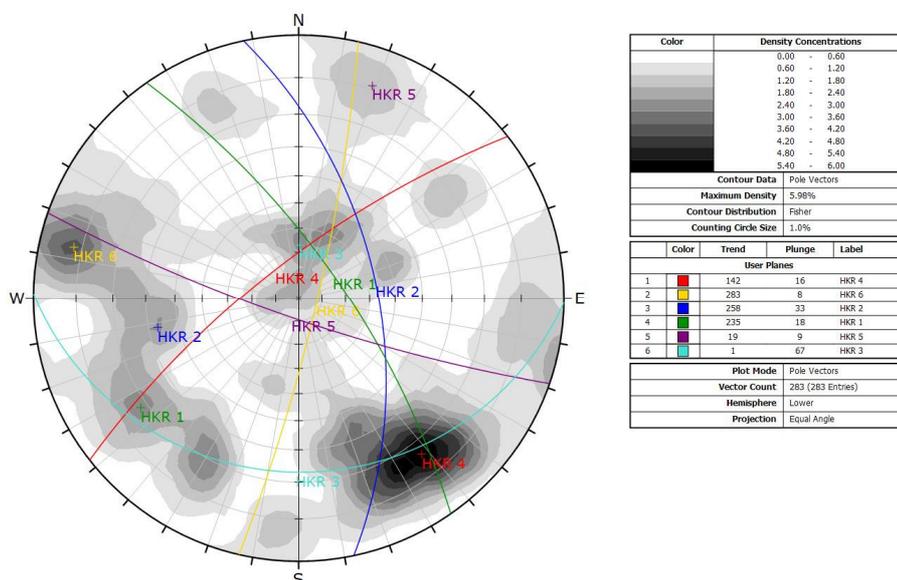


Abb. 40: Gefügedaten Nebenstollen V und VI

Eine tabellarische Darstellung der Orientierung der relevanten Hauptkluftrichtungen ist der Tab. 57 zu entnehmen. Die Auflistungsreihenfolge in der Tabelle ist auf der aus den Bohrergebnissen angetroffenen Häufigkeit/Anzahl der Hauptkluftrichtungen abgeleitet.

Tab. 57: Relevante Hauptkluftrichtungen mit Einfallsrichtung und -winkel (Clar) Nebenstollen V/VI

Hauptkluftrichtung	Einfallsrichtung/-winkel nach Clar (max. Häufigkeit)	Relative Maxima Einfallrichtung [konjugierte Lagerung]	Relative Maxima Einfallswinkel [konjugierte Lagerung]
4	322/ 74	305 – 345 [150 – 160]	65 – 85 [75 – 85]
6	103 / 82	85 – 100	75 - 90
2	78 / 57	70 – 90	50 - 70
1	55 / 72	50 – 60 [230 – 240]	65 - 80 [60 – 75]
5	199 / 81	185 – 210	75 - 90
3	181 / 23	160 – 220	20 - 35

11.3.6 Bauzeitliche Entwässerung

Das an den Stollenwänden zutretende Bergwasser ist zu fassen und über eine entsprechend dem Vortriebsstand nachgeführte Bauwasserhaltung (zweckmäßigerweise als Sohlkanal im Tiefpunkt des Stollenquerschnitts angeordnet) zu einem bauzeitlichen Auffangbehälter im Tiefpunkt des Hauptstollens Kavernenwasserspeicher abzuleiten. Von dort kann das Wasser in freiem Gefälle (sofern der Hauptstollen Kavernenwasserspeicher durchgängig bis zur Murg aufgefahren ist) oder in einer Druckleitung (z. B. über den Schutterstollen) aus dem Stollen herausgepumpt, in einer Aufbereitungsanlage entsprechend den Auflagen der Behörden aufbereitet und in die Murg eingeleitet werden.

Die Ergebnisse der Baugrunduntersuchungen zeigen, dass beim Vortrieb der Nebenstollen nur geringe Wassermengen (im Mittel insges. ca. 5 l/s pro Stollen) zu erwarten sind. Der in den einzelnen Stollenabschnitten zu erwartende Wasserandrang ist dem Kapitel 10 bzw. der Anlage 2.1.3 zu entnehmen.

Sofern beim Vortrieb stark wasserführende Großklüfte, Schwächezonen- und Zerrüttungszonen angeschnitten werden, sind die Wasserzutritte durch Abschlauungen u. ä. gezielt zu fassen, um baubetriebliche Erschwernisse durch Wasser zu vermeiden und die erforderlichen gebirgsmechanischen Sicherungsmaßnahmen zu erleichtern. Auch wenn die Wasserzutritte nach gewisser Zeit versiegen sollten, sind sie funktionsfähig zu erhalten und zu kartieren. Auf der Grundlage der Kartierung und der erhobenen Abflussmessdaten ist nach Vortriebsende ein gesamtheitliches Konzept für die Behandlung der wasserführenden Klüfte und Klüftzonen im Hinblick auf den Betrieb des Kavernenwasserspeichers zu erstellen.

11.3.7 Ausbau der Nebenstollen

Ein Ausbau in Form einer statisch wirksamen Innenschale ist für die Nebenstollen des Kavernenspeichers und die sie verbindenden Spülstollen nicht vorgesehen und im Bereich des frischen bzw. gering verwitterten Granits (Homogenbereich F1) aus felsmechanischer Sicht im Allgemeinen auch nicht erforderlich.

In den Stollenabschnitten, in denen der Granit stark verwittert bzw. in vergruster Form ansteht (Homogenbereiche F2 und F3) und dem zufolge der Zerlegungsgrad groß, die Kluftabstände klein sind

Kapitel 11: Bautechnische Empfehlungen

und das Korngefüge des Gesteins geschwächt ist, wird empfohlen, die ohnehin für die Vortriebssicherung erforderliche Spritzbetonschale zu einer permanenten Sicherung der Stollenlaibung auszubauen:

- a) zur Vermeidung des allmählichen Herauslösen von losen Kluffkörpern im Firstbereich allein durch Schwerkraft
- b) zur Sicherung des Gebirges gegen Strömungsdruck z. B. bei Absenkung des Stauspiegels
- c) als "Erosionsschutz" bei Wasserbewegungen und Luftströmungen im Stollen selbst

Des Weiteren wird empfohlen, die bei Entleerungsvorgängen durch fließendes Wasser im Stollen stark beanspruchten Bereiche (z. B. Sohlbereich, Einmündung der Nebenstollen, Einmündung der Spülstollen, Verzweigung des Hauptstollens Kavernenwasserspeicher zum Kavernenkraftwerk) mit einem "Erosionsschutz" zu versehen.

Die Sicherung kann mit Hilfe von bewehrtem Spritzbeton in Verbindung mit Felsnägeln erfolgen. Zur Vermeidung des Aufbaus eines äußeren Wasserdrucks werden rasterförmig angeordnete Perforationen der Spritzbetonschale als sinnvoll angesehen.

11.3.8 Bemessungswasserspiegel

Alle Stollen des Kavernenwasserspeichers, auch der Hauptstollen, sind als hydraulisch offenes System geplant, d. h. der Wasserspiegel im Stollen kommuniziert mit dem Gebirgswasser. Grundsätzlich wirkt das Stollensystem als Drainage für das Bergwasser und es findet eine Wasserströmung über Klüfte in Richtung des Stollensystems statt. In Abhängigkeit vom Füllzustand der Stollen kann es im Nahbereich jedes Stollens aber auch zu einer Infiltration in das Gebirge und damit zu einer Umkehr der Strömungsrichtung kommen. Dort, wo der Hauptstollen Kavernenwasserspeicher aus tunnelstatischen und gebirgsmechanischen Gründen (zumindest abschnittsweise) mit einer Auskleidung versehen werden muss, ist der Ausbau hydraulisch durchlässig zu gestalten, um den Aufbau eines äußeren Wasserdrucks zu vermeiden. Demzufolge ist der höchste Füllstand des Kavernenwasserspeichers (301,60 mNN) als Bemessungswasserspiegel für Einbauten in den Nebenstollen zu betrachten. Für gebirgsmechanische Berechnungen unter Berücksichtigung großräumiger Strömungsvorgänge sind differenzierte Betrachtungen erforderlich.

11.4 Hauptstollen Kavernenwasserspeicher

11.4.1 Bauwerksdaten

Die maßgebenden Bauwerksdaten zum Hauptstollen des Kavernenwasserspeichers entsprechend dem aktuellem Planungsstand sind in Tab. 58 zusammengestellt.

Tab. 58: Bauwerksdaten Hauptstollen Kavernenspeicher

Stollenlänge (gerader Abschnitt)	787,5 m
Stollenlänge (Kurvenabschnitt)	222,5 m
Stauziel	301,60 mNN
Absenkziel	295,50 mNN
Stollenfirste	ca. 303,50 mNN
Stollensohle	variabel : 293,05 mNN ... 294,50 mNN
Stollensohle am Zulaufbauwerk	290,02 mNN
Lichte Weite	7,8 m
Lichte Höhe	8,95 m bis 10,40 m
Minimale / maximale Gebirgsüberdeckung	ca. 5 m / ca. 225 m

Kapitel 11: Bautechnische Empfehlungen

Der Hauptstollen Kavernenwasserspeicher mit einer Gesamtlänge von ca. 1.010 m endet am Kreuzungspunkt der Zulaufbauwerke des Unterwasserstollens des Schwarzenbachwerks und des Murgwerks.

Im Zulaufbauwerk liegt der Tiefpunkt der Stollensohle bei 290,02 mNN. Außerhalb der Zulaufbauwerke hat die Stollensohle am Nebenstollen I eine geodätische Höhe von ca. 293,05 mNN. Am Einlaufbauwerk an der Murg liegt die Gradiente der Stollensohle auf dem Niveau 294,50 mNN. Damit bleibt die Stollensohle auch bei vollständiger Entleerung der Nebenstollen immer unter Wasser.

Der Hauptstollen mündet im Werksgelände des Fettweis-Werks unmittelbar südlich der Wehranlage in der Murg. Etwa 30 m des Stollens werden in offener Bauweise errichtet. Der Anschlagpunkt für den bergmännisch aufzufahrenden Abschnitt kommt voraussichtlich an der bestehenden Stützwand für die Werkstraße unterhalb der B462 zu liegen. Von dort wird der Hauptstollen in einem Linksbogen mit kurzer Zwischengeraden aufgefahren, bis er etwa ab Station 222,5 eine konstante Richtung (ca. SW) bis zum Stollenende beibehält.

Die B462 wird mit geringer Überdeckung (ca. 8 m) unterfahren.

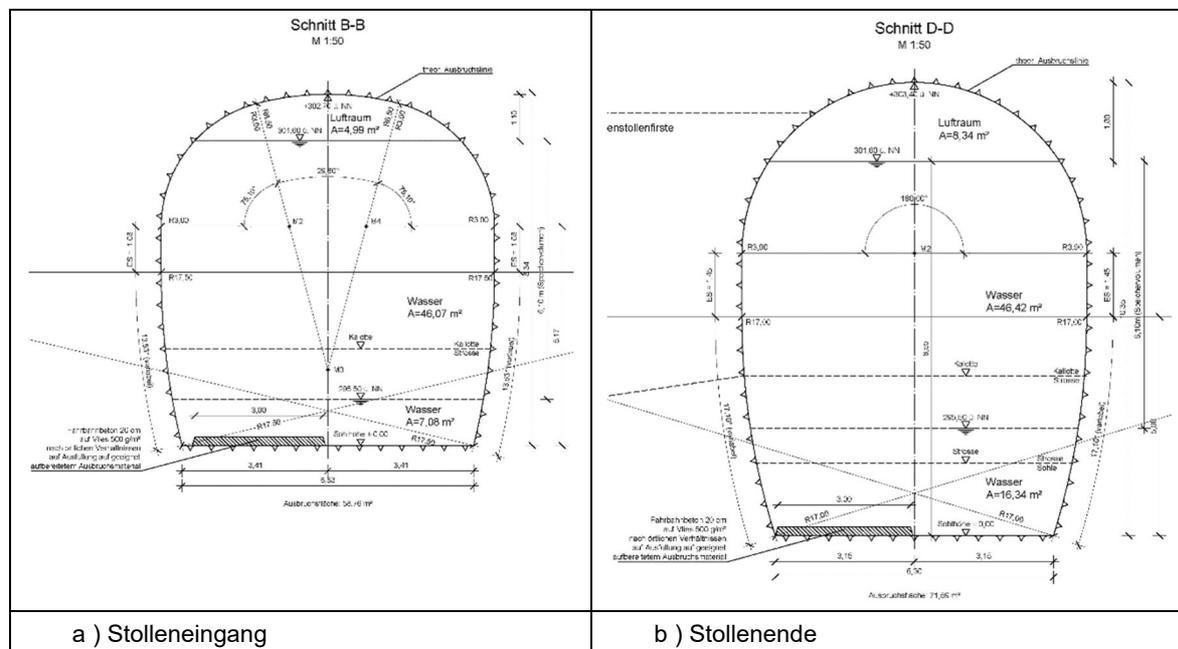


Abb. 41: Kavernenwasserspeicher - Regelquerschnitt Hauptstollen

Der Stollenverlauf ist dem Lageplan in der Anlage 1.1 zu entnehmen. Der höhenmäßig variable Regelquerschnitt des Hauptstollens Kavernenwasserspeicher ist in der Abb. 41 dargestellt. Das Auslaufbauwerk und der Voreinschnitt Hauptstollen werden separat in Kapitel 11.4.9 beschrieben.

11.4.2 Geologische und hydrogeologische Situation

Die für die Bewertung der geologischen und hydrogeologischen Verhältnisse im Nahbereich des Hauptstollens Kavernenwasserspeicher ausgeführten Aufschlüsse (KS BK 104, KS BK 107, KS BK 6, KS BK 7, KS BK 111, KS BK 8 und KS BK 115) sind in Kapitel 4 zusammengestellt, die Aufschlussprofile sind in der Anlage 3 zu finden. Eine Beschreibung der geologischen und hydrogeologischen Situation im Bereich des Kavernenwasserspeichers und des Hauptstollens Kavernenwasserspeicher ist in den Kapiteln 5 und Kapitel 6 sowie in Kapitel 10 enthalten. Die felsmechanische

Kapitel 11: Bautechnische Empfehlungen

Charakterisierung der beim Bau zu durchörternden Gesteine ist im Kapitel 9 zu finden. Der ingenieur- und hydrogeologische Längsschnitt durch den Hauptstollen Kavernenwasserspeicher ist in der Anlage 2.1.4 dargestellt. Das Auslaufbauwerk und der Voreinschnitt Hauptstollen werden separat in Kapitel 11.4.9. beschrieben.

Dem entsprechend ist davon auszugehen, dass die Nebenstollen des geplanten Kavernenwasserspeichers überwiegend im frischen bis angewitterten Forbach-Granit des Homogenbereiches F1 aufzufahren sein werden. Dieser besitzt im Allgemeinen eine hohe Gesteins- und Gebirgsfestigkeit (siehe Kapitel 9), Allerdings ist abschnittsweise mit stärker tektonisch beanspruchten und durch hydrothermale Alteration zusätzlich vergrustem Gebirge zu rechnen; entsprechend weisen die Vergrusungszonen einen geringeren Trennflächenabstand und einen höheren Verwitterungsgrad auf, was mit einer Verringerung der Gebirgsfestigkeit und einer Einstufung in die Homogenbereiche F2 und F3 einher geht. Konnten diese Vergrusungszonen bzgl. ihrer Ausbildung und Trennflächenorientierungen über mehrere Aufschlüsse hinweg nachverfolgt werden, wurden sie als großräumiger auftretende Schwächezonengebiete interpretiert. Die Existenz dieser Schwächezonengebiete konnte anhand der durchgeführten Erkundungen nachgewiesen werden, deren genaue Lage, Verlauf und Ausbildung durch das Gebirge jedoch nicht. Entsprechend stellen die in der Anlage 2.1.4 dargestellten Schwächezonengebiete lediglich eine aus den vorliegenden Ergebnissen abgeleitete Interpretation und keine tatsächlich im Stollenbereich nachgewiesenen Schwächezonengebiete dar.

Nach derzeitigem Kenntnisstand wurden im für den Hauptstollen relevanten Tiefenbereich mehrere Vergrusungszonen angetroffen, die in den herangezogenen Bohrungen Einstufungen zwischen 1 % und 44 % der Bohrstrecke und somit des Gesteins in die Homogenbereich F2 und F3 notwendig machen. Lokale Über-, bzw. Unterschreitungen dieser Anteile an Homogenbereich F2 und F3 können nicht ausgeschlossen werden. Zur Reduzierung dieser großen Spannweite kann der Hauptstollen in einen nördlichen und einen südlichen Abschnitt unterteilt werden. Die Grenze dieser Abschnitte liegt etwa nördlich des Abzweigs Nebenstollen VI. Für den südlichen Abschnitt liegt der Vergrusungsanteil nach den durchgeführten Aufschlüssen bei etwa 1 % bis 11 %, im nördlichen Abschnitt zwischen 12 % und 44 %. In den im südlichen Abschnitt des Hauptstollens gelegenen Aufschlußbohrungen existieren ebenfalls Vergrusungsbereiche mit Mächtigkeiten im Dezimeter- bis Meterbereich, allerdings kommen im starken Maße auch Zonen mit Mächtigkeiten zwischen 2 m und 10 m, seltener aber auch Vergrusungsbereiche von bis zu 25 m vor. In der KS BK 6 wurde zwischen ca. 285 mNN und 305 mNN auf etwa 20 m eine durchgängige Vergrusungs-/Schwächezone festgestellt. Hier ist das Gestein sehr stark vergrust und weist teilweise Lockergesteinscharakter (Sand/Kies) auf.

Aus großräumiger auftretenden Strukturen können in den für den südlichen Abschnitt des Hauptstollens relevanten Gebirgsabschnitten zwei Schwächezonengebiete (S-B104-B109, S-B104-A15) vermutet werden, die der Hauptkluftrichtung HKR 1 zuzuordnen sind. Die Schwächezonengebiete konnten in den Aufschlüssen mit Mächtigkeiten zwischen 4 m bis 12 m erkundet werden, von denen der überwiegende Teil jedoch dem Homogenbereich F2 zuzuordnen ist. Zusammenhängende Mächtigkeiten des Homogenbereiches F3 kamen bis zu 2,5 m vor. Auch hier sind Überschreitungen dieser aus den Aufschlußergebnissen abgeleiteten Mächtigkeiten nicht auszuschließen.

In dem nördlichen Abschnitt des Hauptstollens werden bis zu 8 Schwächezonengebiete postuliert. Diese sind nach ihrem Einfallen überwiegend der Hauptkluftrichtung HKR 1 (S-A11, S-A4-A23, S-B111, S-B7-A3-A23, S-A2-A3, S-A1-A2-A20) zuzuordnen. Daneben orientieren sich die vermuteten Schwächezonengebiete aber auch an der HKR 4 (S-B7-A10-A25) und der HKR 6 (S-B5-B6-B107).

Kapitel 11: Bautechnische Empfehlungen

Die Mächtigkeiten dieser abgeleiteten Schwächezonengebiete liegen zwischen 2 m und 16 m, wobei der Homogenbereich F2 überwiegt, der Homogenbereich F3 jedoch mit Mächtigkeiten bis zu 8 m auch relevant vertreten ist.

Eine erhöhte Gebirgsdurchlässigkeit bzw. erhöhter Bergwasserandrang ist in den Vergrusungszonen/Schwächezonebereichen nach den vorliegenden Untersuchungsergebnissen nicht zu erwarten.

Insgesamt wird der Bergwasserandrang im Hauptstollen Kavernenwasserspeicher als gering eingestuft.

11.4.3 Gebirgsspannungen

Zur Abschätzung der Primärspannungssituation im Gebirge im Umfeld des Hauptstollens Kavernenwasserspeicher können die Angaben in Kapitel 11.1.3 sinngemäß für Überlagerungsmächtigkeiten zwischen 125 m und 230 m übernommen werden. Für den Bereich der Nebenstollen ist zusätzlich eine Erhöhung der Vertikalspannungen aufgrund der Kammer/Pfeiler-Anordnung zu berücksichtigen (siehe Kapitel 11.2.3/Kapitel 11.3.3).

Für die Stollenabschnitte mit Überlagerungsmächtigkeiten <100 m ist davon auszugehen, dass die Horizontalspannungen durch die Topographie (Murgtal und Quertäler) beeinflusst werden.

11.4.4 Bauverfahren / Vortriebsverfahren

Das Auffahren des bergmännischen Vortriebs des Hauptstollens Kavernenwasserspeicher kann vollständig oder teilweise über das Portal an der Murg erfolgen. Aus bauleistungsrechtlicher Sicht kann es vorteilhaft sein, einen Gegenvortrieb über den geplanten Schutterstollen Nebenstollen aufzufahren, um schnellstmöglich eine durchgängige Zugänglichkeit des gesamten Hauptstollens Kavernenwasserspeicher und der daran anschließenden Nebenstollen von der Murgseite zu schaffen. Für den Bau des bergmännisch herzustellenden Abschnitts des Hauptstollens des Kavernenwasserspeichers wird aufgrund der Stollenquerschnittsgeometrie und der geotechnischen Eigenschaften des aufzufahrenden Gebirges aus tunnelbautechnischer Sicht ein zyklischer Vortrieb, vorzugsweise ein Sprengvortrieb empfohlen; abschnittsweise (z. B. in Vergrusungszonen) kann ggf. auch ein Bagervortrieb erforderlich werden. Ein Fräsvortrieb ist aufgrund der Gesteinsfestigkeit und Abrasivität des frischen oder gering verwitterten Granits nicht möglich bzw. wäre unwirtschaftlich. Eine Auffahrung mittels Tunnelvortriebsmaschine (TVM) scheidet wegen der variablen Stollenquerschnittsgeometrie, der kurzen Startbaugrube, der engen Kurvenradien im ersten Stollenabschnitt und der insgesamt vergleichsweise kurzen Stollenlänge (≤ 1.000 m) aus baubetrieblichen und wirtschaftlichen Gründen aus.

11.4.5 Aushubarbeiten / Vortriebsklassen / Felssicherung

Die zu durchörternden Gebirgsbereiche im Hauptstollen Kavernenwasserspeicher und die zu erwartenden Vortriebsklassen sind in der Anlage 2.1.4 dargestellt.

Die Firstüberdeckung sollte am Anschlagpunkt des bergmännischen Stollenvortriebs mindestens der lichten Weite des Hauptstollens (d. h. ca. 8 m) betragen, um die Ausbildung eines Stützgewölbes im Gebirge über dem bergmännischen Stollen zu ermöglichen. Alternativ kann die Stollenfirste bei geringerer Überlagerung mit Hilfe eines Rohrschirms, der eine Tragwirkung als Decke in Stollenlängsrichtung übernehmen muss, abgesichert werden. Dazu muss am Stollenportal ein gewölbeförmiges Auflager für den Rohrschirm geschaffen werden.

Bei einer Spritzbetonbauweise (Lösen durch Sprengen, ggf. Baggern) werden die Vortriebsklassen entsprechend Kapitel 3.2.1 der DIN 18312 (Allgemeine Vortriebsklassen) beschrieben. Aufgrund

Kapitel 11: Bautechnische Empfehlungen

der Einschätzung der Gebirgsverhältnisse wird erwartet, dass im frischen Granit (Homogenbereich F1) überwiegend die Vortriebsklasse VK4 gemäß DIN 18312 zur Anwendung kommen. In Schwächezonen mit stark zerlegtem Gebirge oder in Bereichen von Vergrusungszonen (Homogenbereiche F2 und F3) wird die Verwendung die Vortriebsklassen VK6 und ggf. VK7 gemäß DIN 18312 als sinnvoll angesehen. Werden die in der Bohrung KS BK 6 erkundeten Gebirgsverhältnisse auch beim Auffahren des Hauptstollens angetroffen, so sind Zusatzmaßnahmen zur Sicherung des Tunnelquerschnitts wahrscheinlich.

Bei einem Vortrieb mit Rohrschirmsicherung im Anfahrbereich käme ebenfalls VK6 oder gar VK7 zur Anwendung.

Aufgrund der Querschnittshöhe (lichte Höhe >8,9 m) ist eine Unterteilung des Ausbruchquerschnitts erforderlich.

Als reguläre Sicherungsmittel sind Felsdübel bzw. Felsanker (SN-Anker) und bewehrter Spritzbeton in Betracht zu ziehen. In den vermuteten Schwächezonebereichen kann es erforderlich werden, versagensgefährdete Stollenbereiche durch Vorspannanker oder Gewölbekonstruktionen aus Stahlbeton zu sichern.

Die durchgeführten Erkundungen zeigen ein häufiges, jedoch unregelmäßiges und ohne, bzw. sehr geringen Übergangsbereiche Auftreten von vergrusten Bereichen (Homogenbereiche F2/F3). Zur Absicherung einer ausreichenden Vortriebssicherung werden daher Vorerkundungen des Gebirges während des Vortriebs als sinnvoll erachtet. Dies könnte beispielsweise durch auf 10 m verlängerte Sprengbohrungen o. ä. erfolgen.

Aufgrund der erhöhten Gebirgsdrücke im Bereich des Kavernen-Stollensystems können sich ggf. zusätzliche Sicherungsmittel ergeben, aus denen sich ein erhöhter Sicherungsaufwand und ggf. eine Verschiebung der Vortriebsklassen um 1 Stufe nach oben ergeben.

Aufgrund des Trennflächengefüges ist beim Sprengvortrieb gefügebeeinflusster Mehrausbruch zu erwarten. Die Gefügeauswertung der Bohrungen KS BK 104 und KS BK 107 für den südlichen Abschnitt (Abb. 42) und der Bohrungen KS BK 6, KS BK 111, KS BK 7, KS BK 8 und KS BK 115 für den nördlichen Abschnitt des Hauptstollens (Abb. 43) zeigt, dass die dominierenden Kluftscharen HKR 1/HKR 2, und HKR 4 über die gesamte Länge des Hauptstollens vorherrschen; allerdings treten HKR 1/HKR 2 im Bereich der Nebestollen überwiegend mit einem Einfallen von 40° bis 70° Richtung Nordost auf, während sie Richtung Norden deutlich steiler (80° bis 85°) und Richtung Südwest einfallen. In beiden Bereichen treten die Hauptkluftrichtungen zusätzlich auch konjugiert auf. Daneben kommen untergeordnet als Hauptkluftrichtungen auch die HKR 5, HKR 6 und HKR 3 vor.

Kapitel 11: Bautechnische Empfehlungen

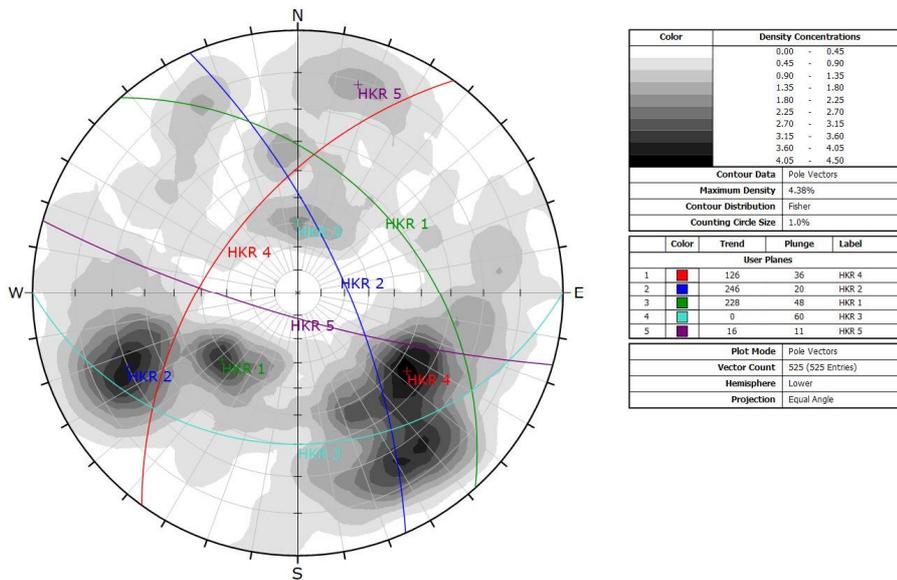


Abb. 42: Gefügedaten Hauptstollen Süd

Eine tabellarische Darstellung der Orientierung der relevanten Hauptkluftrichtungen ist der Tab. 59 zu entnehmen. Die Auflistungsreihenfolge in der Tabelle ist auf der aus den Bohrerergebnissen angetroffenen Häufigkeit/Anzahl der Hauptkluftrichtungen abgeleitet.

Tab. 59: Relevante Hauptkluftrichtungen mit Einfallrichtung und -winkel (Clar) Hauptstollen Süd

Hauptkluftrichtung	Einfallrichtung/-winkel nach Clar (max. Häufigkeit)	Relative Maxima Einfallrichtung [konjugierte Lagerung]	Relative Maxima Einfallswinkel [konjugierte Lagerung]
4	306 / 54	285 – 340 [150 – 160]	45 – 85 [70 – 85]
2	66 / 70	50 – 85 [250 – 270]	55 – 85 [70 – 80]
1	48 / 42	30 – 65 [240 – 250]	30 – 55 [50 – 60]
5	196 / 80	180 – 210	75 - 85
3	180 / 30	160 – 210	20 - 35
6	282 / 63	270 – 290	60 - 75

Kapitel 11: Bautechnische Empfehlungen

Bei Betrachtung der konjugierten Lagerung der HKR 1/HKR 2 im nördlichen Abschnitt (steilstehendes Einfallen vortriebstechnisch eher unkritisch) kann über die gesamte Länge des gerade verlaufenden Stollenabschnitt in etwa senkrecht bis stumpfwinklig zur Stollenachse des Hauptstollens Kavernenwasserspeicher streichen und im Mittel mit ca. 60° nach Ostnordosten einfallen. Dies bedeutet, dass sich beim Vortrieb von Nordost nach Südwest keilförmige Kluftkörper (gebildet durch die Verschneidung der Haupttrennflächen HKR 1/HKR 2 und der Trennflächenschar HKR 5 oder HKR 4) aus der Ortsbrust heraus lösen können. Um die potenzielle Keilhöhe und damit das zu sichernde Gebirgsvolumen möglichst gering zu halten, ist deshalb zu empfehlen, die Höhe der Abschlagsteilquerschnitte möglichst gering zu halten. Die Klufschar HKR 4 streicht nahezu parallel zur Stollenachse und fällt mit 50° bis 70° nach Nordwesten ein.

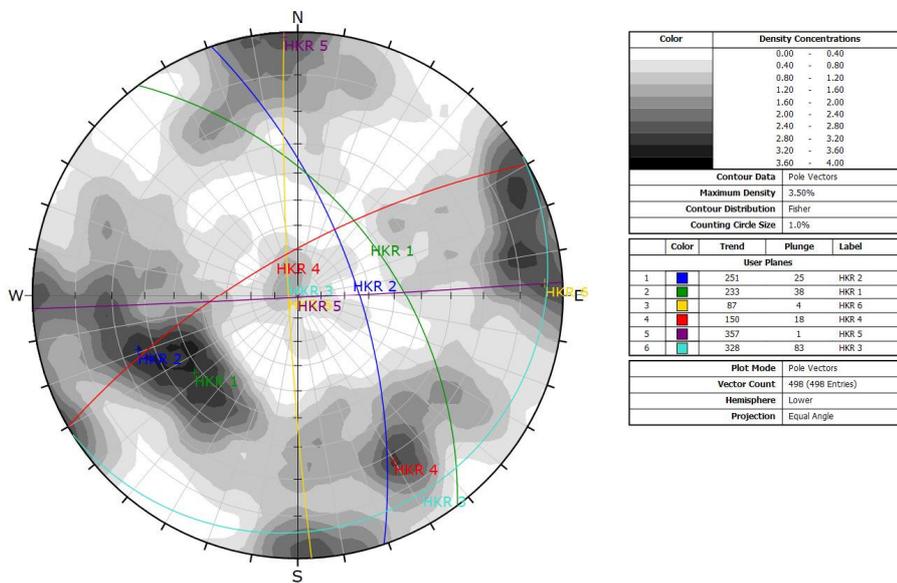


Abb. 43: Gefügedaten Hauptstollen Nord

Eine tabellarische Darstellung der Orientierung der relevanten Hauptkluftrichtungen ist der Tab. 60 zu entnehmen. Die Auflistungsreihenfolge in der Tabelle ist auf der aus den Bohrerergebnissen angetroffenen Häufigkeit/Anzahl der Hauptkluftrichtungen abgeleitet.

Tab. 60: Relevante Hauptkluftrichtungen mit Einfallsrichtung und -winkel (Clar) Hauptstollen Nord

Hauptkluftrichtung	Einfallsrichtung/-winkel nach Clar (max. Häufigkeit)	Relative Maxima Einfallrichtung [konjugierte Lagerung]	Relative Maxima Einfallswinkel [konjugierte Lagerung]
2	71 / 65	60 – 90 [250 – 270]	45 – 75 [75 – 90]
1	43 / 52	40 – 65 [230 – 265]	45 – 70 [75 – 90]
6	267 / 86	260 – 275	80 - 90
4	330 / 72	315 – 340 [140 – 160]	65 – 85 [65 – 80]
5	177 / 89	160 – 190	75 – 90
3	48 / 7	0 – 180	0 - 20

Der südliche Stollenabschnitt des Hauptstollens bis zum Ende der Nebenstollen wird nach Interpretation der Erkundungsergebnisse von zwei vermuteten Schwächezonen der Hauptkluftrichtung 1 durchzogen. Im nördlichen Abschnitt des Hauptstollens wird das Vorkommen von sechs weiteren HKR 1-orientierten Schwächezonebereichen vermutet, die teilweise durch ebenfalls vermutete HKR 4- und HKR 6-orientierten Schwächezonebereichen gekreuzt werden. Für die nordwestliche Ulme ergeben sich analog potenzielle Gleitkörper durch Verschneidung von Trennflächen der Hauptkluftrichtungen HKR 6 und HKR 1/HKR 2.

Im gekrümmten Stollenabschnitt sind aufgrund der wechselnden Stollenachsenrichtung andere Keilgeometrien möglich und wahrscheinlich. Außerdem ändern sich im Kurvenverlauf die Primärspannungsverhältnisse in Bezug auf den Stollenquerschnitt deutlich. Dem entsprechend sind die örtlich wechselnden geometrischen und statischen Randbedingungen im Zuge der Detailplanungen näher zu untersuchen, um ein möglichst durchgängiges und einheitliches Sicherungssystem zu den zu erwartenden Vortriebsklassen zu erarbeiten.

In vergrusten oder durch engständige Klüftung stark zerlegten Gebirgsbereichen kann ggf. eine weitere Unterteilung des Ausbruchsquerschnitts aus gebirgsmechanischer Sicht erforderlich werden (A-Unterklassen der VK4 bis VK7 gemäß DIN 18312).

11.4.6 Bauzeitliche Entwässerung

Das im Zuge des Stollenaushubs zutretende Bergwasser ist zu fassen und über eine entsprechend dem Vortriebsstand nachgeführte Bauwasserhaltung (zweckmäßigerweise als Sohlkanal im Tiefpunkt des Ausbruchsquerschnitts angeordnet) zu einem bauzeitlichen Auffangbehälter im Tiefpunkt des Vortriebsbereichs abzuleiten. Von dort kann das Wasser in einer Druckleitung aus dem Vortriebsbereich herausgepumpt, in einer Aufbereitungsanlage entsprechend den Auflagen der Behörden aufbereitet und in den behördlich genehmigten Vorfluter eingeleitet werden. Da der Hauptstollen Kavernenwasserspeicher voraussichtlich von der Murg her mit fallender Gradienten aufgeföhren wird, sind Sammelbecken, aus denen das Wasser zutage gepumpt wird, in baubetrieblich sinnvollen Abständen anzuordnen.

Kapitel 11: Bautechnische Empfehlungen

Die geohydraulische Situation im Hauptstollen Kavernenwasserspeicher wird gemäß aktuellem Kenntnisstand so eingeschätzt, dass bevorzugt im Stolleneingangsbereich mit geringer Überlagerung sowie in den zu erwartenden Schwächezonen/Kluftzonen Wasserzutritte zu erwarten sind, insgesamt aber beim Ausbruch des Stollens nur vergleichsweise geringe Wassermengen (im Mittel ≤ 12 l/s) anfallen werden.

Sofern beim Vortrieb stark wasserführende Großklüfte, Schwächezonen- und Zerrüttungszonen angeschnitten werden, sind die Wasserzutritte durch Abschlauchungen u. ä. gezielt zu fassen, um baubetriebliche Erschwernisse durch Wasser zu vermeiden und die erforderlichen gebirgsmechanischen Sicherungsmaßnahmen zu erleichtern. Auch wenn die Wasserzutritte nach gewisser Zeit versiegen sollten, sind sie funktionsfähig zu erhalten und zu kartieren. Auf der Grundlage der Kartierung und der erhobenen Abflussmessdaten ist nach Vortriebsende ein gesamtheitliches Konzept für die Behandlung der wasserführenden Klüfte und Kluftzonen im Hinblick auf den Betrieb des Kavernenwasserspeichers zu erstellen.

11.4.7 Ausbau der Stollenabschnitte

Für den bergmännisch aufzufahrenden Stollenabschnitt des Hauptstollens Kavernenwasserspeicher ist gemäß aktueller Planung kein Ausbau in Form einer statisch wirksamen Innenschale vorgesehen und im Bereich des frischen bzw. gering verwitterten Granits (Homogenbereich F1) aus felsmechanischer Sicht im Allgemeinen auch nicht erforderlich.

In den Stollenabschnitten, in denen der Granit stark verwittert bzw. in vergruster Form ansteht und dem zufolge der Zerlegungsgrad groß, die Kluftabstände klein sind und das Korngefüge des Gesteins geschwächt ist (Homogenbereich F2/F3), wird empfohlen, die ohnehin für die Vortriebsicherung erforderliche Spritzbetonschale zu einer permanenten Sicherung der Stollenlaibung auszubauen:

- a) zur Vermeidung des allmählichen Herauslösen von losen Kluftkörpern im Firstbereich allein durch Schwerkraft
- b) zur Sicherung des Gebirges gegen Strömungsdruck z. B. bei Absenkung des Stauspiegels
- c) als "Erosionsschutz" bei Wasserbewegungen und Luftströmungen im Stollen selbst

Des Weiteren wird empfohlen, die bei Entleerungsvorgängen durch fließendes Wasser im Hauptstollen stärker beanspruchten Bereiche (z. B. Sohlbereich, Einmündung der Nebenstollen, Zulaufbauwerk am Ende des Hauptstollens Kavernenwasserspeicher, sowie im Kurvenbereich) mit einem "Erosionsschutz" zu versehen.

Die Sicherung kann mit Hilfe von bewehrtem Spritzbeton in Verbindung mit Felsnägeln erfolgen. Zur Vermeidung des Aufbaus eines äußeren Wasserdrucks werden rasterförmig angeordnete Perforationen der Spritzbetonschale als sinnvoll angesehen.

Des Weiteren wird empfohlen, den bergmännischen Stollenabschnitt, in dem die B462 unterfahren wird, mit einer statisch bemessenen Stahlbeton-Innenschale auszukleiden.

11.4.8 Bemessungswasserspiegel

Wie die Nebenstollen des Kavernenwasserspeichers ist auch der Hauptstollen als hydraulisch offenes System geplant, d. h. der Wasserspiegel im Stollen kommuniziert mit dem Gebirgswasser. Grundsätzlich wirkt der Stollen als Drainage für das Bergwasser und es findet eine Wasserströmung über Klüfte in Richtung des Stollens statt. In Abhängigkeit vom Füllzustand des Stollens

Kapitel 11: Bautechnische Empfehlungen

kann es im Nahbereich aber auch zu einer Infiltration in das Gebirge und damit zu einer Umkehr der Strömungsrichtung kommen. Dort, wo der Hauptstollen aus tunnelstatischen und gebirgsmechanischen Gründen (zumindest abschnittsweise) mit einer Auskleidung versehen werden muss, ist der Ausbau hydraulisch durchlässig zu gestalten, um den Aufbau eines äußeren Wasserdrucks zu vermeiden. Demzufolge ist der höchste Füllstand des Hauptstollens Kavernenwasserspeicher (301,60 mNN) als Bemessungswasserspiegel für den Hauptstollen Kavernenwasserspeicher zu betrachten. Für gebirgsmechanische Berechnungen unter Berücksichtigung großräumiger Strömungsvorgänge sind differenzierte Betrachtungen erforderlich.

Das Auslaufbauwerk ist zusätzlich auf den maximalen Stauspiegel des Wehres des Ausgleichsbeckens in der Murg zu bemessen.

11.4.9 Auslaufbauwerk

11.4.9.1 Geologische und hydrogeologische Situation

Im Mündungsbereich des Hauptstollens an der Murg stehen nach den durchgeführten Erkundungen KS BK 10, KS BK 116H und KS BK 115S sowie den geophysikalischen Profilen GP104/1 und GP104/2 mächtige quartäre Ablagerungen (überwiegend grobkörnige Bodengruppen mit vermutlich Stein- und Block-Anteilen) an. Diese werden hangseitig von Hangschutt (Homogenbereich Q1) gebildet, die jedoch mit Beginn der Verebnung durch Murgschotter (Homogenbereich Q1) überlagert werden. Der darunter anstehende Forbach-Granit ist durch eine von der Geländeoberfläche ausgehende, durch Gebirgsentspannung und Wettereinflüsse bedingte Verwitterung und Entfestigung gekennzeichnet und dem Homogenbereich F2 zuzuordnen. Dies betrifft auch die ersten bergmännisch aufzufahrenden Stollenmeter unterhalb der B462. Hier ist ebenso mit höherer Gebirgsdurchlässigkeit zu rechnen.

Die aus den Erkundungen abgeleiteten Baugrundverhältnisse sind in der Anlage 2.1.15 dargestellt.

11.4.9.2 Bauverfahren

Aufgrund der topografischen Situation werden die ersten ca. 30 m des Hauptstollens Kavernenwasserspeicher (= Auslaufbauwerk) in offener Bauweise erstellt werden müssen. Der Aushub der Baugrube kann voraussichtlich überwiegend mechanisch mittels Bagger durchgeführt werden. Die dabei zu erwartenden Homogenbereiche sind in dem vorherigen Kapitel bereits beschrieben worden. In diesem Abschnitt liegt die Stollenfirse etwa höhengleich mit der Werkstraße des Rudolph-Fettweis-Werks. Als Anschlagpunkt für den bergmännisch aufzufahrenden Stollenabschnitt bietet sich generell die Stützwand bzw. Steilböschung neben der Werkstraße unterhalb der B462 an. Diese wird nach den Erkundungsergebnissen jedoch auf den ersten 8 m bis 10 m noch aus Hangschutt aufgebaut. Entsprechend muss der Portalbereich entweder deutlich in Richtung B462 verschoben werden oder aber die Anschüttungen mit entsprechende Sicherungsmitteln verbessert werden.

11.4.9.3 Aushubarbeiten / Felssicherung

Zur Herstellung der Baugrube für das Auslaufbauwerk sind zwei parallele Baugrubenwände aus überschrittenen Bohrpfahlreihen geeignet, die ggf. auch als äußere Schalung für die Rahmenwände des Auslaufbauwerks dienen können. Die Bohrpfähle müssen so tief in kompakten Granit einbinden, dass vertikale und horizontale Lasten (Erd- und Wasserdruck) ausreichend sicher in den Baugrund abgetragen werden können. Andere Verbaumethoden (Spunddielen, DSV-Säulen, etc. sind prinzipiell möglich, müssten für eine wahrscheinlich notwendige Einbindung in den Fels jedoch flächig vorgebohrt werden).

Kapitel 11: Bautechnische Empfehlungen

Die Begrenzung und wasserdichte Absperrung der Baugrube gegenüber der Murg kann z. B. durch einen Fangedamm erreicht werden, welcher wasserdicht an die beiden Baugrubenwände anschließt. Je nach abzusichernder Wasserhöhe, Überdeckung des Felshorizontes mit Lockergestein und Ausbildung der Baugrube sind alternative Sicherungen z. B. mit DSV-Säulen, ausgesteiften Spunddielen, BigPacks (Teilabdichtung) mit baugrubenseitiger Wasserhaltung oder aber eine vollständige Umschließung der Baugrube mittels Bohrpfählen incl. späteren Rückbau möglich.

Die westliche (bergseitige) Stirnwand der Baugrube wird voraussichtlich im Bereich der bestehenden Stützwand am Böschungsfuß zu liegen kommen. Dazu muss die Stützwand (z. B. mittels Spritzbeton und Mikropfählen/Felsnägel) ertüchtigt und/oder unterfangen oder gar bauzeitlich abgebrochen werden. Im Schutz der Baugrubenwände und des Fangedamms kann der Aushub des anstehenden Lockergesteins und des Granits abschnittsweise erfolgen, wobei der erste Aushubabschnitt nach vollständigem Aushub mit einer Hilfsbrücke überspannt wird, so dass jederzeit eine ungehinderte Werkszufahrt zum Rudolph-Fettweis-Werk sichergestellt ist.

Im Zuge des Aushubs und der restlichen Bauzeit ist eine Wasserhaltung in der Baugrube vorzuhalten. Ggf. ist der anstehende Granit durch Injektionen im Fußbereich der Bohrpfähle oder im Baugrubensohlbereich zu behandeln, um die Zuströmung von Grund- oder Flusswasser in die Baugrube gering zu halten oder aber durch die Herstellung einer ggf. gegen Auftrieb zu sichernden Unterwasserbetonsohle stark zu begrenzen.



Abb. 44: Hauptstollen Kavernenwasserspeicher - Mündungsbereich (= Überlappungsbereich des linken und rechten Fotos)

Das in offener Baugrube zu errichtende Auslaufbauwerk wird als geschlossener Rechteckrahmen aus Stahlbeton ausgebaut, ggf. können die Verbauelemente in das eigentliche Bauwerk einbezogen und berücksichtigt werden. Die Decke des Rahmens muss auf die Verkehrslasten durch den Werkbetrieb (hierzu gehören auch Schwerlast-Transporte) bemessen werden.

Die Gründung des Rahmens kann nach den durchgeführten Erkundungen teilweise in quartären Lockergesteinen und ggf. teilweise auch im anstehenden Felsgestein erfolgen. Sollte lokal Granit im Bereich der Gründungssohle anstehen, so müssen die unterschiedlichen Boden-, bzw. Felsei-

Kapitel 11: Bautechnische Empfehlungen

enschaften bzgl. ihres Verformungsverhalten berücksichtigt werden. Entweder sollte die Bauwerkssohle für eine entsprechende Lastaufnahme dimensioniert werden, oder aber es sollte zur Vermeidung von Steifigkeitssprüngen und Reduzierung der Bettungssteifigkeit im Granit sowohl im Fels als auch im Lockergestein ein Bodenaustausch in der Stärke von 1 m bis 1,5 m mit einem weit gestuften, gut verdichtbaren Sand-Kies-Korngemisch (GW-GI nach DIN 18196) vorgesehen werden. Dies erfordert allerdings einen seitlichen Überstand des Gründungspolsters über die Außenkante der Gründungsplatte des Rahmenbauwerks in der Größe der Bodenaustauschmächtigkeit. Dieser Aufbau muss innerhalb der Baugrube Platz finden.

11.4.9.4 Bauzeitliche Entwässerung

Für die Baugrube des Portalgebäudes und des begehbaren Kabelkanals ist eine Tagwasserhaltung vorzusehen. Zusätzlich zu dem anfallenden Tagwasser ist diese auf Restwasser durch Umläufigkeiten/Undichtigkeiten der Baugrubenbegrenzungen zu dimensionieren.

11.4.9.5 Bemessungswasserspiegel

Im Bereich der Murgschotter korrespondiert der Wasserspiegel stark mit den Wasserständen im vorhandenen Staubecken. Entsprechend ist hier als Bemessungswasserstand das höchste Einstauniveau anzusetzen.

11.5 Zufahrtsstollen Kraftwerkskaverne (Unterstufe)

11.5.1 Bauwerksdaten

Die maßgebenden Bauwerksdaten zum Zufahrtsstollen der Kraftwerkskaverne entsprechend dem aktuellen Planungsstand sind in Tab. 61 zusammengestellt.

Tab. 61: Bauwerksdaten Zufahrtsstollen Kraftwerkskaverne

Niveau Fahrbahn Stolleneingang	305,00 mNN
Niveau Fahrbahn Kavernenteil Schwarzenbachwerk	271,90 mNN
Stollenlänge	578 m
Gradientenneigung	1,7 % / 0 % / 10,4 %
Lichte Höhe (ohne Zwischendecke)	ca. 7,0 m
Lichte Weite	ca. 6,0 m
Ausbruchsquerschnitt	ca. 42 m ²
Minimale / maximale Gebirgsüberdeckung	ca. 5 m / ca. 250 m

Die Lage des Zufahrtsstollens Kraftwerkskaverne ist im Übersichtslageplan der Anlage 1.1 dargestellt. Dem entsprechend kommt der Eingang des Zufahrtsstollens im bestehenden Werksgelände des Rudolf-Fettweis-Werks zwischen dem Verwaltungsgebäude und dem Maschinenhaus zu liegen. Der Zufahrtsstollen verläuft nach kurzer Eingangsstrecke unter der B462 zunächst in östlicher Richtung und biegt zwischen Station ca. 40 m und Station ca. 80 m in südwestliche Richtung ab. Dabei löst sich die Achse des Zufahrtsstollens von der anfangs parallel verlaufenden Achse des Energieableitungsstollens, welcher in der Parallelstrecke mit verkleinertem Querschnitt (als begehbare Kabelkanal) unterhalb des Zufahrtsstollens zu liegen kommt.

Der Zufahrtsstollen stellt die direkte Verbindung zwischen dem Portalgebäude an der Murg und dem Kavernenteil Schwarzenbachwerk und dem Kavernenteil Transformatoren dar. Der Zufahrtsstollen wird bauzeitlich als Auffahrstollen, Schutterweg und Belüftungsquerschnitt für den Bau der Kaverne verwendet.

Kapitel 11: Bautechnische Empfehlungen

Im Endzustand wird der Zufahrtsstollen als Transportzugang für das Kraftwerk und zur Be- und Entlüftung der unterirdischen Betriebsanlagen sowie als Flucht- und Rettungsweg genutzt.

Im Bereich der Unterfahrung der B462 beträgt die Überdeckung der Stollenfirste ca. 13 m. Abb. 45 zeigt den Regel- und Sonderquerschnitt des Zufahrtsstollens.

Der unmittelbare Portalbereich wird im Kapitel 11.12.3 näher beschrieben und im Längsschnitt der Anlage 2.1.16 dargestellt.

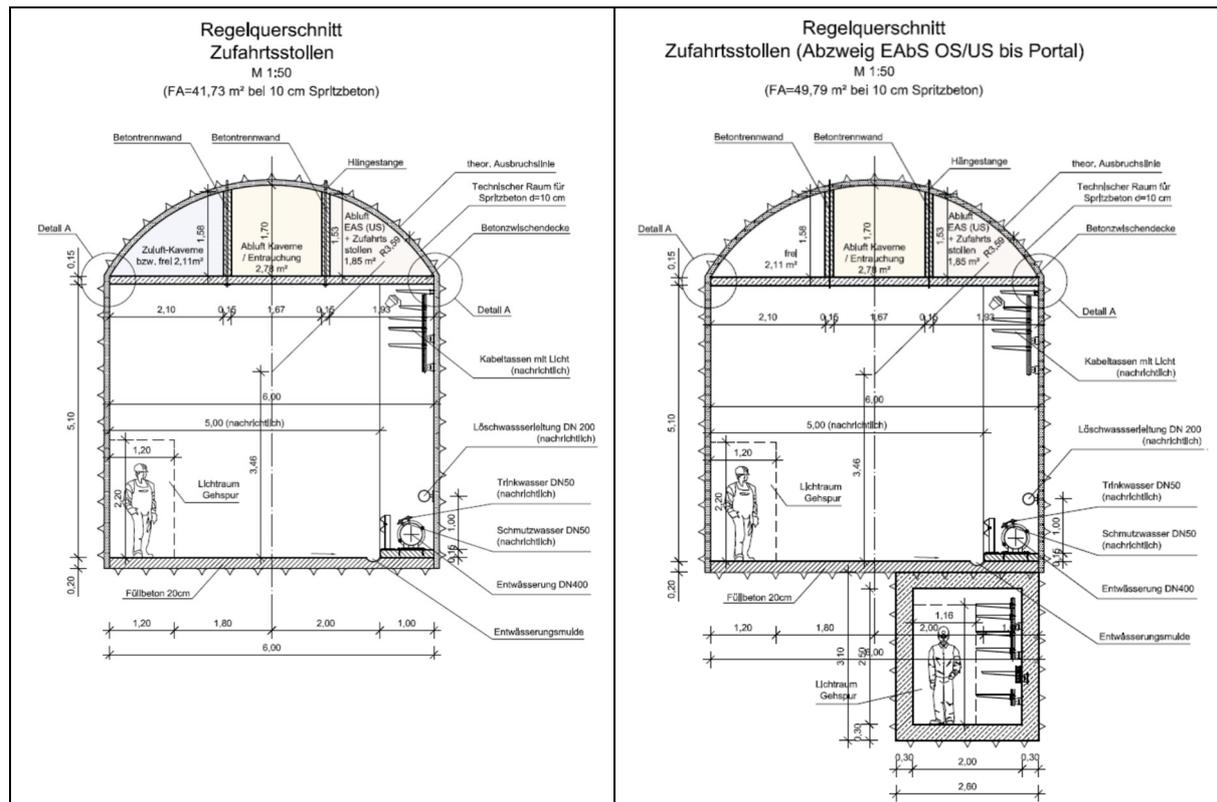


Abb. 45: Zufahrtsstollen Regelquerschnitt und Sonderquerschnitt im Eingangsbereich

11.5.2 Geologische und hydrogeologische Situation

Zur Beschreibung der geologischen und hydrogeologischen Verhältnisse im Bereich des Zufahrtsstollens wurde auf die Aufschlussresultate der Bohrungen KS BK 101, KS BK 102, KS BK 107, KS BK 5 und KS BK 104 herangezogen werden. Die Aufschlussresultate der vor bezeichneten Bohrungen sind in Kapitel 4 zusammengestellt, die Aufschlussprofile sind in der Anlage 3 zu finden. Eine Beschreibung der geologischen und hydrogeologischen Situation im Bereich des Zufahrtsstollens ist in den Kapiteln 5 und 6 sowie in Kapitel 10 enthalten. Die felsmechanische Charakterisierung der beim Bau zu durchörternden Gesteine ist im Kapitel 9 zu finden. Der ingenieur- und hydrogeologische Längsschnitt durch den Zufahrtsstollen mit tunnelbautechnischen Bewertungsband ist in der Anlage 2.1.5 dargestellt.

Dem entsprechend ist davon auszugehen, dass der Zufahrtsstollen überwiegend im frischen bis angewitterten Forbach-Granit des Homogenbereiches F1 aufzufahren sein wird. Dieser besitzt im Allgemeinen eine hohe Gesteins- und Gebirgsfestigkeit (siehe Kapitel 9), Allerdings ist abschnitts-

Kapitel 11: Bautechnische Empfehlungen

weise mit stärker tektonisch beanspruchten und durch hydrothermale Alteration vergrustem Gebirge zu rechnen; entsprechend weisen die Vergrusungszonen einen geringeren Trennflächenabstand und einen höheren Verwitterungsgrad auf, was mit einer Verringerung der Gebirgsfestigkeit und mit einer Einstufung in die Homogenbereiche F2 und F3 einher geht. Konnten diese Vergrusungszonen bzgl. ihrer Ausbildung und Trennflächenorientierungen über mehrere Aufschlüsse hinweg nachverfolgt werden, wurden sie als großräumiger auftretende Schwächezonenbereiche interpretiert. Die Existenz dieser Schwächezonenbereiche konnte anhand der durchgeführten Erkundungen nachgewiesen werden, deren genaue Lage, Verlauf und Ausbildung durch das Gebirge jedoch nicht. Entsprechend stellen die in der Anlage 2.1.5 dargestellten Schwächezonenbereiche lediglich eine aus den vorliegenden Ergebnissen abgeleitete Interpretation und keine im unmittelbaren Bauwerksbereich nachgewiesenen Schwächezonen dar.

In dem für die Beurteilung des für den Zufahrtsstollen relevanten Gebirgsabschnitts wurden in sämtlichen Erkundungsbohrungen Vergrusungszonen angetroffen, aus denen sich ein Anteil der Homogenbereiche F2 und F3 zwischen 1 % und 15 % ableitbar ist, sich jedoch durch die geringere Überdeckung im Portalbereich und der Lage des Stollens auch noch höhere Anteile wahrscheinlich sind. In den Aufschlußbohrungen liegen die Vergrusungsbereiche überwiegend in Mächtigkeiten im Dezimeter- bis zu Meterbereich vor, vereinzelt können jedoch auch Mächtigkeiten von 2 m bis 6 m auftreten.

Aus den entwickelten großräumigeren Strukturen lassen sich im Zufahrtsstollen fünf Schwächezonenbereiche vermuten, von denen drei (S-A1-A2-A20, S-B9-B107, S-B104-A15) der HKR 1 sowie jeweils eine der HKR 6 (S-B5-B6-B107) und eine der HKR 4 (S-G103-A5) zuzuordnen sind. Die Schwächezonenbereiche konnten in den Aufschlüssen mit Mächtigkeiten zwischen 1 m und 11 m erkundet werden, von den der überwiegenden Teil jedoch dem Homogenbereich F2 zuzuordnen ist. Zusammenhängende Mächtigkeiten des Homogenbereiches F3 lagen zwischen 0,5 m und 8 m. Auch hier sind Überschreitungen dieser aus den Aufschlußergebnissen abgeleiteten Mächtigkeiten nicht auszuschließen.

Eine erhöhte Gebirgsdurchlässigkeit bzw. erhöhter Bergwasserandrang ist außerhalb der Zone der oberflächennahen Hangentspannung in den Vergrusungszonen nach den vorliegenden Untersuchungsergebnissen nicht zu erwarten.

Die Gebirgsdurchlässigkeit wird generell als gering eingestuft.

Gemäß Anlage 2.1.5 ist davon auszugehen, dass der Zufahrtsstollen vollständig im Forbach-Granit aufzufahren sein wird. Lediglich im Portalbereich (Kapitel 11.12.3) ist mit quartären Lockergesteinen zu rechnen. Es wird erwartet, dass die Unterfahrung der B462 bereits im Forbach-Granit erfolgt, der in diesem Bereich aufgrund der geringen Überlagerung stärker zerlegt und verwittert ist als in den tiefer liegenden Stollenabschnitten. Dem zufolge ist im Stolleneingangsbereich auch ein höherer Wasserandrang zu erwarten. In den tiefer liegenden Stollenabschnitten ist allgemein ein geringer Bergwasserandrang im Bereich des Zufahrtsstollens zu erwarten. Lokal kann entlang von Großklüften und Zerrüttungszonen stärkerer Wasserzulauf auftreten.

Im Forbach-Granit sind Aplit-Gänge vorhanden, die überwiegend an der rheinischen Hauptkluftrichtung (HKR 6 bzw. HKR 4) orientiert sind und steil in östliche Richtung einfallen. Dezimeter- bis meterbreite Aplit-Gänge wurden auch in den Erkundungsbohrungen aufgeschlossen. Aufgrund der vorliegenden Aufschlussergebnisse stellen die Aplit-Gänge bzw. die Kontaktflächen zum Granit keine geomechanisch relevanten Diskontinuitäten dar.

11.5.3 Gebirgsspannungen

Zur Abschätzung der Primärspannungssituation im Gebirge im Umfeld des Zufahrtsstollens können die Angaben in Kapitel 11.1.3 sinngemäß für Überlagerungsmächtigkeiten zwischen 100 m und 250 m übernommen werden.

Für die Stollenabschnitte mit Überlagerungsmächtigkeiten <100 m ist davon auszugehen, dass die Horizontalspannungen (Betrag und Richtung) durch die Topographie (Murgtal und Quertäler) beeinflusst werden.

11.5.4 Bauverfahren / Vortriebsverfahren

Für den Vortrieb des Zufahrtsstollens kommt aufgrund der Stollenquerschnittsgeometrie und der geotechnischen Eigenschaften des aufzufahrenden Gebirges aus tunnelbautechnischer Sicht ein zyklischer Vortrieb, vorzugsweise ein Sprengvortrieb, im Stolleneingangsbereich ggf. auch ein Bagervortrieb in Betracht. Ein Fräsvortrieb ist aufgrund der Gesteinsfestigkeit und Abrasivität des frischen oder gering verwitterten Granits nicht möglich bzw. wäre unwirtschaftlich.

Der Vortrieb des Zufahrtsstollens erfolgt im Eingangsbereich unter der B462 (bis ca. Station 60 m) mit einem Gefälle 1,7 % nach Westen; es schließt sich eine Stollenstrecke von ca. 210 m Länge auf gleichbleibendem Höhenniveau bis zum Kreuzungspunkt mit den Schutterstollen an. Der Rest des Zufahrtsstollens wird bis zum Erreichen des Turbinenflur-Niveaus in der Krafthauskaverne bei Station 587 mit einem Gefälle von 10,4 % aufgefahren. Aufgrund der Querschnittshöhe von ca. 7,20 m ist eine Unterteilung des Ausbruchquerschnitts in einen Kalottenvortrieb mit nachlaufendem Strossenvortrieb/Sohlausbruch zweckmäßig.

Im ersten Abschnitt, in dem der Energieableitungsstollen parallel unterhalb des Zufahrtsstollens zu liegen kommt, erfolgt der Aushub für den Energieableitungsstollen (begehrbarer Kabelkanal) als zusätzlicher Teilquerschnitt von der Sohle des Zufahrtsstollens.

11.5.5 Aushubarbeiten / Vortriebsklassen / Felssicherung

Bei einer Spritzbetonbauweise (Lösen durch Sprengen, ggf. Baggern) werden die Vortriebsklassen entsprechend Kapitel 3.2.1 der DIN 18312 (Allgemeine Vortriebsklassen) beschrieben. Aufgrund der Einschätzung der Gebirgsverhältnisse wird erwartet, dass in den Granitstrecken überwiegend die Vortriebsklasse VK4, teilweise auch VK3 gemäß DIN 18312 gefahren werden kann. Im Bereich von Vergrusungszonen und im Stolleneingangsbereich kann auch die Vortriebsklasse VK6 oder VK7, erforderlich werden. Im Bereich der Unterfahrung der Bundesstraße B462 können zusätzliche Sicherungsmaßnahmen (Rohrschirme o. ä.) notwendig werden (siehe Kapitel 11.12.3).

Der Zufahrtsstollen wird voraussichtlich vollständig im Forbach-Granit aufgefahren. Aufgrund des Trennflächengefüges ist beim Sprengvortrieb gefügebeeinflusster Mehrausbruch zu erwarten. Dies gilt vor allem für oberflächennahe Stollenabschnitte, in denen das Gebirge durch Hangentspannung aufgelockert ist, sowie für Schwäche- und Vergrusungszonen, die zu durchfahren sind. Hier können sich durch engständige Klüftung Klufkörper bilden, die bevorzugt im Kalottenbereich in den (noch) ungesicherten Abschlag hineinfallen oder -gleiten und zu Mehrausbruch führen können. Generell ist aufgrund der größeren Klufabstände und der hohen Festigkeit des frischen Granits gefügebeeinflusster Mehrausbruch weniger häufig zu erwarten als in Schwächezonebereichen.

Eine Abschätzung der möglichen und bevorzugt zu erwartenden Gleitkeile und potenziellen Ablöseflächen beim Vortrieb ist durch eine geotechnische Trennflächenanalyse mit Hilfe der Lagenkugel möglich (siehe Abb. 46). Geht man davon aus, dass das Gefügediagramm repräsentativ für das Granitgebirge im Bereich des Zufahrtsstollens ist, wird deutlich, dass die Hauptkluftrichtungen HKR

Kapitel 11: Bautechnische Empfehlungen

1 (HKR 2), HKR 4 und HKR 6 in den Erkundungsbohrungen stark vertreten sind. Die HKR 5 und HKR 3 wurden weniger häufig angetroffen. Im Kreuzungsbereich zwischen dem Zufahrtsstollen und den beiden Schutterstollen (Sst Zufahrtsstollen und Sst Nebenstollen) laufen mehrere vermutete Schwächezonbereiche zusammen. Auf Grund der unterschiedlichen Orientierung der Schwächezonen und den in unmittelbarer Umgebung wirkenden Spannungumlagerungen der Stollenverzweigungen können lokal ungünstige Kluffkonstellationen zur Ablösung größerer Kluffkörper führen.

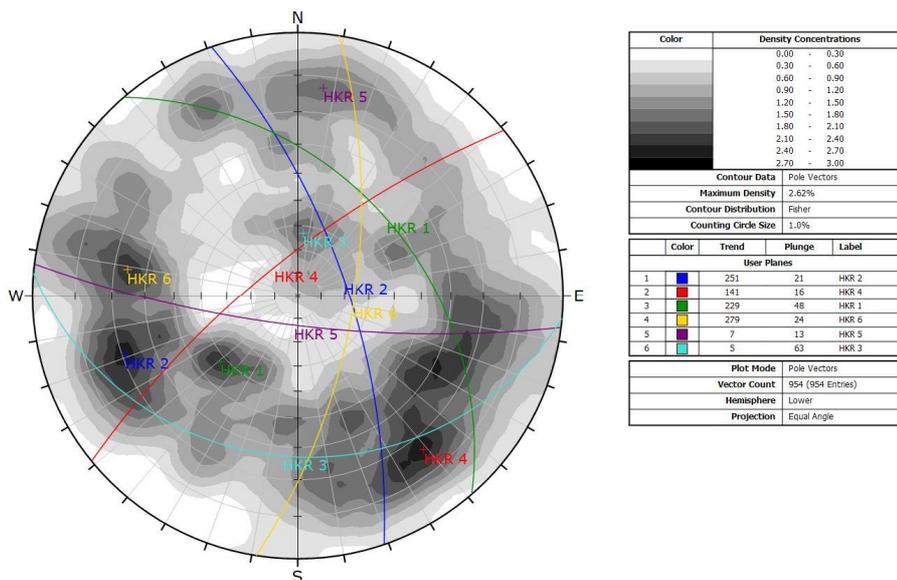


Abb. 46: Gefügedaten Zufahrtsstollen

Eine tabellarische Darstellung der Orientierung der relevanten Hauptkluftrichtungen ist der Tab. 62 zu entnehmen. Die Auflistungsreihenfolge in der Tabelle ist auf der aus den Bohrergebnissen angetroffenen Häufigkeit/Anzahl der Hauptkluftrichtungen abgeleitet.

Tab. 62: Relevante Hauptkluftrichtungen mit Einfallsrichtung und -winkel (Clar) Zufahrtsstollen

Hauptkluftrichtung	Einfallsrichtung/-winkel nach Clar (max. Häufigkeit)	Relative Maxima Einfallrichtung [konjugierte Lagerung]	Relative Maxima Einfallswinkel [konjugierte Lagerung]
2	71 / 69	50 – 90	55 - 85
4	321 / 74	275 - 345	50 - 85
1	49 / 42	15 – 70	30 - 55
6	99 / 66	85 – 115	55 - 85
5	187 / 77	170 – 210	70 - 85
3	185 / 27	160 – 215	15 - 40

Kapitel 11: Bautechnische Empfehlungen

Zu beachten ist, dass die im Granit vergleichsweise häufig festgestellten Aplit-Gänge eine Raumstellung entsprechend der Gefügefläche HKR 6 auch HKR 4 (siehe Kapitel 5.3.2) aufweisen und demzufolge überwiegend parallel bis spitzwinklig zur Stollennachse orientiert sind. Größere Aplit-Gänge sind in der geologischen Karte dokumentiert. Dezimeter- bis meterbreite Aplit-Gänge wurden auch in den Erkundungsbohrungen aufgeschlossen. Aufgrund der vorliegenden Aufschlussergebnisse stellen die Aplit-Gänge bzw. die Kontaktflächen zum Granit keine geomechanisch relevanten Diskontinuitäten dar.

Um rechtzeitig ungünstige felsmechanische Konfigurationen (z. B. Vergrusungszonen und/oder standsicherheitsgefährdende Trennflächen) zu erkennen und geeignete Maßnahmen ergreifen zu können, ist eine ständige und sorgfältige felsmechanische Kartierung aller laufenden Vortriebe und die zeitnahe Erstellung/Aktualisierung der Gebirgsmodelle erforderlich.

Die durchgeführten Erkundungen zeigen ein häufiges, jedoch unregelmäßiges und ohne, bzw. sehr geringen Übergangsbereiche Auftreten von vergrusten Bereichen (Homogenbereiche F2/F3). Zur Absicherung einer ausreichenden Vortriebssicherung werden daher Vorerkundungen des Gebirges während des Vortriebs als sinnvoll erachtet. Dies könnte beispielsweise durch auf 10 m verlängerte Sprengbohrungen o. ä. erfolgen.

11.5.6 Bauzeitliche Entwässerung

Das im Zuge des Stollenausbruchs zutretende Bergwasser ist zu fassen und über eine entsprechend dem Vortriebsstand nachgeführte Bauwasserhaltung (zweckmäßigerweise als Sohlkanal im Tiefpunkt des Ausbruchquerschnitts angeordnet) zu einem bauzeitlichen Auffangbehälter im Tiefpunkt des Vortriebsbereichs abzuleiten. Von dort kann das Wasser in einer Druckleitung aus dem Vortriebsbereich herausgepumpt, in einer Aufbereitungsanlage entsprechend den Auflagen der Behörden aufbereitet und in den behördlich genehmigten Vorfluter eingeleitet werden. Da der Stollen hinter dem Kreuzungspunkt mit den Schutterstollen mit fallender Gradienten aufgeföhren wird, sind Sammelbecken, aus denen das Wasser zutage gepumpt wird, in baubetrieblich sinnvollen Abständen anzuordnen.

Die geohydraulische Situation im Zufahrtsstollen wird gemäß aktuellem Kenntnisstand so eingeschätzt, dass bevorzugt im Stolleneingangsbereich mit geringer Überlagerung sowie in den zu erwartenden Schwächezonen/Kluftzonen Wasserzutritte zu erwarten sind, insgesamt aber beim Ausbruch des Zufahrtsstollens nur vergleichsweise geringe Wassermengen (im Mittel ≤ 12 l/s) anfallen werden.

Sofern beim Vortrieb stark wasserführende Großklüfte, Schwächezonen - und Zerrüttungszonen angeschnitten werden, sind die Wasserzutritte durch Abschlachungen u. ä. gezielt zu fassen, um baubetriebliche Erschwernisse durch Wasser zu vermeiden und die erforderlichen gebirgsmechanischen Sicherungsmaßnahmen zu erleichtern. Sofern ergiebige Wasserzutritte nicht nach kurzer Zeit versiegen, wird empfohlen, die Zuläufe mittels Injektionsbohrungen zu reduzieren. Die Injektionsbohrungen, Injektionsmengen und Veränderungen der Schüttungen sind zu dokumentieren. Auf der Grundlage dieser Daten ist dann zeitnah ein gesamtheitliches Konzept für die Behandlung der wasserführenden Klüfte und Kluftzonen im Hinblick auf den Betrieb des Zufahrtsstollens zu erstellen.

11.5.7 Ausbau des Zufahrtsstollens

Ein durchgängiger Ausbau in Form einer statisch wirksamen Innenschale ist für den Zufahrtsstollen der Kraftwerkskaverne nicht vorgesehen. Im Bereich des frischen bzw. gering verwitterten Granits

Kapitel 11: Bautechnische Empfehlungen

ist eine Innenschale aus felsmechanischer Sicht im Allgemeinen auch nicht erforderlich. Gleichwohl wird empfohlen, den Stollen mit einem ausreichend sicher dimensionierten Nachfallschutz aus bewehrtem Spritzbeton in Verbindung mit einer Systemankerung auszukleiden, da der Zufahrtsstollen als Verbindungsweg zu den technischen Anlagen in der Kaverne jederzeit sicher passierbar sein muss. Zur Vermeidung des Aufbaus eines äußeren Wasserdrucks werden rasterförmig angeordnete Perforationen der Spritzbetonschale als sinnvoll angesehen.

In den Stollenabschnitten, in denen der Granit in Schwächezonebereichen stark verwittert bzw. in vergruster Form ansteht und dem zufolge der Zerlegungsgrad groß, die Kluftabstände klein sind und das Korngefüge des Gesteins geschwächt ist, wird empfohlen, die ohnehin für die Vortriebsicherung erforderliche Spritzbetonschale zu einer permanenten Sicherung der Stollenlaibung auszubauen, welche auf Gebirgsdruck/Auflockerungsdruck bemessen wird.

11.5.8 Bemessungswasserspiegel

Der Zufahrtsstollen mündet auf dem Niveau des Maschinenhausflurs (d. h. bei 271,90 mNN) in das Kavernenteil Schwarzenbachwerk und das Kavernenteil Transformatoren. Im Nahbereich der Kraftwerkskaverne wird der Bergwasserspiegel permanent auf die Ebene des Turbinenflurs (d. h. 262,00 mNN) abgesenkt. Mit zunehmender Entfernung zur Kaverne steigt der Gebirgswasserspiegel an. Da der Zufahrtsstollen nicht ausgekleidet werden soll, und sich demzufolge kein Wasserdruck auf eine Außendichtung ausbilden kann, wirkt dieser Stollen außerhalb des hydraulischen Einflussbereichs der Kaverne als Gebirgsdrainage und es findet eine Wasserströmung über Klüfte in Richtung des Stollens statt; dem zufolge stellt sich der Bergwasserspiegel im Stollenbereich langfristig auf das Niveau der Stollensohle ein.

Insofern der Stolleneingangsbereich (Station 0 m bis ca. Station 80 m) eine abdichtende Innenschale erhalten sollte, wird für diesen Stollenabschnitt als Bezugsniveau für die Bemessung der Innenschale der vorläufig geschätzte Grundwasserspiegel (d. h. ca. 325 mNN) empfohlen.

Dort, wo der Zufahrtsstollen aus tunnelstatischen und gebirgsmechanischen Gründen (zumindest abschnittsweise) mit einer Auskleidung versehen werden muss, ist der Ausbau hydraulisch durchlässig zu gestalten, um den Aufbau eines äußeren Wasserdrucks zu vermeiden.

11.6 Oberwasserstollen Murgwerk

11.6.1 Bauwerksdaten

Die maßgebenden Bauwerksdaten zum Oberwasserstollen des Murgwerks entsprechend dem aktuellen Planungsstand sind in Tab. 63 zusammengestellt.

Tab. 63: Bauwerksdaten Oberwasserstollen Murgwerk

Niveau Achse Stolleneingang (Wasserschloss)	428,13 mNN
Niveau Achse Schachtkopfkaverne	428,13 mNN
Niveau Achse Schachtfußkaverne	272,71 mNN
Niveau Achse Turbineneinlauf	272,71 mNN
Gradientenneigung	0,0 % / 373,2 % / 0,0 %
Gesamtlänge	311,10 m
Innendurchmesser	2,90 m / 2,40 m / 1,90 m
Außendurchmesser (Ausbruch)	ca. 3,5 m bis ca. 2,5 m
Breite / Höhe / Länge Schützenkaverne	10,1 m / 14,6 m / 10,9 m
Breite / Höhe Drosselklappenkammer	5,2 m / 7,5 m / 12,8 m
Breite / Höhe Schachtfußkaverne	5,2 m / 6,2 m / 8,3 m
Minimale / maximale Gebirgsüberdeckung (ü. Stollenfirste)	ca.30 m / ca. 250 m

11.6.2 Geologische und hydrogeologische Situation

Im näheren Umfeld des Oberwasserstollens Murgwerk wurden für die Bewertung der geologischen und hydrogeologischen Verhältnisse die Bohrungen KS BK 5, KS BK 103S und KS BK 4 abgeteuft. Die Aufschlussergebnisse der vor genannten Bohrungen sind in Kapitel 4 zusammengestellt, die Aufschlussprofile sind in der Anlage 3 zu finden. Eine Beschreibung der geologischen und hydrogeologischen Situation im Bereich des Oberwasserstollens ist in den Kapiteln 5 und 6 sowie in Kapitel 10 enthalten. Die felsmechanische Charakterisierung der beim Bau zu durchörternden Gesteine ist im Kapitel 9 zu finden. Der ingenieur- und hydrogeologische Längsschnitt mit tunnelbautechnischen Bewertungsband durch den Oberwasserstollens Murgwerk ist in der Anlage 2.1.7 dargestellt.

Gemäß Anlage 2.1.7 ist davon auszugehen, dass der Oberwasserstollens Murgwerk vollständig im Forbach-Granit aufzufahren sein wird. Es wird erwartet, dass das Gebirge im näheren Umfeld des Wasserschlosses und (mit Bezug auf den Zugangsstollen zur Drosselklappenkammer) im Bereich geringer Überlagerung tendenziell stärker zerlegt und verwittert ist (Homogenbereich F2/F3) als in den Stollenabschnitten mit größerer Überdeckung (Homogenbereich F1). Dem zufolge ist im Eingangsbereich auch ein höherer Wasserandrang zu erwarten. In den tiefer liegenden Stollenabschnitten ist allgemein ein geringer Bergwasserandrang im Bereich des Oberwasserstollens zu erwarten. Lokal kann entlang von Großklüften und Zerrüttungszonen stärkerer Wasserzulauf auftreten.

Generell ist zu erwarten, dass der in der Stollenumgebung anstehende Forbach-Granit überwiegend frisch bis angewittert (Homogenbereich F1) vorliegt. Abschnittsweise ist mit stärker tektonisch beanspruchten und durch hydrothermale Alteration zusätzlich vergrustem Granit zu rechnen; entsprechend weisen die Vergrusungszonen einen geringeren Trennflächenabstand und einen höheren Verwitterungsgrad auf, was mit einer Verringerung der Gebirgsfestigkeit und einer Einstufung in die Homogenbereiche F2 und F3 einher geht.

Konnten diese Vergrusungszonen bzgl. ihrer Ausbildung und Trennflächenorientierungen über mehrere Aufschlüsse hinweg nachverfolgt werden, wurden sie als großräumiger auftretende Schwächezonenbereiche interpretiert. Die Existenz dieser Schwächezonenbereiche konnte anhand der durchgeführten Erkundungen nachgewiesen werden, deren genaue Lage, Verlauf und Ausbildung durch das Gebirge jedoch nicht. Entsprechend stellen die in der Anlage 2.1.7 dargestellten Schwächezonenbereiche lediglich eine aus den vorliegenden Ergebnissen abgeleitete Interpretation und keine tatsächlich im Stollenbereich nachgewiesenen Schwächezonen dar.

Im Bereich des Oberwasserstollens Murg wurden in für die Stollen relevanten Tiefenbereichen mehrere Schwäche-/Vergrusungszonen angetroffen, die in den Bohrungen KS BK 5, KS BK 4PM und KS BK 103S eine Einstufung zwischen 4 % und 14 % der Bohrstrecke und somit des Gesteins in die Homogenbereich F2 und F3 notwendig machen. Lokale Über-, bzw. Unterschreitungen dieser Anteile an Homogenbereich F2 und F3 können nicht ausgeschlossen werden. In den Aufschlussbohrungen liegen die Vergrusungsbereiche überwiegend in Mächtigkeiten im Dezimeter- bis Meterbereich vor, vereinzelt können jedoch auch Mächtigkeiten von 2 m bis 8 m auftreten.

Aus großräumiger auftretenden Strukturen können für den Oberwasserstollen Murg relevanten Gebirgsabschnitt ein Schwächezonenbereich (S-B104-A15) vermutet werden, welcher der Hauptklüftungsrichtung HKR 1 zuzuordnen ist. Der Schwächezonenbereich konnte in den Aufschlüssen mit Mächtigkeiten von etwa 5 m erkundet werden, von den der überwiegenden Teil jedoch dem Homogenbereich F2 zuzuordnen ist. Zusammenhängende Mächtigkeiten des Homogenbereiches F3 lagen bei 2,5 m. Auch hier sind Überschreitungen dieser aus den Aufschlussergebnissen abgeleiteten Mächtigkeiten nicht auszuschließen.

Kapitel 11: Bautechnische Empfehlungen

Eine erhöhte Gebirgsdurchlässigkeit bzw. erhöhter Bergwasserandrang ist außerhalb der Zone der oberflächennahen Hangentspannung in den Vergrusungszonen nicht zu erwarten.

Im Forbach-Granit sind Aplit-Gänge vorhanden, die überwiegend an der rheinischen Hauptkluftrichtung (HKR 6 bzw. HKR 4) orientiert sind und steil in östliche Richtung einfallen. Dezimeter- bis meterbreite Aplit-Gänge wurden auch in den Erkundungsbohrungen aufgeschlossen. Aufgrund der vorliegenden Aufschlussergebnisse stellen die Aplit-Gänge bzw. die Kontaktflächen zum Granit keine geomechanisch relevanten Diskontinuitäten dar.

11.6.3 Bauverfahren / Vortriebsverfahren

Für den Vortrieb des Oberwasserstollens Murgwerk kommt aufgrund der Stollenquerschnittsgeometrie und der geotechnischen Eigenschaften des aufzufahrenden Gebirges aus tunnelbautechnischer Sicht ein zyklischer Vortrieb, vorzugsweise ein Sprengvortrieb, im Stolleneingangsbereich ggf. auch ein Baggervortrieb in Betracht. Ein Fräsvortrieb ist aufgrund der Gesteinsfestigkeit und Abrasivität des frischen oder gering verwitterten Granits nicht möglich bzw. wäre unwirtschaftlich.

Aufgrund des vergleichsweise kleinen Ausbruchsdurchmessers wäre ein Ausbruch des Vertikalschachtes von oben sehr aufwändig und unwirtschaftlich. Für das Auffahren von unten kommen prinzipiell

- a) Zyklischer Vortrieb durch Sprengen/Schuttern/Sichern, oder
- b) Maschineller Vortrieb mittels raise-boring-Methode (Pilotbohrung von oben und Aufweitung mittels Großbohrkopf von unten nach oben)

in Frage. Im Zuge der Entwurfsplanung wurde das Auffahren des Vertikalschachtes mittels raise-boring festgelegt.

Das Auffahren des oberen Abschnittes und des Vertikalschachtes des Oberwasserstollens Murgwerk kann über den Zugangsstollen, der in die Drosselklappenkammer führt, erfolgen. Dabei bietet sich zunächst der Ausbruch der Drosselklappenkammer mit entsprechender Sicherung an. Unterstützend können ggf. vom Hilfsstollen weitere Vortriebe in Richtung Wasserschloss und Drosselklappenkammer vorangetrieben werden. Nach der Herstellung des Querschnitts im Bereich der Drosselklappenkammer kann die Pilotbohrung des raise-boring-Verfahrens für den Vertikalschacht abgeteuft werden.

Parallel muss der untere Abschnitt des Oberwasserstollens Murgwerk über den Hilfsstollen Murg zum Schachtfuß und in Richtung Kaverne aufgefahren und gesichert werden, so dass eine durchgängige und leistungsfähige Stollenverbindung zwischen dem Schachtfuß und den oberirdischen Baustelleneinrichtungen für die Schutterung, den Materialtransport und die Vortriebsentwässerung zur Verfügung steht. Anschließend wird der Schachtfußbereich ausgebrochen. Die Felsicherung im Bereich Schachtfuß sollte abgeschlossen und evtl. Dichtungskrägen für den raise-boring Vorgang fertiggestellt sein, bevor die Pilotbohrung von der Drosselklappenkammer in den gesicherten Bereich des Schachtfußes eindringt. Die Entwässerung des Schachtfußes muss auf den kurzzeitig bis mittelfristig höheren Wasseranfall infolge des Durchstichs der Schachtbohrung und infolge des Aufbohrens des Schachtes ausgelegt werden.

Anschließend wird der Großbohrkopf in den gesicherten Bereich des Schachtfußes mit dem Bohrgestänge kraftschlüssig verbunden und der Vollausbuch des Vertikalschacht im raise-boring Verfahren durchgeführt.

11.6.4 Aushubarbeiten / Vortriebsklassen / Felssicherung

Bei einem zyklischen Vortrieb (Lösen durch Sprengen, ggf. Bagger) werden die Vortriebsklassen entsprechend Kapitel 3.2.1 der DIN 18312 (Allgemeine Vortriebsklassen) beschrieben. In Bereichen mit intakten Gebirgsverhältnissen des Homogenbereiches F1 überwiegend die Vortriebsklasse VK4, abschnittsweise auch VK3 gemäß DIN 18312 gefahren werden kann. Im Bereich von Vergrusungszonen kann auch die Vortriebsklasse VK6, im Eingangsbereich des Zufahrtsstollens und im Durchstoßbereich des Oberwasserstollens Murgwerk in das Wasserschloss auch VK7 erforderlich werden.

Der Aufwand für das Lösen des Gebirges beim raise-boring kann näherungsweise durch die DIN 18301 beschrieben werden; unter Berücksichtigung evtl. erforderlicher Sicherungsarbeiten beim Bohren kann auch die DIN 18312, Abschnitt 3.2.2 für maschinellen Vortrieb herangezogen werden. Dem entsprechend wäre der Bohrvorgang überwiegend durch die Klasse TBM 1 charakterisiert. Sofern beim Aufbohren Sicherungsarbeiten an der Schachtlaufring ausgeführt werden müssen, käme die Klasse TBM 4 zum Tragen.

Alle Abschnitte des Oberwasserstollens Murgwerk werden voraussichtlich vollständig im Forbach-Granit aufgefahren. Aufgrund des Trennflächengefüges ist beim Sprengvortrieb gefügebeneinflusster Mehrausbruch zu erwarten. Dies gilt vor allem für oberflächennahe Stollenabschnitte, in denen das Gebirge durch Hangentspannung aufgelockert ist, sowie für Schwäche- und Vergrusungszonen, die vereinzelt zu durchfahren sind (Homogenbereiche F2/F3). Hier können sich durch engständige Klüftung Klüftkörper bilden, die bevorzugt im Kalottenbereich in den (noch) ungesicherten Abschlag hineinfallen oder -gleiten und zu Mehrausbruch führen können.

Eine Abschätzung der möglichen und bevorzugt zu erwartenden Gleitkeile und potenziellen Ablöseflächen beim Vortrieb ist durch eine geotechnische Trennflächenanalyse mit Hilfe der aus den herangezogenen Erkundungsbohrungen ermittelten Lagenkugel möglich. Geht man davon aus, dass das Gefügediagramm der Abb. 48 repräsentativ für das Granitgebirge im Bereich des Oberwasserstollens Murgwerk ist, so wird deutlich, dass als dominierenden Hauptkluftrichtungen die HKR 1, HKR 2, HKR 5 und HKR 6 anzusehen sind. Die HKR 1 und HKR 6 kommen dabei überwiegend in – gegenüber der vorherrschenden Orientierung - überkippter Lagerung vor.

Kapitel 11: Bautechnische Empfehlungen

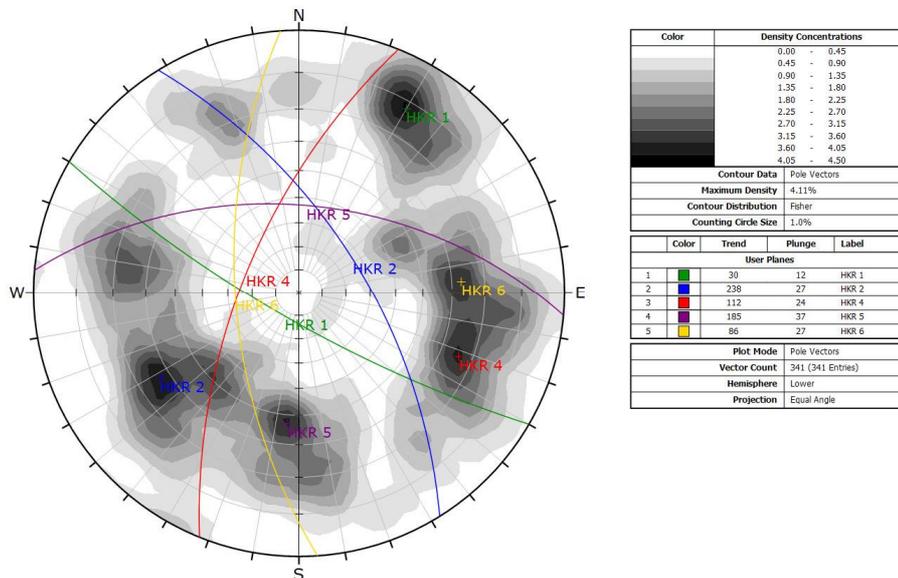


Abb. 48: Lagekugel OW Murg

Im Einfahrtbereich des OW-Stollens in das Wasserschloss, im Kreuzungsbereich zwischen dem Zufahrtsstollen und der Drosselklappenkammer sowie in den Aufweitungsbereichen des Schachtkopfes und des Schachtfußes können lokal ungünstige Kluffkonstellationen mehrerer Hauptkluffscharen zur Ablösung größerer Kluffkörper führen.

Zu beachten ist, dass die im Granit vergleichsweise häufig festgestellten Aplit-Gänge eine Raumstellung entsprechend der Gefügefläche HKR 6 und auch HKR 4 (siehe Kapitel 5.3.2) aufweisen und demzufolge überwiegend parallel bis spitzwinklig zur Stollenachse orientiert sind. Dezimeter- bis meterbreite Aplit-Gänge wurden auch in den Erkundungsbohrungen aufgeschlossen. Aufgrund der vorliegenden Aufschlussergebnisse stellen die Aplit-Gänge bzw. die Kontaktflächen zum Granit keine geomechanisch relevanten Diskontinuitäten dar.

Für den Vertikalschacht können sich an den zylindrischen Schachtwänden eine Vielzahl verschiedener Gleitkeile durch die Verschneidung von jeweils 2 oder 3 Trennflächen mit der Ausbruchslaubung ergeben, so dass diese aus dem Gebirgsverband herausgleiten können. Besondere Beachtung liegt dabei auf dem vermuteten Schwächezonbereich (S-B104-A15), die der Hauptkluffrichtung HKR 1 zuzuordnen ist.

Um rechtzeitig ungünstige felsmechanische Konfigurationen (z. B. Vergrusungszonen und/oder standsicherheitsgefährdende Trennflächen) zu erkennen und geeignet Maßnahmen ergreifen zu können, ist eine ständige und sorgfältige felsmechanische Kartierung aller laufenden Vortriebe und die zeitnahe Erstellung/Aktualisierung der Gebirgsmodelle erforderlich. In diesem Zusammenhang wird empfohlen, vor Beginn des Aufbohrens des Schachtes eine detaillierte Aufnahme und gebirgsmechanische Auswertung der Ergebnisse der Pilotbohrung durchzuführen, um evtl. erforderliche Sicherungsarbeiten oder größere Wasserzutritte im Vorfeld abschätzen zu können.

11.6.5 Bauzeitliche Entwässerung

Das im Zuge des Stollenausbruchs zutretende Bergwasser ist zu fassen und über eine entsprechend dem Vortriebsstand nachgeführte Bauwasserhaltung (zweckmäßigerweise als Sohlkanal im

Kapitel 11: Bautechnische Empfehlungen

Tiefpunkt des Ausbruchsquerschnitts angeordnet) zu einem bauzeitlichen Auffangbehälter im Tiefpunkt des Vortriebsbereichs abzuleiten. Von dort kann das Wasser in einer Druckleitung aus dem Vortriebsbereich herausgepumpt, in einer Aufbereitungsanlage entsprechend den Auflagen der Behörden aufbereitet und in den behördlich genehmigten Vorfluter eingeleitet werden. Im oberen Abschnitt des Oberwasserstollens bietet es sich an, einen Auffangbehälter in der Drosselklappenkammer anzulegen und von dort das Wasser zutage zu pumpen.

Die geohydraulische Situation im Oberwasserstollen Murgwerk wird gemäß aktuellem Kenntnisstand so eingeschätzt, dass bevorzugt im oberen Eingangsbereich mit vergleichsweise geringer Überlagerung sowie in eventuell angetroffenen Schwächezonen/Kluftzonen (vor allem beim Aufbohren des Schachtes) stärkere Wasserzutritte zu erwarten sind. Als maßgebend für den Wasserzufluss ist der Schwächezonenbereich im mittleren Abschnitt des Schachtes anzusehen, bei dem maximale Wassermengen von bis zu 8 l/s bis 9 l/s möglich sind. Für den Gesamtbereich Oberwasserstollen können bis zu 10 l/s erwartet werden.

Beim raise-boring-Verfahren findet durch die Pilotbohrung eine Voraussentwässerung des Gebirges im Nahbereich des Schachtes statt. Das durch die Pilotbohrung erfasste Bergwasser muss beim Durchstoß der Bohrung durch den gesicherten Bereich des Schachtfußes gefasst und schadlos aus dem Kavernenbereich durch den Hilfsstollen Murg abgeleitet werden. Es wird empfohlen, erst mit dem raise-boring-Aufbruch zu beginnen, nachdem eine ausreichende Vorentwässerung des Gebirges durch die Pilotbohrung stattgefunden hat.

Die voraussichtlich bauzeitlich anfallenden Wassermengen sind in Kapitel 10 bzw. in der Anlage 2.1.7 benannt.

11.6.6 Ausbau des Oberwasserstollens Murgwerk

Ein Ausbau in Form einer statisch wirksamen Innenschale ist für den Zugangsstollen der Drosselklappenkammer nicht vorgesehen und im Bereich des frischen bzw. gering verwitterten Granits (Homogenbereich F1) aus felsmechanischer Sicht im Allgemeinen auch nicht erforderlich. In den Stollenabschnitten, in denen der Granit stark verwittert bzw. in vergruster Form ansteht und dem zufolge der Zerlegungsgrad groß, die Kluftabstände klein sind und das Korngefüge des Gesteins geschwächt ist (Homogenbereiche F2/F3), wird empfohlen, die ohnehin für die Vortriebssicherung erforderliche Spritzbetonschale zu einer permanenten Sicherung der Stollenlaibung auszubauen. Darüber hinaus wird empfohlen, den begehbaren Teil der Drosselklappenkammer mit einer Nachfallsicherung aus Spritzbeton und Felsnägeln gegen herabfallende Steine zu sichern, sofern nicht ohnehin aus gebirgsmechanischer Sicht eine permanente Sicherung der Ausbruchslaibung erforderlich wird.

Nach derzeitiger Planung werden alle Abschnitte des Oberwasserstollens Murgwerk mit einer wasserdichten Innenschale aus Beton ausgekleidet, die durch Spaltinjektionen gegen das umgebende Gebirge verspannt wird. Der untere Stollenabschnitt zwischen Schachtfuß und dem Kavernenteil Schwarzenbachwerk wird zusätzlich mit einer Stahlpanzerung ausgestattet.

11.6.7 Bemessungswasserspiegel

Als Bemessungswasserspiegel für die Dimensionierung des Schachtausbaus im Hinblick auf äußeren Wasserdruck bei leerem Schacht wird das Niveau der Drosselklappenkammer empfohlen. Dieses liegt auf ca. 427 mNN. Dies wird damit begründet, dass geringe Sickerwasserzutritte aus dem Wasserschloss in den Nahbereich des Schachtes nicht auszuschließen sind und eine vertikale Drainierung durch eine ringförmige Auflockerungszone im Gebirge um den Schacht möglicherweise nicht stattfindet.

Kapitel 11: Bautechnische Empfehlungen

Der untere Abschnitt des Oberwasserstollens Murgwerk Zugangsstollen mündet etwa auf Höhe des Maschinenhausflurs in das Kavernenteil Schwarzenbachwerk und das Kavernenteil Transformatoren. Im Nahbereich des Kavernenteils Schwarzenbachwerk des Murgwerks wird der Bergwasserspiegel permanent auf die Ebene des Maschinenhausflurs (d. h. 271,90 mNN), im Bereich des Schwarzenbachwerks sogar auf ca. 262 mNN abgesenkt. Mit zunehmender Entfernung zur Kaverne steigt der Gebirgswasserspiegel an. Da der Oberwasserstollen druckwasserdicht ausgebaut wird, ist der durch die Kaverne beeinflusste Druckspiegel des Kluftgrundwasserleiters als Bemessungswasserspiegel anzunehmen.

11.6.8 Zufahrtsstollen und Portalbereich

Die Herstellung des Oberwasserstollens Murg erfolgt über einen Zugangsstollen, dessen Portal nördlich des Wasserschlosses Murgwerk liegt. Von dort läuft der Stollen in Fallrichtung des Hanges in das Gebirge hinein, um anschließend mit einem Gefälle von ca. 7% in einer langen nach Süden orientierten Biegung nahezu senkrecht auf die Drosselklappenkammer zu treffen. Bauzeitlich geht von dem etwa 100 m langen Zugangsstollen nach etwa 70m ein ca. 32 m langer Hilfstollen ab, der bereits etwa 18 m nach dem Wasserschloss auf den Oberwasserstollen trifft. Für den Zugangsstollen ist nach Ende der Bautätigkeit eine Nutzung für den Betrieb als Zuwegung zum Oberwasserstollen vorgesehen.

Die zuvor getroffenen Aussagen bzgl. des Oberwasserstollen können vollständig auf den Zugangsstollen übertragen werden.

Im unmittelbaren Portalbereich verläuft nach derzeitigem Planungsstand der der Hauptklufttrichtung 6 zuzuordnende Schwächezonenebereich S-B5-B6-B107. Entsprechend ist hier auch nach den Ergebnissen der durchgeführten geophysikalischen Messungen (GP101) von einer größeren Lockergesteinsmächtigkeit und einer tiefreichenden Verwitterung des Festgesteins auszugehen.

Liegt die Lockergesteinsmächtigkeit des Hangschutts (Homogenbereich Q1) in den umgebenen Bereichen bei ca. 3 m bis 5 m, so steigt die Mächtigkeit im Schwächezonenebereich auf bis zu >10 m an. Unterlagert wird der Hangschutt von stärker verwitterten und oberflächennah kleinklüftigeren Forbach-Granit, der hier dem Homogenbereich F2 zuzuordnen ist. Der erkundeten Untergundaufbau ist in den vorliegenden Planungsstand eingearbeitet worden. Dabei fielen Abweichungen zwischen dem im Zuge der den geophysikalischen Messungen durchgeführten Vermessungen und dem der Planung zu Grunde liegenden Höhenmodell auf. Diese Abweichungen sollten im weiteren Projektverlauf schnellstmöglich bereinigt werden, da die Anschlagswand derzeit teilweise über Gelände und ganz überwiegend im Lockergestein zu liegen käme und entsprechende Zusatzmaßnahmen (Rohrschirm, o. ä.) für die Sicherung des Portalbereichs zum Einsatz kommen müssten.

Der auf den derzeitigen Planunterlagen beruhende Portallängsschnitt ist der Anlage 2.1.13 zu entnehmen.

11.7 Unterwasserstollen Murgwerk

11.7.1 Bauwerksdaten

Die maßgebenden Bauwerksdaten zum Unterwasserstollen des Murgwerks entsprechend dem aktuellen Planungsstand (November 2015) sind in Tab. 64 zusammengestellt.

Tab. 64: Bauwerksdaten Unterwasserstollen Murgwerk

Niveau Achse Ausgang (Kaverne Murgwerk)	268,50 mNN
Niveau Achse am Diffusor (Zulaufbauwerk im Hauptstollen Kavernenwasserspeicher)	291,45 mNN
Gradientenneigung	20,7 %
Gesamtlänge	102,74 m
Innendurchmesser	2,90 m / 5,80 m
Außendurchmesser (Ausbruch)	ca. 3,9 m bis ca. 6,8 m
Minimale / maximale Gebirgsüberdeckung	ca. 240 m / ca. 265 m

Die Lage des Unterwasserstollens des Murgwerks ist im Übersichtslageplan der Anlage 1.1 dargestellt. Der geotechnische Längsschnitt durch den Unterwasserstollen Murgwerk ist in der Anlage 2.1.7 zu finden. Dem entsprechend beginnt der Unterwasserstollen Murgwerk in einer Seitenkaverne neben dem Kavernenteil Schwarzenbachwerk unterhalb des Maschinenhausflurs. Hier werden die Turbinenauslässe und der Umgehungsast des Oberwasserstollens Murgwerk zu einem Abflussquerschnitt mit einem Innendurchmesser DN = 2,90 m zusammengeführt. Der Unterwasserstollen Murgwerk endet im Diffusor bzw. im Zulaufbauwerk am Ende des Hauptstollens des Kavernenwasserspeichers. Vor dem Übergangsbereich wird der kreisförmige Querschnitt in einer ca. 15 m langen Verzugsstrecke von DN 2,90 m auf DN 5,80 m aufgeweitet.

11.7.2 Geologische und hydrogeologische Situation

Die für die Bewertung der geologischen und hydrogeologischen Verhältnisse im Nahbereich des Unterwasserstollens Murgwerk ausgeführten Aufschlüsse (KS BK 4PM, KS BK 103S und KS BK 104PM) sind in Kapitel 4 zusammengestellt, die Aufschlussprofile sind in der Anlage 3 zu finden. Eine Beschreibung der geologischen und hydrogeologischen Situation im Bereich des Unterwasserstollens ist in den Kapiteln 5 und 6 sowie in Kapitel 10 enthalten. Die felsmechanische Charakterisierung der beim Bau zu durchörternden Gesteine ist im Kapitel 9 zu finden. Der ingenieur- und hydrogeologische Längsschnitt durch den Oberwasserstollen Murgwerk ist in der Anlage 2.1.7 dargestellt.

Gemäß Anlage 2.1.7 ist davon auszugehen, dass der Unterwasserstollen Murgwerk vollständig im Forbach-Granit aufzufahren sein wird.

Demzufolge wird der Unterwasserstollen vollständig im Forbach-Granit aufzufahren sein. Dieser wird im überwiegenden Teil frisch bis angewittert (Homogenbereich F1) erwartet. Allerdings ist abschnittsweise mit stärker tektonisch beanspruchten und durch hydrothermale Alteration vergrustem Gebirge zu rechnen; entsprechend weisen die Vergrusungszonen einen geringeren Trennflächenabstand und einen höheren Verwitterungsgrad auf, was mit einer Verringerung der Gebirgsfestigkeit und mit einer Einstufung in die Homogenbereiche F2 und F3 einher geht. Im Bereich des Unterwasserstollens wurden in dem für den Stollen relevanten Tiefenbereich mehrere Vergrusungszonen angetroffen, die in den Bohrungen KS BK 4PM und KS BK 103S Einstufungen zwischen 6 % und 15 % der Bohrstrecke und somit des Gesteins in die Homogenbereich F2 und F3 notwendig machen. Lokale Über-, bzw. Unterschreitungen dieser Anteile an Homogenbereich F2 und F3 können nicht ausgeschlossen werden. In den Aufschlußbohrungen liegen die Vergrusungsbereiche überwiegend in Mächtigkeiten im Dezimeter- bis Meterbereich vor, vereinzelt können jedoch auch Mächtigkeiten von 2 m bis 3 m auftreten. Eine erhöhte Gebirgsdurchlässigkeit bzw. erhöhter Bergwasserandrang ist in den Vergrusungszonen nicht zu erwarten.

Die Gebirgsdurchlässigkeit wird generell als gering eingestuft.

Kapitel 11: Bautechnische Empfehlungen

Im Forbach-Granit sind Aplit-Gänge vorhanden, die überwiegend an der rheinischen Hauptkluftrichtung (HKR 6 bzw. HKR 4) orientiert sind und steil in östliche Richtung einfallen. Dezimeter- bis meterbreite Aplit-Gänge wurden auch in den Erkundungsbohrungen aufgeschlossen. Aufgrund der vorliegenden Aufschlussergebnisse stellen die Aplit-Gänge bzw. die Kontaktflächen zum Granit keine geomechanisch relevanten Diskontinuitäten dar.

11.7.3 Bauverfahren / Vortriebsverfahren

Für den Vortrieb des Unterwasserstollens Murgwerk kommt aufgrund der Stollenquerschnittsgeometrie und der geotechnischen Eigenschaften des aufzufahrenden Gebirges aus tunnelbautechnischer Sicht ein zyklischer Vortrieb, vorzugsweise ein Sprengvortrieb, in Betracht. Ein Fräsvortrieb ist aufgrund der Gesteinsfestigkeit und Abrasivität des frischen oder gering verwitterten Granits nicht möglich bzw. wäre unwirtschaftlich.

Das Auffahren des UW-Stollens Murgwerk erfolgt voraussichtlich von der Kraftwerkskaverne her, mit einem kurzen Gegenvortrieb vom Hauptstollen des Kavernenwasserspeichers, an dessen Ende zuvor das Zulaufbauwerk ausgebrochen werden muss.

11.7.4 Aushubarbeiten / Vortriebsklassen / Felssicherung

Bei einem zyklischen Vortrieb (Lösen durch Sprengen, ggf. Bagger) werden die Vortriebsklassen entsprechend Kapitel 3.2.1 der DIN 18312 (Allgemeine Vortriebsklassen) beschrieben. Aufgrund der Einschätzung der Gebirgsverhältnisse wird erwartet, dass in den Granitstrecken überwiegend die Vortriebsklasse VK4, abschnittsweise auch VK3 gemäß DIN 18312 gefahren werden kann. Im Bereich von Vergrusungszonen kann auch die Vortriebsklasse VK6, im Durchstoßbereich des UW-Stollens in das Zulaufbauwerk auch VK7 erforderlich werden.

Als reguläre Sicherungsmittel sind Felsdübel bzw. Felsanker (SN-Anker) und bewehrter Spritzbeton in Betracht zu ziehen. Im Einzelfall kann es erforderlich werden, versagensgefährdete Stollenbereiche durch Vorspannanker oder Gewölbekonstruktionen aus Stahlbeton zu sichern.

Aufgrund der erhöhten Gebirgsdrücke im Anschlußbereichen der Kraftwerkskaverne und des Hauptstollens können sich ggf. zusätzliche Sicherungsmittel ergeben, aus denen sich ein erhöhter Sicherungsaufwand ergeben.

Aufgrund des Trennflächengefüges ist beim Sprengvortrieb gefügebeeinflusster Mehrausbruch zu erwarten. Die Gefügeauswertung der Bohrungen im Unterwasserstollen zeigt, dass die dominierenden Kluftscharen HKR 1, HRK 2, HRK 4 und untergeordnet HKR 5 und HKR 6 in etwa parallel bis spitzwinklig zu der Stollenachse streichen. Die HRK 1 und HRK 4 kommen dabei neben ihrer Haupteinfallrichtung auch in konjugierter Lagerung vor. Eine Darstellung der aus den Aufschlüssen im Tiefenbereich der Stollen angetroffenen Trennflächenverteilung ist in Abb. 49 dargestellt.

Kapitel 11: Bautechnische Empfehlungen

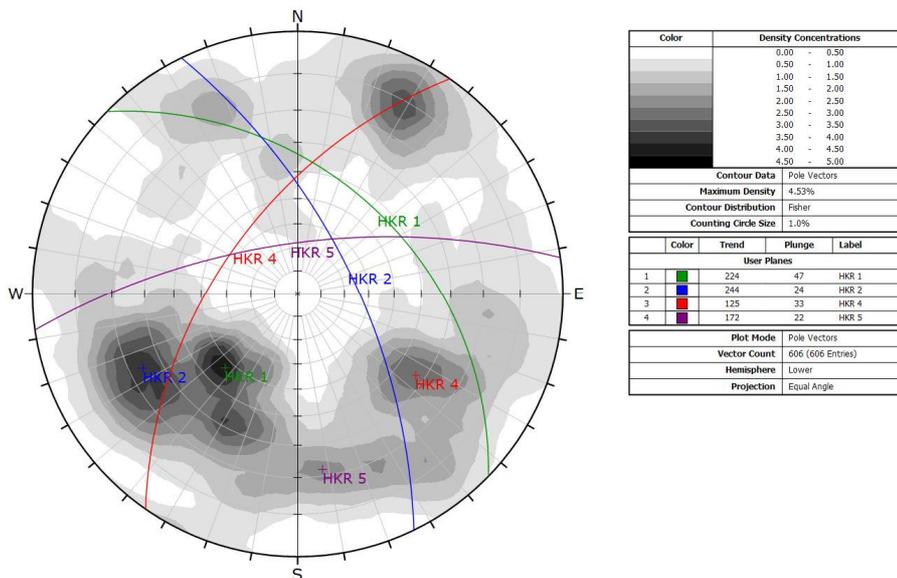


Abb. 49: Lagekugel UWS Murg

11.7.5 Bauzeitliche Entwässerung

Das im Zuge des Stollenaushubs zutretende Bergwasser ist zu fassen und über eine entsprechend dem Vortriebsstand nachgeführte Bauwasserhaltung (zweckmäßigerweise als Sohlkanal im Tiefpunkt des Ausbruchquerschnitts angeordnet) zu einem bauzeitlichen Auffangbehälter im Tiefpunkt des Vortriebsbereichs abzuleiten. Von dort kann das Wasser in einer Druckleitung aus dem Vortriebsbereich herausgepumpt, in einer Aufbereitungsanlage entsprechend den Auflagen der Behörden aufbereitet und in den behördlich genehmigten Vorfluter eingeleitet werden. Bei einem steigenden Vortrieb, der an der Kraftwerkskaverne beginnt, kann das anfallende Bergwasser in der Seitenkaverne neben dem Kavernenteil des Murgwerks gesammelt werden.

Die geohydraulische Situation im Unterwasserstollen Murgwerk wird gemäß aktuellem Kenntnisstand so eingeschätzt, dass in eventuell angetroffenen Schwächezonen/Kluftzonen stärkere Wasserzutritte zu erwarten sind, insgesamt aber beim Ausbruch des Stollens nur vergleichsweise geringe Wassermengen (im Mittel ≤ 3 l/s) anfallen werden.

11.7.6 Ausbau des Unterwasserstollens Murgwerk

Alle Abschnitte des Unterwasserstollens Murgwerk werden mit einer wasserdichten Innenschale aus Stahlbeton ausgekleidet, die durch Spaltinjektionen gegen das umgebende Gebirge verspannt wird.

11.7.7 Bemessungswasserspiegel

Als Bemessungswasserspiegel für die Dimensionierung des Stollenausbaus im Hinblick auf äußeren Wasserdruck bei entleertem Stollen wird das Niveau des Stauwasserspiegels des Kavernenspeichers empfohlen, welches auf ca. 301,60 mNN liegt.

Dies wird damit begründet, dass die Kraftwerkskaverne am Tiefpunkt des Unterwasserstollens Murgwerk permanent als Gebirgsdrainage wirkt und dem entsprechend in ihrem Umfeld den Gebirgswasserspiegel auf das Niveau 262,00 mNN begrenzt, durch den Betrieb des Kavernenspeichers sich jedoch am Ende des Unterwasserstollens Murgwerk ein Gebirgswasserspiegel auf der

Kapitel 11: Bautechnische Empfehlungen

Höhe des Stauspiegels des Kavernenspeichers einstellen wird. Durch eine kaum vermeidbare Auflockerung des Gebirges beim Auffahren des Unterwasserstollens Murgwerk ist eine Längsläufigkeit entlang des Stollens nicht auszuschließen.

11.8 Oberwasserstollen Schwarzenbachwerk

11.8.1 Bauwerksdaten

Die maßgebenden Bauwerksdaten zum Oberwasserstollen des Schwarzenbachwerks entsprechend dem aktuellen Planungsstand sind in Tab. 65 zusammengestellt.

Tab. 65: Bauwerksdaten Oberwasserstollen Schwarzenbachwerk

Niveau Achse Stolleneingang (Wasserschloss)	618,83 mNN
Niveau Achse Schachtkopfkaverne	618,30 mNN
Niveau Achse Schachtfußkaverne	260,45 mNN
Niveau Achse Turbineneinlauf	260,25 mNN
Gradientenneigung	0,0 % / 433,2 % / 0,0 %
Gesamtlänge	166,90 m
Innendurchmesser	2,90 m / 1,90 m / 1,90 m
Außendurchmesser (Ausbruch)	ca. 3,5 m bis ca. 2,8 m
Breite / Höhe / Länge Schützenkaverne	10,1 m / 14,6 m / 10,9 m
Breite / Höhe / Länge Drosselklappenkammer	5,2 m / 7,2 m / 14,8 m
Breite / Höhe / Länge Schachtfußkaverne	5,2 m / 6,1 m / 8,4 m
Minimale / maximale Gebirgsüberdeckung (ü. Stollen- firste)	ca. 40 m / ca. 350 m

Die Lage des Oberwasserstollens Schwarzenbachwerk ist im Übersichtslageplan der Anlage 1.1 dargestellt. Der geotechnische Längsschnitt durch den Oberwasserstollen ist in der Anlage 2.1.8 zu finden. Dem entsprechend zweigt der Oberwasserstollen vom bestehenden Wasserschloss mit einer neu herzustellenden kreisförmigen Öffnung im Wasserschloss nach Nordosten zur Drosselklappenkammer ab (Achsenverlauf parallel zum bestehenden Oberwasserstollen zwischen Wasserschloss und Apparatehaus der bestehenden obertägigen Druckleitung). Nach ca. 65 m findet in der Drosselklappenkammer der Übergang in den Vertikalschacht statt. Über den Vertikalschacht wird ein Höhenunterschied von ca. 358 m überwunden. Nach dem Schachtfuß verläuft der Oberwasserstollen Schwarzenbachwerk mit geringen Gefälle und nahezu richtungskonstant zum Einlaufbauwerk der Pumpturbine des Schwarzenbachwerks.

Die Drosselklappenkammer erhält einen Zugangsstollen von ca. 113 m Länge, durch den sie beim Bau und während des Betriebes von öffentlichen Wegen her erreichbar ist. Bauzeitlich wird zusätzlich ein Hilfsstollen erstellt, der ca. 16 m nach dem Wasserwerk auf den Oberwasserstollen trifft. Der Bereich zwischen Schachtfuß und Wasserwerk Schwarzenbach wird während des Baus durch einen Hilfsstollen erschlossen.

Die Aufweitungen im Bereich Schachtkopf und Schachtfuß werden nach Durchführung des raiseborings und dem Einbau der Krümmer der Druckleitung mit Beton verfüllt. Der Lageplan sowie der Längsschnitt sind in Abb. 50 enthalten.

Kapitel 11: Bautechnische Empfehlungen

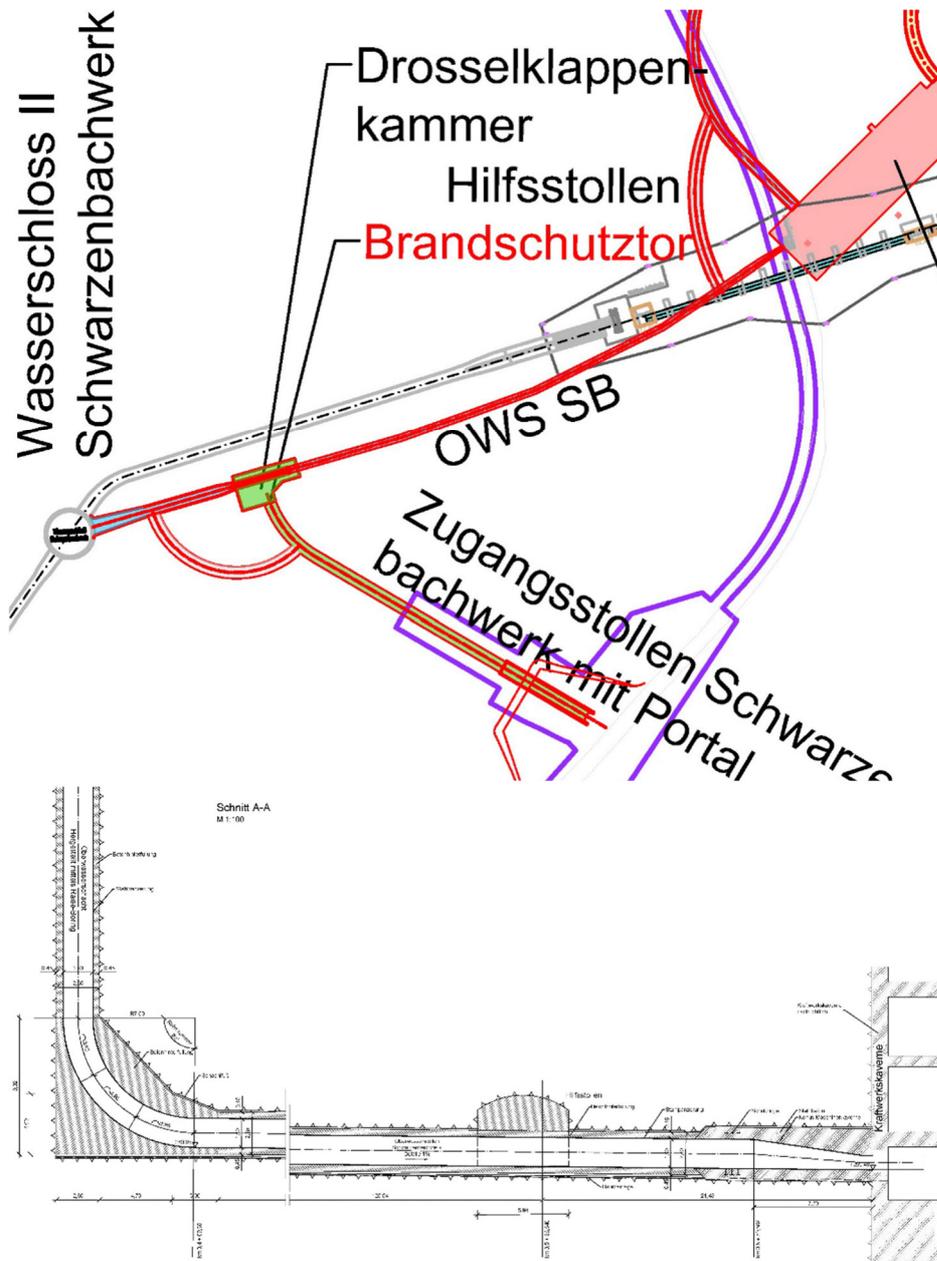


Abb. 50: Oberwasserstollen Schwarzenbachwerk - Lageplan und Längsschnitt im Bereich Schachtfuß - Kraftwerkskaverne

11.8.2 Geologische und hydrogeologische Situation

Im Umfeld des Oberwasserstollens Schwarzenbachwerk wurden für die Bewertung der geologischen und hydrogeologischen Verhältnisse die Bohrungen KS BK 1, KS BK 4PM und KS BK 103S abgeteuft. Die Aufschlussresultate der vor genannten Bohrungen sind in Kapitel 4 zusammengestellt, die Aufschlussprofile sind in der Anlage 3 zu finden. Eine Beschreibung der geologischen und hydrogeologischen Situation im Bereich des Oberwasserstollens ist in den Kapiteln 5 und 6 sowie in Kapitel 10 enthalten. Die felsmechanische Charakterisierung der beim Bau zu durchörternden Gesteine ist im Kapitel 9 zu finden. Der ingenieur- und hydrogeologische Längsschnitt mit

Kapitel 11: Bautechnische Empfehlungen

tunnelbautechnischen Bewertungsband durch den Oberwasserstollen Schwarzenbachwerk ist in der Anlage 2.1.8 dargestellt.

Gemäß Anlage 2.1.8 ist davon auszugehen, dass der Stollen vollständig im Forbach-Granit aufzufahren sein wird. Es wird erwartet, dass das Gebirge im näheren Umfeld des Wasserschlosses tendenziell stärker zerlegt und verwittert ist. Dem zufolge ist im Eingangsbereich auch ein höherer Wasserandrang zu erwarten. In den tiefer liegenden Stollenabschnitten ist allgemein ein geringer Bergwasserandrang im Bereich des Oberwasserstollens zu erwarten. Lokal kann entlang von Großklüften und Schwächezonen stärkerer Wasserzulauf auftreten.

Generell ist zu erwarten, dass der in der Stollenumgebung anstehende Forbach-Granit überwiegend frisch bis angewittert (Homogenbereich F1) vorliegt. Abschnittsweise ist mit stärker tektonisch beanspruchten und durch hydrothermale Alteration zusätzlich vergrustem Granit zu rechnen; entsprechend weisen die Vergrusungszonen einen geringeren Trennflächenabstand und einen höheren Verwitterungsgrad, was mit einer Verringerung der Gebirgsfestigkeit und einer Einstufung in die Homogenbereiche F2 und F3 einher geht.

Konnten diese Vergrusungszonen bzgl. ihrer Ausbildung und Trennflächenorientierungen über mehrere Aufschlüsse hinweg nachverfolgt werden, wurden sie als großräumiger auftretende Schwächezonenbereiche interpretiert. Die Existenz dieser Schwächezonenbereiche konnte anhand der durchgeführten Erkundungen nachgewiesen werden, deren genaue Lage, Verlauf und Ausbildung durch das Gebirge jedoch nicht. Entsprechend stellen die in der Anlage 2.1.8 dargestellten Schwächezonenbereiche lediglich eine aus den vorliegenden Ergebnissen abgeleitete Interpretation und keine tatsächlich im Stollenbereich nachgewiesenen Schwächezonen dar.

Im Bereich des Oberwasserstollens Schwarzenbachwerk wurde in dem für den Stollen relevanten Tiefenbereich mehrere Vergrusungszonen angetroffen, die in den herangezogenen Bohrungen Einstufungen zwischen 10 % und 16 % der Bohrstrecke und somit des Gesteins in die Homogenbereich F2 und F3 notwendig machen. Lokale Über-, bzw. Unterschreitungen dieser Anteile an Homogenbereich F2 und F3 können nicht ausgeschlossen werden. In den Aufschlußbohrungen liegen die Vergrusungsbereiche überwiegend in Mächtigkeiten im Dezimeter- bis Meterbereich vor, vereinzelt können jedoch auch Mächtigkeiten von 2 m bis 4 m auftreten.

Aus großräumiger auftretenden Strukturen können in dem für den Oberwasserstollen Schwarzenbachwerk relevanten Gebirgsabschnitt vier Schwächezonenbereiche vermutet werden, von denen drei (S-B1-B2-B4-B103, S-B1-B4-B103, S-B1-B4) der Hauptkluftrichtung HRK 1 und eine (S-B109-E-H6) der HRK 6 zuzuordnen sind. Die Schwächezonenbereiche konnten in den Aufschlüssen mit Mächtigkeiten zwischen 1 m und 12 m erkundet werden, von den der überwiegenden Teil jedoch dem Homogenbereich F2 zuzuordnen ist. Zusammenhängende Mächtigkeiten des Homogenbereiches F3 lagen zwischen 0 m und 2,0 m. Auch hier sind Überschreitungen dieser aus den Aufschlußergebnissen abgeleiteten Mächtigkeiten nicht auszuschließen.

Eine erhöhte Gebirgsdurchlässigkeit bzw. erhöhter Bergwasserandrang ist außerhalb der Zone der oberflächennahen Hangentspannung in den Vergrusungszonen nicht zu erwarten.

Im Forbach-Granit sind Aplit-Gänge vorhanden, die überwiegend an der rheinischen Hauptkluftrichtung (HKR 6 bzw. HKR 4) orientiert sind und steil in östliche Richtung einfallen. Dezimeter- bis meterbreite Aplit-Gänge wurden auch in den Erkundungsbohrungen aufgeschlossen. Aufgrund der vorliegenden Aufschlussergebnisse stellen die Aplit-Gänge bzw. die Kontaktflächen zum Granit keine geomechanisch relevanten Diskontinuitäten dar.

11.8.3 Bauverfahren / Vortriebsverfahren

Für den Vortrieb des Oberwasserstollens kommt aufgrund der Stollenquerschnittsgeometrie und der geotechnischen Eigenschaften des aufzufahrenden Gebirges aus tunnelbautechnischer Sicht ein zyklischer Vortrieb, vorzugsweise ein Sprengvortrieb, im Stolleneingangsbereich des Zugangstollens ggf. auch ein Baggervortrieb in Betracht. Ein Fräsvortrieb ist aufgrund der Gesteinsfestigkeit und Abrasivität des frischen oder gering verwitterten Granits nicht möglich bzw. wäre unwirtschaftlich.

Aufgrund des vergleichsweise kleinen Ausbruchsdurchmessers wäre ein Ausbruch des Vertikalschachtes von oben sehr aufwändig und unwirtschaftlich. Für das Auffahren von unten kommen

- a) Zyklischer Vortrieb durch Sprengen/Schüttern/Sichern, oder
- b) Maschineller Vortrieb mittels raise-boring-Methode (Pilotbohrung von oben und Aufweitung mittels Großbohrkopf von unten nach oben)

in Frage. Im Zuge der Entwurfsplanung wurde das Auffahren des Schachtes mittels raise-boring festgelegt.

Das Auffahren des oberen Abschnittes und des Schachtes des Oberwasserstollens Schwarzenbachwerk kann über den Zugangstollen, der in die Drosselklappenkammer führt, als auch über den zwischen Wasserwerk und Drosselklappenkammer herzustellenden Hilfsstollen erfolgen.

Nach dem Aufweiten des Querschnitts im Bereich der Drosselklappenkammer kann die Pilotbohrung des raise-boring-Verfahrens für den Schacht abgeteuft werden.

Parallel muss der untere Abschnitt des Oberwasserstollens Schwarzenbachwerk über einen Hilfsstollen, der an den Unterwasserstollen des Schwarzenbachwerks anschließt, bis zum Schachtfuß aufgefahren und gesichert werden, so dass eine durchgängige und leistungsfähige Stollenverbindung zwischen dem Schachtfuß und den oberirdischen Baustelleneinrichtungen für die Schuttentwässerung, den Materialtransport und die Vortriebsentwässerung zur Verfügung steht. Anschließend wird der Bereich des Schachtfußes für die Herstellung des raise-boring-Verfahrens aufgeweitet. Die Felssicherung des Schachtfußes sollte abgeschlossen und evtl. Dichtungskrägen für den raise-boring Vorgang fertiggestellt sein, bevor die Pilotbohrung von der Drosselklappenkammer in den Bereich des Schachtfußes eindringt. Die Entwässerung des Schachtfußes muss auf den kurzzeitig bis mittelfristig höheren Wasseranfall infolge des Durchstichs der Schachtbohrung und infolge des Aufbohrens des Schachtes ausgelegt werden.

Anschließend wird der Großbohrkopf in den aufgeweiteten Bereich Schachtfußes mit dem Bohrgestänge kraftschlüssig verbunden und der Vollausbau des Schachtes im raise-boring Verfahren durchgeführt.

11.8.4 Aushubarbeiten / Vortriebsklassen / Felssicherung

Bei einem zyklischen Vortrieb (Lösen durch Sprengen, ggf. Bagger) werden die Vortriebsklassen entsprechend Kapitel 3.2.1 der DIN 18312 (Allgemeine Vortriebsklassen) beschrieben. Aufgrund der Einschätzung der Gebirgsverhältnisse wird erwartet, dass in den Granitstrecken überwiegend die Vortriebsklasse VK4, abschnittsweise auch VK3 gemäß DIN 18312 gefahren werden kann. Im Bereich von Vergrusungszonen und im Eingangsbereich des Zugangstollens sowie dem Durchstoßbereich des Oberwasserstollens in das Wasserschloss auch VK6 oder VK7 erforderlich werden.

Kapitel 11: Bautechnische Empfehlungen

Der Aufwand für das Lösen des Gebirges beim raise-boring kann näherungsweise durch die DIN 18301 beschrieben werden; unter Berücksichtigung evtl. erforderlicher Sicherungsarbeiten beim Bohren kann auch die DIN 18312, Abschnitt 3.2.2 für maschinellen Vortrieb herangezogen werden. Dem entsprechend wäre der Bohrvorgang überwiegend auf Grund der zu durchfahrenden Schwächezonengebiete durch die Klasse TBM 4 charakterisiert. Bei Abschnitten außerhalb vermuteter Schwächezonengebiete käme die Klasse TBM 1 zum Tragen.

Alle Abschnitte des Oberwasserstollens Schwarzenbachwerk werden voraussichtlich vollständig im Forbach-Granit aufgefahren. Aufgrund des Trennflächengefüges ist beim Sprengvortrieb gefügebeeinflusster Mehrausbruch zu erwarten. Dies gilt vor allem für oberflächennahe Stollenabschnitte, in denen das Gebirge durch Hangentspannung aufgelockert ist, sowie für Schwächezonen und Vergesungszonen, die vereinzelt zu durchfahren sind. Hier können sich durch engständige Klüftung Klüftkörper bilden, die bevorzugt im Kalottenbereich in den (noch) ungesicherten Abschlag hineinfallen oder -gleiten und zu Mehrausbruch führen können.

Eine Abschätzung der möglichen und bevorzugt zu erwartenden Gleitkeile und potenziellen Ablöseflächen beim Vortrieb ist durch eine geotechnische Trennflächenanalyse des Gefüges der zugehörigen Erkundungen mit Hilfe der Lagenkugel möglich. Geht man davon aus, dass das Gefügediagramm der Abb. 51 repräsentativ für das Granitgebirge im Bereich des Oberwasserstollens Schwarzenbachwerk ist, so ist dominant mit dem Auftreten der Kluftrichtungen HKR 1/HKR 2, sowie untergeordnet mit den HKR 4, HKR 5 und HKR 6 zu rechnen. Die HKR 1 ist dabei auch stark konjugiert auf.

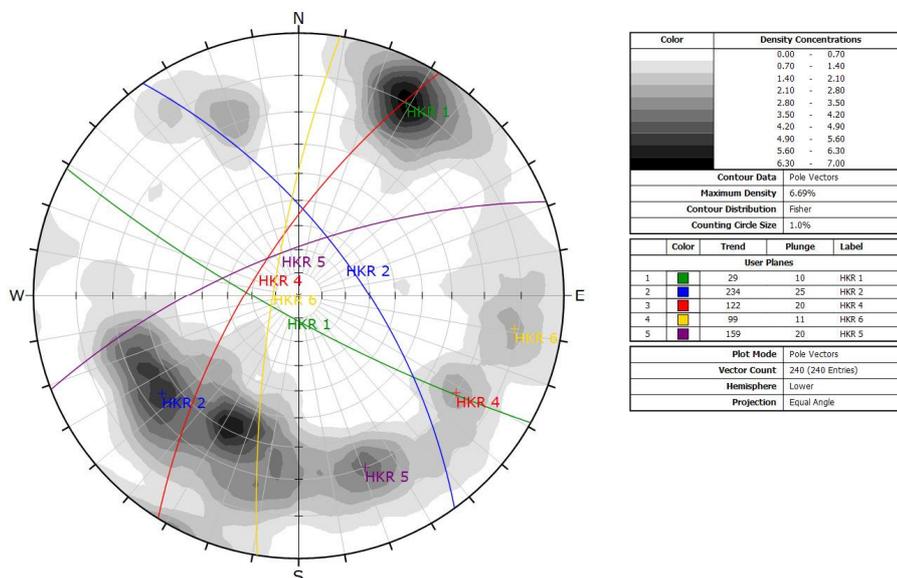


Abb. 51: Lagenkugel OWS Schwarzenbachwerk

Im Einfahrtbereich des Oberwasserstollens in das Wasserschloss I, im Kreuzungsbereich zwischen dem Zugangsstollen und der Schützenkaverne sowie in den Aufweitungsbereichen der Schachtkopf-kaverne und der Schachtfußkaverne können lokal ungünstige Klüftkonstellationen mehrerer Hauptklüftscharen zur Ablösung größerer Klüftkörper führen.

Zu beachten ist, dass die im Granit vergleichsweise häufig festgestellten Aplit-Gänge eine Raumstellung entsprechend der Gefügefläche HKR 6 und auch HKR 4 (siehe Kapitel 5.3.2) aufweisen

Kapitel 11: Bautechnische Empfehlungen

und demzufolge überwiegend parallel bis spitzwinklig zur Stollenachse orientiert sind. Größere Aplit-Gänge sind in der geologischen Karte dokumentiert. Dezimeter- bis meterbreite Aplit-Gänge wurden auch in den Erkundungsbohrungen aufgeschlossen. Aufgrund der vorliegenden Aufschlussergebnisse stellen die Aplit-Gänge bzw. die Kontaktflächen zum Granit keine geomechanisch relevanten Diskontinuitäten dar.

Für den Schacht können sich an den zylindrischen Schachtwänden eine Vielzahl verschiedener Gleitkeile durch die Verschneidung von jeweils 2 oder 3 Trennflächen mit der Ausbruchslaibung ergeben, so dass diese aus dem Gebirgsverband herausgleiten können. Durch den vergleichsweise kleinen Ausbruchsdurchmesser (<3 m) können sich bei standfestem Gebirge nur kleine Klufkörper (<0,1 m³) aus der Schachtwand lösen. Aus den auf Grund der Ergebnisse der relevanten Erkundungen abgeleiteten Schwächezonenbereichen im Bereich des Vertikalstollens können potenziell größere Gleitkeile entstehen und die Stollenwandung ausbrechen.

Um rechtzeitig ungünstige felsmechanische Konfigurationen (z. B. Vergrusungszonen und/oder standsicherheitsgefährdende Trennflächen) zu erkennen und geeignete Maßnahmen ergreifen zu können, ist eine ständige und sorgfältige felsmechanische Kartierung aller laufenden Vortriebe und die zeitnahe Erstellung/Aktualisierung der Gebirgsmodelle erforderlich. In diesem Zusammenhang wird empfohlen, vor Beginn des Aufbohrens des Schrägschachtes eine detaillierte Aufnahme und gebirgsmechanische Auswertung der Ergebnisse der Pilotbohrung durchzuführen, um evtl. erforderliche Sicherungsarbeiten oder größere Wasserzutritte im Vorfeld abschätzen zu können.

11.8.5 Bauzeitliche Entwässerung

Das im Zuge des Stollenausbruchs zutretende Bergwasser ist zu fassen und über eine entsprechend dem Vortriebsstand nachgeführte Bauwasserhaltung (zweckmäßigerweise als Sohlkanal im Tiefpunkt des Ausbruchsquerschnitts angeordnet) zu einem bauzeitlichen Auffangbehälter im Tiefpunkt des Vortriebsbereichs abzuleiten. Von dort kann das Wasser in einer Druckleitung aus dem Vortriebsbereich herausgepumpt, in einer Aufbereitungsanlage entsprechend den Auflagen der Behörden aufbereitet und in den behördlich genehmigten Vorfluter eingeleitet werden. Im oberen Abschnitt des Oberwasserstollens Schwarzenbachwerk bietet es sich an, einen Auffangbehälter in der Drosselklappenkammer anzulegen und von dort das Wasser in freiem Gefälle zum Stollenportal auszuleiten.

Die geohydraulische Situation im Oberwasserstollen Schwarzenbachwerk wird gemäß aktuellem Kenntnisstand so eingeschätzt, dass bevorzugt im oberen Eingangsbereich des Zugangsstollens und im Bereich der Drosselklappenkammer mit vergleichsweise geringer Überlagerung sowie in zu erwartenden Schwächezonen/Kluftzonen (vor allem beim Aufbohren des Schachtes) stärkere Wasserzutritte zu erwarten sind. Für den hochgelegenen Teil des Oberwasserstollens ergeben sich bis zu 5 l/s, für den tiefliegenden bis zu 4 l/s, sodass insgesamt mit vergleichsweise geringe Wassermengen von ≤ 10 l/s gerechnet werden muss.

Im Bereich des Vertikalstollens muss mit höherem Wasseranfall gerechnet werden. Hier muss über die vermuteten Schwächezonenbereiche mit einem Wasseranfall im Mittel von 4 l/s bis 9 l/s gerechnet werden. Bei über weite Strecken höheren Wasserdurchlässigkeiten innerhalb der Schwächezonenbereiche kann sich der Wasserfall auch bis zu 32 l/s erhöhen.

Beim raise-boring-Verfahren findet durch die Pilotbohrung eine Vorausentwässerung des Gebirges im Nahbereich des Vertikalstollens statt. Das durch die Pilotbohrung erfasste Bergwasser muss beim Durchstoß der Bohrung durch das Dach des Schachtfußes gefasst und schadlos durch den Hilfsstollen oder über die Kraftwerkskaverne abgeleitet werden. Es wird empfohlen, erst mit dem

Kapitel 11: Bautechnische Empfehlungen

raise-boring-Aufbruch zu beginnen, nachdem eine ausreichende Vorentwässerung des Gebirges durch die Pilotbohrung stattgefunden hat.

Die bauzeitlich voraussichtlich anfallenden Wassermengen sind in Kapitel 10 bzw. in der Anlage 2.1.8 benannt.

11.8.6 Ausbau des Oberwasserstollens Schwarzenbachwerk

Ein Ausbau in Form einer statisch wirksamen Innenschale ist für den Zugangsstollen der Drosselklappenkammer nicht vorgesehen und im Bereich des frischen bzw. gering verwitterten Granits aus felsmechanischer Sicht im Allgemeinen auch nicht erforderlich. In den Stollenabschnitten, in denen der Granit stark verwittert bzw. in vergruster Form ansteht und dem zufolge der Zerlegungsgrad groß, die Kluftabstände klein sind und das Korngefüge des Gesteins geschwächt ist, wird empfohlen, die ohnehin für die Vortriebssicherung erforderliche Spritzbetonschale zu einer permanenten Sicherung der Stollenlaibung auszubauen. Darüber hinaus wird empfohlen, den begehbaren Teil der Drosselklappenkammer mit einer Nachfallsicherung aus Spritzbeton und Felsnägeln gegen herabfallende Steine zu sichern, sofern nicht ohnehin aus gebirgsmechanischer Sicht eine permanente Sicherung der Ausbruchslaibung erforderlich wird.

Alle Abschnitte des Oberwasserstollens Schwarzenbach werden mit einer wasserdichten Innenschale aus Beton ausgekleidet, die durch Spaltinjektionen gegen das umgebende Gebirge verspannt wird. Im Bereich des Schachtes und im unteren Stollenabschnitt zwischen Schachtfuß und dem Kavernenteil Schwarzenbachwerk wird wasserseitig zusätzlich eine Stahlpanzerung eingebaut.

11.8.7 Bemessungswasserspiegel

Als Bemessungswasserspiegel für die Dimensionierung des Schachtausbaus im Hinblick auf äußeren Wasserdruck bei entleertem Schacht wird das Niveau der Drosselklappenkammer empfohlen. Dieses liegt auf ca. 615 mNN. Dies wird damit begründet, dass geringe Sickerwasserzutritte aus dem Wasserschloss in den Nahbereich des Vertikalschachtes nicht auszuschließen sind und eine vertikale Drainierung des Gebirges im Nahbereich des Schachtes durch eine ringförmige Auflockerungszone im Gebirge möglicherweise nicht stattfindet.

Der untere Abschnitt des Oberwasserstollens Schwarzenbachwerk mündet auf Höhe der Turbinenlaufrades (260 mNN) in das Kavernenteil Schwarzenbachwerk. Im Nahbereich des Kavernenteils Schwarzenbachwerk wird der Bergwasserspiegel permanent auf die Ebene des Turbinenhausflurs (d. h. 262 mNN) abgesenkt. Mit zunehmender Entfernung zur Kaverne steigt der Gebirgswasserspiegel an. Da der Oberwasserstollen druckwasserdicht ausgebaut wird, ist der durch die Kaverne beeinflusste Druckspiegel des Kluftgrundwasserleiters Forbach-Granit als Bemessungswasserspiegel anzunehmen.

11.8.8 Zufahrtsstollen und Portalbereich

Die Herstellung des Oberwasserstollens Schwarzenbachwerk erfolgt über einen Zugangsstollen, dessen Portal südöstlich des Wasserschlosses und südlich des Oberwasserstollens Schwarzenbachwerk liegt. Von dort verläuft der ca. 110 m lange Stollen in etwa in Richtung Nordnordwest mit etwa 3 % Steigung in das Gebirge hinein, um anschließend im hinteren Drittel des Zugangsstollens mit einer Richtung Nordosten orientierten Biegung nahezu senkrecht auf die Drosselklappenkammer zu treffen. Mit Beginn der Biegung zweigt vom Zugangsstollen bauzeitlich ein Hilfsstollen ab,

Kapitel 11: Bautechnische Empfehlungen

der bereits etwa 15 m nach dem Wasserwerk auf den Oberwasserstollen trifft. Für den Zugangsstollen ist nach Ende der Bautätigkeit eine Nutzung für den Betrieb als Zuwegung zum Oberwasserstollen vorgesehen.

Die zuvor getroffenen Aussagen bzgl. des Oberwasserstollens können nahezu vollständig auf den Zugangsstollen übertragen werden. Durch den Zugangsstollen verläuft nach derzeitigem Planungsstand jedoch ergänzend der auch im Zuge des Vortriebs des Oberwasserstollens zu durchfahrende und der Hauptkluftrichtung 1 zuzuordnende Schwächezonenebereich S-B1-B2-B4-B103. Auf Grund der Krümmung und der Orientierung des Zufahrtsstollens schneidet dieser den Schwächezonenebereich sowohl etwa in der Mitte des Stollens als auch im Übergangsbereich zur Schützenkaverne/Oberwasserstollen stark schleifend.

Im unmittelbaren Portalbereich liegt die Lockergesteinsmächtigkeit des Hangschutts (Homogenbereich Q1) wie auch in den umgebenen Bereichen leicht schwanken zwischen ca. 3 m bis 5 m. Unterlagert wird der Hangschutt von dem stärker verwitterten und oberflächennah kleinklüftigeren Forbach-Granit, der hier dem Homogenbereich F2 zuzuordnen ist. Der erkundeten Untergrundaufbau ist in den vorliegenden Planungsstand eingearbeitet worden. Dabei fielen leichte Abweichungen zwischen dem im Zuge der den geophysikalischen Messungen durchgeführten Vermessungen und dem der Planung zu Grunde liegenden Höhenmodell auf. Diese Abweichungen sollten im weiteren Projektverlauf verifiziert werden. Unter Zugrundelegung der derzeitigen Planung wird die Anschlagwand auf den obersten 3-4 m im Hangschutt hergestellt, der bis zur Sohle und noch darüber hinaus von Forbach-Granit des Homogenbereiches F2 unterlagert wird. Die Felsoberkante steigt in etwa hangparallel Richtung Nordwesten an.

Der auf den derzeitigen Planunterlagen beruhende Portallängsschnitt ist der Anlage 2.1.14 zu entnehmen.

11.9 Unterwasserstollen Schwarzenbachwerk

11.9.1 Bauwerksdaten

Die maßgebenden Bauwerksdaten zum Unterwasserstollen des Schwarzenbachwerks entsprechend dem aktuellen Planungsstand sind in Tab. 66 zusammengestellt.

Tab. 66: Bauwerksdaten Unterwasserstollen Schwarzenbachwerk

Niveau Achse Ausgang Kaverne Schwarzenbachwerk)	253,91 mNN
Niveau Achse am Diffusor (Zulaufbauwerk im Hauptstollen Kavernenwasserspeicher)	286,50 mNN
Gradientenneigung	0,0 % / 19,5 %
Gesamtlänge	191,25 m
Innendurchmesser	2,90 m / 5,00 m x 2,90 m
Außendurchmesser (Ausbruch)	ca. 3,5 m bis ca. 5,6 m Breite
Minimale / maximale Gebirgsüberdeckung	ca. 250 m / ca. 345 m

Die Lage des Unterwasserstollens des Schwarzenbachwerks ist im Übersichtslageplan der Anlage 1.1 dargestellt. Der geotechnische Längsschnitt durch den Stollen ist in der Anlage 2.1.8 zu finden. Dem entsprechend beginnt der Unterwasserstollen am Verzugsbauwerk hinter dem Kavernenteil Schwarzenbachwerk unterhalb des Turbinenflurs. Im Verzugsbauwerk wird der quadratische Strömungsquerschnitt im Maschinenhaus auf einer Länge von 6,7 m in einen Kreisquerschnitt im UW-

Kapitel 11: Bautechnische Empfehlungen

Stollen mit einem Innendurchmesser DN = 2,90 m überführt. Danach folgt eine ca. 13,3 m langer horizontaler Stollenabschnitt, der mit kurzem Krümmungsradius in eine Steigungsstrecke mit 19,5 % überführt wird. Der Unterwasserstollen Schwarzenbachwerk endet im Diffusor bzw. im Zulaufbauwerk am Ende des Hauptstollens des Kavernenwasserspeichers. Im Diffusor wird der kreisförmige Querschnitt DN 2,90 m in einer ca. 15 m langen Verzugsstrecke auf einen Rechteckquerschnitt 5,0 m x 2,9 m aufgeweitet.

11.9.2 Geologische und hydrogeologische Situation

Im Umfeld des Unterwasserstollens Schwarzenbachwerk wurden die Bohrungen KS BK 4PM, KS BK 103S und KS BK 104PM abgeteuft. Die Aufschlussresultate der vorgenannten Bohrungen sind in Kapitel 4 zusammengestellt, die Aufschlussprofile in der Anlage 3 zu finden. Eine Beschreibung der geologischen und hydrogeologischen Situation im Bereich des Unterwasserstollens ist in den Kapiteln 5 und 6 sowie in Kapitel 10 enthalten. Die felsmechanische Charakterisierung der beim Bau zu durchörternden Gesteine ist im Kapitel 9 zu finden. Der ingenieur- und hydrogeologische Längsschnitt durch den Unterwasserstollen Schwarzenbachwerk ist in der Anlage 2.1.8 dargestellt.

Gemäß Anlage 2.1.8 ist davon auszugehen, dass der Unterwasserstollen vollständig im Forbach-Granit aufzufahren sein wird. In den tiefer liegenden Stollenabschnitten ist allgemein ein geringer Bergwasserandrang zu erwarten. Lokal kann entlang von Großklüften und Zerrüttungszonen stärkerer Wasserzulauf stattfinden.

Generell ist zu erwarten, dass der in der Stollenumgebung anstehende Forbach-Granit überwiegend frisch bis angewittert (Homogenbereich F1) vorliegt. Abschnittsweise ist mit stärker tektonisch beanspruchten und durch hydrothermale Alteration zusätzlich vergrustem Granit zu rechnen; dieser weist einen geringeren Trennflächenabstand und einen höheren Verwitterungsgrad auf, was mit einer Verringerung der Gebirgsfestigkeit und einer Einstufung in die Homogenbereiche F2 und F3 einher geht. Konnten diese Vergrusungszonen bzgl. ihrer Ausbildung und Trennflächenorientierungen über mehrere Aufschlüsse hinweg nachverfolgt werden, wurden sie als großräumiger auftretende Schwächezonengebiete interpretiert. Die Existenz dieser Schwächezonengebiete konnte anhand der durchgeführten Erkundungen nachgewiesen werden, deren genaue Lage, Verlauf und Ausbildung durch das Gebirge jedoch nicht. Entsprechend stellen die in der Anlage 2.1.8 dargestellten Schwächezonengebiete lediglich eine aus den vorliegenden Ergebnissen abgeleitete Interpretation und keine tatsächlich im Stollenbereich nachgewiesenen Schwächezonengebiete dar.

Im Bereich des Unterwasserstollens Schwarzenbachwerk wurden in für die Stollen relevanten Tiefenbereichen mehrere Vergrusungszonen angetroffen, die in den Bohrungen KS BK 4PM, KS BK 103S und KS BK 104PM Einstufungen zwischen 11 % und 16 % der Bohrstrecke und somit des Gesteins in die Homogenbereich F2 und F3 notwendig machen. Lokale Über-, bzw. Unterschreitungen dieser Anteile an Homogenbereich F2 und F3 können nicht ausgeschlossen werden. In den Aufschlußbohrungen liegen die Vergrusungsbereiche überwiegend in Mächtigkeiten im Dezimeter- bis Meterbereich vor, vereinzelt können jedoch auch Mächtigkeiten von 2 m bis 6 m auftreten.

Aus großräumiger auftretenden Strukturen können in dem für den Unterwasserstollen Schwarzenbachwerk relevanten Gebirgsabschnitt zwei Schwächezonengebiete vermutet werden, die beide (S-B1-B2-B4-B103 und S-B1-B4-B103) der Hauptkluftrichtung HRK 1 zuzuordnen sind. Die Schwächezonengebiete konnten in den Aufschlüssen mit Mächtigkeiten zwischen 0,5 m und 6 m erkundet werden, von den der überwiegenden Teil jedoch dem Homogenbereich F2 zuzuordnen ist. Zusammenhängende Mächtigkeiten des Homogenbereiches F3 lagen unterhalb von 1 m. Auch hier sind Überschreitungen dieser aus den Aufschlußergebnissen abgeleiteten Mächtigkeiten nicht auszuschließen.

Kapitel 11: Bautechnische Empfehlungen

Eine erhöhte Gebirgsdurchlässigkeit bzw. erhöhter Bergwasserandrang ist außerhalb der Zone der oberflächennahen Hangentspannung und den Vergrusungszonen nicht zu erwarten.

Im Forbach-Granit sind Aplit-Gänge vorhanden, die überwiegend an der rheinischen Hauptkluftrichtung (HKR 6 bzw. HKR 4) orientiert sind und steil in östliche Richtung einfallen. Dezimeter- bis meterbreite Aplit-Gänge wurden auch in den Erkundungsbohrungen aufgeschlossen. Aufgrund der vorliegenden Aufschlussergebnisse stellen die Aplit-Gänge bzw. die Kontaktflächen zum Granit keine geomechanisch relevanten Diskontinuitäten dar.

11.9.3 Bauverfahren / Vortriebsverfahren

Für den Vortrieb des Unterwasserstollens Schwarzenbachwerk kommt aufgrund der Stollenquerschnittsgeometrie und der geotechnischen Eigenschaften des aufzufahrenden Gebirges aus tunnelbautechnischer Sicht ein zyklischer Vortrieb, vorzugsweise ein Sprengvortrieb, in Betracht. Ein Fräsvortrieb ist aufgrund der Gesteinsfestigkeit und Abrasivität des frischen oder gering verwitterten Granits nicht möglich bzw. wäre unwirtschaftlich.

Das Auffahren des Unterwasserstollens Schwarzenbachwerk erfolgt voraussichtlich vom Hauptstollen des Kavernenwasserspeichers her, mit einem kurzen Gegenvortrieb von der Kraftwerkskaverne.

11.9.4 Aushubarbeiten / Vortriebsklassen / Felssicherung

Bei einem zyklischen Vortrieb (Lösen durch Sprengen, ggf. Bagger) werden die Vortriebsklassen entsprechend Kapitel 3.2.1 der DIN 18312 (Allgemeine Vortriebsklassen) beschrieben. Aufgrund der Einschätzung der Gebirgsverhältnisse wird erwartet, dass in den Granitstrecken überwiegend die Vortriebsklasse VK4, abschnittsweise ggf. auch VK3 gemäß DIN 18312 gefahren werden kann. Im Bereich von Vergrusungszonen kann auch die Vortriebsklasse VK6, im Durchstoßbereich des Unterwasserstollens in das Verzugsbauwerk an der Kraftwerkskaverne auch VK7 erforderlich werden.

Als reguläre Sicherungsmittel sind Felsdübel bzw. Felsanker (SN-Anker) und bewehrter Spritzbeton in Betracht zu ziehen. Im Einzelfall kann es erforderlich werden, versagensgefährdete Stollenbereiche durch Vorspannanker oder Gewölbekonstruktionen aus Stahlbeton zu sichern.

Die durchgeführten Erkundungen zeigen ein häufiges, jedoch unregelmäßiges und ohne, bzw. sehr geringen Übergangsbereiche Auftreten von vergrusten Bereichen (Homogenbereiche F2/F3). Zur Absicherung einer ausreichenden Vortriebssicherung werden daher Vorerkundungen des Gebirges während des Vortriebs als sinnvoll erachtet. Dies könnte beispielsweise durch auf 10 m verlängerte Sprengbohrungen o. ä. erfolgen.

Aufgrund des Trennflächengefüges ist beim Sprengvortrieb gefügebeeinflusster Mehrausbruch zu erwarten. Die Gefügeauswertung der Bohrungen im Unterwasserstollen zeigt, dass dominant mit dem Auftreten der Kluftrichtungen HKR 1/HKR 2, sowie HKR 4, untergeordnet mit HKR 5 und HKR 6 zu rechnen ist. HKR 1 tritt dabei auch stark konjugiert auf. Die HRK 1 und HRK 4 kommen dabei neben ihrer Haupteinfallrichtung untergeordnet auch in konjugierter Lagerung vor. Eine Darstellung der aus den Aufschlüssen im Tiefenbereich der Stollen angetroffenen Trennflächenverteilung ist in Abb. 52 dargestellt.

Kapitel 11: Bautechnische Empfehlungen

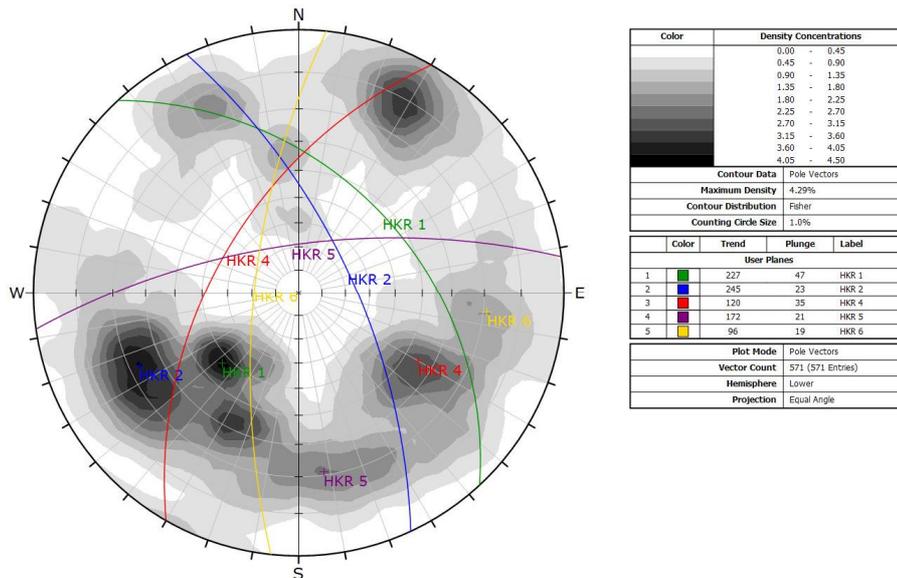


Abb. 52: Gefüge UWS Schwarzenbachwerk

11.9.5 Bauzeitliche Entwässerung

Das im Zuge des Stollenausbaus zutretende Bergwasser ist zu fassen und über eine entsprechend dem Vortriebsstand nachgeführte Bauwasserhaltung (zweckmäßigerweise als Sohlkanal im Tiefpunkt des Ausbruchquerschnitts angeordnet) zu einem bauzeitlichen Auffangbehälter im Tiefpunkt des Vortriebsbereichs abzuleiten. Von dort kann das Wasser in einer Druckleitung aus dem Vortriebsbereich herausgepumpt, in einer Aufbereitungsanlage entsprechend den Auflagen der Behörden aufbereitet und in den behördlich genehmigten Vorfluter eingeleitet werden. Bei einem fallenden Vortrieb, der am Hauptstollen des Kavernenwasserspeichers beginnt, sind Zwischenbecken in bautechnisch sinnvollen Abständen anzulegen.

Die geohydraulische Situation im Unterwasserstollen Schwarzenbachwerk wird gemäß aktuellem Kenntnisstand so eingeschätzt, dass in den vermutlich anzutreffenden Schwächezonen/Kluftzonen stärkere Wasserzutritte zu erwarten sind, insgesamt aber beim Ausbruch des Stollens nur vergleichsweise geringe Wassermengen (im Mittel <9 l/s) anfallen werden.

11.9.6 Ausbau des Unterwasserstollens Schwarzenbachwerk

Alle Abschnitte des Unterwasserstollens Schwarzenbachwerk werden mit einer wasserdichten Innenschale aus Stahlbeton ausgekleidet, die durch Spaltinjektionen gegen das umgebende Gebirge verspannt wird.

11.9.7 Bemessungswasserspiegel

Als Bemessungswasserspiegel für die Dimensionierung des Stollenausbaus im Hinblick auf äußeren Wasserdruck bei entleertem Stollen wird das Niveau des Stauwasserspiegels des Kavernenspeichers empfohlen, welches auf ca. 301,60 mNN liegt.

Dies wird damit begründet, dass die Kraftwerkskaverne am Tiefpunkt des Unterwasserstollen permanent als Gebirgsdrainage wirkt und dem entsprechend in ihrem Umfeld den Gebirgswasserspiegel auf das Niveau 262,00 mNN begrenzt, durch den Betrieb des Kavernenspeichers sich jedoch am Ende des Unterwasserstollen ein Gebirgswasserspiegel auf der Höhe des Stauspiegels des Kavernenspeichers einstellen wird. Durch eine kaum vermeidbare Auflockerung des Gebirges beim

Kapitel 11: Bautechnische Empfehlungen

Auffahren des Unterwasserstollens ist eine Längsläufigkeit entlang des Stollens nicht auszuschließen.

11.10 Energieableitungsstollen Oberstufe/Unterstufe und Unterstufe

11.10.1 Bauwerksdaten

Die maßgebenden Bauwerksdaten der Energieableitungsstollen Oberstufe und Unterstufe entsprechend dem aktuellen Planungsstand sind in Tab. 67 zusammengestellt.

Tab. 67: Bauwerksdaten Energieableitungsstollen (EAbS)

Niveau Sohle am Portalbauwerk	305,00 mNN
Niveau Sohle am Abzweig des EAbS US	315,00 mNN
Niveau Sohle EAbS US an Kraftwerkskaverne US	281,20 mNN
Niveau Sohle EAbS OS an Kraftwerkskaverne OS	626,50 m NN
Stollenlänge EAbS OS	- m
Stollenlänge EAbS US	345 m
Stollenlänge EAbS OS/US	276m
Gradientenneigung EAbS OS	0,0 % / 7,35 %
Gradientenneigung EAbS US	9,53 %
Gradientenneigung EAbS OS/US	-2,6 % / +6,09 %
Lichte Höhe EAbS OS/US	ca. 4,15 m
Lichte Weite EAbS OS/US	ca. 4,40 m
Lichte Höhe EAbS US	ca. 4,70 m
Lichte Weite EAbS US	ca. 3,40 m
Minimale / maximale Gebirgsüberdeckung EAbS OS/US	ca. 5 m / ca. 110 m

Die Lage des Energieableitungsstollens der Unterstufe (US) und des gemeinsamen Abschnittes der Oberstufe und Unterstufe (OS/US) ist im Übersichtslageplan der Anlage 1.1 dargestellt. Die Weiterführung des Energieableitungsstollens in Richtung der Oberstufe ist derzeit nicht Gegenstand der Planung. Im vorliegenden Gutachten wird nur der Energieableitungsstollen Unterstufe und der gemeinsame Abschnitt des Energieableitungsstollen Oberstufe/Unterstufe behandelt. Der diesbezügliche geotechnische Längsschnitt ist in der Anlage 2.1.6 und Anlage 2.1.11 zu finden. Abb. 53 zeigt die unterschiedlichen Regelquerschnitte.

Gemäß der vorliegenden Planung beginnt bzw. endet der Energieableitungsstollen Unterstufe, der zugleich als Fluchtstollen dienen soll, an der Nordwestseite des Kavernenteils Transformatoren im Niveau des obersten Flurs (Kranbahnflur) bei Stollen-Station 345 m. Er verlässt das Kavernenteil Transformatoren senkrecht zur Kavernenachse und schwenkt in einem Viertelkreisbogen in nordöstliche Richtung um. Mit ca. 345 m Gesamtlänge mündet der Energieableitungsstollen Unterstufe am Ende eines ca. 52 m langen Kreisbogens rechtwinklig in den Energieableitungsstollen Oberstufe (Energieableitungsstollen Unterstufe-Station 0 m = Energieableitungsstollen Oberstufe/Unterstufe-Station 300 m); von dort wird der Energieableitungsstollen über 300 m Länge als gemeinsamer Stollen Energieableitungsstollen Oberstufe/Unterstufe bis zum Portalgebäude (= Station 0 m EAbS Unterstufe/Oberstufe) im Rudolf-Fettweis-Werk geführt, dabei zwischen Station 0 m und Station 80 m mit verkleinertem Querschnitt (begehrbarer Kabelkanal) unterhalb des Zufahrtsstollens Kraftwerkskaverne.

Kapitel 11: Bautechnische Empfehlungen

Aufschlüsse hinweg nachverfolgt werden, wurden sie als großräumiger auftretende Schwächezonengebiete interpretiert. Die Existenz dieser Schwächezonengebiete konnte anhand der durchgeführten Erkundungen nachgewiesen werden, deren genaue Lage, Verlauf und Ausbildung durch das Gebirge jedoch nicht. Entsprechend stellen die in den Anlagen 2.1.6 und 2.1.11 dargestellten Schwächezonengebiete lediglich eine aus den vorliegenden Ergebnissen abgeleitete Interpretation und keine im unmittelbaren Bauwerksbereich nachgewiesenen Schwächezonen dar.

Im Bereich des Energieableitungsstollen OS/US wurden in für die Stollen relevanten Tiefenbereichen mehrere Vergrusungszonen angetroffen, die in den herangezogenen Bohrungen Einstufungen zwischen 2 % und 15 % der Bohrstrecke und somit des Gesteins in die Homogenbereich F2 und F3 notwendig machen. In den Aufschlußbohrungen liegen die Vergrusungsbereiche überwiegend in Mächtigkeiten im Dezimeter- bis Meterbereich vor, vereinzelt können jedoch auch Mächtigkeiten von bis zu 3 m auftreten.

In dem für den Energieableitungsstollen US relevanten Gebirgsbereich liegt der Anteil an Vergrusungszonen in den zu betrachtenden Bohrungen zwischen 4 % und 21 % bei ähnlichen Mächtigkeiten wie beim Energieableitungsstollen OS/US. Lokale Über-, bzw. Unterschreitungen dieser Anteile an Homogenbereich F2 und F3 können nicht ausgeschlossen werden.

Aus großräumiger auftretenden Strukturen können in dem für den Energieableitungsstollen OS/US relevanten Gebirgsabschnitt drei Schwächezonengebiete vermutet werden, von denen zwei (S-A1-A2-A20 und S-B9-B107) der Hauptklufrichtung HRK 1 und eine (S-B5-B6-B107) der HRK 6 zuzuordnen sind. Die Schwächezonengebiete konnten in den Aufschlüssen mit Mächtigkeiten zwischen 1 m und 11 m erkundet werden, von den der überwiegenden Teil jedoch dem Homogenbereich F2 zuzuordnen ist. Zusammenhängende Mächtigkeiten des Homogenbereiches F3 lagen zwischen 0,5 m und 8,0 m.

Im Umfeld des Energieableitungsstollens US wurden ebenfalls drei Schwächezonengebiete abgeleitet, von denen zwei (S-B104-A15 und S-B1-B2-B4-B103) der Hauptklufrichtung HRK 1 und eine (S-G103-A5) der HRK 5 zuzuordnen sind. Die Schwächezonengebiete konnten in den Aufschlüssen mit Mächtigkeiten zwischen 1 m und 6 m erkundet werden, von den der überwiegenden Teil jedoch dem Homogenbereich F2 zuzuordnen ist. Zusammenhängende Mächtigkeiten des Homogenbereiches F3 lagen bei bis zu 2,5 m. Auch hier sind Überschreitungen dieser aus den Aufschlußergebnissen abgeleiteten Mächtigkeiten nicht auszuschließen.

Eine erhöhte Gebirgsdurchlässigkeit bzw. erhöhter Bergwasserandrang ist außer in den Vergrusungszonen nach den vorliegenden Untersuchungsergebnissen nicht zu erwarten.

Die Gebirgsdurchlässigkeit wird generell als gering eingestuft.

11.10.3 Bauverfahren / Vortriebsverfahren

Für den Vortrieb der Energieableitungsstollen kommt aufgrund der Stollenquerschnittsgeometrien und der geotechnischen Eigenschaften des aufzufahrenden Gebirges aus tunnelbautechnischer Sicht ein zyklischer Vortrieb, vorzugsweise ein Sprengvortrieb, in Betracht. In Zonen starker Gebirgszerlegung oder Vergrusung kann ggf. auch das Lösen mit einem Tunnelbagger zweckmäßig sein. Ein Fräsvortrieb ist aufgrund der Gesteinsfestigkeit und Abrasivität des frischen oder gering verwitterten Granits nicht möglich bzw. wäre unwirtschaftlich.

Das Auffahren der Energieableitungsstollens erfolgt voraussichtlich vom Zufahrtsstollen Kraftwerkskaverne, welcher bei Station ca. 65 m die im Eingangsbereich gemeinsame Trasse in einem Linksbogen verlässt, während der Energieableitungsstollen Oberstufe/Unterstufe geradlinig weiter

Kapitel 11: Bautechnische Empfehlungen

verläuft in Richtung einer geplanten Oberstufe. Die schleifende Verzweigung der beiden Stollen erfordert eine sukzessive Aufweitung des Stollenquerschnitts, bis der Abstand zwischen beiden Stollenquerschnitten so groß wird, dass ein ausreichend tragfähiger Gebirgspfeiler zwischen den Einzelröhren die sich überlagernden Gewölbekräfte der benachbarten Stollen aufnehmen kann.

Bei Station 300 m des Energieableitungsstollen Unterstufe/Oberstufe zweigt der Vortrieb des Energieableitungsstollens Unterstufe im rechten Winkel ab. Der Energieableitungsstollen Unterstufe sowie der davon abzweigende Messstollen können von hier aufgefahren werden, wobei zusätzlich ein Gegenvortrieb von dem Kavernenteil Transformatoren her möglich wäre.

11.10.4 Aushubarbeiten / Vortriebsklassen / Felssicherung

Die zu durchörternden Gebirgsbereiche in den Energieableitungsstollen und die zu erwartenden Vortriebsklassen sind in den Anlagen 2.1.6 und 2.1.11 dargestellt.

Bei einem zyklischen Vortrieb (Lösen durch Sprengen, ggf. Bagger) werden die Vortriebsklassen entsprechend Kapitel 3.2.1 der DIN 18312 (Allgemeine Vortriebsklassen) beschrieben. Aufgrund der gutachterlichen Einschätzung der Gebirgsverhältnisse wird erwartet, dass in den Granitstrecken überwiegend die Vortriebsklasse VK3 und VK4 gemäß DIN 18312 gefahren werden können. Im Bereich von Schwächezonebereichen/Vergrusungszonen sowie im Verzweigungsbereich zwischen dem Zufahrtsstollen und dem Energieableitungsstollen Unterstufe/Oberstufe sowie im Durchschlagbereich des Kavernenteils Transformatoren kann auch die Vortriebsklasse auch VK6 oder VK7 erforderlich werden.

Alle Abschnitte der Energieableitungsstollen Unterstufe/Oberstufe und Unterstufe werden voraussichtlich vollständig im Forbach-Granit aufgefahren. Aufgrund des Trennflächengefüges ist beim Sprengvortrieb gefügebeflusster Mehrausbruch zu erwarten. Dies gilt vor allem für oberflächennahe Stollenabschnitte, in denen das Gebirge durch Hangentspannung aufgelockert ist, sowie für Schwächezonen und Vergrusungszonen, die vereinzelt zu durchfahren sind. Hier können sich durch engständige Klüftung Klüftkörper bilden, die bevorzugt im Kalottenbereich in den (noch) ungesicherten Abschlag hineinfallen oder -gleiten und zu Mehrausbruch führen können. Ebenso können sich in den Aufweitungsstrecken und Abzweigungsbereichen der Stollen aufgrund der räumlichen Hohlraumgeometrie ungünstige Trennflächenkonfigurationen ergeben, die eine verstärkte Sicherung mittels Spritzbeton und Felsnägeln erforderlich machen.

Aus den durchgeführten Erkundungsbohrungen ergeben sich Hinweise auf Schwächezonebereiche im unmittelbaren Portalbereich sowie zwischen Stollenmeter 200 bis Tunnelmeter 400 für den Energieableitungsstollen Unterstufe/Oberstufe sowie etwa im Bereich der Stollenmeter 100, 200 und 300 der Unterstufe. Überwiegend sind diese Schwächezonebereiche entsprechend der Hauptkluftrichtung HKR 1 orientiert, es treten jedoch auch Schwächezonen auf, die den Hauptkluftrichtungen HKR 4, HKR 5 und HKR 6 zuzuordnen sind.

Eine Abschätzung der möglichen und wahrscheinlich zu erwartenden Gleitkeile und potenziellen Ablöseflächen beim Vortrieb ist grundsätzlich durch eine geotechnische Trennflächenanalyse mit Hilfe der Lagenkugel möglich. Einen gesamtheitlichen Überblick über alle aus dem im Bereich der Energieableitungsstollen aus den Aufschlussbohrungen ermittelten Gefügedaten gibt Abb. 54.

Nach den durchgeführten Erkundungen sind für den Energieableitungsstollen OS/US als dominante Hauptkluftrichtungen die HKR 4 und HKR 6, wenig dominant auch die HKR 3 anzusehen. Untergeordnet kommen die HKR 1, HKR 2 und HKR 5 vor. Außer der HKR 3 kommen sämtliche Hauptkluftrichtungen auch in konjugierter Lagerung vor.

Kapitel 11: Bautechnische Empfehlungen

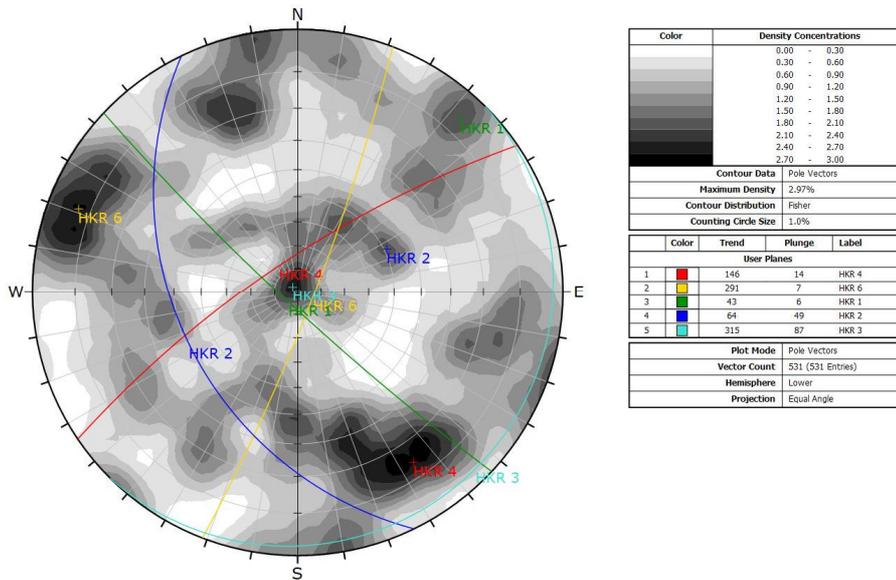


Abb. 54: Gefügedaten Energieableitungsstollen Ober-/Unterstufe

In dem für den Energieableitungsstollen US relevanten Gebirgsbereich dominieren nach den herangezogenen Erkundungen die HKR 1/HKR 2 und HKR 4 (siehe Abb. 55). Die übrigen Hauptkluftrichtungen kommen lediglich untergeordnet vor. Auch hier kommen die Hauptkluftrichtungen in konjugierter Lagerung vor.

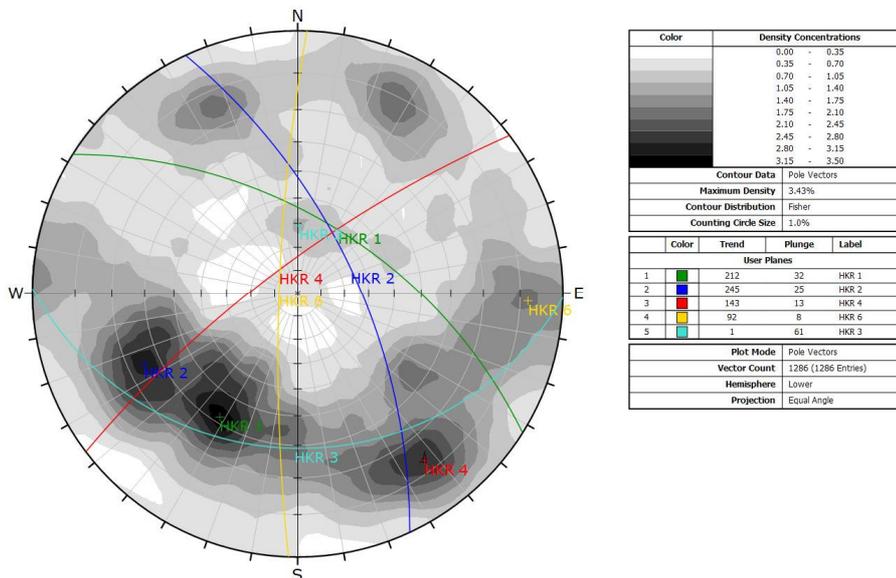


Abb. 55: Gefügedaten Energieableitungsstollen Unterstufe

Für den Bereich der Aufweitungskaverne der Verzweigung zwischen dem Energieableitungsstollen Unterstufe/Oberstufe und dem Zufahrtsstollen können mit Bezug auf die Gefügesituation gemäß Abb. 54 und Abb. 55 abgeleitet werden, dass es bei den großen Spannweiten zu gefügebedingten

Kapitel 11: Bautechnische Empfehlungen

Überprofilen im Kalottenbereich und zu einer Schwächung des schlanken Gebirgspfeilers zwischen den Stollen mit erhöhtem Sicherheitsaufwand führen kann und ggf. den Einbau einer Innenschale erfordern. Bei ungünstiger Verschneidungen der Trennflächenscharen an der Stirnwand der Aufweitungskaverne können die dadurch entstehenden Felskeile aus der Stirnwand potenziell herausgleiten, so dass diese Hohlraumfläche intensiv gesichert werden muss.

Zu beachten ist weiterhin, dass die im Granit vergleichsweise häufig festgestellten Aplit-Gänge eine Raumstellung entsprechend der Gefügefläche HKR 6 und auch HKR 4 (siehe Kapitel 5.3.2) aufweisen. Aufgrund der vorliegenden Aufschlussergebnisse stellen die Aplit-Gänge bzw. die Kontaktflächen zum Granit keine geomechanisch relevanten Diskontinuitäten dar.

Um ungünstige felsmechanische Konfigurationen (z. B. Vergrusungszonen und/oder standsicherheitsgefährdende Trennflächen) rechtzeitig zu erkennen und geeignete Maßnahmen ergreifen zu können, ist eine ständige und sorgfältige felsmechanische Kartierung aller laufenden Vortriebe und die zeitnahe Erstellung/Aktualisierung der Gebirgsmodelle erforderlich.

11.10.5 Bauzeitliche Entwässerung

Das im Zuge des Stollenaushubs zutretende Bergwasser ist zu fassen und über eine entsprechend dem Vortriebsstand nachgeführte Bauwasserhaltung zu einem bauzeitlichen Auffangbehälter/Pumpensumpf im Tiefpunkt des Vortriebsbereichs abzuleiten. Von dort kann das Wasser in einer Druckleitung aus dem Vortriebsbereich herausgepumpt, in einer Aufbereitungsanlage entsprechend den Auflagen der Behörden aufbereitet und in den behördlich genehmigten Vorfluter eingeleitet werden. Bei einem fallenden Vortrieb des Energieableitungsstollens Unterstufe, der bei Station 300 m des Energieableitungsstollens Unterstufe/Oberstufe beginnt, sind Zwischenbecken in bautechnisch sinnvollen Abständen anzulegen.

Die geohydraulische Situation beim Auffahren der Energieableitungsstollen wird nach aktuellem Kenntnisstand so eingeschätzt, dass in eventuell angetroffenen Schwächezonen/Kluftzonen stärkere Wasserzutritte (<8 l/s auf 100 m) zu erwarten sind, insgesamt aber beim Ausbruch der Stollen Energieableitungsstollens Unterstufe und Energieableitungsstollens Unterstufe/Oberstufe nur vergleichsweise geringe Wassermengen (im Mittel <10 l/s) anfallen werden.

Sofern beim Vortrieb stark wasserführende Großklüfte, Schwächezonen- und Zerrüttungszonen angeschnitten werden, sind die Wasserzutritte durch Abschlauungen u. ä. gezielt zu fassen, um baubetriebliche Erschwernisse durch Wasser zu vermeiden und die erforderlichen gebirgsmechanischen Sicherungsmaßnahmen zu erleichtern. Sofern ergiebige Wasserzutritte nicht nach kurzer Zeit versiegen, wird empfohlen, die Zuläufe mittels Injektionsbohrungen zu reduzieren. Die Injektionsbohrungen, Injektionsmengen und Veränderungen der Schüttungen sind zu dokumentieren. Auf der Grundlage dieser Daten ist dann zeitnah ein gesamtheitliches Konzept für die Behandlung der wasserführenden Klüfte und Kluftzonen im Hinblick auf den Betrieb des Energieableitungsstollens zu erstellen.

11.10.6 Ausbau der Energieableitungsstollen

Ein durchgängiger Ausbau in Form einer statisch wirksamen Innenschale ist für die Energieableitungsstollens Unterstufe und Oberstufe/Unterstufe nicht vorgesehen. Im Bereich des frischen bzw. gering verwitterten Granits ist eine Innenschale aus felsmechanischer Sicht im Allgemeinen auch nicht erforderlich. Gleichwohl wird empfohlen, die Stollen mit einem hinsichtlich der langfristigen Nutzung ausreichend sicher dimensionierten Nachfallschutz aus bewehrtem Spritzbeton in Verbindung mit einer Systemankerung auszukleiden, da die Stollen als Verbindungsweg zu den techni-

Kapitel 11: Bautechnische Empfehlungen

schen Anlagen in der Kaverne und als Fluchtweg jederzeit sicher passierbar sein müssen. Zur Vermeidung des Aufbaus eines äußeren Wasserdrucks werden rasterförmig angeordnete Perforationen der Spritzbetonschale als sinnvoll angesehen.

In den Stollenabschnitten, in denen der Granit stark verwittert bzw. in vergruster Form ansteht und dem zufolge der Zerlegungsgrad groß, die Kluftabstände klein sind und das Korngefüge des Gesteins geschwächt ist, wird empfohlen, die ohnehin für die Vortriebssicherung erforderliche Spritzbetonschale zu einer permanenten Sicherung der Stollenlaibung auszubauen, welche auf Gebirgsdruck / Auflockerungsdruck bemessen wird.

11.10.7 Bemessungswasserspiegel

Da die Energieableitungsstollen nicht durchgängig mit einer Innenschale ausgekleidet werden sollen, wirken sie dauerhaft gebirgsdrainierend. Dabei findet eine Wasserströmung über Klüfte in Richtung der Stollen statt; dem zufolge stellt sich der Bergwasserspiegel auf das Niveau der Stollensohle ein, sofern er nicht durch andere Stollen oder dem Kavernenteil Schwarzenbachwerk noch tiefer (z. B. auf das Niveau 271,90 mNN im Bereich des Kavernenteils Transformatoren) abgesenkt wird. Mit zunehmender Entfernung zur Kaverne steigt der Gebirgswasserspiegel an.

Da der Energieableitungsstollen im Eingangsbereich (Station 0 m bis ca. Station 80 m) eine abdichtende Innenschale erhalten sollte, wird für diesen Stollenabschnitt als Bezugsniveau für die Bemessung der Innenschale der vorläufig geschätzte Grundwasserspiegel (d. h. ca. 325,00 mNN) empfohlen.

Dort, wo die Energieableitungsstollen aus tunnelstatischen und gebirgsmechanischen Gründen (zumindest abschnittsweise) mit einer Auskleidung versehen werden müssen, ist der Ausbau hydraulisch durchlässig zu gestalten, um den Aufbau eines äußeren Wasserdrucks zu vermeiden.

11.11 Schutterstollen Zufahrtsstollen und Schutterstollen Nebenstollen

11.11.1 Bauwerksdaten

Die maßgebenden Bauwerksdaten der beiden Schutterstollen (Zufahrtsstollen und Nebenstollen) entsprechend dem aktuellen Planungsstand sind in Tab. 68 zusammengestellt.

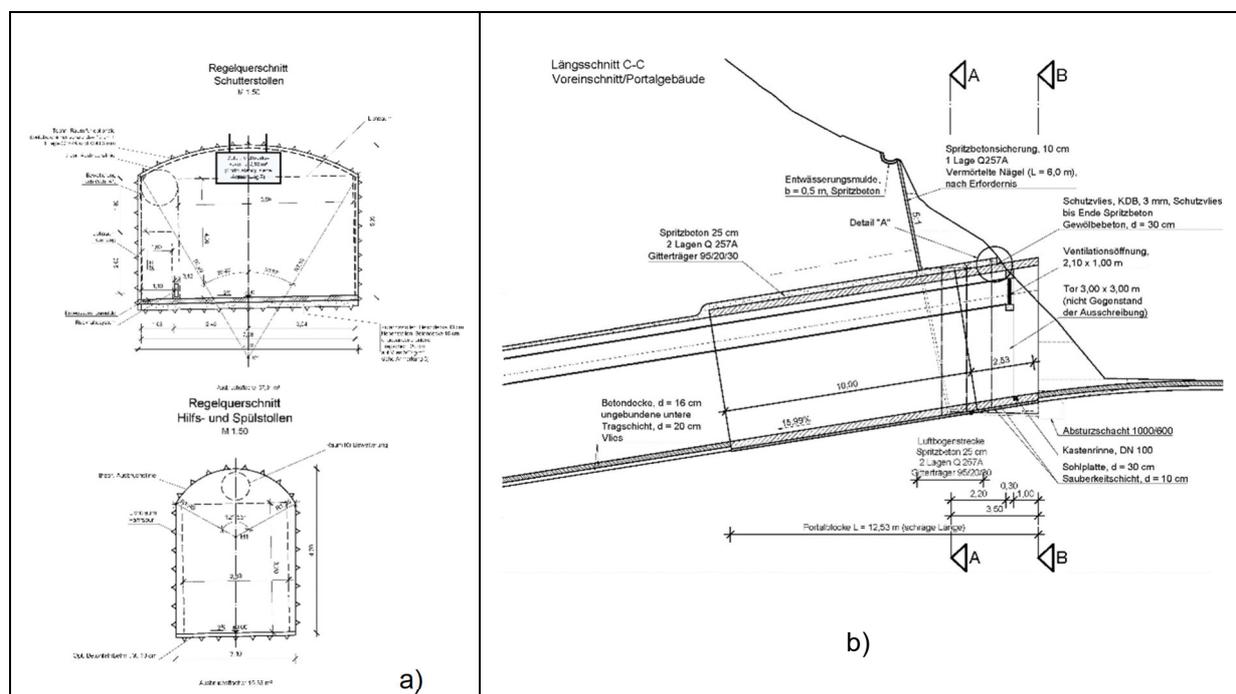
Tab. 68: Bauwerksdaten Schutterstollen Zufahrtsstollen und Nebenstollen

Schutterstollen Zufahrtsstollen	
Niveau Sohle am Portalbauwerk	329,74 mNN
Niveau Sohle am Zufahrtsstollen	304,00 mNN
Stollenlänge	164,62 m
Gradientenneigung	-15,64 %
Lichte Höhe	5,09 m
Lichte Weite	7,08 m
Minimale / maximale Gebirgsüberdeckung	4 m / 89 m
Schutterstollen Nebenstollen	
Niveau Sohle am Zufahrtsstollen	304,00 mNN
Niveau Sohle am Nebenstollen V	295,57 mNN
Stollenlänge	114,28 m
Gradientenneigung	-8,08 %
Lichte Höhe	5,09 m
Lichte Weite	7,08 m
Minimale / maximale Gebirgsüberdeckung	89 m / 135 m

Kapitel 11: Bautechnische Empfehlungen

Die Lage der beiden Schutterstollen ist im Übersichtslageplan der Anlage 1.1 dargestellt. Der Regelquerschnitt ist in Abb. 56a) dargestellt.

Die Schutterstollen dienen der Verbesserung der Baustellenlogistik und sollen nach Abschluss der Bauarbeiten als Rettungsstollen und Lüftungsstollen sowie als Zufahrt zum Kavernenwasserspeicher dienen. Der Schutterstollen Zufahrtsstollen stellt neben dem Zufahrtsstollen und dem Hauptstollen des Kavernenwasserspeichers eine bauzeitliche Verbindung zwischen den unterirdischen Vortriebsstrecken und der Außenwelt her, über die Materialtransporte (Anlieferungen und Abtransporte) bewältigt und ein Teil der Bewetterung der Vortriebe geführt werden können, wobei der Schutterstollen Zufahrtsstollen als einziger Stollen direkt an das öffentliche Straßennetz (B462) anschließt. Das Portal wird mit einem Portalbauwerk abgesichert.



**Abb. 56: a) Regelquerschnitt Schutterstollen und Hilfsstollen
b) Portal und Eingangsbereich Schutterstollen Zufahrtsstollen**

Der Schutterstollen Nebenstollen ist die Verlängerung des Schutterstollens Zufahrtsstollen bis hin zum Nebenstollen V. Von dort könnte grundsätzlich der gesamte Kavernenwasserspeicher mit den Nebenstollen I bis V sowie der Hauptstollen Kavernenwasserspeicher aufgefahren werden. Der diesbezügliche geotechnische Längsschnitt ist in der Anlage 2.1.12 zu finden. Abb. 56 zeigt die unterschiedlichen Regelquerschnitte.

11.11.2 Geologische und hydrogeologische Situation

Im Umfeld des Schutterstollens wurden die Bohrungen KS BK 9, KS BK 102 und KS BK 107 abgeteuf. Die Aufschlussresultate der vorgenannten Bohrungen sind in Kapitel 4 zusammengestellt, die Aufschlussprofile in der Anlage 3 zu finden. Eine Beschreibung der geologischen und hydrogeologischen Situation im Bereich des Schutterstollens ist in den Kapiteln 5 und 6 sowie in Kapitel 10 enthalten. Die felsmechanische Charakterisierung der beim Bau zu durchörternden Gesteine ist im Kapitel 9 zu finden. Der ingenieur- und hydrogeologische Längsschnitt durch den Unterwasserstollen Schwarzenbachwerk ist in der Anlage 2.1.12 dargestellt.

Kapitel 11: Bautechnische Empfehlungen

Gemäß Anlage 2.1.12 ist davon auszugehen, dass der Schutterstollen vollständig im Forbach-Granit aufzufahren sein wird. In den tiefer liegenden Stollenabschnitten ist allgemein ein geringer Bergwasserandrang zu erwarten. Lokal kann entlang von Großklüften und Zerrüttungszonen stärkerer Wasserzulauf stattfinden.

Generell ist zu erwarten, dass der in der Stollenumgebung anstehende Forbach-Granit überwiegend frisch bis angewittert (Homogenbereich F1) vorliegt. Abschnittsweise ist mit stärker tektonisch beanspruchten und durch hydrothermale Alteration zusätzlich vergrustem Granit zu rechnen; dieser weist einen geringeren Trennflächenabstand und einen höheren Verwitterungsgrad auf, was mit einer Verringerung der Gebirgsfestigkeit und einer Einstufung in die Homogenbereiche F2 und F3 einhergeht. Konnten diese Vergrusungszonen bzgl. ihrer Ausbildung und Trennflächenorientierungen über mehrere Aufschlüsse hinweg nachverfolgt werden, wurden sie als großräumiger auftretende Schwächezonengebiete interpretiert. Die Existenz dieser Schwächezonengebiete konnte anhand der durchgeführten Erkundungen nachgewiesen werden, deren genaue Lage, Verlauf und Ausbildung durch das Gebirge jedoch nicht. Entsprechend stellen die in der Anlage 2.1.12 dargestellten Schwächezonengebiete lediglich eine aus den vorliegenden Ergebnissen abgeleitete Interpretation und keine tatsächlich im Stollenbereich nachgewiesenen Schwächezonen dar.

Im Bereich des Schutterstollens wurden in für die Stollen relevanten Tiefenbereichen mehrere Vergrusungszonen angetroffen, die in den Bohrungen KS BK 9, KS BK 102 und KS BK 107 Einstufungen zwischen 2 % und 30 % der Bohrstrecke und somit des Gesteins in die Homogenbereich F2 und F3 notwendig machen. Lokale Über-, bzw. Unterschreitungen dieser Anteile an Homogenbereich F2 und F3 können nicht ausgeschlossen werden. In den Aufschlußbohrungen liegen die Vergrusungsbereiche überwiegend in Mächtigkeiten im Dezimeter- bis Meterbereich vor, vereinzelt können jedoch auch Mächtigkeiten von 3 m bis 10 m auftreten.

Aus großräumiger auftretenden Strukturen können in dem für den Schutterstollen relevanten Gebirgsabschnitt zwei Schwächezonengebiete vermutet werden, die der HKR 5 (S-G103-A5) und der HKR 6 (S-B5-B6-B107) zuzuordnen sind. Eine weiterer, der Hauptkluftrichtung HKR 1 zuzurechnender Schwächezonengebiet (S-B9-B107) verläuft westlich und in etwa parallel zum Schutterstollen Nebenstollen. Obwohl der Schwächezonengebiet den Stollen vermutlich nicht schneidet, ist von Beeinflussungen des Gebirges durch den Schwächezonengebiet auszugehen. Die Schwächezonengebiete konnten in den Aufschlüssen mit Mächtigkeiten von bis zu 11 m erkundet werden. Der Anteil des Homogenbereiches F3 an dieser Mächtigkeit kann mit bis zu 8 m abgeschätzt werden. Auch hier sind Überschreitungen dieser aus den Aufschlußergebnissen abgeleiteten Mächtigkeiten nicht auszuschließen.

Eine erhöhte Gebirgsdurchlässigkeit bzw. erhöhter Bergwasserandrang ist außerhalb der Zone der oberflächennahen Hangentspannung und den Vergrusungszonen nicht zu erwarten.

Im Forbach-Granit sind Aplit-Gänge vorhanden, die überwiegend an der rheinischen Hauptkluftrichtung (HKR 6 bzw. HKR 4) orientiert sind und steil in östliche Richtung einfallen. Dezimeter- bis meterbreite Aplit-Gänge wurden auch in den Erkundungsbohrungen aufgeschlossen. Aufgrund der vorliegenden Aufschlussergebnisse stellen die Aplit-Gänge bzw. die Kontaktflächen zum Granit keine geomechanisch relevanten Diskontinuitäten dar.

11.11.3 Bauverfahren / Vortriebsverfahren

Für den Vortrieb der Schutterstollen kommt aufgrund der Stollenquerschnittsgeometrien und der geotechnischen Eigenschaften des aufzufahrenden Gebirges aus tunnelbautechnischer Sicht ein zyklischer Vortrieb, vorzugsweise ein Sprengvortrieb, in Betracht. In Zonen starker Gebirgszerlegung oder Vergrusung kann ggf. auch das Lösen mit einem Tunnelbagger zweckmäßig sein. Ein

Kapitel 11: Bautechnische Empfehlungen

Fräsvortrieb ist aufgrund der Gesteinsfestigkeit und Abrasivität des frischen oder gering verwitterten Granits nicht möglich bzw. wäre unwirtschaftlich.

Das Auffahren der Schutterstollen erfolgt vom Parkplatz an der B462, unmittelbar nördlich der alten Straßenbrücke über die Druckleitungen des Rudolf-Fettweis-Werkes.

Der Stollen wird im Portalbereich an der B462 mit nahezu horizontaler Gradienten, nach wenigen Stollenmetern aber bereits mit einem Gefälle von ca. -16 % aufgefahren, bis der Zufahrtsstollen bei Station 164m erreicht ist.

Von diesem Kreuzungspunkt kann der Schutterstollen mit einem Gefälle von -8 % bis zum Nebensollen V des Kavernenspeichers aufgefahren werden.

11.11.4 Aushubarbeiten / Vortriebsklassen / Felssicherung

Bei einem zyklischen Vortrieb (Lösen durch Sprengen, ggf. Bagger) werden die Vortriebsklassen entsprechend Kapitel 3.2.1 der DIN 18312 (Allgemeine Vortriebsklassen) beschrieben. Aufgrund der Einschätzung der Gebirgsverhältnisse wird erwartet, dass in den stark zerlegten oder vergrusteten Granitstrecken des Schutterstollens überwiegend die Vortriebsklasse VK6, abschnittsweise auch VK7 gemäß DIN 18312 gefahren werden kann. In frischem, gering geklüfteten Granit (Homogenbereich F1) können auch die Vortriebsklassen VK3 oder VK4 realisierbar werden. Im Kreuzungsbereich zwischen den beiden Schutterstollen und dem Zufahrtsstollen sowie im Durchschlagbereich zum Nebensollen V des Kavernenspeichers werden voraussichtlich Vortriebsklassen mit vorausseilender Sicherung (VK6 oder VK7) und ggf. Zusatzmaßnahmen erforderlich.

Als reguläre Sicherungsmittel sind Felsdübel bzw. Felsanker (SN-Anker) und bewehrter Spritzbeton in Betracht zu ziehen. Im Einzelfall kann es erforderlich werden, versagensgefährdete Stollenbereiche durch Vorspannanker oder Gewölbekonstruktionen aus Stahlbeton zu sichern.

Die durchgeführten Erkundungen zeigen ein häufiges, jedoch unregelmäßiges und ohne, bzw. sehr geringen Übergangsbereiche Auftreten von vergrusteten Bereichen (Homogenbereiche F2/F3). Zur Absicherung einer ausreichenden Vortriebssicherung werden daher Vorerkundungen des Gebirges während des Vortriebs als sinnvoll erachtet. Dies könnte beispielsweise durch auf 10 m verlängerte Sprengbohrungen o. ä. erfolgen.

Alle Abschnitte der Schutterstollen werden voraussichtlich vollständig im Forbach-Granit aufgefahren. Aufgrund des Trennflächengefüges ist beim Sprengvortrieb gefügebeeinflusster Mehrausbruch zu erwarten. Dies gilt vor allem für oberflächennahe Stollenabschnitte, in denen das Gebirge durch Hangentspannung aufgelockert ist, sowie für Schwächezonen und Vergrusungszonen, die voraussichtlich den Vortrieb des Schutterstollens Zufahrtsstollen begleiten werden. Hier können sich durch engständige Klüftung Klüftkörper bilden, die bevorzugt im Kalottenbereich in den (noch) ungesicherten Abschlag hineinfallen oder -gleiten und zu Mehrausbruch führen können. Ebenso können sich in den Aufweitungsstrecken und Abzweigungsbereichen der Stollen aufgrund der räumlichen Hohlraumgeometrie ungünstige Trennflächenkonfigurationen ergeben, die eine verstärkte Sicherung mittels Spritzbeton und Felsnägeln erforderlich machen.

Eine Abschätzung der möglichen und wahrscheinlich zu erwartenden Gleitkeile und potenziellen Ablöseflächen beim Vortrieb ist durch eine geotechnische Trennflächenanalyse des Gefüges der im Umfeld des Schutterstollens niedergebrachten Erkundungsbohrungen mit Hilfe der Lagenkugel möglich. Einen gesamtheitlichen Überblick über die Trennflächenverteilung gibt die Abb. 57. Die Gefügeauswertung zeigt ein dominantes Vorkommen der Hauptkluftrichtungen HKR 1/HKR 2 und HKR 4. HKR 5 und HKR 6 kommen nur untergeordnet vor. Sämtliche Hauptkluftrichtungen kom-

Kapitel 11: Bautechnische Empfehlungen

men auch in konjugierter Lagerung vor. Daraus ergeben sich für den Schutterstollen Zufahrtsstollen potenzielle Ablösungen von Felskörpern aus der südlichen Ulme bzw. Kalotte durch Gleiten auf Trennflächen der HKR 5 und durch Felskeile infolge der Trennflächenverschneidung zwischen HKR 5 und HKR 6 oder zwischen HKR 5 und HKR 1/HKR 2.

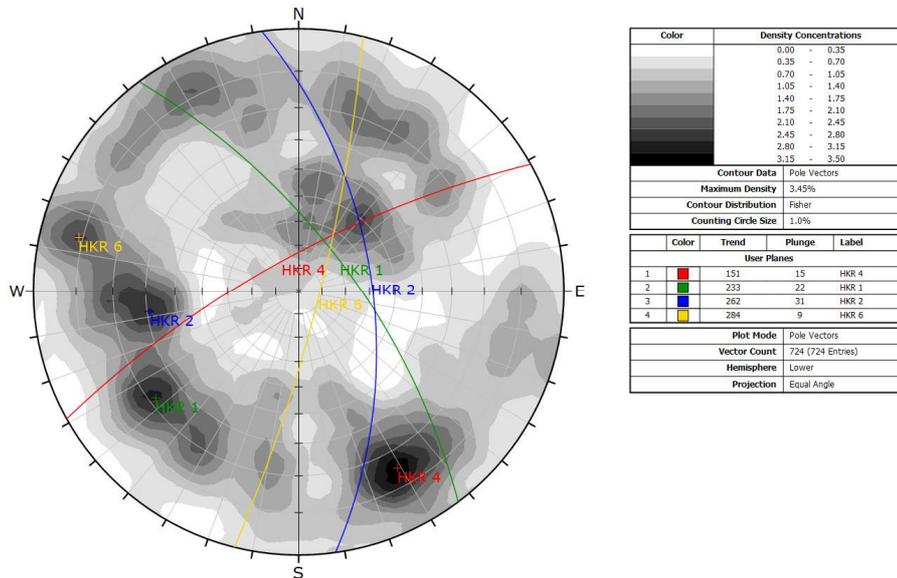


Abb. 57: Gefügedaten Zufahrtsstollen

Weiterhin ist zu beachten, dass die im Granit vergleichsweise häufig festgestellten Aplit-Gänge eine Raumstellung entsprechend der Gefügefläche HKR 6 und auch HKR 4 (siehe Kapitel 5.3.2) aufweisen. Aufgrund der vorliegenden Aufschlussergebnisse stellen die Aplit-Gänge bzw. die Kontaktflächen zum Granit keine geomechanisch relevanten Diskontinuitäten dar.

Um ungünstige felsmechanische Konfigurationen (z. B. Vergrusungszonen und/oder standsicherheitsgefährdende Trennflächen) rechtzeitig zu erkennen und geeignete Maßnahmen ergreifen zu können, ist eine ständige und sorgfältige felsmechanische Kartierung aller laufenden Vortriebe und die zeitnahe Erstellung/Aktualisierung der Gebirgsmodelle erforderlich.

11.11.5 Bauzeitliche Entwässerung

Das im Zuge des Aushubs der Schutterstollen zutretende Bergwasser ist zu fassen und über eine entsprechend dem Vortriebsstand nachgeführte Bauwasserhaltung (zweckmäßigerweise als Sohlkanal im Tiefpunkt des Ausbruchsquerschnitts angeordnet) zu einem bauzeitlichen Auffangbehälter im Tiefpunkt des Vortriebsbereichs abzuleiten. Von dort kann das Wasser in einer Druckleitung aus dem Vortriebsbereich herausgepumpt, in einer Aufbereitungsanlage entsprechend den Auflagen der Behörden aufbereitet und in den behördlich genehmigten Vorfluter eingeleitet werden.

Durch den steil fallenden Vortrieb des Schutterstollens Zufahrtsstollen und den vergleichsweise hohen Wasserandrang im Stolleneingangsbereich sollte der Pumpensumpf ausreichenden Abstand von der Ortsbrust haben, um die Vortriebsarbeiten nicht zu behindern. Darüber hinaus empfiehlt es sich, Zwischenbecken in bautechnisch sinnvollen Abständen anzulegen. Nach dem Durchschlag des Schutterstollens in den Zufahrtsstollen kann die bauzeitliche Entwässerung des Schutterstollens Zufahrtsstollen über den Zufahrtsstollen in Richtung Murg erfolgen. Dazu muss ausreichend großer Auffangraum im Kreuzungsbereich der Stollen bereitgestellt werden, der zusätzlich das

Kapitel 11: Bautechnische Empfehlungen

beim (fallenden) Vortrieb des Schutterstollens Nebenstollen anfallende Bergwasser aufnehmen kann.

Die geohydraulische Situation im Bereich des Schutterstollens Zufahrtsstollen wird gemäß aktuellem Kenntnisstand so eingeschätzt, dass im Stolleneingangsbereich und in den voraussichtlich anzutreffenden Schwäche-/Kluftzonen stärkere Wasserzutritte zu erwarten sind, insgesamt aber beim Ausbruch des Stollens und während der Bauzeit der Unterstufe beherrschbare Wassermengen (im Mittel <16 l/s) anfallen werden.

Sofern beim Vortrieb stark wasserführende Großklüfte, Schwäche-/Zerrüttungszonen angeschnitten werden, sind die Wasserzutritte durch Abschlauchungen u. ä. gezielt zu fassen, um baubetriebliche Erschwernisse durch Wasser zu vermeiden und die erforderlichen gebirgsmechanischen Sicherungsmaßnahmen zu erleichtern. Sofern ergiebige Wasserzutritte nicht nach kurzer Zeit versiegen, wird empfohlen, die Zuläufe mittels Injektionsbohrungen zu reduzieren. Die Injektionsbohrungen, Injektionsmengen und Veränderungen der Schüttungen sind zu dokumentieren. Auf der Grundlage dieser Daten ist dann zeitnah ein gesamtheitliches Konzept für die Behandlung der wasserführenden Klüfte und Kluftzonen im Hinblick auf die spätere Verwendung des Schutterstollens als Rettungsweg zu erstellen.

11.11.6 Bemessungswasserspiegel

Die Schutterstollen wirken während der Bauzeit als Gebirgsdrainage; dem zufolge stellt sich der Bergwasserspiegel im Nahbereich der Stollen bauzeitlich auf das Niveau der Stollensohle ein. Die Angabe eines Bemessungswasserspiegels ist deshalb nicht erforderlich. Aufgrund der geplanten dauerhaften Nachnutzung der Schutterstollen nach dem Bau muss die Stollenentwässerung dauerhaft betrieben werden.

11.11.7 Anschlagswand

Nach den durchgeführten Erkundungen und Kartierungen ist davon auszugehen, dass der unmittelbare Portalbereich/Anschlagswand bereits überwiegend im durch witterungsbedingte Einflüsse dem Homogenbereich F2 zuzuordnenden Forbach-Granit aufgebaut ist. Zur Geländeoberkante hin ist mit einer dünnen ($<1,5$ m) Lockergesteinsschicht aus Hangschutt (Homogenbereich Q1) zu rechnen.

Talseitig fällt der Granit steil ab und es treten die im Zuge der Erstellung der B462 und der zugehörigen Parkplatzfläche anthropogen überprägten Lockergesteine auf. Die Bodenschichten sind durch den eingebrachten Fahrbahnbelag aus Asphalt verdeckt. Die geologischen Verhältnisse sind in der Anlage 2.1.17 dargestellt.

11.12 Sonstige Bauwerke

11.12.1 Hilfsstollen

11.12.1.1 Bauwerksdaten

Die maßgebenden Bauwerksdaten der Hilfsstollen (Murgwerk und Schwarzenbachwerk) entsprechend dem aktuellen Planungsstand sind in Tab. 69 zusammengestellt.

Tab. 69: Bauwerksdaten Hilfsstollen Murgwerk und Schwarzenbachwerk

Hilfsstollen Murgwerk	
Niveau Fahrbahnoberkante am Zufahrtsstollen	275,58 mNN
Niveau Fahrbahnoberkante an der Schachtfußkaverne Murgwerk	272,52 mNN
Stollenlänge	44,46 m
Gradientenneigung	-7,7 %
Lichte Höhe	4,70 m
Lichte Weite	3,40 m
Minimale / maximale Gebirgsüberdeckung	224 m / 229 m
Hilfsstollen Schwarzenbachwerk	
Niveau Fahrbahnoberkante am Unterwasserstollen Schwarzenbach	256,78 mNN
Niveau Fahrbahnoberkante am Oberwasserstollen Schwarzenbach	259,68 mNN
Stollenlänge	51,86 m
Gradientenneigung	+5,6 %
Lichte Höhe	4,70 m
Lichte Weite	3,40 m
Minimale / maximale Gebirgsüberdeckung	348 m / 351 m

Die Lage der beiden Hilfsstollen ist im Übersichtslageplan der Anlage 1.1, das Regelprofil der Hilfsstollen in der Abb. 56 dargestellt.

Die Hilfsstollen dienen der Verbesserung bzw. der Vermeidung von Behinderungen der baubetrieblichen Abläufe; sie werden voraussichtlich nach dem Bau wieder verschlossen.

Der Hilfsstollen Murg erleichtert das Auffahren der Schachtfußkaverne am Oberwasserschacht des Murgwerks, die Vorbereitung des raise-borings, das Schüttern und den Ausbau der Schachtfußkaverne.

Der Hilfsstollen Schwarzenbach umfährt das Kavernenteil Schwarzenbachwerk und ermöglicht so das Auffahren der Schachtfußkaverne am Oberwasserschacht Schwarzenbach, die Vorbereitung des raise-borings, das Schüttern und den Ausbau der Schachtfußkaverne, ohne Passage der Kavernenbaustelle.

11.12.1.2 Geologische und hydrogeologische Situation

Die geologischen und hydrogeologischen Verhältnisse sind in den entsprechenden Kapiteln des Unterwasserstollens Murg (Kapitel 11.6.2) und des Unterwasserstollens Schwarzenbach (Kapitel 11.8.2) beschrieben.

11.12.1.3 Bauverfahren / Vortriebsverfahren

Für den Vortrieb der Hilfsstollen kommt aufgrund der Stollenquerschnittsgeometrien und der geotechnischen Eigenschaften des aufzufahrenden Gebirges aus tunnelbautechnischer Sicht ein zyklischer Vortrieb, vorzugsweise ein Sprengvortrieb, in Betracht. In Zonen starker Gebirgszerlegung oder Vergrusung kann ggf. auch das Lösen mit einem Tunnelbagger zweckmäßig sein. Ein Fräs-vortrieb kommt aufgrund der Stollengeometrie nicht in Frage und wäre auch aufgrund der Gesteinsfestigkeit und Abrasivität des frischen oder gering verwitterten Granits unwirtschaftlich.

Der Hilfsstollen Murg zweigt bei Station 536 m vom Zufahrtsstollen Kraftwerkskaverne in südliche Richtung ab und wird mit fallendem Vortrieb bis zur Schachtfußkaverne des Murgwerks aufgefahren. Der Hilfsstollen Schwarzenbach zweigt vom Unterwasserstollen Schwarzenbach bei Station 35,8 m im spitzen Winkel ab und nähert sich der Schachtfußkaverne des Oberwasserstollens Schwarzenbach in einem Kreisbogen.

11.12.1.4 Aushubarbeiten / Vortriebsklassen / Felssicherung

Bei einem zyklischen Vortrieb (Lösen durch Sprengen, ggf. Bagger) werden die Vortriebsklassen entsprechend Kapitel 3.2.1 der DIN 18312 (Allgemeine Vortriebsklassen) beschrieben. Aufgrund der gutachterlichen Einschätzung der Gebirgsverhältnisse wird erwartet, dass in den Granitstrecken überwiegend die Vortriebsklasse VK4 und VK3 gemäß DIN 18312 gefahren werden kann. Im Bereich von Vergrusungszonen und in den Verzweigungsbereichen kann auch VK6 oder VK7 erforderlich werden.

Alle Abschnitte der Hilfsstollen werden voraussichtlich vollständig im Forbach-Granit aufgefahren. Aufgrund des Trennflächengefüges ist beim Sprengvortrieb gefügebeeinflusster Mehrausbruch zu erwarten. Dies gilt vor allem für Schwächezonen und Vergrusungszonen, die vereinzelt zu durchfahren sind. Besonders zu erwähnen ist dabei, dass bei dem Auffahren des Hilfsstollens Schwarzenbachwerk voraussichtlich einen Schwächezonenbereich (S-B1-B4) der Hauptklufrichtung HKR 1 angetroffen wird. Für diesen Schwächezonenbereich werden Mächtigkeiten der Homogenbereich F2/F3 von bis zu 12 m vermutet, von denen etwa 2 m dem Homogenbereich F3 zuzuordnen sind.

In Schwächezonen und Vergrusungszonen können sich durch engständige Klüftung Klüftkörper bilden, die bevorzugt im Kalottenbereich in den (noch) ungesicherten Abschlag hineinfallen oder -gleiten und zu Mehrausbruch führen können. Ebenso können sich in den Aufweitungsstrecken und Abzweigungsbereichen der Stollen aufgrund der räumlichen Hohlraumgeometrie ungünstige Trennflächenkonfigurationen ergeben, die eine verstärkte Sicherung mittels Spritzbeton und Felssägeln erforderlich machen.

Eine Abschätzung der möglichen und wahrscheinlich zu erwartenden Gleitkeile und potenziellen Ablöseflächen beim Vortrieb ist grundsätzlich durch eine geotechnische Trennflächenanalyse mit Hilfe der Lagenkugel möglich. Die für den Gebirgsbereich im Umfeld der Hilfsstollen relevanten Gefügevorkommen sind in den Kapiteln 11.6.4, 11.7.4, 11.8.4 und 11.9.4 beschrieben. Aufgrund der wechselnden Richtungen der Stollenachsen der Energieableitungsstollen können jedoch keine generalisierten Angaben zu "repräsentativen Gefährdungsszenarien" gemacht werden.

Zu beachten ist weiterhin, dass die im Granit vergleichsweise häufig festgestellten Aplit-Gänge eine Raumstellung entsprechend der Gefügefläche HKR 6 und auch HKR 4 (siehe Kapitel 5.3.2) aufweisen. Aufgrund der vorliegenden Aufschlussergebnisse stellen die Aplit-Gänge bzw. die Kontaktflächen zum Granit keine geomechanisch relevanten Diskontinuitäten dar.

Um ungünstige felsmechanische Konfigurationen (z. B. Vergrusungszonen und/oder standsicherheitsgefährdende Trennflächen) rechtzeitig zu erkennen und geeignete Maßnahmen ergreifen zu können, ist eine ständige und sorgfältige felsmechanische Kartierung aller laufenden Vortriebe und die zeitnahe Erstellung/Aktualisierung der Gebirgsmodelle erforderlich.

11.12.1.5 Bauzeitliche Entwässerung

Das im Zuge des Aushubs der Hilfsstollen zutretende Bergwasser ist zu fassen und über eine entsprechend dem Vortriebsstand nachgeführte Bauwasserhaltung (zweckmäßigerweise als Sohlkanal im Tiefpunkt des Ausbruchquerschnitts angeordnet) zu einem bauzeitlichen Auffangbehälter (Pumpensumpf) im Tiefpunkt des Vortriebsbereichs abzuleiten. Von dort kann das Wasser in einer Druckleitung aus dem Vortriebsbereich herausgepumpt, in einer Aufbereitungsanlage entsprechend den Auflagen der Behörden aufbereitet und in den behördlich genehmigten Vorfluter eingeleitet werden.

Kapitel 11: Bautechnische Empfehlungen

Beim Hilfsstollen Murgwerk kann die bauzeitliche Entwässerung über den Zufahrtsstollen erfolgen. Dazu empfiehlt sich die Anlage eines Sammelbehälters im Abzweigbereich Zufahrtsstollen/Hilfsstollen, in welchen das an der Ortsbrust des Hilfsstollens anfallende Wasser gepumpt, und dort in die Entwässerung des Zufahrtsstollens integriert werden muss.

Beim Hilfsstollen Schwarzenbachwerk, der steigend vom Unterwasserstollen aufgefahren wird, empfiehlt sich ebenso die Anlage eines Sammelbehälters im Abzweigbereich Unterwasserstollen/Hilfsstollen. Dorthin kann das im Vortriebsbereich anfallende Wasser im freien Gefälle gelangen und in die bauzeitliche Entwässerung des Unterwasserstollens Schwarzenbach eingebunden werden.

Die geohydraulische Situation im Bereich der Hilfsstollen wird gemäß aktuellem Kenntnisstand so eingeschätzt, dass in möglichen Schwächezonen/Kluftzonen stärkere Wasserzutritte zu erwarten sind, insgesamt aber beim Ausbruch der Hilfsstollen während der Bauzeit geringe Wassermengen (im Mittel <3 l/s pro Stollen) anfallen werden.

Sofern beim Vortrieb stark wasserführende Großklüfte, Schwächezonen und Zerrüttungszonen angeschnitten werden, sind die Wasserzutritte durch Abschlauchungen u. ä. gezielt zu fassen, um baubetriebliche Erschwernisse durch Wasser zu vermeiden und die erforderlichen gebirgsmechanischen Sicherungsmaßnahmen zu erleichtern. Sofern ergiebige Wasserzutritte nicht nach kurzer Zeit versiegen, wird empfohlen, die Zuläufe mittels Injektionbohrungen zu reduzieren.

11.12.1.6 Bemessungswasserspiegel

Die Hilfsstollen wirken während der Bauzeit als Gebirgsdrainage; dem zufolge stellt sich der Bergwasserspiegel im Nahbereich der Stollen bauzeitlich auf das Niveau der Stollensohle ein. Die Angabe eines Bemessungswasserspiegels ist deshalb nicht erforderlich. Nach Abschluss der Bauarbeiten werden die Hilfsstollen wieder verfüllt und es stellt sich der durch die Kavernen und die permanent verbleibenden Stollen beeinflusste Bergwasserspiegel ein. Sofern eine Nutzung der Hilfsstollen nach dem Bau angestrebt wird, müssten die Stollenentwässerung dauerhaft betrieben oder die Stollen mit einer wasserdichten Innenschale ausgestattet werden.

11.12.2 Messstollen

11.12.2.1 Bauwerksdaten

Die maßgebenden Bauwerksdaten des Messstollens entsprechend dem aktuellen Planungsstand sind in Tab. 70 zusammengestellt.

Tab. 70: Bauwerksdaten Messstollen

Niveau Sohle am Abzweig vom Energieableitungsstollen Unterstufe	292,88 mNN
Niveau Sohle am Stollenende	303,45 mNN
Stollenlänge	73 m
Gradientenneigung	16,8 % / 0 %
Lichte Höhe	ca. 2,5 m
Lichte Weite	ca. 2,5 m
Gebirgsüberdeckung	ca. 215 m

Kapitel 11: Bautechnische Empfehlungen

Der Messstollen zweigt bei Station 232 m des Energieableitungsstollens Unterstufe von diesem in Richtung Hauptstollen Kavernenwasserspeicher ab. Der Messstollen nähert sich dem Hauptstollen des Kavernenwasserspeichers seitlich in einem ca. 63 m langen Stollenabschnitt mit 16,8 % Steigung bis auf Höhe des Firstgewölbe des Hauptstollens Kavernenwasserspeicher, fährt auf den letzten 10 m horizontal in das Dach des Hauptstollens Kavernenwasserspeicher ein und endet dort im Scheitelpunkt der Stollenfirste über dem Zulaufbauwerk (siehe Abb. 58).

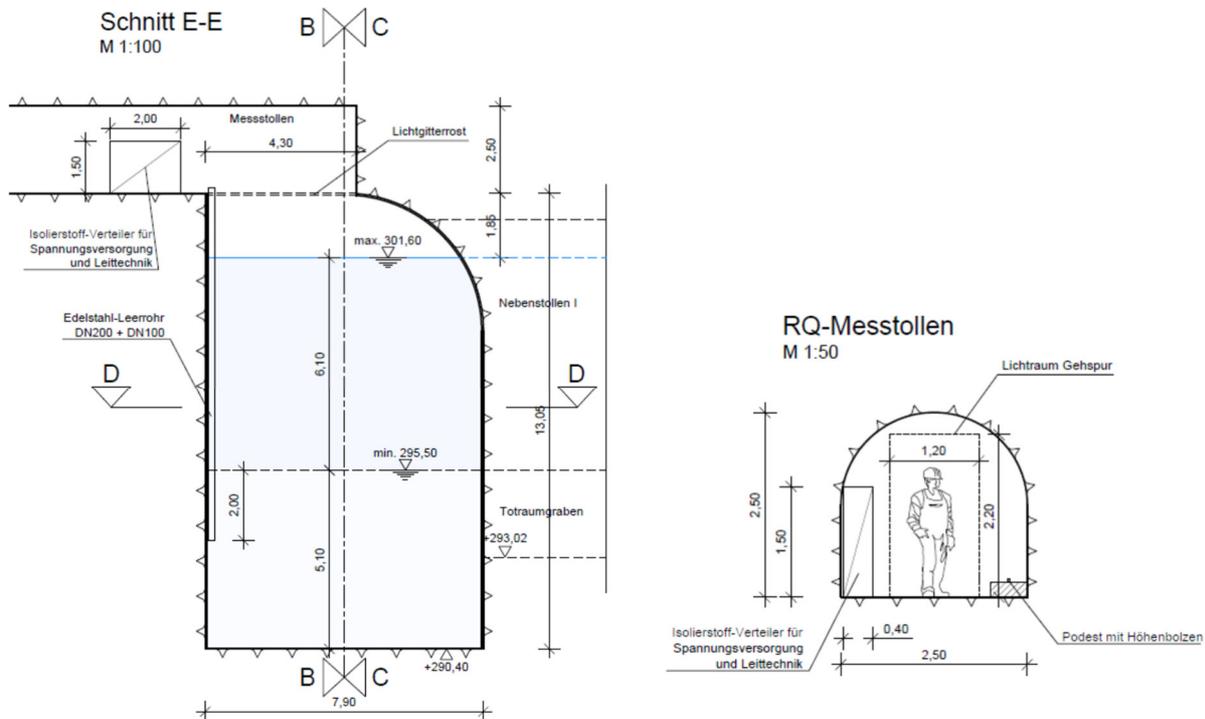


Abb. 58: a) Eingangsbereich Messstollen/Hauptstollen Kavernenwasserspeicher b) Regelquerschnitt Messstollen

11.12.2.2 Geologische und hydrogeologische Situation

Die geologische und hydrogeologische Situation entspricht der des Zufahrtsstollens und des Hauptstollens Kavernenwasserspeicher, zwischen denen der Messstollen zu liegen kommt. Die Angaben in Kapitel 11.3.2 und Kapitel 11.4.2 gelten hier sinngemäß.

11.12.2.3 Bauverfahren / Vortriebsverfahren

Für den Vortrieb des Messstollens kommt aufgrund der Stollenquerschnittsgeometrie, der Stollenlänge und der geotechnischen Eigenschaften des aufzufahrenden Gebirges aus tunnelbautechnischer Sicht ein zyklischer Vortrieb, vorzugsweise ein Sprengvortrieb, in Betracht. In Zonen starker Gebirgszerlegung oder Vergrusung kann ggf. auch das Lösen mit einem Tunnelbagger zweckmäßig sein. Ein Fräsvortrieb kommt aufgrund der Stollengeometrie nicht in Frage und wäre auch aufgrund der Gesteinsfestigkeit und Abrasivität des frischen oder gering verwitterten Granits unwirtschaftlich.

Kapitel 11: Bautechnische Empfehlungen

Der Messstollen zweigt bei Station 232 m vom Energieableitungsstollen Unterstufe in nordwestliche Richtung ab und wird mit anfangs steigendem im Endbereich horizontalem Vortrieb bis zum Dach des Hauptstollens Kavernenwasserspeicher aufgefahren.

11.12.2.4 Aushubarbeiten / Vortriebsklassen / Felssicherung

Bei einem zyklischen Vortrieb (Lösen durch Sprengen, ggf. Bagger) werden die Vortriebsklassen entsprechend Kapitel 3.2.1 der DIN 18312 (Allgemeine Vortriebsklassen) beschrieben. Aufgrund der gutachterlichen Einschätzung der Gebirgsverhältnisse wird erwartet, dass in den Granitstrecken des Messstollens überwiegend die Vortriebsklasse VK2 oder VK3 gemäß DIN 18312 gefahren werden kann. Im Bereich von Vergrusungszonen kann auch die Vortriebsklasse VK4, in den Verzweigungsbereichen ggf. auch VK6 oder VK7 erforderlich werden.

Alle Abschnitte des Messstollens werden voraussichtlich vollständig im Forbach-Granit aufgefahren. Aufgrund des Trennflächengefüges ist beim Sprengvortrieb gefügebeeinflusster Mehrausbruch zu erwarten. Dies gilt vor allem für Schwächezonen und Vergrusungszonen, die vereinzelt zu durchfahren sind. Hier können sich durch engständige Klüftung Kluftkörper bilden, die bevorzugt im Kalottenbereich in den (noch) ungesicherten Abschlag hineinfallen oder -gleiten und zu Mehrausbruch führen können. Aufgrund des kleinen Querschnittes wird gefügebedingter Mehrausbruch einen vergleichsweise großen Anteil am theoretisch vorgegebenen Ausbruchsvolumen haben, was gebirgsmechanisch aber von geringer Bedeutung ist.

Ein besonderes Augenmerk ist auf die letzten 5 m bis 10 m des Messstollens zu legen, da dieser in diesem Abschnitt in das Gebirgstraggewölbe des Hauptstollens Kavernenwasserspeicher eingreift. Dem entsprechend ist bereits bei der Herstellung der Kalotte des Hauptstollens Kavernenwasserspeicher der gaubenartige Verschneidungsbereich unter dem Messstollen und der in den Hauptstollen Kavernenwasserspeicher hineinreichende Abschnitt des Messstollens durch eine seitliche Erweiterung und Überfirstung der Kalotte des Hauptstollens Kavernenwasserspeicher mit einer verstärkten Felssicherung (zusätzliche Felsnägel und verstärkte Spritzbetonschale herzustellen).

11.12.2.5 Bauzeitliche Entwässerung

Das im Zuge des Aushubs des Messstollens zutretende Bergwasser ist zu fassen und über eine entsprechend dem Vortriebsstand nachgeführte Bauwasserhaltung (zweckmäßigerweise als Sohlkanal im Tiefpunkt des Ausbruchsquerschnitts angeordnet) zu einem bauzeitlichen Auffangbehälter (Pumpensumpf) am Verzweigungspunkt mit dem Energieableitungsstollen Unterstufe abzuleiten. Von dort kann das Wasser in einer Druckleitung aus dem Vortriebsbereich herausgepumpt, in einer Aufbereitungsanlage entsprechend den Auflagen der Behörden aufbereitet und in den behördlich genehmigten Vorfluter eingeleitet werden.

Die geohydraulische Situation im Bereich des Messstollens wird gemäß aktuellem Kenntnisstand so eingeschätzt, dass in möglichen Schwächezonen/Kluftzonen Wasserzutritte zu erwarten sind, insgesamt aber angesichts der bereits wirksamen Gebirgsentwässerung durch den Hauptstollen Kavernenwasserspeicher und den Energieableitungsstollen beim Ausbruch des Messstollens während der Bauzeit geringe Wassermengen (im Mittel <1 l/s) anfallen werden.

11.12.2.6 Ausbau des Messstollens

Ein durchgängiger Ausbau in Form einer statisch wirksamen Innenschale ist für den Messstollen nicht vorgesehen. Im Bereich des frischen bzw. gering verwitterten Granits ist eine Innenschale aus felsmechanischer Sicht im Allgemeinen auch nicht erforderlich. Gleichwohl wird empfohlen, den Stollen mit einem hinsichtlich der langen Nutzungsdauer ausreichend sicher dimensionierten

Kapitel 11: Bautechnische Empfehlungen

Nachfallschutz aus bewehrtem Spritzbeton in Verbindung mit einer Systemankerung auszukleiden, da der Stollen zu Mess- und Kontrollzwecken während des Betriebs jederzeit passierbar sein sollte. Zur Vermeidung des Aufbaus eines äußeren Wasserdrucks werden rasterförmig angeordnete Perforationen der Spritzbetonschale als sinnvoll angesehen.

In den Stollenabschnitten, in denen der Granit stark verwittert bzw. in vergruster Form ansteht und dem zufolge der Zerlegungsgrad groß, die Kluftabstände klein sind und das Korngefüge des Gesteins geschwächt ist, wird empfohlen, die ohnehin für die Vortriebssicherung erforderliche Spritzbetonschale zu einer permanenten Sicherung der Stollenlaibung auszubauen, welche auf Gebirgsdruck/Auflockerungsdruck bemessen wird.

Im Endbereich des Messstollens ist aufgrund der räumlichen Überschneidung der Gebirgstraggewölbe des Hauptstollens Kavernenwasserspeicher und des Messstollens aus gebirgsstatischer Sicht eine permanente Sicherung der Stollenlaibung und des Daches des Hauptstollens Kavernenwasserspeicher erforderlich. Außerdem müssen im Sohlbereich des Messstollens Auflagerungen für ein Gitterrost und Befestigungen für Einstiegleitern o. ä. in den Hauptstollen Kavernenwasserspeicher geschaffen werden. Dies wird z. B. durch einen Ausbau der Stollensohle mit einer Stahlbetondecke ermöglicht.

11.12.2.7 Bemessungswasserspiegel

Da der Messstollen dauerhaft gebirgsdrainierend wirkt, findet eine Wasserströmung über Klüfte in Richtung des Stollens statt. Andererseits erfolgt durch den Hauptstollen Kavernenwasserspeicher und die Nebentollen des Kavernenspeichers eine großräumige Absenkung des Gebirgswasserspiegels bis auf das Niveau des Stauziels des Kavernenspeichers (301,60 mNN). Dem zufolge ist davon auszugehen, dass der Bemessungswasserspiegel für den Messstollen dem des Stauziels des Kavernenspeichers entspricht.

11.12.3 Zufahrtsstollen mit Portalgebäude

11.12.3.1 Bauwerksdaten

Die maßgebenden Bauwerksdaten des Zufahrtsstollen mit Portalgebäude entsprechend dem aktuellen Planungsstand sind in Tab. 71 zusammengestellt.

Tab. 71: Bauwerksdaten Zufahrtsstollen mit Portalgebäude

Gründungsniveau des Zufahrtsstollen Portalgebäudes	ca. 304,30 mNN
Gründungsniveau des begehbaren Kabelkanals	ca. 301,50 mNN
Fahrebene Stolleneingang = Fahrebene Parkplatz	ca. 304,80 mNN
Hauptabmessungen des Gebäudes (L x B x H)	11,05 m x 11,80 m x 8,65 m
Hauptabmessungen des begehbaren Kabelkanals (L x B x H)	36,37 m x 2,60 m x 2,80 m

Das Portalgebäude des Zufahrtsstollens ist als flach gegründetes eingeschossiges Gebäude mit einer hoch liegenden Zwischendecke für die Entlüftung der Kaverne und des Energieableitungstollen (Unterstufe) konzipiert.

Es soll mehrere Funktionen erfüllen:

- Verschluss der untertägigen Anlage (Zufahrtsstollen, Energieableitungstollen) für Betriebsfremde und Schutz gegen Witterung mit Doppelflügel-Stahltür

Kapitel 11: Bautechnische Empfehlungen

- Aufnahme der Lüfter für die Entlüftung und Entrauchung der Krafthauskaverne und des Energieableitungstollens
- Abdeckung und Schutz des begehbaren Kabelkanals im Portalbereich
- Zuführung/Ausleitung von Kabeln in den / aus dem begehbaren Kabelkanal (im Bedarfsfall)

Der Zufahrtsstollen mit Portalgebäude wird in einer Baugrube, die temporär in den Hang unterhalb der B462 einschneidet, errichtet und zum überwiegenden Teil wieder eingeschüttet.

Der begehbare Kabelkanal wird außerhalb des Portalgebäudes unter der bestehenden Verkehrsfläche auf dem Werksgelände nach Osten fortgeführt und an den bestehenden begehbaren Kabelkanal angeschlossen.

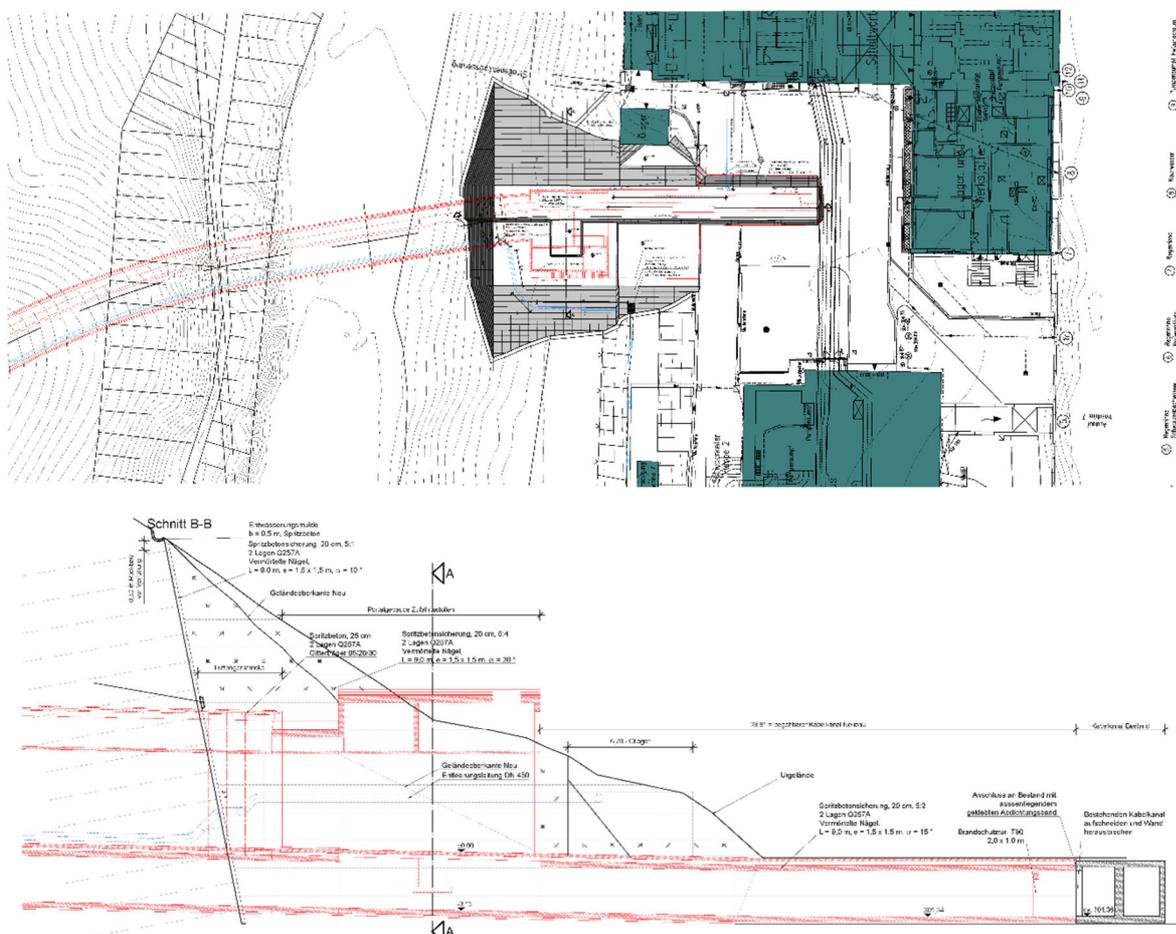


Abb. 59: Zufahrtsstollen mit Portalgebäude oben: Lageplan, unten: Längsschnitt

11.12.3.2 Geologische und hydrogeologische Situation

Im Bereich des Portalgebäudes wurden die Erkundungsbohrungen KS BK 101S, KS BK 112GM, KS BK 113S, KS BK 114H und KS BK 117 durchgeführt. Weiterhin wurden beidseitig entlang der B462 und ergänzend auf dem Straßenniveau am Rudolf-Fettweis-Werk geophysikalische Untersuchungen durchgeführt.

Kapitel 11: Bautechnische Empfehlungen

Nach den Ergebnissen der durchgeführten Erkundungen kommt das Portalgebäude teilweise in den Auffüllungen des Straßendamms B462 zu liegen. Diese Auffüllungen des Straßendamms wurden zum einen sandig-kiesige Schluffe (Homogenbereich A2.3) angetroffen, zum anderen traten auch stark sandige Kiese (Homogenbereich A2.1) auf.

Unterhalb des Gebäudes steht teilweise noch der Forbach-Granit an, der jedoch auf Grund der Oberflächennähe und dem in diesem Bereich verlaufenden Schwächezonbereich S-A1-A2-A20 dem Homogenbereich F2 zuzuordnen ist. In Richtung Murg fällt der Fels jedoch recht steil ab und wird von Murgschottern (Homogenbereich Q2) überlagert. Die Murgschotter wurden in den Bohrungen als sandig-schluffiger Kies angesprochen. Die ermittelten geologischen Verhältnisse sind in der Anlage 2.1.16 dargestellt.

11.12.3.3 Bauverfahren

Der Aushub der Baugrube kann voraussichtlich überwiegend mechanisch mittels Bagger durchgeführt werden. Die dabei zu erwartenden Homogenbereiche sind in dem vorherigen Kapitel bereits beschrieben worden. Da das geplante Gebäude nach derzeitigem Planungsstand und den durchgeführten Erkundungen teilweise auf dem Homogenbereich F2 des Granits und teilweise auf den Kiesen der Murgschotter (Homogenbereich Q2) zu liegen kommt und diese Untergrundschichten unterschiedliche Setzungs- und Belastungseigenschaften aufweisen, sollte zur Homogenisierung der Auflagerverhältnisse sollte im Bereich des unterlagernden Granites entweder eine 0,5 m mächtige Kiestragschicht eingebaut werden oder aber die Bodenplatte entsprechend angepasst werden.

In Richtung B462 schließt sich der Voreinschnitt/Anschlagbereich des Zufahrtsstollens an. Da die unterhalb der Bundesstraße B462 vorhandene Böschung im Außenbereich ausschließlich aus Schüttmaterial besteht, muss der Portalbereich entweder deutlich in Richtung B462 verschoben werden oder aber die Anschüttungen mit entsprechenden Sicherungsmitteln verbessert werden.

11.12.3.4 Aushubarbeiten / Hangsicherung

Die Baugruben sind entsprechend den Vorgaben der DIN 4124 zu gestalten. Da sich Böschungshöhen >5 m ergeben und die Standsicherheit der Böschungen im Fels vom Trennflächengefüge abhängig ist, sind gemäß DIN 4124 Standsicherheitsnachweise zu führen. In Abhängigkeit von der Gefügegeometrie und dem Auflockerungsgrad des Gebirges müssen die Baugrubenböschungen im Fels mit Spritzbeton und Felsnägeln gesichert werden. Im Bereich der Anschlagwand für den bergmännischen Vortrieb des Zufahrtsstollens ist voraussichtlich eine verstärkte Kranzsicherung der Ausbruchskontur erforderlich.

Nach den aus den Erkundungen festgestellten Lockergesteinsmächtigkeit in der Straßenschüttung sind für einen sicheren Stollenanschlag aufwändige Sicherungen (z. B. Rohrschirm o. ä.) wahrscheinlich. Eine Verschiebung des Anschlagpunktes für den bergmännischen Vortrieb (und damit Verlängerung der Baugrube für das Portalbauwerk) ist wegen der Nähe der B462 kaum möglich.

Beim Aushub und bei der Profilierung der Gründungssohle für das Portalbauwerk ist darauf zu achten, dass das Lösen des Granites sehr schonend erfolgt. Da der Hochbau erst nach Abschluss der Tunnel- und Kavernenbauarbeiten beginnen kann, und die Baugrube als Baustelleneinrichtungsfläche genutzt werden kann, empfiehlt es sich, die Baugrube zunächst nicht bis auf das geplante Gründungsniveau auszuheben und für den Baustellenbetrieb des Tunnelbaus eine "Opferschicht" zu belassen, die rechtzeitig vor Beginn der Hochbauarbeiten entfernt wird. Alternativ kann der Ausbruch und Aushub im Sohlbereich unter Berücksichtigung eines "Gründungspolsters" (siehe Kapitel

Kapitel 11: Bautechnische Empfehlungen

11.12.3.7) tiefer unter die Gründungskote geführt und eine bauzeitliche Tragschicht für den Baustellenverkehr eingebaut werden, welche nach Abschluss der Vortriebsarbeiten und bei der Gründung des Bauwerks wieder entfernt wird.

11.12.3.5 Bauzeitliche Entwässerung

Für die Baugrube des Portalgebäudes und des begehbaren Kabelkanals ist eine Tagwasserhaltung vorzusehen.

11.12.3.6 Bemessungswasserspiegel

Das Bauwerk wird flach gegründet und nach Herstellung des Rohbaus hangseitig hinterfüllt. Der Hang und die Hinterfüllung werden durch eine Ringdrainage auf Höhe der Gründungsebene drainiert. Dem entsprechend ist als permanenter Bemessungswasserspiegel das Höhenniveau der Hangentwässerung/Ringdrainage zu verwenden.

Im Bereich der Murgschotter korrespondiert der Wasserspiegel stark mit den Wasserständen im vorhandenen Staubecken. Entsprechend ist hier als Bemessungswasserstand das höchste Einstauniveau anzusetzen.

11.12.3.7 Errichtung des Portalgebäudes

Das Portalgebäude und der begehbare Kabelkanal können erst nach Abschluss der Vortriebsarbeiten für den Zufahrtsstollen und den Energieableitungsstollen und deren Nutzung als Baustellenzufahrt für die untertägigen Arbeiten im Kavernenbereich errichtet werden. Hinsichtlich des Aushubs und der Herstellung der Gründungssohlen wird auf Kapitel 11.12.3.4 verwiesen.

Wie bereits erwähnt, erfolgt die Gründung nach derzeitigem Planungsstand sowohl in Lockergesteinen als auch im Fels. Entsprechend den Abmessungen und der Nutzung des Portalgebäudes sind keine bzw. nur geringe Setzungen (mm-Bereich) zu erwarten. Genaue Angaben zu Lasten und Setzungsempfindlichkeit des Bauwerks liegen uns zum Zeitpunkt der Berichtserstellung nicht vor. Es wird jedoch empfohlen, den Fels um ca. 0,5 m bis 1,0 m tiefer auszuheben und durch ein Polster aus gut verdichtetem, weit gestuftem grobkörnigem Mineralgemisch (GW/GI nach DIN 18196) zu ersetzen. Sofern talseitig bereichsweise feinkörnige oder gemischtkörnige quartäre Böden im Gründungsniveau anstehen, sind diese ebenfalls durch GW/GI-Material zu ersetzen. Dies gilt auch für die Gründung des begehbaren Kabelkanals. Diese Maßnahme dient dem Ausgleich der Bettungssteifigkeit des Untergrundes unter der Bodenplatte des Portalbauwerks.

Da das Portalgebäude teilweise hinterfüllt bzw. überschüttet werden soll, sind die sich daraus ergebenden Lasten und Erddrücke bei der Bemessung der Außenwände und der Gründungen zu berücksichtigen.

Für eine Vorbemessung der Baugrubenböschungen können die im Kapitel 9 angegebenen Bodenkennwerte verwendet werden. Der Bemessungswert des Sohlwiderstandes im Hinblick auf Bauwerksgründungen kann vorab anhand der Tab. A 6.2 der DIN EN 1997-1 (unter Beachtung der hierfür geltenden Einschränkungen) ermittelt werden.

11.13 Wiederverwendbarkeit der Aushubmassen

11.13.1 Quartäre Lockergesteine

Es wurden bisher keine Probe der im Murgtal verbreiteten quartären fluviatilen Lockergesteine im Hinblick auf ihre bautechnische Verwendbarkeit untersucht (siehe Kapitel 9). In bautechnischer Hinsicht wurden bisher lediglich Klassifizierungsversuche an Hangschuttproben durchgeführt (siehe Kapitel 8.3). Dem entsprechend beruhen die geotechnischen Angaben und Charakterisierungen der Lockergesteine in Kapitel 9 auf Schätzungen und allgemeinen Erfahrungen.

Es wird erwartet, dass die im Bereich der offenen Baugrube für das Auslaufbauwerk und in der Baugrube für das Portalbauwerk des Zufahrtsstollens Kraftwerkskaverne anfallenden, überwiegend grobkörnigen Lockergesteine - vorbehaltlich des Ergebnisses einer differenzierten abfalltechnischen Bewertung (siehe Kapitel 12) - voraussichtlich einer qualifizierten Wiederverwertung (z. B. für Geländemodellierungen u. ä.) zugeführt werden können.

Zur Überprüfung dieser Einschätzung ist im Zuge der weiteren Bearbeitung eine ortsspezifische orientierende Untersuchung der potenziellen Aushubmassen im Hinblick auf die geotechnischen Eigenschaften und eine möglichen Schadstoffbelastung durchzuführen.

11.13.2 Granit

Die Ergebnisse der Laboruntersuchungen an Proben des Forbach-Granits sind in Kapitel 8 dokumentiert. Die geotechnische Charakterisierung der Gesteine ist in Kapitel 9 zu finden. Dem entsprechend ist der Forbach-Granit im bergfrischen und gering verwitterten Zustand als Frostschutzmaterial und für den Wegebau als Betonzugschlagstoff bedingt geeignet. Die Ergebnisse der Untersuchungen zur Eignung sind in Kap. 8.3.8 bis 8.3.11 dargestellt.

Bei stärker verwitterten (w2 bis w3) Forbach-Graniten wurden entsprechende schlechtere Kategorien versuchstechnisch ermittelt. Die Eignung der jeweiligen Gesteine hängt demnach von dem Verwendungszweck ab und individuell vorzunehmen. Gesteine, welche die Anforderungen an den Widerstand gegen Zertrümmerung nicht vollständig einhalten, können gem. TL-Gesteine StB 04 auf Grund von Erfahrungswerten ggf. trotzdem verwendet.

Die vorgenannten Einschätzungen gelten grundsätzlich nur für das geogene Material und vorbehaltlich des Ergebnisses einer differenzierten abfalltechnischen Bewertung des mäßig verwitterten bis zersetzten Granits (siehe Kapitel 12).

Verunreinigungen durch Spritzbetonrückprall, Sprengmittelrückstände und ähnliche baubedingte Verunreinigungen müssen im Zuge der Bauausführung abfalltechnisch untersucht und bewertet werden.

12 Abfalltechnische Beurteilung von potentiellen Ausbruchmassen

Zur abfalltechnischen Beurteilung von potentiellen Ausbruchmassen wurden ausgewählte Bohrkernproben und Lockermaterialproben aus dem Bereich des Kavernenspeichers auf die Parameter der Verwaltungsvorschrift des Umweltministeriums Baden-Württembergs vom 14. März 2007 für die Verwertung von als Abfall eingestuftem Bodenmaterial (VwV Boden) untersucht. Die folgende Tabelle enthält Untersuchungen aus den Jahren 2019, 2018 und 2010.

Geogen bedingte Aluminium-Gehalte im Eluat sind nach Aussage des Landratsamtes Rastatt nicht abfallrechtlich relevant.

Tab. 72: Abfalltechnische Einstufung der Proben aus dem Bereich des Kavernenwasserspeichers

Bohrung	Probenbezeichnung (inklusive Entnahmetiefe)	Materialbeschreibung	Jahr	Stratigraph. Einheit	Einstufung nach VwV Boden
KS BK 3	KS BK 3 (265 - 265,5 m)	Granit w0/w1	2010	Forbach-Granit	Z 0
KS BK 6	KS BK 6 (74 - 75,5 m)	Granit w4/w5	2010	Forbach-Granit	Z 1.1
KS BK 11	KS BK 11 (8 - 13 m)	Sand	2010	Quartär	Z 0*
KS BK 101	KS BK 101 (40,8-41,0m)	Granit w2/w3	2018	Forbach-Granit	Z 0
KS BK 103 S	KS BK 103 S (344,9-345,0m)	Granit w1/w2	2018	Forbach-Granit	Z 0
KS BK 103 S	KS BK 103 S (341,6-341,7m)	Granit w2/w3	2018	Forbach-Granit	Z 1.1
KS BK 104	KS BK 104 (142,3-142,5m)	Granit w3/w4	2018	Forbach-Granit	Z 1.1
KS BK 106	KS BK 106 (7,0-7,3m)	Granit w3/w4	2018	Forbach-Granit	Z 2
KS BK 107	KS BK 107 (53,0-53,2m)	Granit w2/w3	2018	Forbach-Granit	Z 0
KS BK 113	KS BK 113 (6,6-7,0m)	Schluff, sandig, kiesig	2018	Quartär	Z 0
KS BK 116 H	KS BK 116 H (5,0 - 6,0 m)	Sand, kiesig, schluffig	2018	Quartär	Z 1.2
KS BK 106	KS BK 106 (6,8-7,0m)	Granit w3/w4	2019	Forbach-Granit	Nachuntersuchung Kupfer Z2
KS BK 106	KS BK 106 (7,3-7,5m)	Granit w3/w4	2019	Forbach-Granit	Nachuntersuchung Kupfer Z2

Die Laborberichte zu den chemischen Untersuchungen finden sich in Anlage 9.2.2; darin ist auch eine tabellarische Zusammenstellung der Analysenergebnisse enthalten.

Bei den untersuchten Bohrkernproben fallen die Proben KS BK 103S (341,6 m bis 341,7 m), KS BK 104 (142,3 m bis 142,5 m), KS BK 6 (74 m bis 75,5 m) und KS BK 106 (7,0 m bis 7,3 m) auf:

Die Probe KS BK 103S (341,6 m bis 341,7 m) aus dem mäßig verwitterten Granit weist mit 16 mg/kg **Arsen** einen geringfügig über dem Z 0*-Wert liegenden Arsen-Gehalt und mit 0,46 mg/kg **Thallium** einen knapp über dem Z 0-Wert (Sand) liegenden Thallium-Gehalt auf.

Die Probe KS BK 104 (142,3 m bis 142,5 m) aus dem deutlich verwitterten Granit hat mit 0,71 mg/kg **Thallium** einen Gehalt, der knapp über dem zugehörigen Z 0*-Wert liegt.

Kapitel 12: Abfalltechnische Beurteilung von potentiellen Ausbruchmassen

Die Probe KS BK 6 (74 m bis 75,5 m) aus dem vollständig verwitterten Granit weist geringfügige Überschreitungen der Z 0-Werte (Sand) für **Blei, Kupfer, Thallium, Quecksilber und Zink** im Feststoff auf und ihr **Arsen-Gehalt** liegt mit 16 mg/kg knapp über dem Z 0*-Wert.

Die Probe KS BK 106 (7,0 m bis 7,3 m) zeigt mit 260 mg/kg einen deutlich über dem Z 1.2-Wert liegenden Gehalt an **Kupfer**. Das unmittelbar angrenzende Gestein mit den Proben KS BK 106 (6,8 m bis 7,0 m) und KS BK 106 (7,3 m bis 7,5 m) hat ebenfalls Gehalte an Kupfer von über 200 mg/kg im Feststoff. Im Eluat ist Kupfer nicht auffällig.

Sämtliche geringfügig erhöhten Gehalte an Schwermetallen und Arsen im Forbach-Granit sind geogenen Ursprungs.

Auch die deutlich erhöhten Kupfergehalte im oberflächennahen Bereich der Bohrung KS BK 106 sind mit Sicherheit geogenen Ursprungs. Dieser Bereich fällt durch seine starke Klüftung und Alteration mit bis zu 1 cm mächtigen Kluffüllung durch Ton- und Erzminerale auf (siehe Abb. 60). An der Probe KS BK 106 5,7 m bis 6,0 m kann Hämatit makroskopisch als Kluffüllung identifiziert werden. Dieses Eisenerzmineral ist häufig mit Kupfer vergesellschaftet. Beides entstand vermutlich durch ein hydrothermales Zirkulationssystem entlang dieser Kluff. Hierbei lösen heiße Fluide in großer Tiefe Metalle aus dem Grundgebirge, transportieren sie entlang der Kluff nach oben und Fällern sie dann bei der Mischung mit meteorischem Wasser oder durch Abkühlung in oberflächennähe aus. Die Minerale liegen in oxidischer Form vor und sind dadurch eher unlöslich in meteorischem Wasser. Das zeigen auch die niedrigen Gehalte an Kupfer in den Eluat Versuchen. Mit einer für die Umwelt schadhafte Freisetzung von Kupfer ist folglich nicht zu rechnen.

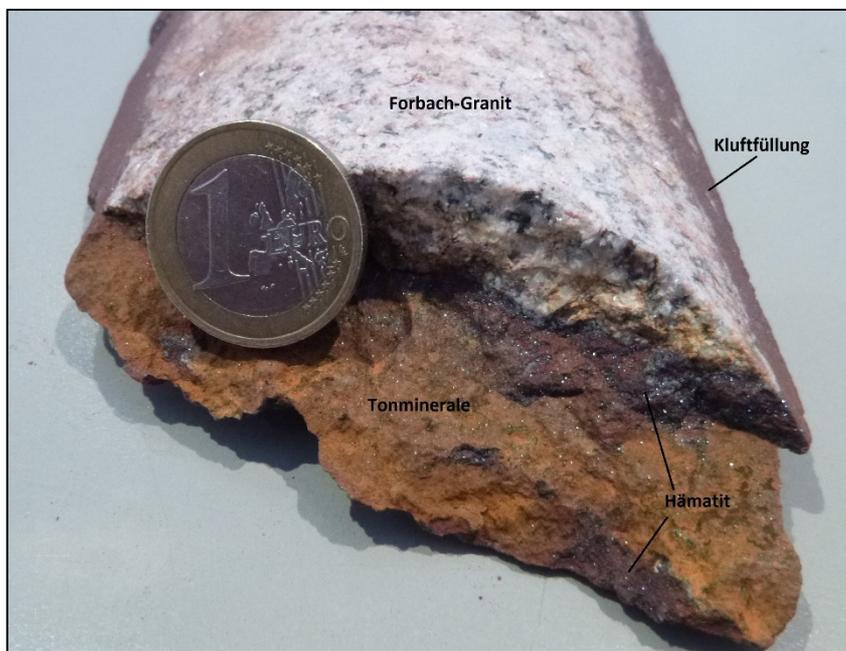


Abb. 60: Foto der Probe KS BK 106 5,7 m bis 6,0 m. Der Forbach-Granit (weiß) zeigt eine bis zu 1 cm mächtige Kluffüllung (rot) aus Tonmineralen (gelb/braun) und Hämatit (rot/schwarz, glitzernd).

Kapitel 12: Abfalltechnische Beurteilung von potentiellen Ausbruchmassen

Bei den Lockergesteinproben fällt die Probe KS BK 116H (5,0 m bis 6,0 m) auf, die aufgrund eines erhöhten **PAK-Gehalts** in die Einbauklasse Z 1.2 einzustufen ist. Die Probe stammt aus der Auffüllung, die hinter der Stützwand unterhalb der B 462 ansteht. Die Belastung ist vermutlich auf Teeranstriche oder teerhaltiges Straßenbaumaterial zurückzuführen und damit anthropogenen Ursprungs.

Verwertungsmöglichkeiten

Der unverwitterte Granit (w0 bis w2) kann uneingeschränkt verwertet werden (Qualitätsstufe Z 0).

Beim mäßig bis vollständig verwitterten Granit (w2 bis w5) ist anhand der Analysen mit erhöhten Gehalten an Arsen, Blei, Kupfer, Quecksilber, Thallium und Zink im Feststoff bis zur Qualitätsstufe Z 2 zu rechnen. Aufgrund ihres geogenen Ursprungs und der sehr geringen Eluierbarkeit können die Gesteine innerhalb der geplanten Baumaßnahme uneingeschränkt wieder eingebaut werden.

Auch innerhalb des Verbreitungsgebiets des Forbach-Granits besteht die Möglichkeit, das geogen belastete Material in der Einbauklasse Z 0 zu verwerten (sogenannte Öffnungsklausel der VwV Boden), wenn der Einbau nicht zu einer Verschlechterung der Ausgangssituation am Einbauort führt.

Ist eine externe Verwertung außerhalb des Verbreitungsgebiets des Forbach-Granits vorgesehen, gelten die Anforderungen der VwV Boden an die Art des Einbaus entsprechend der Qualitätsstufe des zu verwertenden Materials. So kann beispielsweise Z 1.2 - Material in technischen Bauwerken ohne definierte technische Sicherungsmaßnahmen bei gleichzeitig günstigen hydrogeologischen Verhältnissen (Deckschicht ≥ 2 m und Abstand zum Grundwasser ≥ 1 m) eingebaut werden.

Beim Lockermaterial wurden keine geogen bedingten Schadstoffgehalte festgestellt. Es können aber je nach Herkunft des Lockermaterials (z. B. aus Bauwerkshinterfüllungen, oder aus Siedlungs- bzw. Straßennähe) anthropogene Belastungen auftreten. Hier ist v. a. mit PAK und Mineralölkohlenwasserstoffen zu rechnen. Vor einer angestrebten Verwertung ist das Material daher baubegleitend abfalltechnisch zu untersuchen. Die Verwertung muss entsprechend den Vorgaben der VwV Boden zum Einbauort in Abhängigkeit von der Qualitätsstufe erfolgen.

Neben den geogenen Belastungen können durch den Tunnelvortrieb und die Sicherungsmaßnahmen Stoffe in das Tunnelausbruchmaterial gelangen, die die Verwertungsmöglichkeiten des Materials einschränken.

Das Tunnelausbruchmaterial kann durch

- Sprengmittelrückstände
- Bau- und Bauhilfsstoffe (Stützmittel, Injektionsmittel)
- Betriebs- und Hilfsstoffe von Maschinen und Fahrzeugen
- Unfälle mit wassergefährdenden Stoffen

verunreinigt sein.

Sprengstoffreste können durch Wahl und Dosierung des Sprengmittels so weit reduziert werden, dass sie keine entsorgungsrelevanten Schadstoffmengen hinterlassen. Ausreichende Bewettungsmaßnahmen können sicherstellen, dass die sich im Abschlag niederschlagenden Stoffe zu keiner relevanten Schadstoffbelastung des Ausbruchmaterials führen.

Kapitel 12: Abfalltechnische Beurteilung von potentiellen Ausbruchmassen

Durch Aussortieren der Zündschnüre und Schlauchzünder kann erreicht werden, dass die verbleibenden Anteile zu keiner Änderung der abfalltechnischen Einstufung führen.

Spritzbetonrückprall sollte ebenfalls durch Aussortieren reduziert werden. Der pH-Wert kann in Abhängigkeit von den verbliebenen Betonresten allerdings noch über 9,5 liegen.

Durch Verwendung von chromatarmem Beton sowie biologisch abbaubaren Treib- und Schmierstoffen können weitere Risiken entsorgungsrelevanter Schadstoffbelastungen vermieden werden.

Geeignete Maßnahmen wie z. B. Wahl und Menge des eingesetzten Sprengmittels, ausreichende Bewetterung/Wasserschleier, Einsatz von chromat- und bariumarmem Beton, biologisch abbaubaren Schmier- und Treibstoffen, Aussortieren von Fremdstoffen usw., können die stofflichen Änderungen so weit reduziert werden, dass die Materialanforderungen für die vorgesehenen Entsorgungswege erfüllt werden können.

Die endgültige abfalltechnische Einstufung sollte dann anhand baubegleitender abfalltechnischer Untersuchungen des Tunnelausbruchmaterials erfolgen.

13 Auswirkungen des Bauvorhabens auf die hydrogeologischen Verhältnisse

13.1 Wirkfaktoren

Im Hinblick auf das Schutzgut Grundwasser kommen folgende Wirkfaktoren und die daraus resultierenden möglichen Auswirkungen auf das Schutzgut Grundwasser in Betracht:

Tab. 73: Baubedingte Wirkfaktoren und mögliche Auswirkungen

Wirkfaktoren	Beschreibung und mögliche Auswirkungen
Arbeiten im Bereich von Grundwasser führenden Schichten (Herstellen der Untertagebauwerke)	Schaffung von Wasserwegigkeiten und Dränierung des umgebenden Gebirges, Beeinflussung der Schüttung von Quellen und Grundwassernutzungen. Eintrag von Schadstoffen und Trübstoffen in den Untergrund und Beeinflussung der Wasserqualität von Quellen und Grundwassernutzungen.

Tab. 74: Anlagebedingte Wirkfaktoren und mögliche Auswirkungen

Wirkfaktoren	Beschreibung und mögliche Auswirkungen
Anlage von Untertagebauwerken in grundwasserführendem Gebirge	Auswirkungen auf die Grundwasserströmung und auf das Grundwasserdargebot bei dauerhafter Dränierung des Gebirges; Beeinflussung der Schüttung von Quellen und Grundwassernutzungen.

Tab. 75: Betriebsbedingte Wirkfaktoren und mögliche Auswirkungen

Wirkfaktoren	Beschreibung und mögliche Auswirkungen
Betrieb des Kraftwerkskaverne und des Kavernenwasserspeichers	Beeinflussung der Grundwasserqualität infolge von: Eintrag von Betriebswasser aus den Oberbecken (Schwarzenbachtalsperre, Sammelbecken Kirschbaumwasen), den Wasserwegen und dem Kavernenwasserspeicher in das Grundwasser. Eintrag von Schadstoffen aus dem Betrieb und der Wartung der Kraftwerksanlage in das Grundwasser. Eintrag von Schadstoffen aus dem Betrieb der Zugangstunnel und Energieableitungsstollen in das Grundwasser.

Des Weiteren können mögliche Auswirkungen auf Oberflächengewässer eintreten (z. B. Beeinträchtigung der Gewässerökologie), die im Rahmen dieses hydrogeologischen Gutachtens nicht zu bewerten sind.

Zur Einleitung von Grundwasser in Oberflächengewässer wurden bereits in Kapitel 6.4.3 Aussagen getroffen.

In den folgenden Kapiteln wird auf die zahlreichen Untertagebauwerke eingegangen. Zur besseren Übersicht sind in der nachfolgenden Abbildung die Untertagebauwerke nochmals namentlich dargestellt:

Kapitel 13: Auswirkungen des Bauvorhabens auf die hydrogeologischen Verhältnisse

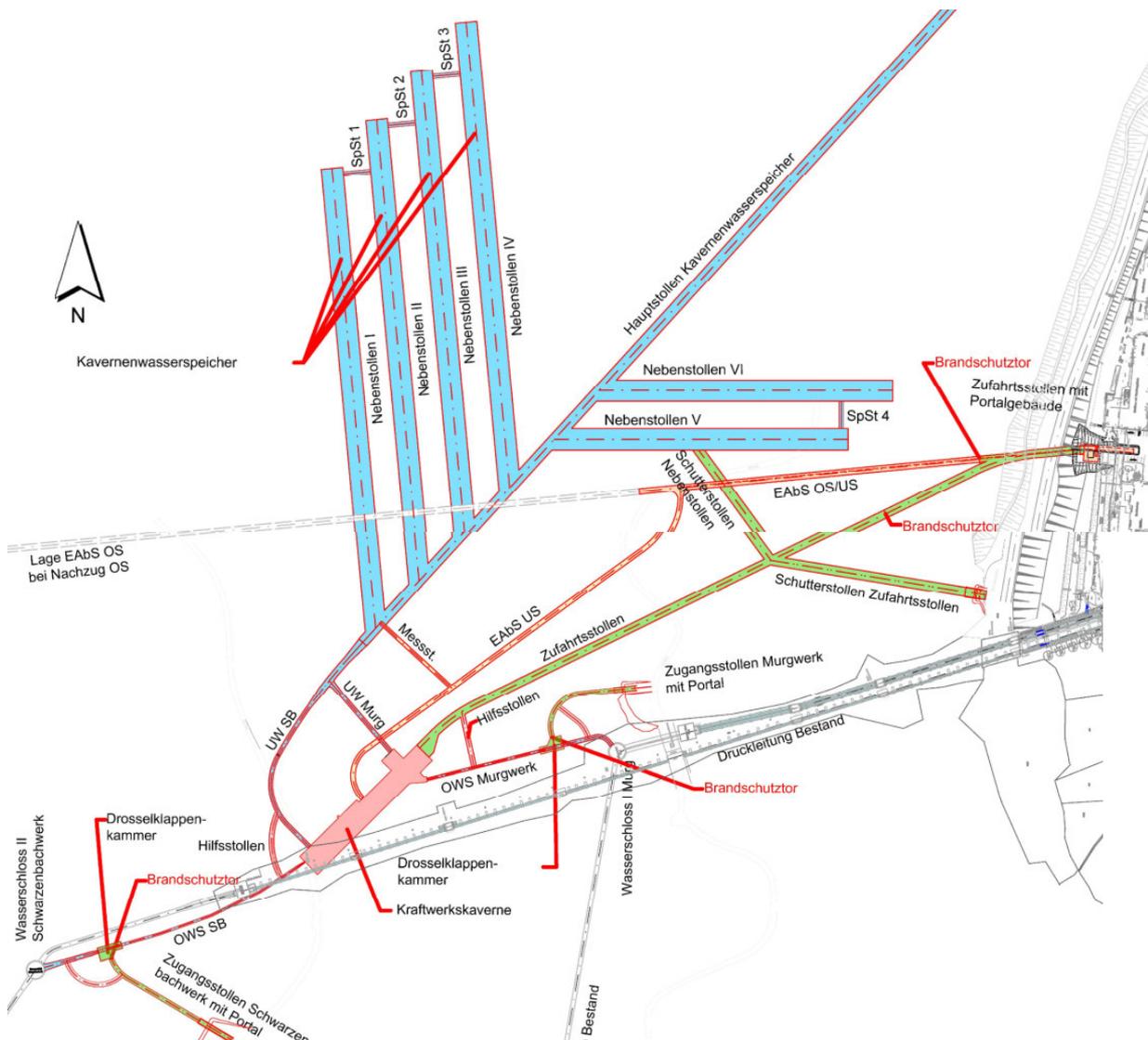


Abb. 61: Übersichtslageplan Unterstufe

Legende:

EAbS	Energieableitungsstollen	OS	Oberstufe
KKW	Kraftwerkskaverne	US	Unterstufe
Messst.	Messstollen	OWS:	Oberwasserstollen/-schacht
Murg:	Murgwerk	UWS:	Unterwasserstollen/-schacht
SB:	Schwarzenbachwerk	SpSt	Spülstollen

13.2 Herleitung Wirkraum Grundwasserabsenkung

13.2.1 Schwächezonen als Strukturen bevorzugter Wasserwegigkeit

Der ungestörte Granitkomplex weist nur eine sehr geringe hydraulische Leitfähigkeit auf (siehe Kap. 6.1.2.1). Weiterreichende Grundwasserabsenkungen können sich nur entlang der bereits beschriebenen Schwächezonen mit ihren möglichen höheren hydraulischen Wirksamkeiten ausbilden

Zur Herleitung des Wirkraums Grundwasserabsenkung wird folglich davon ausgegangen, dass sich die Grundwasserabsenkungen entlang der Schwächezonen ausbreiten. Grundlage für die räumliche Ausbreitung der Grundwasserabsenkung ist dabei das 3D-Gebirgsmodell.

13.2.2 Reichweitenabschätzung

Zur Abschätzung der Reichweite von Grundwasserabsenkungen wird auf die Formel nach Sichardt (1928) zurückgegriffen. Da die Formel nur für definierte Grundwasserverhältnisse zutrifft, die so im Forbach-Granit nicht vorliegen, dient das Ergebnis der groben Abschätzung der Reichweite.

Es wird angenommen, dass sämtliche im 3D-Gebirgsmodell identifizierten Schwächezonen (dort als „Störungsbereiche“ bezeichnet) eine Durchlässigkeit von $3 \cdot 10^{-8}$ m/s aufweisen. Der kf-Wert von $3 \cdot 10^{-8}$ m/s entspricht dem maximalen kf-Wert, der im tieferen Granit gemessen wurde.

Zum Vergleich wird noch die Reichweite für den kf-Wert von $5 \cdot 10^{-7}$ m/s betrachtet. Dieser kf-Wert entspricht dem arithmetischen Mittel für den oberflächennahen Granit bis 30 m u. GOK.

Um alle Auswirkungen im Planfeststellungsverfahren sicher erfassen zu können, werden neben der Durchlässigkeit weitere worst case Annahmen getroffen:

Dort, wo eine Schwächezone ein Bauwerk durchschneidet, wird der Grundwasserspiegel bis auf die Bauwerkssohle abgesenkt und es stellen sich quasistationäre Verhältnisse ein. Unberücksichtigt bleibt damit, dass bereits während des Stollenvortriebs stärkere Wasserzutritte abgedichtet werden.

Die Berechnungen ergaben in den Schwächezonen in Abhängigkeit von der erwarteten maximalen Grundwasserabsenkung Werte bei einem kf-Wert von $3 \cdot 10^{-8}$ m/s Reichweiten zwischen 20 m und 155 m. Für einen kf-Wert von $5 \cdot 10^{-7}$ m/s ergaben sich Reichweiten zwischen 85 m und 630 m.

(Zum Vergleich: Im ungestörten tieferen Gebirge mit seiner mittleren Durchlässigkeit von $2,5 \cdot 10^{-10}$ m/s ergeben sich Reichweiten nach Sichardt von maximal 15 m um die Bauwerke herum.)

In den Anlage 1.7 und 1.8 sind die berechneten Reichweiten für die durchfahrenen Schwächezonen dargestellt.

Ob es wirklich zu solchen Reichweiten kommt, wird durch ein hydrogeologisches Monitoringprogramm festgestellt werden (siehe Kap. 14.5).

Um bezüglich des Wirkraums Wasser auf der sicheren Seite zu liegen, wird als Wirkraum die Umhüllende um alle Untertagebauwerke unter Berücksichtigung der maximalen Reichweiten entlang der identifizierten Schwächezonen festgelegt (siehe Anlagen 1.7 und 1.8). Dabei wurde die Lage der Schwächezonen auf Bauwerksniveau, also rund 300 m+NN verwendet ohne Berücksichtigung des Einfallens der Schwächezone. Diese Vereinfachung ist vor dem Hintergrund der gewählten worst case-Ansätze vertretbar.

Die Reichweiten, die für die Schwächezonen 11, 12 und 13 berechnet wurden, beziehen sich auf die Bauwerke Oberwasserstollen Schwarzenbachwerk (OWS SB) und den unteren Teil der Kraft-

Kapitel 13: Auswirkungen des Bauvorhabens auf die hydrogeologischen Verhältnisse

werks-kaverne. Diese Bauwerke werden vollständig abgedichtet, so dass sich hier keine quasistationären Verhältnisse einstellen können und die Reichweiten deutlich überschätzt sind. Eine Überschätzung ist auch dadurch gegeben, dass bei der Berechnung davon ausgegangen wird, dass alle unterirdischen Bauwerke ohne jegliche lokale Abdichtung von Wasserzutritten dränieren.

Für den kf-Wert von $3 \cdot 10^{-8}$ m/s ergibt sich eine Fläche von rund 33,5 ha. Für den kf-Wert von $5 \cdot 10^{-7}$ m/s ergibt sich eine Fläche von rund 115 ha.

Da sich ein Absenktrichter zu seinem Rand hin asymptotisch der unbeeinflussten Grundwasserhöhe annähert, ist selbst unter der worst case Annahme von $k_f = 5 \cdot 10^{-7}$ m/s nicht davon auszugehen, dass die Absenkungen nennenswert über den Frankenbach im Norden und den Holderbach im Süden hinausreichen, zumal die Bauwerke, die zu den weitreichenden Absenkungen führen, abgedichtet werden.

13.3 Baubedingte Auswirkungen

13.3.1 Schaffung von Wasserwegigkeiten und Dränierung des Gebirges

Tab 76: Schaffung von Wasserwegigkeiten und Dränierung des Gebirges

Wirkfaktoren	Beschreibung und mögliche Auswirkungen
Arbeiten im Bereich von Grundwasser führenden Schichten	Schaffung von Wasserwegigkeiten und Dränierung des umgebenden Gebirges, Beeinflussung der Schüttung von Quellen und Grundwassernutzungen

Sämtliche unterirdischen Bauwerke werden im zwar wassererfüllten, aber grundwasserhemmenden Forbach-Granit aufgefahren. Aufgrund der geringen Gebirgsdurchlässigkeiten wird die gebirgsdränierende Wirkung insgesamt gering sein.

Nur in Klufverdichtungszonen, in den Voreinschnitten der Stollen (Schutterstollen, Zufahrtsstollen Kraftwerkskaverne und Energieableitungstollen sowie Hauptstollen Kavernenwasserspeicher) sowie in den Baugruben des Portalgebäudes und des Auslaufbauwerks ist mit höheren Durchlässigkeiten und in Folge höherem Wasserandrang zu rechnen.

Aufgrund der Größe der Bauwerke ergibt sich in Summe ein bauzeitlicher Wasseranfall zwischen 34 l/s und 134 l/s, allerdings nur unter der Voraussetzung, dass alle Bauwerke zeitgleich aufgefahren würden und der umgebende gering durchlässige Granit konstant Wasser nachliefern kann.

Das unterirdische Einzugsgebiet für den Forbach-Granit im Bereich der geplanten Unterstufe reicht weit über die Fläche der geplanten Unterstufe hinaus, zumal er Teil des zusammenhängenden Nordschwarzwälder Granitplutons ist.

Auf die Wasserführung des Granitplutons hat die bauzeitliche Entwässerung tatsächlich jedoch nur lokalen Einfluss: Aufgrund der geringen Durchlässigkeiten im Granit wird das Gestein lediglich bis zu einer Reichweite von maximal 20 m um die Untertagebauwerke herum entwässert; lediglich in Schwächezonen mit erhöhter Kluftdichte kann es bei worst case Betrachtung zu größeren Reichweiten kommen, die bei Berechnung nach Sichardt (1928) bis zu mehrere hundert Meter weit reichen können (siehe Kapitel 10 und 13.2). Daher wird für die weiteren Betrachtungen als Wirkraum die Fläche von rund 33,5 ha angesetzt. Die Grundwasserneubildung beträgt in diesem Gebiet rund 2,4 l/s. Das umliegende Gebirge um die Untertagebauwerke herum wird also durch den bauzeitlichen Wasseranfall vollständig dräniert.

Herstellen der Untertagebauwerke (Kraftwerkskaverne und Stollensystem)

Durch die bauzeitliche Dränage des Forbach-Granits können Quellaustritte betroffen sein. Die Grundwasserführung erfolgt allerdings in der Regel oberflächennah in der Auflockerungszone – (siehe auch nochmals Schemabild nach HINDERER und EINSELE, Abb. 24).

In Forbach wurden keine Hinweise auf stärker wasserführende Klüfte in größerer Tiefe gefunden; damit sind solche Strukturen zwar nicht vollständig auszuschließen, aber unwahrscheinlich. Aufgrund dieser Rest-Unsicherheit werden Auswirkungen bis hin zum Versiegen von Quellen in unmittelbarer Nähe zu den Untertagebauwerken und den oberflächennahen Eingriffen in den Untergrund nicht vollständig ausgeschlossen.

Bei diesen Quellen, für die eine Betroffenheit nicht vollständig ausgeschlossen werden kann, handelt es sich um die Quellen, die innerhalb des Wirkraums Grundwasserabsenkung für k_f -Wert $:3 \cdot 10^{-8}$ m/s liegen. Zudem werden noch die Quellen Nr. 78/113 und 79/114 aufgrund ihrer Lage unterhalb des Portalgebäudes Zugangstollens, wo in den Hangschutt und oberflächennah aufgelockerten Granit eingegriffen wird („oberflächennaher Eingriff in den Untergrund“), hinzugenommen, ebenso die Quellen 101 und 115, die knapp außerhalb des Wirkraums liegen.

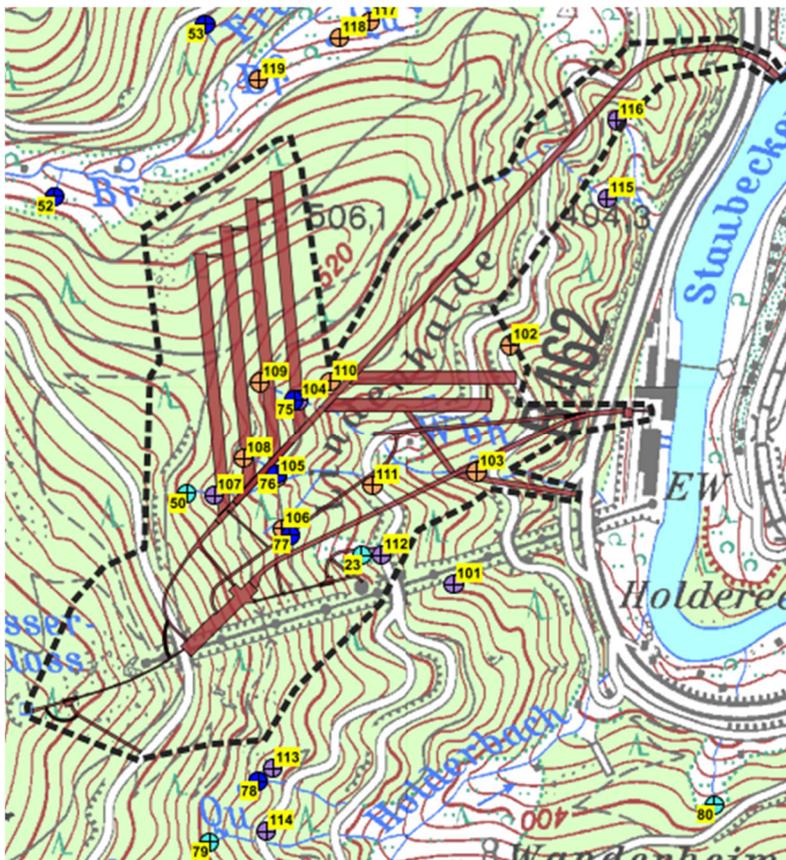


Abb. 62: Quellaustritte innerhalb des Wirkraums Grundwasserabsenkung für k_f -Wert $:3 \cdot 10^{-8}$ m/s

Kapitel 13: Auswirkungen des Bauvorhabens auf die hydrogeologischen Verhältnisse

Anmerkung: Für die Quellen, die sich außerhalb des Wirkraums Grundwasserabsenkung für $k_f=3 \cdot 10^{-8}$ m/s befinden, aber noch innerhalb des Wirkraums für $k_f=5 \cdot 10^{-7}$ m/s werden keine Auswirkungen prognostiziert, weil hierdurch mehrere unwahrscheinliche Ereignisse zu einem Szenario verknüpft würden. Diese unwahrscheinlichen Ereignisse sind:

- 1) alle identifizierten Störungszonen haben eine hohe Durchlässigkeit
- 2) alle Störungszonen werden dauerhaft vollständig dräniert und
- 3) die Grundwasserabsenkung im tiefen Granit wirkt sich vollständig auf das Grundwasser im oberflächennahen Granit und im Hangschutt aus.

Tab. 77: Baubedingte Auswirkungen auf Quellschüttungen

Quellaustritte	Auswirkungen
<p>Quellen in unmittelbarer Nähe zu den Untertagebauwerken: Nr. 23/112, 50/107, 75-77/101-106, 108 – 112, 115 und 116</p> <p>Quellen unterhalb Portal Zugangsstollen Nr. 78./113 und 79/114 - den Holderbach speisend</p>	<p>Aufgrund der vorliegenden Morphologie und der Messungen der Quellen ist davon auszugehen, dass die Quellen durch Deckschichtenabfluss gespeist werden, der an stark erosiv angeschnittenen Stellen zu Tage tritt. Das sich in den Deckschichten hangabwärts bewegende Wasser speist sich ganz überwiegend aus Niederschlagswasser, das in den Deckschichten versickert.</p> <p>Weitere Komponenten der Quellaustritte können ein diffuser Übertritt artesisch gespannten Wassers aus dem Granit in die Deckschichten und ein direkter Grundwasseraustritt aus dem Granitkörper an einer Kluft sein. Aufgrund der Art der Wasseraustritte (flächig über vernässte Bereiche an die Deckschichten anschnidenden Stellen) und der Ergebnisse aus den Bohrarbeiten sind diese Komponenten unwahrscheinlich.</p> <p>Auswirkungen bis hin zu einem Versiegen von Quellen in der Bauzeit können jedoch aufgrund ihrer Lage in unmittelbarer Nähe zu den Untertagebauwerken und den oberflächennahen Eingriffen in den Untergrund nicht vollkommen ausgeschlossen werden.</p>
<p>Quellen nördlich und südlich der Kraftwerkskaverne und des Stollensystems: Nr. 51, 52, 53, 117, 118, 119, 120 - den Frankenbach speisend</p>	<p>Aufgrund der vorliegenden Morphologie und der Messungen der Quellen ist davon auszugehen, dass die Quellen durch Deckschichtenabfluss gespeist werden, der an stark erosiv angeschnittenen Stellen zu Tage tritt. Das sich in den Deckschichten hangabwärts bewegende Wasser speist sich ganz überwiegend aus Niederschlagswasser, das in den Deckschichten versickert.</p> <p>Weitere Komponenten der Quellaustritte können ein diffuser Übertritt artesisch gespannten Wassers aus dem Granit in die Deckschichten und ein direkter Grundwasseraustritt aus dem Granitkörper an einer Kluft sein. Aufgrund der Art der Wasseraustritte (flächig über vernässte Bereiche an die Deckschichten anschnidenden Stellen) und der Ergebnisse aus den Bohrarbeiten sind diese Komponenten generell unwahrscheinlich. Hinzu kommt hier noch, dass sich die Quellen außerhalb des Wirkraums der Grundwasserabsenkung für $k_f = 3 \cdot 10^{-8}$ befinden.</p> <p>Auswirkungen bis hin zu einem Versiegen von Quellen in der Bauzeit können aufgrund ihrer Lage zu den Untertagebauwerken ausgeschlossen werden.</p>
<p>Quellaustritte am Übergang Deckgebirge / kristalliner Sockel (Nr. 46, 47, 48)</p>	<p>Hier sind aufgrund ihrer Höhenlage und der geologischen Verhältnisse keine direkten Betroffenheiten der Quellen zu erwarten. Eine Reaktion der Schichtquellen auf Druckabsenkungen im Granit ist auszuschließen, da das Grundwasser an der Grenze Deckgebirge / Kristallin nicht aufgrund der Wassersättigung im Granit sondern aufgrund des Gesteinswechsels aufgestaut wird.</p> <p>Auswirkungen bis hin zu einem Versiegen von Quellen in der Bauzeit können ausgeschlossen werden.</p>

Ein Monitoringprogramm an Quellen und den von ihnen gespeisten Fließgewässern während der Bauzeit soll der Überprüfung und Beweissicherung (siehe Kapitel 14.5) dienen.

Grundwassernutzungen für die öffentliche Trinkwasserversorgung sind nicht vorhanden. Auswirkungen auf Grundwassernutzungen sind daher nicht zu besorgen.

Wasserhaltung während der Herstellung der Untertagebauwerke

Die abzuleitenden Wässer, die infolge Gebirgsdränage in den Bauwerken anfallen, können trübstoffreich sein und gelöste Schadstoffe wie z. B. Aluminium geogenen Ursprungs enthalten sowie ggf. auch Verschmutzungen durch den Baumaschineneinsatz aufweisen. Durch Sprengmitteleinsatz, Spritzbetonrückstände und Injektionsmittel sind weitere Stoffeinträge in die abzuleitenden Wässer zu erwarten.

Da die Wässer nicht versickert werden, sondern - nach entsprechender Wasseraufbereitung - in Oberflächengewässer abgeleitet werden sollen, sind keine Auswirkungen auf die Grundwasserqualität verbunden.

Herstellen von Baugruben und Voreinschnitten der Stollen

Baugruben mit offener Wasserhaltung werden zur Errichtung des Portalgebäudes und des Auslaufbauwerks benötigt. Voreinschnitte zum Auffahren der Stollen werden an vier Orten hergestellt:

- Am Zugangsstollen Schwarzenbachwerk
- Am Zugangsstollen Murgwerk
- Am Schutterstollen (Zufahrtsstollen)
- Am Zufahrtsstollen/Energieableitungsstollen

Im Bereich der Baugruben (Portalgebäude, Auslaufbauwerk) und der drei Voreinschnitte "Schutterstollen (Zufahrtsstollen)", "Zufahrtsstollen/Energieableitungsstollen" und "Zugangsstollen Schwarzenbachwerk" sind keine Grundwassernutzungen oder Quellaustritte vorhanden.

Im Bereich des geplanten Voreinschnitts für den Zugangsstollen Murgwerk befindet sich eine vernässte Wiese mit diffusem Wasseraustritt (Quelle Nr. 23 bzw. Quelle Nr. 112), der aufgrund der gemessenen Wassertemperaturen und der Art des Wasseraustritts ausschließlich aus Deckschichtenabfluss gespeist wird. Der Quellaustritt speist keinen Wasserlauf.

Folglich ist während der begrenzten Dauer der herstellungsbedingten Wasserhaltungen nur für den Wasseraustritt Quellen Nr. 23/Nr. 112 im Wiesenbereich mit Auswirkungen zu rechnen, da hier vermutlich unmittelbar in den Wiesenbereich eingegriffen wird.

Auswirkungen auf Grundwassernutzungen sind nicht zu besorgen.

13.3.2 Eintrag von Schadstoffen und Trübstoffen

Tab. 78: Eintrag von Schadstoffen und Trübstoffen

Wirkfaktoren	Beschreibung und mögliche Auswirkungen
Arbeiten im Bereich von Grundwasser führenden Schichten	Eintrag von Schadstoffen und Trübstoffen in den Untergrund und Beeinflussung der Wasserqualität von Quellen und Grundwassernutzungen

Aufgrund der Druckverhältnisse im Gebirge tritt beim Bau Wasser in den geschaffenen Hohlraum über. Daher können während des Kavernen- und Stollenbaus keine Brauchwassereintritte in das

Gebirge erfolgen, die die Wasserchemie angrenzender Quellen oder Grundwassernutzungen verändern könnten.

13.4 Anlagebedingte Auswirkungen - dauerhafte Gebirgsdränage

Tab. 79: Anlagebedingte Auswirkungen - dauerhafte Gebirgsdränage

Wirkfaktoren	Beschreibung und mögliche Auswirkungen
Anlage von Untertagebauwerken in grundwasserführendem Gebirge	Auswirkungen auf die Grundwasserströmung und auf das Grundwasserdargebot bei dauerhafter Dränierung des Gebirges; Beeinflussung der Schüttung von Quellen und Grundwassernutzungen

Für den oberen und mittleren Querschnittsbereich der Kraftwerkskaverne und den überwiegenden Teil des Stollensystems sind keine Abdichtungen vorgesehen. Die Bauwerke haben aufgrund ihrer Lage im grundwasserhemmenden Forbach-Granit auch ohne Abdichtungsmaßnahmen insgesamt nur eine geringe gebirgsdränierende Wirkung. Werden stärker wasserführende Klüfte angetroffen, kann der Wasserandrang durch Injektionsmaßnahmen reduziert werden.

Rechnerisch können weiterhin Wassermengen anfallen, die die Grundwasserneubildung überschreiten würden. Nach der Grundwasserabsenkung im umgebenden Gebirge während der Bauzeit kann jedoch dauerhaft nur noch Kluftwasser zulaufen, das über die Grundwasserneubildungsrate in den Gebirgskörper gelangt.

Für das Gebiet der geplanten Unterstufe hat die LUBW eine mittlere jährliche Grundwasserneubildung von 222 l/m² angegeben.

Der Wirkraum für die Gebirgsdränage nimmt für den kf-Wert von 3*10⁻⁸ m/s eine Fläche von rund 33,5 ha ein. Da erhöhte Wasserzutritte in den Untertagebauwerken beim Auffahren abgedichtet werden, stellt der kf-Wert von 3*10⁻⁸ m/s den worst case dar; eine Betrachtung des kf-Wertes von 5*10⁻⁷ m/s ist für die anlagenbedingten Auswirkungen nicht mehr gerechtfertigt.

Setzt man die Fläche von 33,5 ha als Einzugsgebiet an, können dem Stollensystem aus der Grundwasserneubildung rechnerisch im Mittel rund 2,4 l/s zufließen, die dann über das Stollensystem abgeführt werden (vgl. auch Kapitel 13.3.1). Damit liegt der berechnete Gesamtabfluss in vergleichbarer Größenordnung wie der Gesamtabfluss des bestehenden Murgstollens, der eine ähnliche Gesamtlänge aufweist wie die geplanten unterirdischen Bauwerke.

Es ist anzunehmen, dass die dauerhafte Zusickerung von Grundwasser in das Stollensystem zu einer allmählichen Entleerung der wasserführenden Klüfte unmittelbar oberhalb des Stollensystems führt. Hierdurch findet eine Rückverlegung der Vorflut der Murg in das Gebirge hinein statt. Allerdings ist davon auszugehen, dass der Deckschichtenabfluss davon unbeeinflusst bleibt; eine "Austrocknung" des Hanges ist nicht zu befürchten, da die hydraulische Kommunikation zwischen dem Deckschichtenabfluss und dem im tieferen Granit zirkulierenden Grundwasser aufgrund der großen Durchlässigkeitsunterschiede sehr gering ist.

Auch die Speisung der Quellen oberhalb des Kavernenwasserspeichers erfolgt vollständig oder ganz überwiegend durch den Deckschichtenabfluss. Dauerhafte Änderungen des Wasserregimes der Quellen sind nicht anzunehmen.

Grundwassernutzungen für die öffentliche Trinkwasserversorgung sind nicht vorhanden. Auswirkungen auf Grundwassernutzungen sind daher nicht zu besorgen.

13.5 Betriebsbedingte Auswirkungen

Tab. 80: Betriebsbedingte Auswirkungen

Wirkfaktoren	Beschreibung und mögliche Auswirkungen
Betrieb der Kraftwerkskaverne und des Kavernenwasserspeichers	Beeinflussung der Grundwasserqualität infolge von: Eintrag von Betriebswasser aus den Oberbecken (Schwarzenbachtalsperre, Sammelbecken Kirschbaumwasen), den Wasserwegen und dem Kavernenwasserspeicher in das Grundwasser. Eintrag von Schadstoffen aus dem Betrieb und der Wartung der Kraftwerksanlage in das Grundwasser. Eintrag von Schadstoffen aus dem Betrieb der Zugangstunnel und Energieableitungstollen in das Grundwasser.

Eintrag von Betriebswasser

Das Grundwassergefährdungspotential des Betriebswassers wird insgesamt als gering erachtet, da es kaum mit Schadstoffen in Kontakt kommt. Mikrobielle Verunreinigungen sind allerdings möglich, da der Wasserweg für das Betriebswasser über offene Gewässer führt (Oberbecken und Ausgleichsbecken Forbach).

Das Betriebswasser gelangt aus den beiden Oberbecken (Schwarzenbachtalsperre, Sammelbecken Kirschbaumwasen) über den bestehenden Schwarzenbachstollen bzw. den bestehenden Murgstollen mit den beiden entsprechenden ebenfalls bereits bestehenden Wasserschlössern in die neuen Oberwasserdruckstollen und die Kraftwerkskaverne. Von dort führt der Wasserweg weiter über die beiden Unterwasserstollen in den Kavernenwasserspeicher und das Ausgleichsbecken.

Oberwasserstollen und Unterwasserstollen werden technisch abgedichtet, so dass das Betriebswasser nur über den nicht abgedichteten Kavernenwasserspeicher ins umgebende Gebirge übertreten kann, wobei in Bereichen erhöhten Grundwasseranfalls technische Maßnahmen zur Abdichtung vorgesehen sind.

Der Kavernenwasserspeicher wird betriebsbedingt periodisch wassererfüllt sein. So lange deutlich höhere Drücke des Gebirgswassers als des Kavernenwassers vorliegen, können keine Wasserübertritte aus dem Kavernenwasserspeicher in das Gebirge erfolgen.

Da anzunehmen ist, dass es zu einer allmählichen vollständigen Entleerung des Granit-Körpers oberhalb des Kavernenwasserspeichers kommt (Rückverlegung der Vorflut der Murg in das Gebirge hinein), kann das Betriebswasser infolge fehlenden Gebirgswasserdrucks während einer Füllperiode aus der Kaverne in das umliegende Gebirge übertreten, um während der Periode der Kavernenentleerung wieder in die Kaverne zurück zu entwässern. Aufgrund der sehr geringen Gebirgsdurchlässigkeiten (größere Klüfte sind technisch abgedichtet) kann das Betriebswasser während der Füllperiode allerdings nur sehr geringfügig (maximal wenige Meter) in das Gebirge eindringen.

Auswirkungen auf die Wasserqualität der natürlichen Quellen sind nicht zu erwarten, zumal die Quellaustritte oberhalb des Kavernenwasserspeichers liegen und davon auszugehen ist, dass die Quellen keinen Anteil an Grundwasser aus dem tieferen Forbach-Granit haben.

Die bestehenden Stollen "Schwarzenbachstollen" und "Murgstollen" und die bestehenden Wasserschlösser sind ebenfalls nicht technisch abgedichtet. Wie bereits heute schon kann auch hier ein geringer, lokal begrenzter Wasseraustausch zwischen dem Gebirgswasser und dem Betriebswasser stattfinden. Signifikante Änderungen der bestehenden Verhältnisse sind durch den geplanten Betrieb nicht zu erwarten.

Eintrag von Schadstoffen aus dem Betrieb und der Wartung der Kraftwerksanlage

Alle in der Kraftwerkskaverne anfallenden und potentiell belasteten Abwässer werden über einen Schlammfang und Koaleszenzabscheider von Ölen und Schmierstoffen gereinigt, bevor sie in den Pumpensumpf gelangen. Der Pumpensumpf nimmt die anfallenden Sickerwässer und die Wässer aus der Entleerung der Maschine und der Unterwasserstollen auf. Von dort werden die Wässer über den Zufahrtsstollen Kraftwerkskaverne in das Ausgleichsbecken abgeleitet.

Aufgrund der geringen Gebirgsdurchlässigkeit und der herrschenden hydraulischen Verhältnisse ist nicht von einem nennenswerten Eintrag von Wasserinhaltsstoffen in das umgebende Grundwasser auszugehen. Für die Einleitung der Wässer in das Ausgleichsbecken sind die Anforderungen gemäß Abwasserverordnung (AbwV) einzuhalten.

Die befahrbaren Stollen (Zufahrts- und Zugangsstollen einschl. Nebenstollen sowie der Energieableitungsstollen) sind überwiegend nicht abgedichtet. Sie erhalten eine betonierte Fahrbahn, so dass Schadstoffe, z. B. aus Tropfverlusten von Fahrzeugen nicht in das umgebende Gebirge eindringen können. Die Ableitung von anfallendem Sickerwasser erfolgt über den Zufahrtsstollen zur Kraftwerkskaverne, wo das Wasser dem Ölabscheider zugeführt wird.

13.6 Bilanzierung der Gebirgsdränage

Der fortschreitende Bau der Untertagebauwerke führt während der Bauzeit dazu, dass zunehmend Wasser aus den Bauwerken abgeleitet werden muss. Gleichzeitig werden die Wassermengen durch Abdichtungsmaßnahmen wieder reduziert.

Nach dem Terminplan (Stand: 06.07.2016) werden die unterirdischen Bauwerke über einen Zeitraum von rund 18 Monaten ausgebrochen. Einen Monat zuvor beginnen die Voreinschnitte Schutterstollen und Zufahrtsstollen.

In den ersten drei Monaten werden der Schutterstollen, der Zufahrtsstollen und der Energieableitungsstollen Ober-/Unterstufe aufgefahren. Die den Bauwerken zusickernden Wassermengen werden in dieser Zeit auf maximal 14 l/s geschätzt.

Es schließt sich der 2-monatige Ausbruch des Energieableitungsstollens Unterstufe an. Zugleich beginnt der Vortrieb für den Hauptstollen des Kavernenwasserspeichers.

Ab dem fünften Monat beginnen der Ausbruch der Nebenstollen und der Ausbruch der Kraftwerkskaverne. In der rund siebenmonatigen Vortriebszeit der Nebenstollen einschl. des sie verbindenden Hauptstollens befinden sich meist drei Stollen zeitgleich im Vortrieb, und auch der Ausbruch der Kraftwerkskaverne, deren Ausbruchszeit mit rund neun Monaten veranschlagt ist, sowie die Vortriebe Unterwasserstollen Murg- und Schwarzenbachwerk finden in dieser Zeit statt. Damit ist in dieser Zeit eine allmähliche Zunahme der abzuleitenden Wassermengen bis auf rund 60 l/s möglich, abgesehen von zusätzlich möglichen hohen lokalen Wasserzutritten, die aber umgehend abgedichtet werden.

Während sich die parallel laufenden Vortriebe für den Kavernenwasserspeicher auf zunächst zwei, dann nur noch einen Vortrieb für den Hauptstollen reduzieren, beginnt rund 10 Monate nach Baubeginn die Herstellung der Druckschächte für das Schwarzenbach- und das Murgwerk. Bis zur Abdichtung der Druckschächte werden maximal vier Monate benötigt. Gleichzeitig laufen die Ausbrucharbeiten für die Kraftwerkskaverne und den Hauptstollen weiter. In dieser Zeit sind folglich vier Bauwerke im Ausbruch, für die jeweils mit größerem Wasserandrang gerechnet werden muss. In Summe können sich hier rechnerisch weiterhin rund 60 l/s ergeben.

Kapitel 13: Auswirkungen des Bauvorhabens auf die hydrogeologischen Verhältnisse

In den verbleibenden vier Monaten der Gesamt-Ausbruchszeit wird der Hauptstollen bis zum Auslaufbauwerk hergestellt. Hierdurch können noch weiterhin bis zu 14 l/s Wasser allein aus dem Hauptstollen anfallen, allerdings haben sich die Wasserzutritte in der Kraftwerkskaverne, den Stollen- und den Schachtbauwerken bereits durch die Ausbaumaßnahmen deutlich reduziert, so dass der gesamte Wasserandrang wieder auf max. 30 l/s zurückgehen sollte.

Die zusickernden Wassermengen liegen damit während der gesamten Bauzeit von rund 18 Monaten um ein Mehrfaches über der Grundwasserneubildung von 2,4 l/s im rund 33,5 ha großen Bereich oberhalb des Stollensystems, was ohne Zufluss von außen zu einer allmählichen Entleerung des Gebirges führt.

Würde das Gebirgsvolumen über dem Stollensystem komplett entleert, entspräche dies bei Annahme von 1 % Porosität einem Wasservolumen von rund 875.000 m³. Bei einem angenommenen durchschnittlichen bauzeitlichen Wasseranfall von 30 l/s wäre das gesamte im Granit vorhandene Wasser innerhalb von 11 Monaten abgeführt.

Auch nach Fertigstellung der Untertagebauwerke und im Betrieb können rechnerisch weiterhin Wassermengen anfallen, die die Grundwasserneubildung überschreiten würden. Nach der Grundwasserabsenkung im umgebenden Gebirge während der Bauzeit kann jedoch dauerhaft nur noch Kluftwasser zulaufen, das über die Grundwasserneubildungsrate in den Gebirgskörper gelangt.

Tab. 81: Zusammenstellung bauzeitlicher Wasseranfall in den einzelnen Bauwerken

Bauwerk	Bauzeitlicher Wasseranfall* (vgl. Kap. 10)	Vorauss. Zeitraum des bauzeitlichen Wasseranfalls**	Hauptvortriebszeit**	Geplante Abdichtungsmaßnahmen
Kraftwerkskaverne	5 l/s bis 20 l/s	Vortriebszeit gesamt ca. 8,5 Monate Ausbau Erstbeton ca. 10 Monate	Monat 5 bis 14	keine Abdichtungsmaßnahmen im oberen und mittleren Querschnittbereich anfallendes Sickerwasser wird über Pumpensumpf und den Zufahrtsstollen Kraftwerkskaverne in das Ausgleichsbecken Forbach geleitet
Zufahrtsstollen Kraftwerkskaverne (ohne Voreinschnitt und Portalgebäude) sowie Schutterstollen	2 l/s bis 7 l/s	Vortriebszeit: ca. 3,5 Monate	Monat 1 bis 4	Ca. 2/3 des Zufahrtsstollens werden nicht abgedichtet und entwässern über den Pumpensumpf der Kraftwerkskaverne ca. 1/3 des Zufahrtsstollens haben kein Längsgefälle und werden bei Wasseranfall abgedichtet (Betonauskleidung) Ausbau des Schutterstollens: Ohne Abdichtung und ohne Innenschale
OW-Stollen SB			Monat 10 bis 11	Druckstollen
OW-Schacht SB	4 l/s bis 9 l/s, max. 32 l/s	Vortriebszeit Schacht: ca. 4 Monate	Monat 11 bis 14	vollständig abgedichtet (überwiegend Stahlpanzerung)
Zugangsstollen und Schützenkaverne SB			Monat 10	Zugangsstollen ohne Abdichtung und ohne Innenschale
Unterwasserstollen SB inkl. Hilfsstollen	2 l/s bis 9 l/s	Vortriebszeit: ca. 1 Monat	Monat 9 bis 10	Druckstollen vollständig abgedichtet (Betonauskleidung) Hilfsstollen: Ohne Abdichtung und ohne Innenschale
OW-Stollen Murg	1 l/s bis 10 l/s		Monat 4 bis 5, 11	Druckstollen

Kapitel 13: Auswirkungen des Bauvorhabens auf die hydrogeologischen Verhältnisse

OW-Schacht Murg		Vortriebszeit Schacht: ca. 3 Monate	Monat 12 bis 14	vollständig abgedichtet (teilweise Stahlpanzerung)
Zugangsstollen und Schützenkaverne Murg			Monat 11 bis 12	Zugangsstollen ohne Abdichtung und ohne Innenschale
Unterwasserstollen Murg inkl. Hilfsstollen	1 l/s bis 3 l/s	Vortriebszeit: ca. 1 Monat	Monat 9	Druckstollen vollständig abgedichtet (Betonauskleidung) Hilfsstollen: Ohne Abdichtung und ohne Innenschale
Kavernenwasserspeicher: Hauptstollen	4 l/s bis 14 l/s	Vortriebszeit gesamt ca. 15 Monate	Monat 3 bis 18	Ohne Abdichtung und ohne Innenschale Fahrstreifen betoniert, Entwässerung in das Ausgleichsbecken Forbach
Kavernenwasserspeicher: Nebenstollen I bis VI	12 l/s bis 34 l/s	Vortriebszeit je Nebenstollen: 2 bzw. 3 Monate Insgesamt (bis zu 3 Stollen gleichzeitig): 7,5 Monate	Monat 5 bis 12	Ohne Abdichtung und ohne Innenschale Fahrstreifen betoniert, Entwässerung in das Ausgleichsbecken Forbach
Energieableitungsstollen US und US/OS und OS bis Station 0+500	3 l/s bis 14 l/s	Vortriebszeit gesamt ca. 4 Monate	Monat 2 bis 5	Ohne Abdichtung und ohne Innenschale
Auslaufbauwerk	(5 l/s)	Bauzeit: ca. 3,5 Monate	Bau erst nach Fertigstellung sämtlicher Untertagbauwerke	Herstellung in offener Baugrube mit Grundwasserhaltung; Stahlbetonbauwerk
Portalgebäude	(1 l/s)	Bauzeit: ca. 3 Monate	Bau erst nach Fertigstellung sämtlicher Untertagbauwerke	Herstellung in offener Baugrube mit Grundwasserhaltung
Gesamter Wasseranfall (ohne Auslaufbauwerk und Portalgebäude)	34 l/s bis 143 l/s			

SB = Schwarzenbach US = Unterstufe OS = Oberstufe OW = Oberwasser

* ohne Berücksichtigung von möglichen Spitzenwerten infolge lokaler Wasserzutritte aus wasserwegsamem Gebirge

** gemäß Terminplan IAF, Stand 06.07.2016

13.7 Auswirkungen auf das Tiefenzirkulationswasser

Nach heutigem Kenntnisstand ist davon auszugehen, dass die Thermal- und Heilquellen von Baden-Baden aus dem im Nordschwarzwälder Granit zirkulierenden Tiefengrundwasser gespeist werden. Dieses Grundwasser entsteht durch die Niederschläge auf den Höhenzügen des Nordschwarzwalds, die in den anstehenden Granit einsickern und sich - dem natürlichen Gefälle folgend - über ein zusammenhängendes Klufnetz im Granitkörper in größere Tiefen und zur Seite hin ausbreiten.

Nur ein sehr kleiner Teil dieses Grundwassers tritt in den Thermalquellen von Baden-Baden wieder zu Tage. Das Thermalwasser ist vermutlich mehrere zehntausend Jahre alt (BENDER, 1995). Die Thermalquellen treten artesisch auf einer Höhe von knapp 200 mNN aus, d. h. dass gespannte Grundwasser-Verhältnisse vorliegen. Solche Systeme können empfindlich auf hydraulische Entlastung reagieren. Eine Druckverminderung in demjenigen kristallinen Grundwasserkörper, der mit dem Thermalwasser von Baden-Baden hydraulisch in Verbindung steht, könnte theoretisch einen Rückgang der Quellschüttungen herbeiführen.

Es könnte also ein Einfluss auf die Baden-Badener Thermalquellen dann nicht ausgeschlossen werden, wenn eine großräumige und nachhaltige Druckentlastung des kristallinen Grundwasserkörpers, der hydraulisch mit den Thermalquellen in Verbindung steht, stattfinden würde.

Das Heilquellenschutzgebiet für die Thermalquellen in Baden-Baden (Schutzgebietsnummer 211 007) beginnt ca. 3,5 km westlich der geplanten Unterstufe.

Momentan findet eine Neubearbeitung des Heilquellenschutzgebiets statt (hydrogeologisches Zwischengutachten des LGRB vom 30.08.2004). Nach Auffassung des LGRB könnte sich das unterirdische Einzugsgebiet über das oberirdische Einzugsgebiet hinaus erstrecken. Das LGRB hat dementsprechend einen Untersuchungsraum definiert, der das denkbare unterirdische Einzugsgebiet mit größter Sicherheit vollständig erfasst. Die geplante Unterstufe liegt teils innerhalb, teils außerhalb dieses Untersuchungsraums des LGRB für die Neuabgrenzung des Heilquellenschutzgebiets.

Ob das unterirdische Einzugsgebiet bis an den Rand des vom LGRB festgelegten Untersuchungsraum reicht und die geplante Unterstufe dann teilweise im Einzugsgebiet liegt, ist eher unwahrscheinlich, da im Bereich der Unterstufe die Murg die Vorflut für das Grundwasservorkommen im Granit darstellt.

Sämtliche unterirdischen Bauwerke kommen innerhalb des Granits zu liegen, so dass flächenhaft in den Granitkörper eingegriffen wird. Es wird von einem bauzeitlichen Wasseranfall zwischen 34 l/s und 143 l/s im Granit ausgegangen (siehe Kapitel 10). Die allmähliche Drainage des Gebirges durch die Kraftwerkskaverne und das Stollensystem verlagert die Vorflut von der Murg zwar in den Berg hinein; aufgrund der geringen Durchlässigkeiten im Granit wirken sich Veränderungen der Druckverhältnisse durch die Rückverlagerung der Vorflut in den Berg allerdings nur auf sehr kurze Distanz aus. Lediglich an einzelnen, offenen und weitreichenden Klüften könnte es lokal zu Druckreduzierungen in größerem Abstand zu den Untertagebauwerken kommen. Bei der Herleitung des Wirkraums wurden als worst case Reichweiten bis maximal 630 m ermittelt (siehe Kap. 13.2). Diese Klüfte mit erhöhtem Wasserzutritt werden während des Baus abgedichtet, so dass sie in der Betriebsphase technisch dicht sind.

Der Wirkraum für die Gebirgsdrainage nimmt für den kf-Wert von $3 \cdot 10^{-8}$ m/s eine Fläche von rund 33,5 ha ein. Bei Ansatz des kf-Werts von $5 \cdot 10^{-7}$ m/s ergibt sich eine Fläche von 115 ha, die jedoch nur dann im Bauzustand auftreten könnte, wenn – neben dem Ansatz, dass alle Schwächezonenn einen kf-Wert von $5 \cdot 10^{-7}$ m/s aufweisen – auch alle unterirdischen Bauwerke gleichzeitig dränieren

Kapitel 13: Auswirkungen des Bauvorhabens auf die hydrogeologischen Verhältnisse

ohne bautechnisch vorgesehene Abdichtung verschiedener Bauwerke und ohne Abdichtung von einzelnen Wasserzutritten.

Für eine längerfristige Gebirgsdrainage ist daher der Wirkraum von 33,5 ha anzusetzen, von dem rund 60 % innerhalb des Untersuchungsgebiets für die Neuabgrenzung des Heilquellenschutzgebiets liegen, das sind 0,2 % des Untersuchungsgebiets für die Neuabgrenzung des Heilquellenschutzgebiets von 157,6 km². Eine großräumige Druckentlastung des kristallinen Grundwasserkörpers erscheint daher sehr unwahrscheinlich.

Schließlich ist noch zu bedenken, dass die tiefste Bauwerkssohle aller Bauwerke der Unterstufe bei 248,3 mNN liegt und damit rund 50 m höher als die Thermalquellen, die in Baden-Baden auf einer Höhe von knapp 200 mNN artesisch austreten. Das hydraulische Potential wird durch das Auffahren der unterirdischen Bauwerke somit nicht unter das notwendige Potential für den artesischen Austritt der Thermalquellen in Baden-Baden abgesenkt.

Durchgängige Großklüfte mit erhöhter Wasserwegsamkeit konnten nicht nachgewiesen werden, sind aber entlang kataklastischer Zonen, wie sie recht häufig im Forbach-Granit auftreten, nicht prinzipiell auszuschließen. Es erscheint allerdings sehr unwahrscheinlich, dass solche großräumigen kataklastischen Zonen mit erhöhter Wasserführung so weit in das Einzugsgebiet der Thermalquellen von Baden-Baden hineinreichen und zugleich durch die Untertagebauwerke derart dräniert werden, dass dies zu einer Druckentlastung des kristallinen Grundwasserkörpers führt, in dessen Folge es dann zu einer Reduzierung der Schüttungen der Thermalquellen führt.

Aus Beweissicherungsgründen wird nun empfohlen, ein Monitoringprogramm zu installieren, das mögliche Veränderungen des hydraulischen Potentials nordwestlich der Untertagebauwerke außerhalb des prognostizierten Wirkraums und in Richtung Thermalquellen Baden-Baden erfasst (siehe Kap. 14.5).

Flächenversiegelungen sind nicht vorgesehen; eine Reduzierung der Grundwasserneubildung infolge Versiegelung und in Folge eine theoretisch denkbare quantitative Beeinflussung der Thermalquellen sind daher auszuschließen.

Eine qualitative Beeinträchtigung der Thermalquellen kann ausgeschlossen werden: eine hydrochemische Veränderung des Grundwassers an der Unterstufe infolge der geplanten Baumaßnahme wird sich nur sehr lokal und zeitlich eng auf die Bauzeit beschränkt bemerkbar machen, und das heute im Nordschwarzwald neugebildete Grundwasser wird erst in mehreren Zehntausend Jahren als Thermalwasser in Baden-Baden zu Tage treten.

13.8 Ableiten von Baustellenabwässern

Als Baustellenabwässer werden verstanden:

- (1) Niederschlagswasser sowie Sicker-, Hang-, Grundwässer, die für den Baustellenbetrieb durch Wasserhaltungsmaßnahmen abgeleitet werden müssen
- (2) Arbeits- und Betonwasser
- (3) Waschwasser (z. B. aus Reifenwaschanlagen)
- (4) Sanitärabwässer

Mit Ausnahme von (1) sind bei sämtlichen Abwässern Verschmutzungen in solchem Maße zu erwarten, dass die Wässer fachgerecht behandelt und ggf. fachgerecht entsorgt werden müssen. Ein Baustellenentwässerungskonzept hat sicherzustellen, dass diese Abwässer nicht unkontrolliert in

Kapitel 13: Auswirkungen des Bauvorhabens auf die hydrogeologischen Verhältnisse

den Untergrund gelangen. Im Hinblick auf die Auswirkungen auf das Grundwasser müssen sie hier nicht weiter betrachtet werden.

Niederschlagswasser sowie Sicker-, Hang-, Grundwässer sind zunächst "sauber". Durch ihren Kontakt mit dem Baustellenbetrieb (Baumaschinen, Bauteile, freigelegte Böden und Fels) können jedoch infolge von Tropfverlusten oder Havarien Schadstoffe wie z. B. Dieselöl aus den Fahrzeugen aufgenommen werden, es können pH-Wert-Änderungen durch Kontakt mit frisch betonierten Bauteilen eintreten, und es ist damit zu rechnen, dass die Wässer trübstoffreich sind und nach dem Kontakt mit den verwitterten Gesteinen gelöstes Aluminium geogenen Ursprungs enthalten.

In Abhängigkeit von der gewählten Einleitung ist eine entsprechende Wasseraufbereitung (z. B. Absetzbecken, Ölabscheider und Neutralisationsanlage mit Einstellung des pH-Wertes im leicht sauren Bereich) vorzusehen. Bei Einleitung in Oberflächengewässer sind zudem die natürlichen Gehalte des Grundwassers an Aluminium, Eisen und Mangan zu beachten (vgl. Kapitel 6.4.3).

Auf vorbeugende Maßnahmen gegenüber einem Schadstoffeintrag (z. B. Einsatz von biologisch abbaubaren Treibstoffen, Vorhalten von Ölbindemitteln im Arbeitsbereich und auf den Arbeitsgeräten) wird hier nochmals hingewiesen.

14 Zusammenfassung und Empfehlungen

14.1 Zusammenfassung der Baugrunduntersuchungen

Zur Ermittlung der Baugrundsituation und der hydrogeologischen Verhältnisse als Grundlage für die Ausführungsplanung der Unterstufe „PSW Forbach – Unterstufe“ wurden in Erweiterung der Erkundungen für die Raumordnung und die Entwurfsplanung [14] für die Ausschreibungsplanung weitere Erkundungsbohrungen durchgeführt. In den Bohrungen wurden umfangreiche Tests und Untersuchungen durchgeführt. Des Weiteren wurden Geländekartierungen im Bereich des Kaverenwasserspeichers und der Stolleneingänge ausgeführt. Da die Planung für einige Untertagebauwerke seit der ersten Erkundung 2010/2011 geändert wurde, wurden der Erkundungsumfang und die Erkundungsorte für die Untersuchungsprogramm 2018/2019 angepasst. Vor allem wurden die Kaverne, die Nebenstollen I bis IV und die Portalbereiche der Stollen ausführlicher untersucht. Des Weiteren wurde der „Franzosenstollen“ am südlichen Ortseingang von Forbach, an der B462, hinsichtlich des Gefügeinventars kartiert.

Die Erkundung 2018/2019 erfasste wie bei der Erkundung 2010/2011 die folgenden Schichten:

Quartärer Hangschutt, im Areal oberhalb der B462

Quartäre fluviatile Sedimente der Murg und

rollige und bindige Auffüllungen unterhalb der B462

Forbach-Granit (Grundgebirge) im gesamten Areal unter den quartären Sedimenten und den Auffüllungen

Der Forbach-Granit (Grundgebirge) ist als regellos körniger Zweiglimmergranit im Bereich des Murgtals direkt an der Geländeoberfläche aufgeschlossen und nur von quartären Deckschichten bzw. Auffüllungen überlagert. Die Laboruntersuchungen ergaben, dass der Granit von Mikrorissen durchzogen ist, die nach den Untersuchungen z. T. die Wasseraufnahmefähigkeit/Frostsicherheit des Granit beeinflussen.

Der Forbach-Granit ist nach den Aufschlussresultaten im Bauwerksbereich vereinzelt von hellen, mittel bis feinkörnigen, harten Granitgängen (Aplite) durchzogen, die ca. 60° bis 70° geneigt sind und eine Gang-Mächtigkeit von Dezimetern bis Metern besitzen.

In allen Aufschlüssen (Bohrungen und obertägige Aufschlüsse) wurden neben dem frischen Granit räumlich begrenzte vergrusste Granitzonen festgestellt; dabei handelt es sich um hydrothermale Veränderungen des Granitgesteins, die vorwiegend an die Kluftsysteme des Grundgebirges gebunden sind. Mit Hilfe von Festigkeitsmessungen an den Bohrkernen konnte die Verwitterung des Granits quantitativ erfasst und in 4 Gebirgstypen eingeteilt werden.

Im Rahmen einer gesonderten Auswertung des tektonischen Gefüges wurde ein Modell für die Prognose des Anteils an vergrustem Gebirge am Gesamtvolumen der geplanten unterirdischen Bauwerke erarbeitet.

Für die 4 Granittypen wurden die geotechnische Kennwerte ermittelt, Die in 2019 ermittelten Gebirgskennwerte liegen dabei in der gleichen Größenordnung wie die Kennwerte des Gutachtens Rev.01.

Das Granitgebirge an der Geländeoberfläche flächig bis in eine Tiefe von ca. 5 m verwittert. Ansonsten ist in Teufen größer 5 m der Granit meist hart und unverwittert ausgebildet.

Kapitel 14: Zusammenfassung und Empfehlungen

Die Gesteine des Forbach-Granits besitzen in frischem und gering verwittertem Zustand eine hohe bis sehr hohe, die Gesteine in Verwitterungszonen dagegen nur eine vergleichsweise geringe Gesteinsfestigkeit. Den verschiedenen festen Varietäten des Forbach-Granits wurden nach EC 07 unterschiedliche Homogenbereiche zugeordnet.

Der Forbach-Granit ist im bergfrischen und gering verwitterten Zustand aufgrund seiner Frostbeständigkeit und hohen Gesteinsfestigkeit als Frostschutzmaterial und für den Wegebau gut geeignet. Er kann ebenso als Dammschüttmaterial mit hoher Scherfestigkeit verwendet werden. Die Untersuchungen an gebrochenem Granitmaterial ergaben, dass aufgrund der Wasseraufnahmefähigkeit Teile des Granits (Homogenbereich 1) überprüft werden sollte.

Mäßig bis stark verwitterter Forbach-Granit (Homogenbereich 2) kann als Dammschüttmaterial verwendet werden.

Vollständig verwitterter bis zersetzter Forbach-Granit (Homogenbereich 3) ist als Dammschüttmaterial nur bedingt geeignet, kann aber für Geländemodellierungen u. ä. verwendet werden.

Die Untersuchung der Gebirgsverformungen für die 4 Gebirgstypen des Granits in Bohrlöchern durch in-situ Untersuchungen bestätigte die an Laborversuchungen ermittelten Verformungskennwerte des Gebirges.

Im Granit wurde in den im Jahre 2018 durchgeführten Untersuchungen das Kluffinventar der Untersuchungen der Jahre 2010/2011 bestätigt. Es wurden 6 Hauptkluffrichtungen festgestellt:

<u>Name</u>	<u>Beschreibung</u>	<u>Gemittelte Orientierung</u> (Fallrichtung, Fallwert)
HKR 1	Sigma 1, Schwächezonen, Runsen	060/60 bzw. 215/67
HKR 2	Murgtal-Lineament	075/57 bzw. 267/75
HKR 3	Lagerklüfte	Klüfte flach in alle Richtungen verteilt
HKR 4	Schwächezone herzynisch (variszisch)	117/75; 150/75; 327/75; 297/75
HKR 5	Orthogonal zu Murg- und Rheintalstörung	157/75; 330/75; 30/57
HKR 6	Rheintal-Lineament	95/70 bzw. 290/75

In den für die Hauptbauwerke relevanten (tiefer liegenden) Gebirgsabschnitten treten die Vergrusungszonen bevorzugt mit der Hauptkluffrichtung HKR 1/HKR 2 und HKR 6 auf.

Die 3D-Auswertung der Vergrusungszonen (Homogenbereiche F2 und F3) ergab, dass der Granit entlang der Hauptkluffrichtungen durch eine Vielzahl von Schwächezonen (Vergrusungszonen) durchzogen ist. Der Verlauf dieser Schwächezonen ist in den Längsschnitten und Lageplänen des Gutachtens Rev.02 dargestellt.

Die Kartierung des Granitgebirges im Franzosenstollen bestätigte die 6 Hauptkluffrichtungen.

Die quartären Lockergesteine bestehen im Bereich der Hänge und der Talflanken aus bis zu 2 m mächtigem Hangschutt, der sich aus verwittertem und umgelagertem Granitgrus sowie aus Steinen und Blöcken (des Granits) zusammensetzt. Im unteren Hangbereich des Murgtals (z. B. im Bereich des Auslaufbauwerks des Hauptstollens) kann die Hangschuttmächtigkeit deutlich zunehmen. Hier durchmischt sich der Hangschutt mit den Murgschottern und dazwischen lagernden Granit-Blöcken im Flussbett. Im Bereich des Betriebsgebäudes des Zufahrtsstollens und des Einlauf- / Auslaufbauwerks besteht das Lockergestein aus bis zu 12 m mächtigem sandig, kiesigem Hangschuttmaterial

Kapitel 14: Zusammenfassung und Empfehlungen

aus Granit und Murgschottern (Homogenbereich Q2). Im Bereich zwischen dem bestehenden Rudolf-Fettweis-Werks und der B462 wurden im Zuge der Detailuntersuchung der Portalbereiche bindige und rollige Auffüllungen (Homogenbereich A1.1 und Homogenbereich A1.2) erkundet.

Organisch durchsetzter Oberboden ist im gesamten Bereich des Kavernenwasserspeichers und im Bereich der Portalbauwerke vorhanden. Die Mächtigkeit liegt in der Regel im ein- bis zwei-Dezimeterbereich.

14.2 Zusammenfassung der hydrogeologisch-hydrochemischen Untersuchungen

Im Bereich der geplanten Unterstufe können grundsätzlich zwei hydrogeologische Einheiten unterschieden werden:

- Forbach-Granit (Grundwasser-Hemmer bis Grundwasser-Nichtleiter, im frischen Zustand ausschließlich Klüfte als Wasserwege, im verwitterten, aufgelockerten Zustand auch Porenräume als Wasserwege)
- Quartäre Lockergesteinsdecken (Hangschuttaquifer - Porengrundwasserleiter)

Die Ganglinie im Hangschuttaquifer weicht deutlich von den Ganglinien im tieferen Granit ab. Damit werden Grundwasserstände im Hangschuttaquifer von anderen Faktoren beeinflusst als die Druckpiegelschwankungen im tieferen Granit.

Der Übergang zwischen den Lockergesteinen und dem frischen Granit wird durch eine Zone gebildet, in der der Granit mäßig verwittert bis zersetzt und aufgelockert sein kann und dadurch um den Faktor 100 bis 1000 höhere Durchlässigkeiten aufweist als der frische Granit.

Im tieferen Granit treten Bereiche erhöhter Kluftdichten und Schwächezonen mit kataklastisch zerbrochenem bis vollständig zersetztem Gestein auf. Diese Bereiche können Zonen erhöhter Wasserwegsamkeit darstellen, wenn sie mit höherer Kluftdichte einhergehen.

Tab. 82: Hydrogeologische Gliederung im Bereich der Unterstufe

Stratigraphische Einheit Erbohrte Mächtigkeiten	Wasserwegsamkeiten / Durchlässigkeiten	Grundwasservorkommen		Hydrochemie
Quartäre Deckschichten / Schuttdecken (0,6 bis 4,5 m)	Porenwasserleiter $k_f = 10^{-2} - 10^{-6} \text{ m/s}$	Teilweise grundwassererfüllt	Grundwasserleiter / Deckschichtenabfluss	sehr gering mineralisiert
Oberflächennaher Forbach-Granit (GFO) Bis ca. 30 m Tiefe	Übergang vom Porengrundwasserleiter zum Klufftgrundwasserleiter $k_f = 10^{-5} \text{ bis } 10^{-9} \text{ m/s}$ im Mittel $5 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$	Überwiegend grundwassererfüllt	Übergang Grundwasserleiter / Grundwasserhemmer	Gering mineralisiertes Erdalkali-Hydrogencarbonat-Wasser mit höherem Alkali-Gehalt
Tieferer Forbach-Granit (GFO) Ab ca. 30 m Tiefe	Dreidimensionales Klufftnetz Frisches, ungestörtes Gebirge: $k_f = 10^{-8} \text{ bis } 10^{-12} \text{ m/s}$ im Mittel $2,5 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}$ Schwächezonen, Bereiche höherer Klüftigkeit: $k_f = 3 \cdot 10^{-8} \text{ bis } 5 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$	grundwassererfüllt	Grundwasserhemmer bis Grundwasser-Nichtleiter	Gering mineralisiertes Erdalkali-Hydrogencarbonat-Wasser mit höherem Alkali-Gehalt

Kapitel 14: Zusammenfassung und Empfehlungen

Es ist davon auszugehen, dass der Granit überwiegend grundwassererfüllt ist.

Für die weiteren Betrachtungen wurden folgende Durchlässigkeiten angesetzt:

Forbach-Granit, unterhalb 30 m u. GOK außerhalb von Schwächezonen bzw. Bereichen erhöhter Kluftdichten:	$2,5 * 10^{-10}$ m/s
Forbach-Granit, unterhalb 30 m u. GOK in Schwächezonen und Bereichen erhöhter Kluftdichten:	$3 * 10^{-8}$ bis $5 * 10^{-7}$ m/s
Forbach-Granit, oberflächennah (bis zu 30 m u. GOK)	$5 * 10^{-7}$ m/s

Das Grundwasser des Forbach-Granits ist gering mineralisiert.

Betonaggressivität

Das Grundwasser im tieferen Forbach-Granit war aufgrund des pH-Werts und/oder des kalklösenden CO₂-Gehaltes in einer von vier Proben der Expositionsklasse XA1 nach DIN 4030-1 zuzuordnen. Sollte sich bei weiteren Messungen der niedrige pH-Wert und der hohe Gehalt an kalklösendem CO₂ weiterhin nicht bestätigen, läge keine Expositionsklasse vor und das Grundwasser könnte als nicht betonangreifend klassifiziert werden.

Für das oberflächennahe, atmosphärisch beeinflusste Grundwasser ist nicht auszuschließen, dass es aufgrund seines kalklösenden CO₂-Gehaltes die Expositionsklasse XA2 erreichen kann.

Das Grundwasser im Forbach-Granit hat eine sehr geringe Carbonathärte (CaO < 30 mg/l), was zur Weichwasserkorrosion führen kann.

Stahlkorrosion

Zur Beurteilung der Korrosionswahrscheinlichkeit für unlegierten und niedriglegierten Stahl wurden zwei Grundwasserproben untersucht. Die Korrosionswahrscheinlichkeit der Wasserprobe aus dem tieferen Forbach-Granit wurde als sehr gering eingestuft, während die der Wasserprobe aus dem quartären Grundwasserleiter als gering (Flächenkorrosion) bis mittel (Mulden- und Lockkorrosion) klassifiziert wurde.

Eisen, Mangan und Aluminium sind fischtoxisch und können Algen und Daphnien schädigen. Erhöhte Gehalte sind nach Vorliegen der Ergebnisse aus 2018 nicht mehr zu erwarten. Aufgrund der früheren Befunde können erhöhte Werte jedoch nicht generell ausgeschlossen werden. Vor Einleitung von baubedingt anfallendem Grundwasser in Oberflächengewässer ist ggf. eine Enteisungs-/ Entmanganisierung und eine Erhöhung des pH-Werts erforderlich.

Die Grundwasservorkommen werden nicht wasserwirtschaftlich genutzt.

Quellaustritte

An der Geländeoberfläche über den unterirdischen Bauwerken sind einige meist schwach schütende Quellaustritte feststellbar. Einige der Quellaustritte sind als Blockschuttquellen ausgebildet, andere treten diffus aus und bilden Vernässungszonen. Letztere finden sich meist an Weganschnitten.

Es handelt sich ausschließlich um Quellen, die durch den Deckschichtenabfluss gespeist werden. Hinweise auf einen Grundwasseranteil aus dem granitischen Kluftgrundwasserleiter in diesen Quellen konnten nicht gefunden werden.

14.3 Zusammenfassung der abfalltechnischen Untersuchungen

Geogene Belastungen

Der Forbach-Granit kann geogen bedingt erhöhte Gehalte an Arsen, Blei, Kupfer, Thallium, Quecksilber und Zink im Feststoff aufweisen. Erhöhte Gehalte wurden allerdings nur im Feststoff und nur im mäßig verwitterten bis zersetzten Granit festgestellt.

Beim quartären Lockergestein wurden keine geogen bedingten Schadstoffgehalte festgestellt.

Der unverwitterte Granit (w0 bis w2) kann uneingeschränkt verwertet werden (Qualitätsstufe Z 0).

Beim mäßig bis vollständig verwitterten Granit (w2 bis w5) ist mit geogen bedingten Belastungen bis zur Qualitätsstufe Z 2 zu rechnen. Aufgrund ihres geogenen Ursprungs und der sehr geringen Eluierbarkeit können die Gesteine innerhalb der geplanten Baumaßnahme uneingeschränkt wieder eingebaut werden.

Auch innerhalb des Verbreitungsgebiets des Forbach-Granits besteht die Möglichkeit, das geogen belastete Material in der Einbauklasse Z 0 zu verwerten (sogenannte Öffnungsklausel der VwV Boden), wenn der Einbau nicht zu einer Verschlechterung der Ausgangssituation am Einbauort führt.

Ist eine externe Verwertung außerhalb des Verbreitungsgebiets des Forbach-Granits vorgesehen, gelten die Anforderungen der VwV Boden an die Art des Einbaus entsprechend der Qualitätsstufe des zu verwertenden Materials. So kann beispielsweise Z 1.2 - Material in technischen Bauwerken ohne definierte technische Sicherungsmaßnahmen bei gleichzeitig günstigen hydrogeologischen Verhältnissen (Deckschicht ≥ 2 m und Abstand zum Grundwasser ≥ 1 m) eingebaut werden.

Anthropogene Belastungen

Beim Lockermaterial können je nach Herkunft des Lockermaterials (z. B. aus Bauwerkshinterfüllungen, oder aus Siedlungs- bzw. Straßennähe) anthropogene Belastungen auftreten. Hier ist v. a. mit PAK und Mineralölkohlenwasserstoffen zu rechnen. Vor einer angestrebten Verwertung ist das Material daher baubegleitend abfalltechnisch zu untersuchen. Die Verwertung muss entsprechend den Vorgaben der VwV Boden zum Einbauort in Abhängigkeit von der Qualitätsstufe erfolgen.

Aus dem Tunnelvortrieb und den notwendigen Sicherungsmaßnahmen können Schadstoffbelastungen und pH-Wert-Erhöhungen des Tunnelausbruchmaterials resultieren. Durch geeignete Maßnahmen können die stofflichen Änderungen so weit reduziert werden, dass die Materialanforderungen für die vorgesehenen Entsorgungswege erfüllt werden können.

Die endgültige abfalltechnische Einstufung sollte dann anhand baubegleitender abfalltechnischer Untersuchungen des Tunnelausbruchmaterials erfolgen.

14.4 Zusammenfassung der wesentlichen Auswirkungen des Bauvorhabens auf die hydrogeologischen Verhältnisse

Die wesentliche Auswirkung des Bauvorhabens auf das Schutzgut Grundwasser besteht in der baubedingten Gebirgsdränage durch die im Grundwasser errichteten unterirdischen Bauwerke.

Für die Quellen, die in unmittelbarer Nähe zu den unterirdischen Bauwerken austreten, können Auswirkungen bis hin zu einem Versiegen von Quellen in der Bauzeit aufgrund ihrer Lage nicht vollkommen ausgeschlossen werden. Es ist allerdings davon auszugehen, dass die Quellen ganz überwiegend vom Deckschichtenabfluss gespeist werden, der von der Gebirgsdränage nicht betroffen ist.

Kapitel 14: Zusammenfassung und Empfehlungen

Im Bereich des geplanten Voreinschnitts für den Zugangsstollen Murgwerk befindet sich eine ver-nässte Wiese mit diffusem Wasseraustritt. Während der begrenzten Dauer der baulichen Eingriffe ist mit Auswirkungen auf diesen Quellaustritt zu rechnen.

Als anlagenbedingte Auswirkung ist anzunehmen, dass die dauerhafte Zusickerung von Grundwasser in das Stollensystem zu einer allmählichen Entleerung der wasserführenden Klüfte unmittelbar oberhalb des Stollensystems führt. Hierdurch findet eine Rückverlegung der Vorflut der Murg in das Gebirge hinein statt. Allerdings ist davon auszugehen, dass der Deckschichtenabfluss davon unbeeinflusst bleibt; eine "Austrocknung" des Hanges ist nicht zu befürchten, da die hydraulische Kommunikation zwischen dem Deckschichtenabfluss und dem im tieferen Granit zirkulierenden Grundwasser aufgrund der großen Durchlässigkeitsunterschiede sehr gering ist.

Auch die Speisung der Quellen oberhalb des Kavernenwasserspeichers erfolgt vollständig oder ganz überwiegend durch den Deckschichtenabfluss. Dauerhafte Änderungen des Wasserregimes der Quellen sind nicht anzunehmen.

Betriebsbedingte Auswirkungen auf das Grundwasser sind nicht zu erwarten: Dem Eintrag von Schadstoffen aus dem Kavernenbetrieb (Tropfverluste von Fahrzeugen, Öl- und Schmierstoffbeastete Abwässer) kann durch Auffangen, Abreinigen über Koaleszenzabscheider und schadloses Ableiten der Wässer begegnet werden. Das Betriebswasser, das infolge fehlenden Gebirgswasserdrucks während einer Füllperiode aus der Kaverne in das umliegende Gebirge übertreten kann, hat nur ein sehr geringes Grundwassergefährdungspotential und entwässert während der Periode der Kavernenentleerung wieder in die Kaverne zurück.

Grundwassernutzungen für die öffentliche Trinkwasserversorgung sind nicht vorhanden. Auswirkungen auf Grundwassernutzungen sind daher nicht zu besorgen.

Für die Thermalquellen von Baden-Baden sind Auswirkungen in quantitativer Hinsicht sehr unwahrscheinlich, in qualitativer Hinsicht auszuschließen.

14.5 Empfehlungen

Bautechnische Empfehlungen

Alle unterirdischen Bauwerke der Unterstufe werden zum weitaus überwiegenden Teil im Forbach-Granit aufgefahren. Lediglich in den Portalbereichen von Stollen sowie am Auslaufbauwerk müssen kurze Abschnitte im Lockergestein aufgefahren werden, die dann ggf. in offener Bauweise herzustellen sind.

Die Schrägstollen der Oberwasserwege beider Kraftwerke (Schwarzenbachwerk und Murgwerk) können im Raise-Boring-Verfahren hergestellt werden. Das Kavernenteil Schwarzenbachwerk wird vollständig im Forbach-Granit durch Sprengvortrieb hergestellt. Die anschließenden Unterwasserstollen zwischen dem Kavernenteil Schwarzenbachwerk und dem Zulaufbauwerk im Hauptstollen des Kavernenwasserspeichers werden ebenfalls vollständig im Forbach-Granit hergestellt. Der Hauptstollen und die Nebenstollen des Kavernenwasserspeichers werden in den Festgesteinen des Forbach-Granits voraussichtlich mittels Sprengvortrieb erstellt. Der Zufahrtsstollen zum Kavernenteil Schwarzenbachwerk, die Hilfsstollen und die Energieableitungsstollen werden vollständig im Forbach-Granit hergestellt. Auch hier kommt grundsätzlich als Vortriebsart Sprengvortrieb zur Anwendung.

Die Baugruben der Portalbauwerke der Zugangsstollen zu den Oberwasserwegen beider Kraftwerke können überwiegend mittels Baggeraushub hergestellt werden, im kompakten Granit ist das

Kapitel 14: Zusammenfassung und Empfehlungen

Lösen durch Sprengungen zu empfehlen. Die Baugruben für den Zufahrtsstollen mit Portalgebäude und für das Auslaufbauwerk des Hauptstollens Kavernenwasserspeicher in das Ausgleichsbecken im Murgtal erfordern voraussichtlich umfangreiche Baugrubensicherungen zur Absicherung der oberhalb verlaufenden B462 und des Werksgeländes des Rudolf-Fettweis-Werkes, dessen Betrieb während des Baus aufrecht erhalten werden muss. Die Herstellung der Anschlagswände und die Unterfahrung der B462 mit geringer Überdeckung und im Übergangsbereich Lockergestein/Fels erfordert einen erhöhten Sicherungsaufwand und wahrscheinlich auch Sondermaßnahmen.

Nach der DIN EN 1998/A1:2013-05 liegt das Projektgebiet in der Erdbebenzone 1. Der Bauwerksbereich ist dementsprechend der Untergrundklasse R (Gebiete mit felsartigem Gesteinsuntergrund) sowie der Baugrundklasse A (unverwitterte (bergfrische) Festgesteine mit hoher Festigkeit) bzw. teilweise der Baugrundklasse B (mäßig verwitterte Festgesteine bzw. Festgesteine mit geringerer Festigkeit) zuzuordnen.

Aus Gründen des Grundwasserschutzes wird für die Bauzeit empfohlen, die Dränagewirkung hinsichtlich abgeführter Wassermengen so gering wie möglich zu halten.

Zur Festlegung des Bemessungswasserstandes ist es erforderlich, die Grundwasserstände in den errichteten Grundwassermessstellen bis zum Baubeginn zu beobachten.

Aufgrund der betrieblichen Randbedingungen einerseits und der geologischen und hydrogeologischen Gegebenheiten andererseits ist es erforderlich, für das Kavernenteil Schwarzenbachwerk und das Kavernenteil Transformatoren, die Zufahrtsstollen sowie den Energieableitungsstollen eine dauerhafte Bergwasserdrainierung zu betreiben. Aufgrund der generell geringen Durchlässigkeit des Gebirges im Forbach-Granit und der Möglichkeit, wasserführende Schwächezonen durch Injektionen abzudichten, können die bei der Drainierung anfallenden Wassermengen und die Reichweite der Grundwasserabsenkung begrenzt werden. Gezielte Abdichtungsmaßnahmen sollten den dauerhaften Wasseranfall weiter reduzieren, um sicher ausschließen zu können, dass das Grundwasservorkommen nicht oder nur geringfügig beeinflusst wird.

Die durchgeführten Aufschlussbohrungen verdichten das im Zuge des Raumordnungsverfahrens umgesetzte erste Erkundungsprogramm der Jahre 2010 / 2011 in befriedigendem Umfang. Aufgrund der schlüssigen Ergebnisse dieses zusätzlichen Erkundungsprogrammes aus dem Jahren 2018 / 2019 ist unsere damalige Empfehlung eines Pilotstollens in der zum Verfahren eingereichten Version des Gutachtens Rev. 01 nicht mehr erforderlich.

Die im Rahmen dieses Gutachtens vorgenommenen Bewertungen und Einschätzungen basieren in Teilbereichen auf Extrapolationen mittels plausibler Annahmen. Diese sollten im Zuge der Bauausführung auf jeden Fall durch detaillierte geotechnische Kartierungen des Vortriebes überprüft und ggf. angepasst werden.

Empfehlung eines Hydrogeologischen Beweissicherungsprogramms

Zum Nachweis, ob und wenn ja in welchem Ausmaß die prognostizierten Auswirkungen auf die hydrogeologischen Verhältnisse eingetreten sind, wird ein Beweissicherungsprogramm empfohlen:

(1) Gebirgswasserstände

Um die Beeinflussung der Gebirgswasserstände erfassen zu können, sind Grundwasserstandsmessungen an den vorhandenen und ggf. noch zu ergänzenden Grundwassermessstellen durchzuführen. Hierbei sind auch weiter entfernte Grundwassermessstellen in die Beobachtungen einzu beziehen, die außerhalb oder randlich der prognostizierten Grundwasserabsenkungen liegen.

(2) Quellschüttungen/Abflussmessungen

Kapitel 14: Zusammenfassung und Empfehlungen

Für ausgewählte Quellaustritte, die in unmittelbarer Nähe zu den Untertagebauwerken liegen, werden bauzeitlich Schüttungsmessungen empfohlen. Mit den Schüttungsmessungen sollte mindestens ein Jahr vor Bau begonnen werden, und wegen der dauerhaften Gebirgsdrainage über die unvollständig abgedichteten unterirdischen Bauwerke sollten die Messungen über die Bauzeit hinaus fortgeführt werden. In diesem Zusammenhang sollten auch die aus den dränierenden Bauwerken abgeleiteten Wassermengen aufgezeichnet werden.

Zusätzlich zu den Quellaustritten werden Abflussmessungen an Oberflächengewässern empfohlen, die von den ausgewählten und weiteren Quellen gespeist werden und somit summarisch den oberirdischen Abfluss erfassen.

Ergänzend sind von den Baumaßnahmen unbeeinflusste Quellaustritte und Wasserläufe für sogenannte „Referenzmessungen“ in das Monitoringprogramm aufzunehmen.

(3) Niederschlagsmessungen

Um den Einfluss des Niederschlags auf die Wasserführungen feststellen zu können, sind Niederschlagsmessungen erforderlich. Hierzu kann die bestehende amtliche Messstation mit Kennung [02653] auf dem Betriebsgelände des Rudolf-Fettweis-Werkes genutzt werden.

(4) Hydrogeologisches Monitoring im Bereich Badener Höhe / Seekopf

Zur Beweissicherung, dass das hydrostatische Potential des Tiefenzirkulationswassers, das die Thermalquellen von Baden-Baden speist, nachweislich unbeeinflusst bleibt, sollen auf Forderung des LGRB geeignete Grundwassermessstellen und Quellaustritte in das Beweissicherungsprogramm integriert werden.

Die vorgenannten Empfehlungen (1) bis (4) werden in einem separaten Konzept zum hydrogeologischen Monitoring konkretisiert und den zuständigen Behörden zur Prüfung und Abstimmung vorgelegt.

14.6 Abschließende Anmerkungen

Für das vorliegende geotechnische und hydrogeologische Gutachten gilt grundsätzlich:

Die Aussagen und Bewertungen in diesem Gutachten dürfen nur im Zusammenhang mit dem vollständigen Gutachten (einschließlich Anlagen) verwendet werden.

Das Gutachten basiert auf punktuellen Aufschlüssen, Probenahmen für Laboruntersuchungen und Geländeaufnahmen, entsprechend den Anforderungen der zum Zeitpunkt der Untersuchung gültigen Planung, Normen, Regelwerke, Vorschriften und Richtlinien.

Es wird darauf hingewiesen, dass die Beschaffenheit, Mächtigkeit und Ausdehnung der anstehenden Böden und Gesteine einschl. ihrer Wasserführung natürlichen Schwankungen unterworfen sind, die bereichsweise unterschiedliche geotechnische Eigenschaften des Baugrundes hervorrufen. Bei auftretenden signifikanten Abweichungen von den hier beschriebenen Verhältnissen oder in Zweifelsfällen ist der Gutachter zur Klärung des Sachverhaltes hinzuzuziehen. Bei wesentlichen Änderungen der geplanten Baumaßnahme gegenüber den zugrunde gelegten Unterlagen zum Zeitpunkt der Gutachtenerstellung sind die entsprechenden Aussagen des Gutachtens durch den Gutachter zu überprüfen und ggf. zu modifizieren.

Kapitel 14: Zusammenfassung und Empfehlungen

Anpassungen rev. 02

gbm: Dipl.-Geol. P. Rothengatter, Dipl.-Geol. L. Kuschka, Dipl.-Geol. F. Kraul, MSc. J. Rothschink, MSc. S. Beathalter

Mailänder Consult: Dipl.-Geol. Dr. U. Mainka, MSc. Oscar Sztatetsny

Ettlingen - Karlsruhe, den 30.07.2021

gbm • Gesellschaft für Baugeologie und -meßtechnik mbH • Baugrundinstitut und

Mailänder Consult GmbH



(Dipl.-Geol. L. Kuschka)



(Dr. U. Mainka)