



Bericht zur Diplomkartierung

Geologisch-Hydrogeologische Kartierung im
Alten Tiefen Fürstenstolln zur geothermischen
Grubenwassernutzung im Schloss Freudenstein, Freiberg

vorgelegt von
cand.-geol. Julia Dillenardt
und
cand.-geol. Kathrin Kranz

betreut von

Prof. Dr. Broder J. Merkel
TU Bergakademie Freiberg, Institut für Geologie,
Lehrstuhl für Hydrogeologie

und

Prof. Dr. Steffen Wagner
TU Bergakademie Freiberg, Institut für Bohrtechnik und Fluidbergbau,
Lehrstuhl Geoströmungs-, Förder- und Speichertechnik

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichern wir, dass wir die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt haben; die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht.

Freiberg, September 2010

Julia Dillenardt & Kathrin Kranz

Zusammenfassung

Anfang des Jahres 2009 wurde eine Geothermieanlage zur geothermischen Grubenwassernutzung (offener Kreislauf) im Altstadtbereich der Bergstadt Freiberg zur Beheizung und Klimatisierung des neu sanierten Schloss Freudenstein in Betrieb genommen.

Der Alte Tiefe Fürstenstolln, der bis ins 19. Jahrhundert als Hauptentwässerungsstollen diente, liegt hier in einer Teufe von rund 50 m und wurde im Jahre 2005 von den an der Planung dieses Geothermieprojekts beteiligten Planungsbüros als ökonomisch effektivster Stollenabschnitt ausgewählt. Die Vorteile bei dieser Entscheidung liegen vor allem in der konstanten Grubenwassertemperatur von 10,2 °C, der relativ geringen Bohrteufe und der Nähe zum Endnutzer von rund 100 m.

Im Vorfeld der geothermischen Nutzung des Alten Tiefen Fürstenstollns wurden Ende des Jahres 2008 im ca. 250 m langen anzustauenden Stollenabschnitt – zwischen der neu abgeteuften Geothermebohrung am Meißner Ring (Ecke Geschwister-Scholl-Straße, HW: 4595510, RW: 564481) und dem neuen Wehr am Untermarkt – hydrogeologische und geologische Kartierarbeiten durchgeführt sowie Grubenwasser, Zuflüsse, Sediment und anstehendes Gestein (Freiberger Graugneis) beprobt und untersucht.

Für eine erste Beurteilung der Wasserqualität von Grubenwasser und Zuflüssen wurden im Rahmen der Kartierung die Vor-Ort-Parameter bestimmt und das Grubensediment mittels Mikroskopie und Rasterelektronenmikroskopie untersucht. Anhand der aus der Bohrung gewonnenen Bohrkleinproben wurde ein geologisches Schichtenverzeichnis erstellt. Außerdem wurden Proben des anstehenden Freiberger Graugneises entnommen.

Der vorliegende Bericht gibt eine detaillierte hydrologische und geologische Aufnahme des Alten Tiefen Fürstenstollns als innovative und effektive geothermische Ressource.

Weitere Analysen und Ergebnisse (geothermische Parameter des Gesteins, Hydrogeochemie von Grubenwasser und -sediment) sind dem Paper KRANZ & DILLENARDT 2010 bzw. der Diplomarbeit von Kathrin Kranz zu entnehmen.

Abstract

Until the end of the 19th century, the Freiberg mine drainage water flowed through the Alter Tiefer Fürstenstolln gallery into the Freiberger Mulde River. Since 2005, various committees and organizations have collaborated on developing a technical concept about an innovative idea: using the geothermal energy of the mine water to heat and cool the rehabilitated Castle Freudenstein in Freiberg.

Due to its low depth of about 50 m, the closeness to the castle and the constant mine water temperature of circa 10.2 °C, an about 250 m long section of the gallery Alter Tiefer Fürstenstolln that lies beneath the historic portion of Freiberg was proposed as a suitable heat reservoir for the planned geothermal system. The gallery section which is to be flooded is located between a new borehole at the Meißner Ring (corner Geschwister-Scholl-Straße, HW: 4595510, RW: 564481) and the new installed wire at the Untermarkt.

The aim of this field investigation is the geological and hydrogeological mapping in the gallery as well as the sampling and analysis of the mine water, influents, mine sediment and in-situ rock (Freiberg Grey Gneiss) regarding a geothermal use.

For a first estimation of the water quality, the water parameters of the mine water and the influents were measured and the mine sediment was determined via microscopy and scanning electron microscopy. Furthermore, a geological well-log was established with the help of the drilling cuttings from the new borehole.

This report overviews the detailed hydrogeological and geological mapping of the Alter Tiefer Fürstenstolln gallery as cutting-edge and effective geothermal resource.

Further analysis and results (regarding geothermal parameters of the Freiberg Grey Gneiss, hydrogeochemistry of the mine water and sediment) can be taken from KRANZ & DILLENARDT 2010 and the diploma thesis from Kathrin Kranz.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis
Tabellenverzeichnis

1 Einleitung und Aufgabenstellung (JD)	1
2 Grundlagen (JD/KK)	2
2.1 Geothermie (JD)	2
2.1.1 Zum Begriff der Geothermie	2
2.1.2 Oberflächennahe Geothermie und Tiefengeothermie	3
2.1.3 Geothermische Grubenwassernutzung	3
2.2 Untersuchungsgebiet (KK)	5
2.2.1 Lagerstättengebiet Freiberg	5
2.2.2 Geologie und Morphologie	5
2.2.3 Tektonik	8
2.2.4 Erzlagerstätten und Mineralisation	8
2.2.5 Hydrologie und Hydrogeologie	11
3 Projekt „Geothermische Grubenwassernutzung im Alten Tiefen Fürstenstolln zur Beheizung und Klimatisierung des Schloss Freudenstein, Freiberg“ (JD/KK)	13
3.1 Technisches Konzept des Geothermieprojekts (JD)	13
3.2 Alter Tiefer Fürstenstolln (KK)	14
4 Methodik der Untersuchungen (JD/KK)	17
4.1 Kartierung (KK)	17
4.2 Probenahme und Probenahmestellen (KK)	17
4.2.1 Gesteinsproben	17
4.2.2 Grubenwasser- und Zuflussproben	19
4.2.3 Grubensediment- und Stalagtitproben	25
4.3 Vor-Ort-Analytik (KK)	27
4.4 Laboranalytik (JD/KK)	27
4.4.1 Gesteinsproben (KK)	27
4.4.1.1 Makro- und mikroskopische Untersuchung	27
4.4.1.2 Dichtebestimmung mit Pyknometer-Versuch	28
4.4.2 Grubenwasser- und Zuflussproben (KK)	29
4.4.3 Grubensediment- und Stalagtitproben (JD/KK)	29
4.4.3.1 Entnahme und Ansprache des Grubensediments (KK)	29
4.4.3.2 Filtration des Grubensediments zur Porenwassergewinnung (KK)	29
4.4.3.3 Komponentenanalyse mittels Rasterelektronen-Mikroskopie (JD)	29
5 Ergebnisse (JD/KK)	31
5.1 Kartiergebiet und Stollengeometrie	31

5.2 Geologie	32
5.2.1 Allgemeines	32
5.2.2 Schichtenverzeichnis	34
5.3 Tektonik	39
5.4 Grubenwasser und Zuflüsse	41
5.4.1 Organoleptik	41
5.4.2 Wassertemperatur	41
5.4.3 pH-Wert	42
5.4.4 Sauerstoffgehalt und Sauerstoffsättigung	43
5.4.5 Redoxpotenzial	45
5.4.6 Elektrische Leitfähigkeit und Gesamtmineralisation (TDS)	46
5.5 Grubensediment und Stalagtit	47
5.5.1 Allgemeines	47
5.5.2 Makro- und mikroskopische Untersuchung	48
5.5.3 REM-Untersuchungen	50
6 Zusammenfassung und Ausblick	51
7 Literaturverzeichnis	52
Danksagung	55
Anlagenverzeichnis	56
Anlagen	

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Grundlagen der Geothermie.	2
Abb. 2:	Geothermen ermittelt aus europäischen Großprojekten und Nutzungsformen der geothermischen Energie untergliedert nach der Tiefe.	3
Abb. 3:	Übersicht hydrogeologischer Kreisläufe in alten Grubenbauten.	4
Abb. 4:	Die größten Entwässerungsstollen des Freiberger Bergbaureviers.	11
Abb. 5:	Das Konzept zur geothermischen Grubenwassernutzung im Alten Tiefen Fürstenstolln (offenes System).	14
Abb. 6:	Alter Tiefer Fürstenstolln.	15
Abb. 7:	Fotodokumentation wichtiger technischer Bauwerke und Maßnahmen im Rahmen des Geothermieprojekts.	16
Abb. 8:	52 Bohrkleinproben von der Geothermiebohrung (Teufe 1-52 m).	18
Abb. 9:	Übersicht über die entnommenen Gesteinsproben im Alten Tiefen Fürstenstolln mit Detailkarte zum Bohrabsatzpunkt der neuen Geothermiebohrung.	18
Abb. 10:	Übersicht über die entnommenen Grubenwasser- und Zuflussproben im Alten Tiefen Fürstenstolln.	19
Abb. 11:	Grubenwasser-Probenahmestelle W1.	20
Abb. 12:	Grubenwasser-Probenahmestelle W2.	20
Abb. 13:	Zufluss-Probenahmestelle W3.	21
Abb. 14:	Grubenwasser-Probenahmestelle W4.	21
Abb. 15:	Grubenwasser-Probenahmestelle W5.	21
Abb. 16:	Grubenwasser-Probenahmestelle W6.	22
Abb. 17:	Grubenwasser-Probenahmestelle W7.	22
Abb. 18:	Zufluss-Probenahmestelle W8.	23
Abb. 19:	Grubenwasser-Probenahmestelle W9.	23
Abb. 20:	Grubenwasser-Probenahmestelle W10.	23
Abb. 21:	Grubenwasser-Probenahmestelle W11.	24
Abb. 22:	Grubenwasser-Probenahmestelle W12.	24
Abb. 23:	Probenahme des Sedimentkerns S ₁ .	25
Abb. 24:	Probenahme des Sedimentkerns S ₂ .	26

Abbildungsverzeichnis

Abb. 25:	Stalagtitprobe (Sammelprobe).	26
Abb. 26:	Übersicht über die entnommenen Grubensediment- und Stalagtitproben im Alten Tiefen Fürstenstolln.	27
Abb. 27:	Dichtebestimmung mittels Pyknometerversuch.	28
Abb. 28:	Grundlagen der Rasterelektronen-Mikroskopie.	30
Abb. 29:	Verlauf des Alten Tiefen Fürstenstollns in Freiberg.	31
Abb. 30:	Kartiergebiet im Alten Tiefen Fürstenstolln zwischen dem Geothermiebohrloch und dem neuen Wehr mit einer Skizze zum Stollenquerschnitt.	31
Abb. 31:	Bohrloch der neuen Geothermiebohrung am Meißner Ring.	32
Abb. 32:	Geologische Karte des Lagerstättenbezirks Freiberg.	33
Abb. 33:	Mittels Pyknometerversuch ermittelten Dichten der Bohrproben aus der neuen Geothermiebohrung am Meißner Ring.	34
Abb. 34:	Detailaufnahmen einzelner Bohrkleinproben.	35
Abb. 35:	Schematisches Beispiel zweier Flächen im Gebirge und deren Schnittwinkel in einem Stollen.	39
Abb. 36:	Darstellung der ermittelten Trennflächen des gesamten Untersuchungsgebietes im Schmidtschen Netz.	40
Abb. 37:	Übersicht über die gemessenen Wassertemperaturen des Grubenwassers vom Alten Tiefen Fürstenstolln und seiner Zuflüsse.	42
Abb. 38:	Übersicht über die gemessenen pH-Werte des Grubenwassers vom Alten Tiefen Fürstenstolln und seiner Zuflüsse.	43
Abb. 39:	Übersicht über die gemessenen Sauerstoffgehalte und Sauerstoffsättigungen des Grubenwassers vom Alten Tiefen Fürstenstolln und seiner Zuflüsse.	44
Abb. 40:	Übersicht über die gemessenen Redoxpotentiale des Grubenwassers vom Alten Tiefen Fürstenstolln und seiner Zuflüsse.	46
Abb. 41:	Übersicht über die gemessenen Elektrischen Leitfähigkeiten und Gesamtmineralisationen (TDS, Total Dissolved Solids) des Grubenwassers vom Alten Tiefen Fürstenstolln und seiner Zuflüsse.	47
Abb. 42:	Sedimentmächtigkeit zur Zeit der Kartierung.	47
Abb. 43:	Sedimentprofil des Sedimentkerns S ₁ .	48
Abb. 44:	Sedimentprofil des Sedimentkerns S ₂ .	48

Hinweis: Soweit nicht anders angegeben, stammen alle Fotos von Kathrin Kranz.

Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Der Modalbestand (Vol-%) der Unteren Graugneise des Erzgebirges aus Untersuchungen verschiedener Autoren.	7
Tab. 2:	Der Modalbestand (Vol-%) der Oberen Graugneise des Erzgebirges aus Untersuchungen verschiedener Autoren.	8
Tab. 3:	Erzformationen und Mineralparagenesen der Freiberger Mineralisationszyklen.	10
Tab. 4:	Eigenschaften der verwendeten Probengefäße.	19
Tab. 5:	Schichtenverzeichnis der 52 Bohrkleinproben von der Geothermiebohrung (1-52 m).	36
Tab. 6:	Schichtenverzeichnis Sedimentkern S ₁ .	49
Tab. 7:	Schichtenverzeichnis Sedimentkern S ₂ .	49

1 Einleitung und Aufgabenstellung (JD)

Die Nutzung des Altbergbaus im Erzgebirge für die Gewinnung von geothermischer Energie findet seit den letzten Jahren zunehmend Beachtung. Es wurde erstmals im Jahre 1994 erfolgreich eine Anlage zur geothermischen Grubenwassernutzung in der Zinngruben Ehrenfriedersdorf durchgeführt. Der erfolgreiche Betrieb dieser und weiterer Anlagen aus den vergangenen Jahren hat gezeigt, dass eine geothermische Nutzung von bereits vorhanden künstlichen Hohlräumen im Gneis und Granitgestein des Erzgebirges eine effiziente, kostengünstige, regenerative und damit umweltschonende Alternative zu den derzeit konventionellen Energiequellen sein kann.

Die Grundidee für die Beheizung und Klimatisierung des Schloss Freudenstein in Freiberg stammte bereits aus dem Jahre 2002. Im ersten Konzept aus dem Jahr 2005 war zunächst die Installation eines geschlossenen Kollektorsystems im dafür anzustauenden Bereichs des Alten Tiefen Fürstenstollns vorgesehen, das aber aufgrund der Unwirtschaftlichkeit verworfen wurde. Nach weiteren Untersuchungen wurde im Jahr 2008 ein zweites Konzept erarbeitet und in die Tat umgesetzt, welches im untersuchten Stollenabschnitt ein offenes System vorsah.

Diese Kartierarbeit soll die bereits vorliegenden technischen Daten und Wirtschaftlichkeitsberechnungen durch detaillierte geologische und hydrogeologische Untersuchungen im Alten Tiefen Fürstenstolln ergänzen, wobei der Fokus auf die ingenieurgeologische Kartierung des im Rahmen des Geothermieprojekts anzustauenden Stollenabschnitts sowie die Probenahme und Analyse von Gestein, Grubenwasser und Grubensediment gelegt wurde.

2 Grundlagen (JD/KK)

2.1 Geothermie (JD)

2.1.1 Zum Begriff der Geothermie

Geothermische Energie, auch als Erdwärme bezeichnet, beschreibt die in Form von Wärme gespeicherte Energie unter der Oberfläche der festen Erde. Geothermische Energie ist nach heutigem Stand eine reine regenerative Energiequelle, die eine nachhaltige und klimaschonende Energieversorgung ermöglicht. Die Wärmeenergie der Erde speist sich aus zwei Quellen: Im Erdkern und Erdmantel ist eine beträchtliche Wärmemenge aus der Erdentstehung gespeichert. In der Erdkruste kommt eine weitere Quelle aus der Energie des radioaktiven Zerfalls der natürlichen Isotope Uran, Thorium und Kalium hinzu.

In nur wenigen Metern Tiefe der Erdoberfläche hat zudem die Sonneneinstrahlung einen weiteren Effekt, der vor allem für eine geothermische Nutzung aus geringen Tiefen große Bedeutung findet (WERNER 2009): Sie dringt durch direkte Wärmestrahlung als auch in Form von erwärmten Sickerwässern in die oberen Erdschichten ein. Allerdings sind Gesteine schlechte Wärmeleiter, so dass die Sonneneinstrahlung nur bis auf eine maximale Tiefe von 20 m wirksam ist (siehe Abb. 1a). In Mitteleuropa herrschen im Durchschnitt bereits ab einer Tiefe von 10 m das ganze Jahr über konstante Temperaturen von 8-10 °C vor (WERNER 2009). In den tieferen Erdschichten erfolgt ein fließender Übergang zu einer mehr durch den Erdwärmestrom bzw. geothermischen Wärmefluss dominierten Temperaturverteilung.

Weitere, aber i.d.R. weniger bedeutsame Faktoren der Temperaturverteilung im oberflächennahen Untergrund sind zahlreiche geologische Parameter wie Geodynamik, physikalische Gesteinseigenschaften, Tektonik, u.a. Hier sind insbesondere Gesteinseigenschaften wie die vom Wassergehalt mitbeeinflusste Wärmekapazität c_p des Gesteins sowie die Wärmeleitfähigkeit λ und die Dichte ρ des Untergrundes wichtig. Die Wärmeleitfähigkeit kann in Abhängigkeit vom Wassergehalt des Gesteins um 30-50 % schwanken (OFNER & WIEBER 2008).

Der Anstieg der Temperatur mit zunehmender Tiefe wird im Allgemeinen mit dem geothermischen Gradienten beschrieben, der in Mitteleuropa im Mittel 3°C/100 m beträgt aber für die Nutzung oberflächennaher Wärmeenergie aus Grubenbauten in 50 m Tiefe kaum eine Rolle spielt. In den obersten Schichten ist die Temperaturverteilung in hohem Maße von Klima und Sonneneinstrahlung abhängig und variiert folglich den Jahreszeiten entsprechend (siehe Abb. 1b).

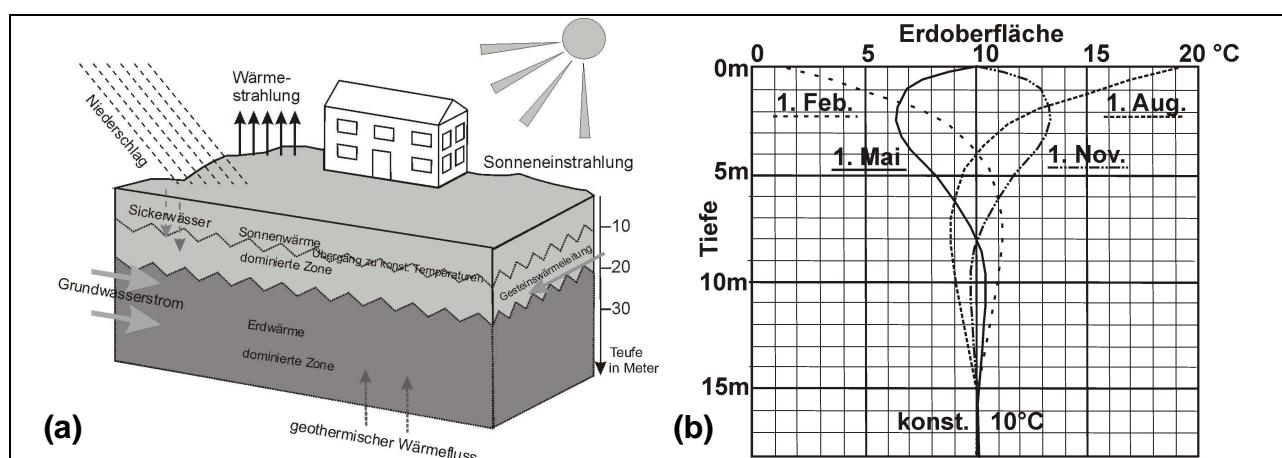


Abb. 1: Grundlagen der Geothermie. **a)** Wärmeregime im Untergrund. Aus: VDI 4640 Bl. 1, ergänzt nach WERNER (2009). **b)** Temperatur-Tiefen-Verteilung im Untergrund: Im Durchschnitt liegt die neutrale Zone mit rund 10°C in 15 km Tiefe. Erstellt nach: SLUG (2006).

2.1.2 Oberflächennahe Geothermie und Tiefengeothermie

Die Wärmeenergie der Erde kann auf verschiedene Art und Weise nutzbar gemacht werden. Die Anwendung ist dabei im hohen Maße von der Lage und insbesondere von der Beschaffenheit des Untergrundes abhängig. Das Diagramm in Abb. 2 zeigt typische Nutzungsarten und europäische Projektbeispiele zur geothermischen Energiegewinnung. Entsprechend dem geothermischen Gradienten lässt sich die Geothermie im Wesentlichen in zwei Bereiche unterteilen: Tiefengeothermie zur Wärme- und Stromgewinnung, und oberflächennahe Geothermie, die im Allgemeinen nur zur Wärme- und Kälteversorgung genutzt wird. Auch wenn keine scharfe Abgrenzung der beiden Bereiche möglich ist, wurde in der Technik eine Grenze zwischen Tiefen- und Oberflächennaher Geothermie bei 400 m Tiefe gezogen. Diese Angabe beruht auf einem aus der Schweiz in die DIN übernommenen Wert (VDI DIN 4640 Blatt).

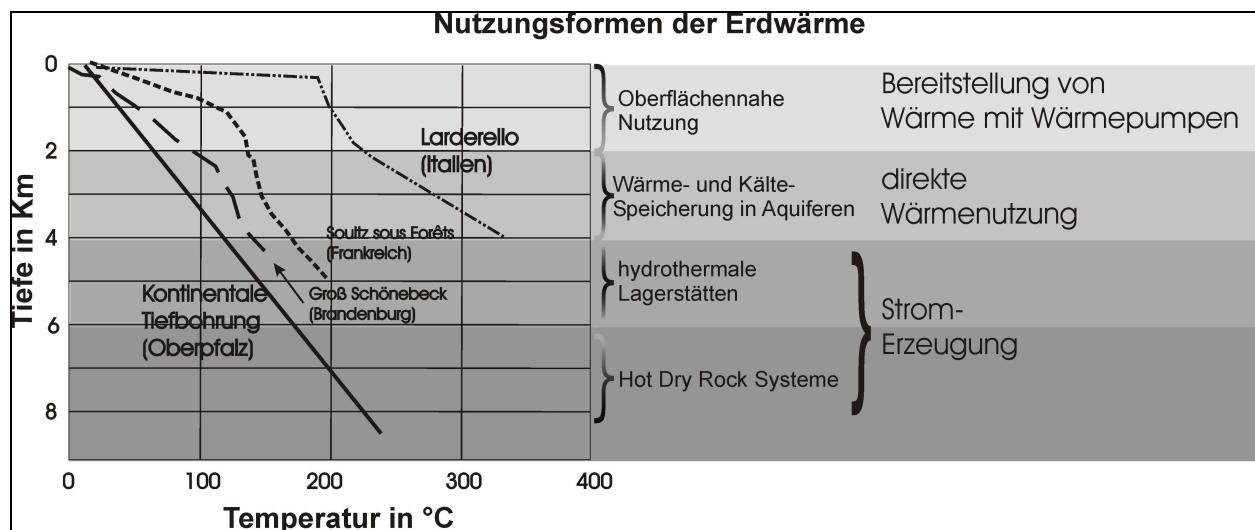


Abb. 2: Geothermen ermittelt aus europäischen Großprojekten (links) und Nutzungsformen der geothermischen Energie untergliedert nach der Tiefe (rechts). Aus: CLAUSER et al. (2006) und SLUG (2006).

Unter **Tiefengeothermie** versteht man die hydro- und petrothermale Erdwärmennutzung in Tiefen ab 400 m, i.d.R. aber ab 1000 m und Temperaturen über 60 °C. Sie wird vor allem zu Heizzwecken und zur Stromerzeugung genutzt.

Oberflächennahe Geothermie erlaubt zwar aufgrund der geringen Temperaturen lediglich eine Nutzung zur Raumklimatisierung. Diese ist aber besonders effektiv in der Kombination von Beheizung und Kühlung im Jahreszeitenwechsel, und mit wesentlich geringerem Bohraufwand verbunden. Somit ist diese Nutzungsform relativ weit verbreitet, da sie nahezu überall möglich ist. Sie setzt aber eine relative Nähe zum Endnutzer voraus. Weitere Einsatzbereiche z.B. die Beheizung von Schwimmbädern und Gewächshäusern, sowie die Eisfreihaltung von Weichen, Brücken oder Fischzuchtteichen im Winter. Unter bestimmten Gegebenheiten ist auch die Warmwasserbereitung möglich. Dazu wird mit Hilfe von Wärmepumpen das Temperaturniveau des Untergrundes auf ein für die Raumwärme nutzbares Niveau angehoben.

2.1.3 Geothermische Grubenwassernutzung

Eine besondere Nutzungsform der Geothermie ist die geothermische Grubenwassernutzung im Altbergbau, welche im Fokus dieser Kartierung steht. Erste Untersuchungen des sächsischen Untergrundes wurden bereits vor 175 Jahren von Ferdinand Reich, dem ersten Geophysikprofessor an der TU Bergakademie Freiberg, durchgeführt. In seinem Werk wird neben einer Vielzahl von teufendifferenzierten Thermalmessungen auch die Bedeutung von Grubenwässern als Wärmeträgermedium und die Zusammenhänge zwischen Erdwärme und Bergbau diskutiert (WOLF et al. 2007).

Zu Zeiten des Bergbaus wurde das ständig zufließende Grubenwasser, welches sich

aus den verschiedensten im Gebirge zirkulierenden Wässern zusammensetzt, über eine umfangreiche Wasserhaltung mit Pumpen auf Vorfluterniveau gehoben, wo es dann über so genannte Wasserlösungsstollen (wie z.B. den Alten Tiefen Fürstenstolln in Freiberg) zum Mundloch abgeführt wurde (siehe Abb 3). Somit stellen heute viele Stollen, die bis auf eine Tiefe von 1000 m abgeteuft wurden (OFNER & WIEBER 2008), ein weit verzweigtes Netzwerk aus teilweise oder vollständig gefluteten Gängen dar.

Das natürliche Grundwasserspiegelniveau kann gegenüber der vorbergbaulichen hydrogeologischen Situation nicht erreicht werden. Letztlich stellt nach vollständiger Flutung das gesamte Bergwerk eine überdimensionierte Drainage dar, die mit dem Grubenwasser auch eine konstante Temperatur aus dem Berg zu Tage fördert. OFNER & WIEBER (2008) haben in Temperaturverteilungsanalysen an Gruben im Siegerland nachgewiesen, dass im Gegensatz zu Oberflächennahen Grubenbauten die tiefen gefluteten Tunnelnystemen über mehrere hundert Meter keine nennenswerten Schwankungen der Temperaturverteilung und der hydrochemischen Zusammensetzung vorweisen. Die Ursache sei dabei das Verhalten der Grubenbauten als ein System kommunizierender Röhren mit voll ausgebildeten Konvektionskreisläufen und Gasaustausch. Grubensysteme auf 200 bis 300 m Teufe zeigen hingegen aufgrund einer oftmals schlechten Anbindung an tieferen Schächte eine Stagnation und eine damit verbundene Temperaturschichtung auf. Es wird dabei zwischen Stagnations- und Zirkulationswässern unterschieden. Insbesondere durch die Zirkulationswässer, verursacht durch oberirdische Zuflüsse, kommt es im Vergleich zum tiefen Bergbaustollen zu starken Schwankungen des Temperaturfeldes in der Vertikalen.

Die aufgelassenen und gefluteten Altbergbaubestände bieten v.a. in mittleren Tiefen besonders geeignete Standorte für die Gewinnung von Erdwärme, da das gebrochene Gebirge über Stollen und Schächte einen intensiven Wärmeaustausch zwischen Gestein und Grubenwasser ermöglicht.

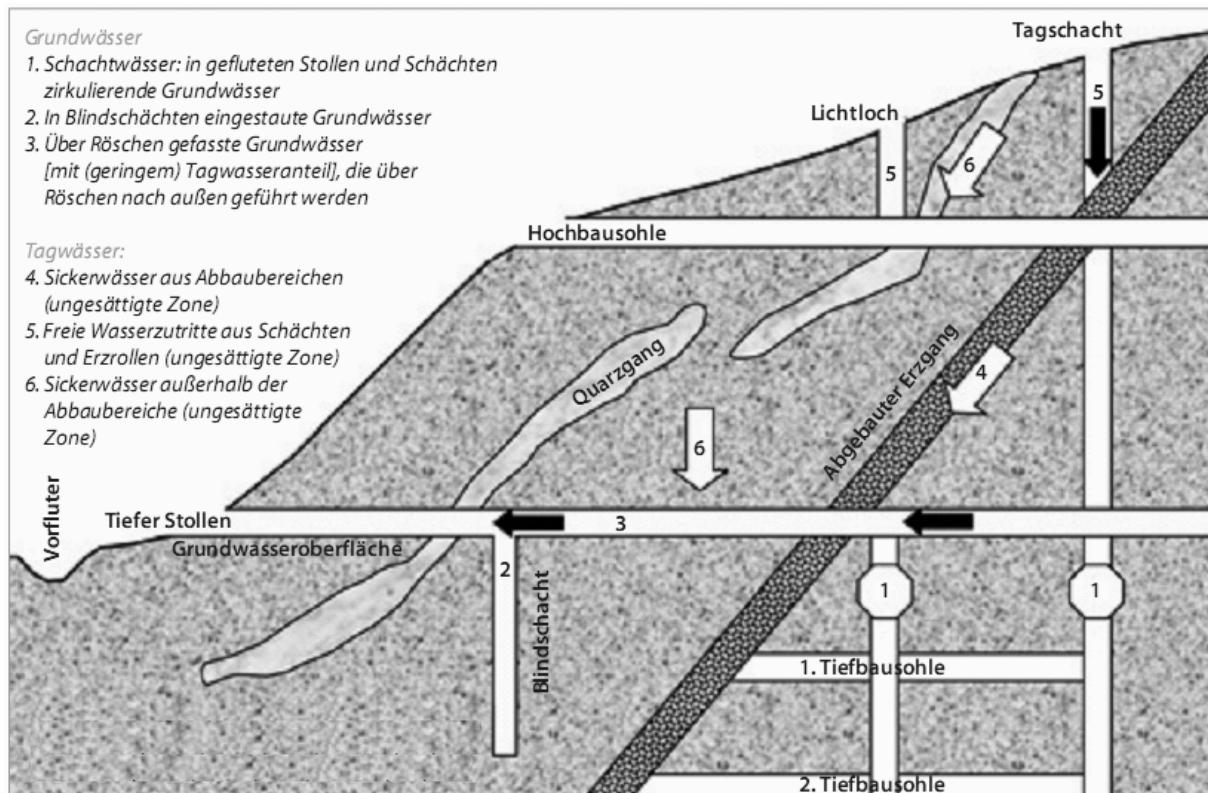


Abb. 3: Übersicht hydrogeologischer Kreisläufe in alten Grubenbauten. Aus: OFNER & WIEBER (2008).

Es existiert eine Reihe internationaler und nationaler Beispiele von geothermisch genutzten Altbergbaustollen. Dazu sein insbesondere aufgeführt die im Jahre 2008 in Betrieb genommenen großen Geothermiekraftwerke am ehemaligen Steinkohlebergwerk im Untergrund von Aachen und in den Niederlanden bei Heerlen. Diese Anlagen versorgen mehr als 200 Wohnhäuser

ser und einige staatliche Gebäude mit Wärme im Winter und Kälte im Sommer. Das Erzgebirge stellt aufgrund seiner Vielzahl an weitverzweigten Grubenbauten, die zum Teil aus dem 12. Jahrhundert stammen, einen idealen Standort für geothermische Grubenwassernutzungsanlagen dar. Ein wichtiges Beispiel ist der WISMUT-Schacht 302 in Marienberg. Hier wurde im Jahre 2006 im Uranaltbergbau eine Anlage in rund 140 m Tiefe in Betrieb genommen (MATTHES & SCHREYER 2007). Aus dem rund 40 m tiefen Schacht wird über einen geschlossenen Sekundärkreislauf dem Grubenwasser des offenen Primärkreislaufes mit einer Temperatur von konstanten 12 °C über einen Wärmetauscher geothermische Wärmeenergie entzogen.

Im Vergleich zur oberflächennahen Geothermie hat die geothermische Nutzung von gefluteten Stollensystemen in jedweder Teufe gewichtige Vorteile (HEITFELD et al. 2006, SCHETELIG et al. 2008): Da der genutzte Stollen bereits bergbaulich gut erschlossen ist, sind kaum Bohrarbeiten und Ausschachtungen notwendig; außerdem wird durch bereits vorhandene ausführliche bergtechnische, geologische und hydrogeologische Kenntnis des Stollens das Fündigkeitsrisiko der Ressource Geothermie erheblich reduziert. Der direkte Kontakt zwischen Grubenwasser und dem gebrochenen Gebirge ermöglicht einen exzellenten Wärmeaustausch, des Weiteren herrschen konstante Wassertemperaturen über das ganze Jahr. Nicht zuletzt ist die Anlage zu jedem Zeitpunkt direkt begehbar und kann problemlos gewartet werden.

Auf der anderen Seite hat eine geothermische Grubenwassernutzungsanlage aber auch entsprechende Ansprüche: So ist eine Realisierung solcher Projekte nur in Bergbauregionen möglich; zudem sind neben den erhöhten bergbaulichen und technischen Anforderungen für die Umsetzung einer solchen Anlage auch umfassendere genehmigungsrechtliche Aspekte zu berücksichtigen. Wegen der relativ geringen Temperatur (wie z.B. auch bei der Nutzung von Erdwärmesonden) sind Wärmepumpen erforderlich, wodurch diese Energiegewinnungsform im Allgemeinen nur für Niedertemperaturheizungen oder Brauchwasser mäßiger Temperatur geeignet ist.

Zur Gewinnung der geothermischen Energie aus gefluteten Bergwerken können im Wesentlichen zwei technische Varianten genutzt werden. Zum einen die **Einzelsonde** (Zirkulationssonde), bei der es sich um ein geschlossenes Rohrsystem handelt, das in den Schacht eingebaut wird und nur einen Zugang benötigt. Die Wärme wird damit dem im Schacht stehenden Wasser und dem umgebenen Gebirge über ein Wärmeträgermedium entzogen. Dem Gegenüber steht die Variante eines **Dublettensystems** (offenes hydrothermales System), bei dem ein ausgedehnter Wasser- und Wärmestrom zwischen einer Entnahmestelle und einem oder mehreren Schächten oder Brunnen erzeugt wird. Das Dublettensystem setzt eine ausführlichere technische Planung voraus und bedarf außerdem meistens eines höheren finanziellen Aufwands. Allerdings ergeben sich die Vorteile eines kontinuierlichen Wärmestroms und eine höhere Leistungsfähigkeit über das ganze Jahr.

2.2 Untersuchungsgebiet (KK)

2.2.1 Lagerstättengebiet Freiberg

Geographisch ist der Freiberger Lagerstättenbezirk in den nördlichen Teil des Osterzgebirges einzuordnen, das Stadtgebiet von Freiberg befindet sich auf einer Höhe von 360-440 m ü. NN. Von Nord nach Süd wird der Freiberger Lagerstättenbezirk in drei Grubenfelder unterteilt: das Halsbrücker, das Freiberger und das Brander Revier (JOBST et al. 1993). Die über tausend Erz- und Mineralgänge sind bergmännisch bis in 700 m Tiefe aufgeschlossen.

2.2.2 Geologie und Morphologie

Der Freiberger Lagerstättenbezirk ist eine geologische Teilstruktur der Fichtelgebirgs-Erzgebirgischen Antiklinalzone, welche dem Saxothuringikum zuzuordnen ist und aus metamorphen präkambrischen bis altpaläozoischen Gesteinen besteht (LINNEMANN 2003). Im Nordwesten wird die Lagerstätte durch das Granulitgebirge und im Südosten durch den Hartmanns-

dorfer Granitporphyrgang begrenzt. Die Flöhasyntklinale stellt die südwestliche Begrenzung dar und im Nordwesten fungiert die Mittelsächsische Störung als Grenze (BAUMANN 1965).

Das Erzgebirgskristallin besteht aus einem Gneiskern und einer Schieferhülle, wobei letztere in eine innere Glimmerschieferhülle und eine äußere Phyllithülle gegliedert wird. Infolge der zonaren Anordnung der Schieferhülle um den zentralen Gneiskern ergibt sich für das Erzgebirge ein zwiebelschalenartiger Aufbau im Kartenbild. Der Gneiskern bildet flächenmäßig den größten Anteil des Erzgebirgskristallins.

Das älteste Gestein des Erzgebirges und das im Raum Freiberg am häufigsten vorkommende Gestein ist der Freiberger Graugneis, der zu den sauren, katazonal-parametamorphen Gesteinen gehört und die sog. **Freiberger Gneiskuppel** bildet. Zur Gruppe der Graugneise gehören als Endglieder mittelkörnige, grobflasige oder augige Biotit-Plagioklas-Gneise der Stufe **Unterer Freiberger Gneis** (auch als „Innerer Freiberger Gneis“ oder „Kerngneis“ bezeichnet) und reliktische, kleinkörnige Paragneise der Stufe **Oberer Freiberger Gneis** (auch „Äußerer Freiberger Gneis“ oder „Hülggneis“ genannt).

Der **Übergang** zwischen beiden Endgliedern der Graugneise – von grobflasig nach kleinkörnig – ist selten direkt erkennbar: In der Regel ist er durch kontinuierliche Abnahme der Korngröße sowie Zunahme des Deformationsgrades der Gneise im Randbereich der Inneren Freiberger Gneise ("Brander Gneis") gekennzeichnet; des weiteren nimmt die Anzahl und Vielfalt von Xenolithen deutlich zu (TICHOMIROWA 2002).

Auf Grund ihrer Struktur und Zusammensetzung wurden die Unteren Graugneise aus Graniten bzw. Granodioriten abgeleitet, die Oberen Graugneise aus Sedimenten. Die Beziehung der beiden Gneiseinheiten untereinander wird jedoch bis heute kontrovers diskutiert: Während die Unteren Graugneise von z.B. PIETZSCH (1956) als ehemals granitische Intrusionen angesehen wurden, betrachtete HOFMANN (1974) sie als durch Aufschmelzen der Oberen Graugneise entstandene insitu-Anatexite. Nach TICHOMIROWA (2002) können die Oberen Graugneise (insbesondere die Edukte der reliktischen Paragneise) als wichtigstes Ausgangsgestein der magmatischen Protolithen der Unteren Graugneise angesehen werden: Die feinkörnigen reliktischen Paragneise der Oberen Graugneise stellen neoproterozoische Meta-Grauwacken des cadiomischen Basements dar, in die die aus spätcadomischen Granodioriten entstandenen Unteren Graugneise sind vor ca. 540 Ma intrudiert sind.

Die Orthogneisdome der Stufe des Unteren Graugneises stellen einen Teil des cadiomischen Basements des Erzgebirges dar (MP-MT-Metamorphose) und werden von mehreren Deckeneinheiten überlagert: 1. HP-HT-Decke = Teile der Oberen Graugneise, 2. HP-LT-Decke = Glimmerschieferhülle, 3. MP-LT-Decke = Phyllithülle des Erzgebirges. Das Alter der variszischen Überprägung wurde auf 340-325 Ma datiert.

Die **Unteren Graugneise** bilden die Kernzone der Freiberger Gneiskuppel und eine kuppelförmige Lagerung. Mit Hilfe ihrer Struktur, des Glimmergehalt und der Häufigkeit von Xenolith-Einschlüssen können verschiedene Gneisarten unterschieden werden (TICHOMIROWA 2002):

- Das Zentrum der Gneiskuppel wird vom lang- und weitflaserigen **Freiberger Normalgneis** gebildet, der oft eine Augenstruktur erkennen lässt. Der Zentralbereich der Freiberger Normalgneise enthält nach BERGER et al. (1994) keine Xenolithe und Einlagerungen, vielmehr wurden granitische Reliktstrukturen beschrieben. Die Zentralbereiche der Freiberger Kuppel sind durch eine hohe vertikale Belastung mit geringer seitlicher Einengung gekennzeichnet. Häufiger sind die Gneise hier als grobflaserige Biotitgneise ausgebildet. Im *Grenzbereich Freiberger Normalgneis/Brander Gneis* sind immer wieder Quarzitlinsen zu finden, die von HOFMANN (1974) als "Metaquarzit-Horizont von Oberschöna-Frauenstein" bezeichnet wurden.
- Am S-, W- und NW-Rand umhüllt der mittelflaserige bis körnig-stengelige **Brander Gneis** schalenartig den Freiberger Gneis. Der Brander Gneis unterscheidet sich in seiner Ausbildung neben einer häufigeren Xenolithführung durch eine stärker ausgeprägte Foliation. Die Quarzgefüge der Gneise in der Faltenzone Brand-Weißenborn sind durch eine stärkere seitliche Einengung charakterisiert.
- Der körnig-schuppige **Himmelsfürster Gneis** ist eine feldspatreiche Abart des Brander Gneises und tritt ausschließlich im Süden des Freiberger Gebietes auf, im sog. Revier Himmelsfürst.

- Die äußere Schale der Gneiskuppel wird vom sehr grobflaserigen und glimmerreichen **Wegefarther Gneis** gebildet, der nach den zirkonmorphologischen Untersuchungen von TICHOMIROWA (2002) schon zu den Oberen Graugneisen einzuordnen ist. Im *Grenzbereich der Brander zu den Wegefarther Gneisen* ist ein 20-130 Meter mächtiger und bis zu 2,5 km langer Glimmerschieferzug ("Brander Glimmerschiefer") ausgehalten worden.

Xenolithe und Einlagerungen sind erst für die Randbereiche des Freiberger Normalgneises sowie für den Brander, Himmelsfürster und Wegefarther Gneis charakteristisch: Die selten anzutreffenden Einlagerungen (Linsen) werden durch kleinere Amphibolitkörper gebildet. Xenolithe werden überwiegend als deformierte, spindel- bis diskusförmige, z.T. eckige Einschlüsse von dichtem Biotitgneis ("Metagrauwacken"), Amphibolit, Quarzit, Kalksilikathornfelsen und selten Quarz-Feldspatfels beobachtet. Weitere Variationen in der Ausbildung der unteren Graugneise stellen Gesteinspartien mit geringen Biotitgehalten dar: Diese leukokraten Gneise liegen oft als helle Quarz-Feldspat-Lagen konkordant zur Hauptschieferung; gelegentlich schneiden die Quarz-Feldspatgesteine als Aplite jedoch auch die biotitführenden Unteren Graugneise in Form von Gängen. Die Unteren Graugneise sind in der direkten Umgebung von Freiberg in ihrer typischen mittelkörnigen, grobflaserigen Ausbildung zu finden und bestehen hauptsächlich aus titanreichem Biotit, Oligoklas, Kalifeldspat und Quarz (siehe Tab. 1). Die genannten Varietäten der Unteren Graugneise unterscheiden sich vor allem in ihrer Struktur, während das Mengenverhältnis der Minerale zumeist gleiche Schwankungsbereiche aufweist. Lediglich der Wegefarther Gneis fällt durch einen erhöhten Glimmergehalt auf (TICHOMIROWA 2002).

Tab. 1: Der Modalbestand (Vol-%) der Unteren Graugneise des Erzgebirges aus Untersuchungen verschiedener Autoren. Aus: TICHOMIROWA (2002).

Untere Graugneise	Quarz (Vol-%)	Plagioklas (Vol-%)	K-Feldspat (Vol-%)	Biotit (Vol-%)	Muskowit (Vol-%)	Granat (Vol-%)
SCHMIDT (1959)	26-36	29-45	1-8	11-22	4-11	nicht vorh.
WALTHER (1962)	30-32	35-42	8-15	7-15	4-7	nicht vorh.
WIEDEMANN (1969)	21-37	22-40	5-26	5-20	5-15	nicht vorh.
KLEMM (1995)	20-30	20-30	15-25	15-20	0-11	nicht vorh.

Die peripheren Teile der Freiberger Kuppel werden durch die **Oberen Graugneise** aufgebaut, die außerdem zwei kuppelförmige Strukturen im Westerzgebirge bilden: Die Marienberger und Annaberger Graugneis-Kuppen sind durch die Wiesenbader Störung voneinander getrennt. Der Obere Freiberger Gneis ist durch die Flöhazone vom Marienberger Gneis getrennt und wird als identisch mit dem Annaberger und Marienberger Gneis angesehen. Sowohl durch mineralfaziale als auch insbesondere strukturelle Merkmale geben sich innerhalb jedes Gneisareals zahlreiche unterschiedliche Gneistypen zu erkennen.

In ihrer Hauptmasse bestehen die Oberen Graugneise aus feinkörnigen bis mittelkörnigen Muskowit-Biotit-Gneisen (auch als "reliktische Paragneise" oder "Zweiglimmergneise" bezeichnet). Die Gefüge umfassen körnige, körnig-streifige, flaserige, stengelige und schuppige Typen. Dabei ist häufig eine Wechsellagerung von glimmerreichen und -armen, feinschiefrigen Gesteinen mit phyllitischem Habitus und feinkörnigen bis dichten, grauwackenähnlichen Modifikationen mit massigem oder schiefrig-plattigem Gefüge zu beobachten. Neben diesen "reliktischen Paragneisen" treten vor allem in den Zentralbereichen der Annaberger und Marienberger Kuppel häufig klein- bis mittelkörnige, blastische Gneise auf, die bis zu zentimetergroße Plagioklas-Blasten enthalten. An den Randbereichen der Kuppen sind hingegen eher plattierte Gneise zu finden.

Im "Hangenden", also in den weiter entfernten Randbereichen der Graugneis-Kuppen, sind wesentlich mehr Einlagerungen, die in der Regel konform zur Hauptschieferung verlaufen, vorhanden.

Der Modalbestand der Biotit- bis Zweiglimmergneise der Oberen Graugneise ist relativ einheitlich (siehe Tab. 2). Gneise aus dem Osterzgebirge (Obere Freiberger Gneise) führen oftmals mehr Kalifeldspat, jedoch weniger Granat als Graugneise der Marienberger und Annaberger Kuppen.

Tab. 2: Der Modalbestand (Vol-%) der Oberen Graugneise des Erzgebirges aus Untersuchungen verschiedener Autoren. Aus: TICHOMIROWA (2002).

Obere Graugneise	Quarz (Vol-%)	Plagioklas (Vol-%)	K-Feldspat (Vol-%)	Biotit (Vol-%)	Muskowit (Vol-%)	Granat (Vol-%)
SCHMIDT (1959)	11-45	22-50	0-18	9-31	1-21	0-1
ZÄNKER (1961)	24-28	33-42	6-16	18-27	0-5	-
WALTHER (1962)	30-40	38-47	0,2-7	9-18	2-8	-
KLIUMUS (1963)	27-38	26-37	11-16	5-24	3-11	< 0,1
WIEDEMANN (1969)	30-32	20	0,5-11	15-20	0-15	< 0,1
KLEMM (1995)	25	35-50	20	20	10	< 0,1

2.2.3 Tektonik

Infolge der Faltungs- und Bruchtektonik während der sudetischen und variszischen Orogenese bildeten sich im Unteren Gneis des Freiberger Lagerstättenbezirks zwei unterschiedlich alte **Gangspaltensysteme** heraus (BAUMANN 1958):

- ein annähernd N-S verlaufendes Erzgangsystem mit vorwiegend Stehenden und Flachen Gängen (Mächtigkeit durchschnittlich 0,5 m, maximal ca. 10 m)
- ein vorwiegend W-E verlaufendes Gangsystem mit vorwiegend Spatgängen (Mächtigkeit durchschnittlich 1,0 m, maximal 10 m)

Beide Gangsysteme setzen sich wiederum jeweils aus zwei verschiedenen Scher- und Fiederspaltensystemen zusammen, die die räumliche Voraussetzung für das Netzwerk der Freiberger Erzgänge bilden. Während die Scherspalten bevorzugt auf Grund von Scherbeanspruchung entstanden, sind die diagonal dazu angeordneten Fiederspalten auf Zugbeanspruchung zurückzuführen. Die Abstände zwischen den einzelnen Gangspalten der beiden Gangsysteme sind annähernd konstant (Äquidistanz für Scherspalten ca. 600 m, Fiederspalten ca. 400 m).

Die relativ gleichförmig verlaufenden **Scherspalten** erfuhren eine stärkere tektonische Beanspruchung als die jeweiligen Fiederspalten und sind durch eine große Mächtigkeit und oft ein steiles Einfallen charakterisiert. Mit ihren v.a. NNE-SSW und E-W streichenden Spalten (Erstreckung bis max. 15 km) dominieren sie häufig als gut ausgebildete, häufig gut vererzte Gangkörper das tektonische System:

- Das ältere **s₁-System** ist durch ein Streichen von 5-35° und ein Einfalle n zwischen 70-90° nach N-NW bzw. E-SE gekennzeichnet.
- Das jüngere **s₂-System** verläuft in südöstliche Richtung (95-125°) und ist mit 65-125° nach SW geneigt.

Infolge ihres häufigen Ruschelcharakters führen diese Gänge zum Teil nur absetzige (unregelmäßige) Vererzung und stellen durch verringerte Standfestigkeit und starke Wasserzuführung erhöhte Gefahren für den bergmännischen Abbau dar.

Die diagonal verlaufenden **Fiederspalten** scharen sich den zugehörigen Scherklüften spitzwinklig an. Neben ihrem unregelmäßigeren Verlauf sind sie durch ein flacheres Einfallen (35°-70°) und eine geringere streichende Erstreckung (max. 2 km) charakterisiert. Während N-S streichende Fiederspalten oft stark zertrümert und auskeilend sind, sind NW-SE streichende Fiedergänge häufig sehr gut ausgebildet und verbinden z.T. Scherspalten miteinander. Fiederspalten besitzen niemals Ruschelcharakter, und somit eine gleichmäßigere Erzführung.

Die Hauptkluftrichtungen des vorherrschenden Nebengesteins, dem Freiberger Graugneis (siehe Kapitel 2.2.2), stimmen im Streichen (NNE-SSW und WNW-ESE) mit dem der meisten Erzgänge überein.

2.2.4 Erzlagerstätten und Mineralisation

Hydrothermale Bildungen werden aus heißen, wässrigen Lösungen, die erhöhte Konzentrationen an Nicht-/Metallverbindungen aufweisen, in p-T-Bereichen unterhalb des kritischen Punktes

für Wasser bei Temperaturen zwischen 400-50 °C ausgeschieden. Geochemische Barrieren sind für die Erzabscheidung von besonderer Bedeutung. Vererzungen sind dabei stets an das tektonische Spaltensystem gebunden. Im Idealfall entstehen symmetrische Lagenstrukturen (Salzbänder) verschiedener Erze; weitere Gangstrukturen können massiv, kollomorph, Imprägnationen oder Ringelerze (Kokardenerze) sein. Es bilden sich meist erzreiche, aber kleine Ganglagerstätten. Bis in das 20. Jahrhundert waren hydrothermale Ganglagerstätten die wichtigsten Metallquellen.

Die Freiberger Lagerstätte gehört zum Typ der Blei-Zink-Silber-Erzlagerstätten, bei der es zu einer zeitlichen Abfolge hydrothermaler Mineralisationen kam, die in den meisten der durchschnittlich 0,8 m mächtigen, bis mehrere km streichenden Gänge mindestens zwei Mineralparagenesen hinterließ. Die primäre Mineralisation der Gänge wird in Formationen eingeteilt, die typische Paragenesen von Erzen und Gangarten umfassen und somit die Elementverteilung bestimmen. Diese Lagerstätte entstand im Zeitraum vor 300 bis 30 Millionen Jahren, wobei die Erze des Freiberger Reviers während zwei Mineralisationszyklen gebildet wurden (BAUMANN 1958, BERNSTEIN 1985):

- Infolge des variszischen Magmatismus kam es zur Bildung des **1. Freiberger Mineralisationszyklus**, der mit der kiesig-blendigen Formation (kb) sowie der edlen Braunspatformation (eb) für die Freiberger Lagerstätte von besonderer Bedeutung ist.
- Im Tertiär folgte der **2. Freiberger Mineralisationszyklus** mit der Eisen-Baryt-Abfolge (eba), der fluorbarytischen Bleierzformation (fba) und der Bi-Co-Ni-Ag-Formation (Edle Geschicke), die weniger verbreitet sind.

Tabelle 6 zeigt einen Überblick über die Erzformationen und Mineralparagenesen. Innerhalb des Freiberger Erzreviers sind etwa hundert Minerale bekanntgeworden. Im Bereich der Gangkreuze bildeten sich „veredelte“ Mineralparagenesen aus. Das unmittelbare Nebengestein der Gänge erfuhr z.T. Mineralumwandlungen und Imprägnationen.

In den obersten Dekametern unter der Erdoberfläche, in der Verwitterungszone, ist der Ausbissbereich der die Erzgänge durch exogene Einflüsse ebenso chemisch umgewandelt wie das Nebengestein: Einige Minerale wie z.B. Calcit sind aufgelöst, andere wie z.B. Pyrit zu Limonit zersetzt (Oxidationszone). Auch das wichtigste Silbererz, Galenit, wurde infolge des Einbaus von Schwefel aus Sulfiden in die Sulfate zersetzt, wodurch sich das Silber in den Erzgängen innerhalb der Verwitterungszone in gediegener Form anreicherte (Zementationszone).

Daraus ergaben sich für den Silberbergbau folgende Konsequenzen: Zunächst erfuhr der Bergbau durch Abbau der reichen Erze in geringer Teufe einen starken Aufschwung. Als der Bergbau die Erze in größeren Teufen – aus der unverwitterten Zone – gewinnen musste, bedeutete dies infolge der geringeren Silbergehalte in festerem Gestein höheren Arbeitsaufwand in Aufbereitung, Verhüttung und Grubenentwässerung.

Das Währungsmetall Silber war bis Ende des 19. Jahrhunderts das Hauptabbauprodukt des Sächsischen Bergbaus. Da für die metallurgischen Prozesse zur Silbergewinnung Blei benötigt wurde, wurde dieses anfangs sogar nach Freiberg geliefert, bis es aus dem Galenit der Reviere selbst gewonnen wurde. Im Laufe der Jahrhunderte entwickelte sich Blei schließlich vom Hilfs- zum Verkaufsprodukt. Die Anzahl der aus dem Fördergut gewonnenen Stoffe vergrößerte sich; seit dem 16. Jahrhundert produzierten die sog. „Gifthütten“ aus den Erzen Arsen, Schwefel, Schwefelsäure und Vitriol. Ab Mitte des 19. Jahrhunderts wurde aus dem Freiberger Sphalerit auch metallisches Zink gewonnen (WAGENBRETH 2000). Der Silberbergbau Sachsens lässt sich in mehrere Hauptperioden einteilen:

- 1168 (Entdeckung des Freiberger Silbers) bis ca. 1350 (Pest; Kapitalmangel und fehlende Technik zur Grubenentwässerung): oberflächennaher Bergbau („Eiserner Hut“) in Freiberg und Umgebung
- ca. 1460 (Aufschwung des Bergbaus bei Schneeberg, Annaberg, Marienberg, Johanngeorgenstadt) bis ca. 1750 (Ruin durch Siebenjährigen Krieg): Bergbau in mittleren Gangteilen und neuen Gebieten
- 1765 (Gründung der Bergakademie Freiberg) bis 1913 (Stilllegung des Freiberger Bergbaus): Bergbau in tieferen Gangteilen, ausgedehnte Grubenfelder
- 1935 (Wiederaufnahme des Bergbaus in Freiberg) bis 1968 (endgültige Einstellung des Bergbaus im Freiberger Revier): höchstproduktiver Bergbau auf Silber und Buntmetalle in sehr tiefen Gangteilen, starke Industrialisierung

Tab 3: Erzformationen und Mineralparagenesen der Freiberger Mineralisationszyklen. Nach: PFORR et al. (1985).

Abfolge	Gangart	Erzminerale	Besonderheiten	Vorkommen
1. Freiberger Mineralisationszyklus				
I. Kiesig-blendige Bleierzformation (kb-Formation)				
1. „Kiesige“ (pyritische) Abfolge	Quarz	Pyrit, Arsenopyrit, Pyrrhotin, Markasit, in Spuren ged. Gold	<ul style="list-style-type: none"> - v.a. massige Verwachsungs- und Verdrängungsstrukturen in der Gangausbildung - in tieferen Gangbereichen z.T. Sn-W-Abfolge (Quarz, Kassiterit, Wolframit) 	v.a. auf den Stehenden bzw. Flachen Gängen im Zentralteil des Freiberger Lagerstättenreviers
2. Zn-Sn-Cu-Abfolge	Quarz	Sphalerit, Chalkopyrit, wenig Tetraedrit, Stannit, Bornit, Chalkosin		
3. Pb-Abfolge	Quarz	Galenit, z.T. mit Schapbachit und Tetraedrit		
II. Edle Braunschpatformation (eb-Formation)				
1. Uran-Quarz-Abfolge (uq-Abfolge)	Quarz, Karbonspat	wenig Fluorit, Hämatit, Uraninit	<ul style="list-style-type: none"> - v.a. Verdrängungs- und Lagenstrukturen in der Gangausbildung - wichtigste Silbererzformation - in Freiberger Randgebieten und z.T. Halsbrücke Revier feinkristalline, Ag-reiche „Edle Quarzformation“ (eq)-Formation 	v.a. in oberen Gangbereichen der Stehenden bzw. Flachen Gänge im Freiberger und Brander Revier sowie in den Freiberger Randgebieten
2. Sulfidische Abfolge	Karbonspäte (Braunspäte)	Freibergit, Ag-haltiger Sphalerit, Galenit, Pyrit-Markasit		
3. Ag-Abfolge	Karbonspäte	Freibergit, Miargyrit, Pyrargyrit, Stephanit, Dyskrasit, Argentit, ged. Silber, lokal Jamesonit, Berthierit, Antimonit, Bournonit, Freieslebenit u.a „Spiegeln“		
2. Freiberger Mineralisationszyklus				
III. Eisen-Baryt-Abfolge	Quarz (Hornstein, Chalcedon, z.T. Achat und Amethyst), Baryt	Roteisen-Hämatit, z.T. Fluorit und Manganoxide	häufig Bändertextur („Halsbacher Achat“)	nur untergeordnetes Vorkommen
IV. Fluorbarytische Bleierzformation (fba-Formation)				
1. „Hartes Trum“ (Baryt-Quarzit-Abfolge)	Baryt (meist durch SiO ₂ verdrängt), Quarz (Hornstein, fein- bis mittelkristalliner Quarz), etwas Fluorit	Ag-reicher Galenit, Chalkopyrit, Tetraedrit, Pyrit	z.T. ausgezeichnete Lagertextur	v.a auf den Spatgängen im Raum Halsbrücke
2. „Weiches Trum“ a) Fluorit-Baryt-Abfolge („Hauptfluoritabfolge“) b) Baryt-Fluorit-Abfolge („Kalkbarytabfolge“)	a) Fluorit, Quarz (z.T. Chalcedon), Baryt b) Baryt (lagenförmig), Fluorit, Quarz	a) Ag-arme Galenit, weniger Sphalerit und Chalkopyrit b) Schalenblende (ZnS), Galenit, Chalkopyrit, Melnikowitpyrit, Markasit	a) v.a. massige, z.T. derb verwachsene Mineralgefüge b) z.T. ausgezeichnete Lagertextur	
V. Bi-Co-Ni-Ag-Formation („Edle Geschicke“)				
1. Arsenidische Abfolge	Quarz (z.T. als Chalcedon), wenig Baryt und Fluorit	Skutterudit, Nicelin, Rammelsbergit, Safrlorit, ged. Wismut, ged. Arsen („Scherbenkobalt“)		relativ wenig verbreitet
2. Silber-Sulfid-Abfolge	Karbonspäte, Quarz	Tetraedrit-Tennantit, Proustit, Polybasit-Pearceit, Argentit, ged. Silber, wenig Argyrodit, etwas Galenit, Sphalerit, Pyrit	häufig bedeutende Kreuzveredelungen	nur sporadisch, v.a. an Gangkreuze gebunden

2.2.5 Hydrologie und Hydrogeologie

Hydrologische Daten über den Raum Freiberg sind u. a. bei BERRIOS (1995) zu finden: Die mittlere jährliche Lufttemperatur beträgt ca. 7,9 °C, die durchschnittliche Niederschlagshöhe ca. 841 mm. Die mittlere Abflussmenge liegt im Bereich von 270 mm, wobei mit einer potentiellen Verdunstung von ca. 570 mm gerechnet werden kann. Die Mulde reagiert im Allgemeinen schnell auf Niederschläge; allerdings spielt die Niederschlagsspeicherung in der winterlichen Schneedecke eine wichtige Rolle für den Wasserhaushalt des gesamten Jahres. Die Grundwasserneubildungsrate beträgt etwa 3,5 L/(s·km²).

Für den Kernbereich der Freiberger Lagerstätte ist das Grundwassereinzugsgebiet zwischen den beiden Wasserscheiden Freiberger Mulde / Bobritzsch und Striegis / Kleinwalthersdorfer Bach bestimend. Die Entwässerung erfolgt primär in:

- die *Freiberger Mulde*, die sich als Durchbruchs-/Kerbsohlental ins Grundgebirge einschneidet;
- den *Münzbach*, der meist in Rohre gefasst das Stadtgebiet durchkreuzt (seine Nebenbäche Goldbach und Saubach entwässern nur untergeordnet und lediglich im unmittelbaren Stadtgebiet);
- den *Kleinwalthersdorfer Bach*.

Der Kleinwalthersdorfer Bach und der Münzbach fließen der Mulde zu, welche nach dem Zusammenfluss mit der Zwickauer Mulde bei Sermuth als Vereinigte Mulde in der Nähe von Dessau in die Elbe mündet. Die Triebisch nimmt bei Rothschönberg einen großen Teil des Wassers auf, das, zum Teil aus dem Einzugsgebiet der Mulde stammend, den stillgelegten Freiberger und Brander Grubenbauen zusitzt.

Im Kristallinbereich wird von einer gesättigten Grundwasserzone ausgegangen, so dass die Versickerungsrate vernachlässigbar klein ist. Somit wird das hydrogeologische System im Einzugsgebiet der Freiberger Mulde von einem Kluft-Aquifer dargestellt, dessen Oberfläche sich in ca. 1 bis >6 m Tiefe befindet (RÖSNER 1987). Eine Besonderheit der Mulde ist, dass die intensive bergmännische Erschließung im Freiberger Raum die Wasserverhältnisse in Gruben Nähe signifikant verändert hat. Bevor das Grubenwasser der Freiberger Mulde zufließt, wird es in zwei Stollenniveaus abgeführt (siehe Abb. 4): Seit dem 14. Jahrhundert wurde mit dem Stollensystem des Alten Tiefen Fürstenstollns das gesamte Bergwasser in die Mulde geleitet; ab 1877 übernahm jedoch der Rothschönberger Stollen diese Aufgabe (WAGENBRETH & WÄCHTLER 1986). Das Wasser, das heute in der ungefluteten Zone bis zur Stollnsohle (Alter Tiefer Fürstenstolln; 338 m ü. NN) anfällt, fließt aus der Grube durch den Hauptstollnumbruch und durch den Koeniglich Verträgliche Gesellschaft Stolln in die Mulde ab. Das Wasser aus der gefluteten Zone strömt dem Schacht Reiche Zeche zu, steigt im Schacht bis zur Rothschönberger Stollnsohle – dem wohl bedeutendsten Wasserableitungsstollen des Freiberger Bergbaureviers – bei 198 m ü. NN auf und wird dort schließlich nach der Vermischung mit anderen Sickerwässern in die Triebisch abgeleitet.

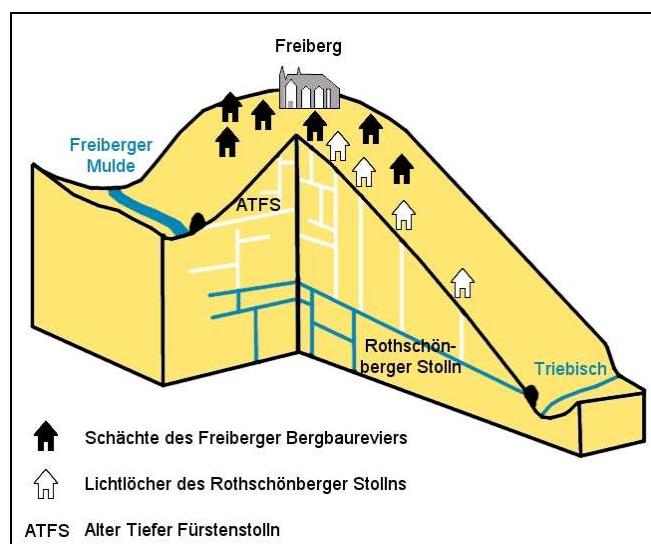


Abb. 4: Die größten Entwässerungsstollen des Freiberger Bergbaureviers. Verändert nach: SEBASTIAN (2001).

Der Freiberger Gneis wird allgemein als "klüftungsfreundlich, im Aufliegenden grusig zersetzt" (RÖSNER 1987) – früher Gems, heute Gneiszersatzkappe genannt – beschrieben, in dem kaum mit grundwasserfüllbarem Hohlraumvolumen zu rechnen ist. Im kompakten Freiberg Graugneis können lediglich alte Abbaue sowie Kluftflächen und Gänge als Zirkulations- und Speicherraum für *Grundwasser* dienen (MILDE 1973, BAUMANN 1958). Somit gibt es im Freiberger Gneis keine direkten grundwasserführenden Horizonte. Eröffnete Grubenbaue wie der Rothsönberger Stolln sind in der Regel offene hydrogeologische Systeme; sie stören extrem den Wasserhaushalt.

Zusitzende Wässer der Grube setzen sich zusammen aus Tageswässern (v.a. Niederschläge, Oberflächenwässer, Kunstgrabensystem, Abwasser, Brauchwasser) und Gebirgswässern, wobei mit zunehmender Tiefe der Anteil an Gebirgswasser ansteigt. Unterhalb der wasserabführenden Stollen sinkt der Anteil an Tageswässern auf unter 4 % (MEYER 1960). Oberflächenwasser dringt allein über der Gneiszersatzkappe und oberflächig ausstreichende Gänge in tagesnahe Abbaue und Spalten ein. Besonders Spatgänge sind stark Wasser führend. Die Herkunft der in der Tiefe zusitzenden Kluftwässer ist nicht eindeutig geklärt. Die Wässer zirkulieren vor allem durch bergmännische Auffahrungen und sammeln sich in den wasserabführenden Stollen.

Die Grundwasseroberfläche wird etwa vom Niveau des **Rothsönberger Stollns** markiert, der die einzige Verbindung zwischen den drei Grubenfeldern des Freiberger Lagerstättenbezirk darstellt. Der Rothsönberger Stolln besitzt als tiefster zugänglicher Teil der Freiberger Grube eine Schlüsselfunktion: Er unterteilt das Grubengebäude in eine völlig abgesoffene Grundwasserzone mit nahezu anoxischen Verhältnissen und eine größtenteils wasserfreie Sickerwasserzone, die gelegentlich Stau-, Fließ- und Standwasser aufnimmt. Der Grubenteil über der Rothsönberger Stollnsohle stellt somit einen Zirkulationsraum dar, in dem das Sickerwasser mit den verschiedenen Erzen und der durch die stetige Bewetterung sehr sauerstoffhaltigen, ca. 10°C warmen Luft in Kontakt tritt und durch das Grubengebäude migriert, bis es in den Stollen aufgenommen und abgeführt wird.

Das punktförmig an den großen wasserabführenden Stollen - Rothsönberger Stolln, Verträgliche Gesellschaft Stolln und Hauptstolln Umbruch - austretende Wasser beeinträchtigt vor allem die Gewässerqualität der Freiberger Mulde und der Triebisch.

3 Projekt „Geothermische Grubenwassernutzung im Alten Tiefen Fürstenstolln zur Beheizung und Klimatisierung des Schloss Freudenstein, Freiberg“ (JD/KK)

3.1 Technisches Konzept des Geothermieprojekts (JD)

Das Nutzungskonzept für das Schloss Freudenstein mit der Terra Mineralia, dem sächsischen Bergarchiv, den städtischen Nutzungen und den daraus resultierenden hohen Anforderungen an das Raumklima, bietet eine einzigartige Chance ein Vorzeigeobjekt zum wirtschaftlichen Einsatz regenerativer Energien zu initiieren. Zur unterstützenden Beheizung und Klimatisierung des Schloss Freudenstein wurde daher in den Jahren 2005 bis 2008 durch die TU Bergakademie Freiberg und außeruniversitäre Partner eine geothermische Grubenwassernutzung vorbereitet.

Ende des Jahres 2005 wurde das beteiligte geologische Ingenieurbüro überprüft, ob geeignete, standsichere bergmännische Hohlräume in der Nähe des Schlosses vorhanden sind, welche eine geothermische Energiegewinnung zulassen würden. Im Ergebnis wurde der Alte Tiefen Fürstenstolln (siehe Kapitel 3.2), der in etwa 50 m Tiefe von der Gerberpassage zum Untermarkt und anschließend parallel zur Geschwister-Scholl-Straße bis unter das Hochschulgelände der TU Bergakademie Freiberg verläuft, favorisiert, da er eine konstante Grubenwassertemperatur von 10,2 °C, eine relativ geringe Teufe von 50 m und die benötigte Nähe zum Endnutzer – dem Schloss Freudenstein – besitzt.

Das erste Konzept aus dem Jahre 2005 sah zur Verwirklichung einer geothermischen Anlage ein **geschlossenes System** mit einem Rohrbündel vor, dessen Vorteil die Wärmeübertragung ohne Stoffaustausch zwischen Grubenwasser und Prozesskreislauf der Wärmepumpe ist. Dadurch können Kontaminationen vermieden werden, was die Anlage relativ wartungsarm macht. Dieser Vorteil wird jedoch nicht nur von einem wesentlich höherem technischen und finanziellen Aufwand überschattet, sondern ist zudem für geringere Temperaturen uneffektiv, was durch die mehrstufige Wärmeübertragung (Wärmedurchgang Gebirge/Wasser - Wärmetransport im Wasser - Wärmedurchgang Rohr - Wärmetransport über Pumpe nach über Tage) bedingt ist.

Nach weiteren Überlegungen wurde im Jahre 2008 in kollegialer Zusammenarbeit der TU Bergakademie Freiberg mit der Stadtverwaltung Freiberg und den projektierenden Ingenieurbüros, mit Unterstützung von der Lehrgrube „Reiche Zeche“ (K. Grund), dem Sächsischen Oberbergamt und der finanziellen Förderung durch das Sächsische Landesamt für Umwelt, Geologie und Landwirtschaft ein zweites Konzept entwickelt: Dabei wurde ein **offenes System** favorisiert, da es eine wirtschaftlich vertretbare Wärmeleistung von 160-180 kW (N/A ~ 3,5 : 1) und eine Kälteleistung von 120 kW ($\Delta T=5$ K, N/A= 20 : 1) erreichen kann und zudem um 50 % kostengünstiger ist.

Nach markscheiderischen Vermessungsarbeiten, weiteren technischen Maßnahmen und dem Abteufen des benötigten neuen Bohrlochs im Oktober 2008 (siehe Kapitel 3.2) wurde das Konzept des offenen Systems im Alten Tiefen Fürstenstolln in die Realität umgesetzt (siehe Abb. 5): Im neuen Bohrloch wurden der Injektionsstrang und die Förderstränge der beiden baugleichen Pumpen installiert, wobei letztere durch eine gemeinsame elektrische Leistung von 6 kW (2x 3 kW) gekennzeichnet sind, was bei Vollast einer maximalen Förderleistung von 6 L/s entspricht. Die durchschnittliche Strömungsgeschwindigkeit des mittels eines neu installierten Wehres auf einer Strecke von ca. 200 m angestauten Grubenwassers beträgt aufgrund des Stollenquerschnitts und der geringen Fördermenge höchstens $1,5 \text{ mm s}^{-1}$ (BENTHIN & HAMANN 2008). Das schon bestehende, wenige hundert Meter entfernte Bohrloch der Firma Steyer wurde im Installationszeitraum als Kommunikationsöffnung zur Medienzuführung genutzt; eine vorgesehene zusätzliche Bewetterung erwies sich als unnötig. Im Anströmbereich war zunächst der Bau eines zweiten Wehres als Schlammrückhalt und Stauhilfe vorgesehen, wurde aber nicht realisiert.

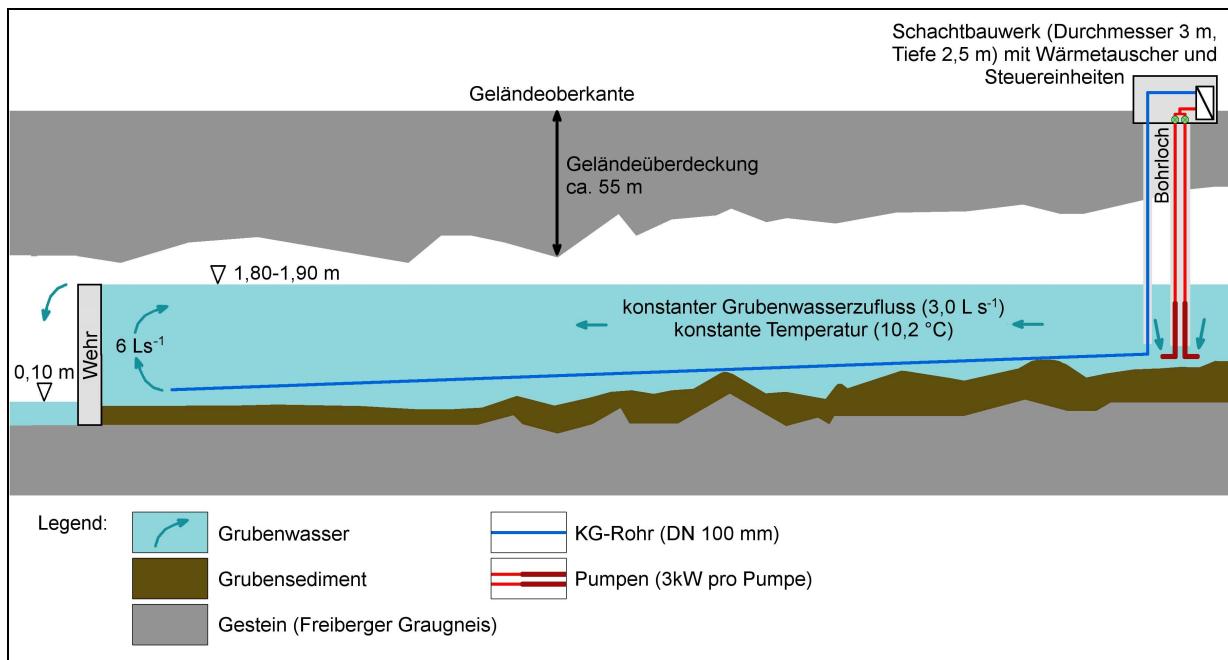


Abb. 5: Das Konzept zur geothermischen Grubenwassernutzung im Alten Tiefen Fürstenstolln (offenes System).

3.2 Alter Tiefer Fürstenstolln (KK)

Etwa 200 m östlich der Straßenbrücke zwischen Tuttendorf und Conradsdorf, jenseits des Roten Grabens, befinden sich die Mundlöcher des Alten Tiefen Fürstenstollns und des Hauptstolln Umbruchs (siehe Abb. 6a). Der Alte Tiefe Fürstenstolln, der von Tuttendorf bis zur Reichen Zeche verläuft, war bis ins 19. Jahrhundert (bis zum Einkommen des Rothschönberger Stollns) der tiefste und wichtigste Stollen, da er als Hauptentwässerungsstollen des Freiberger Reviers das Grubenwasser ins Muldental ableitete. Aufgrund seiner Bedeutung wurde er im Jahre 1851 nahe seines Mundloches mit dem für das damalige bergmännische Vermessungswesen maßgeblichen Höhen-Nullpunkt markiert, was dem Mundloch auch den Namen „Nullpunktgrotte“ gab (Wagenbreth & Wächtler 1986).

Allerdings handelt es sich beim Alten Tiefen Fürstenstolln genau genommen um zwei Stollen in unterschiedlichen Teufen – den Alten Fürstenstolln und den Tiefen Fürstenstolln –, die im Sprachgebrauch zu einem Stollen „verschmolzen“ sind (siehe Abb. 6b):

- Der obere Teil, der *Alte Fürstenstolln*, wurde erstmalig 1384 urkundlich erwähnt und gehört somit zu den ältesten Stollen des Freiberger Reviers.
- Ab dem Jahre 1530 wurde der *Tiefe Fürstenstolln* vorgetrieben, der sich ca. 90 m oberhalb der 1. Sohle befindet und durch einen nahezu gleichen Verlauf, aber geringeres Ansteigen (1:425) gekennzeichnet ist. Mit der Fertigstellung des Hauptstolln Umbruchs im Jahr 1850 verlor er seine Entwässerungsfunktion.
- Der parallel verlaufende *Hauptstolln Umbruch* wurde in den Jahren 1822 bis 1850 etwa 40 m östlich vom Alten Tiefen Fürstenstolln aufgefahren, damit das Grubenwasser abfließen konnte (Ansteigen 1:2080), ohne die mittlerweile immer tieferen Erzabbau zu gefährden.

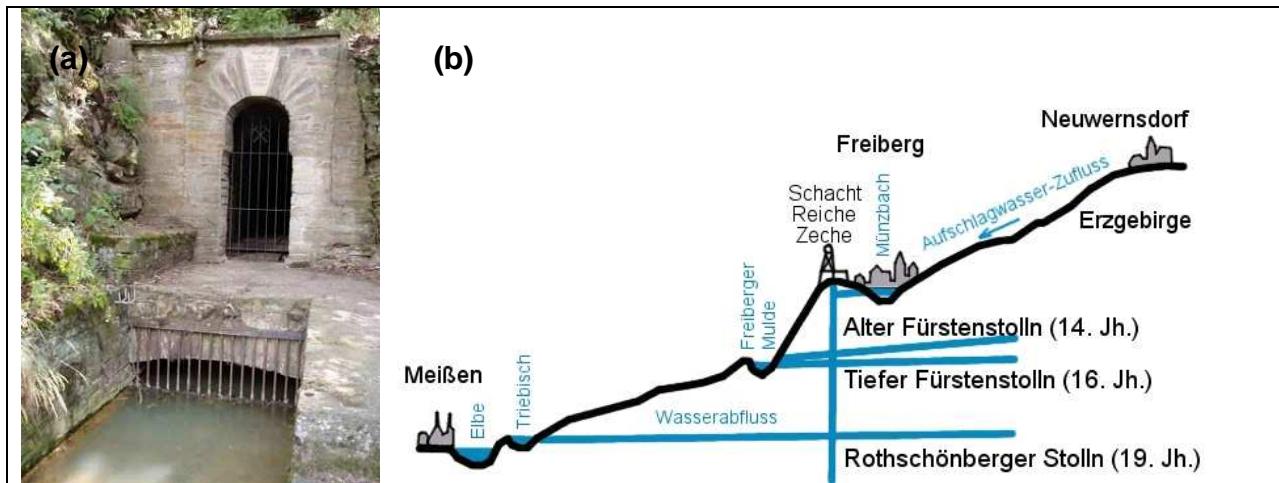


Abb. 6: Alter Tiefer Fürstenstolln. **a)** Das sanierte Mundloch vom Hauptstollen Umbruch des Alten Tiefen Fürstenstollns. **b)** Das Freiberger bergmännische Wassersystem mit den Zuflüssen des Erzgebirges aus dem Kunstgrabensystem und den wasserabführenden Stollen der Freiberger Grube. Verändert nach: PFORR (1994).

In der jüngeren Vergangenheit – bis zum Jahr 1991 – wurde der Alte Tiefe Fürstenstolln im Bereich der Gerberpassage (Bereich Untermarkt Freiberg) von der ehemaligen Wäscherei Steyer im Bereich zu Brauchwasserzwecken genutzt. Das zum Grubenwasseranstau genutzte **Beton-verspünden (Wehr) Steyer** wurde 1992 geöffnet und im Jahr 2008 mit Dynamit gesprengt (siehe Abb. 7a und 7b). Es befindet sich wenige Meter vorm **Bohrloch Steyer** (siehe Abb. 7c), welches der Wasserförderung diente und noch heute im Bereich des Parkplatzes Gerberpassage vorhanden ist. Im August 2008 wurde das Bohrloch für einen neuen Übertageausbau (Brunnenringe, Kanaldeckelverschluss, Bewetterungsleitung) geöffnet und auch das alte Bohrgestänge samt Resten der Förderpumpen entfernt (siehe Abb. 7d). Nach markscheiderischen Vermessungsarbeiten konnte im Oktober 2008 die **neue Geothermiebohrung** am Meißner Ring (Ecke Geschwister-Scholl-Straße – im Park, hinter den alten Rhododendron-Büschen an der historischen Freiberger Stadtmauer) abgeteuft werden (siehe Abb. 7e bis 7g). Nach Ende der Kartierarbeiten Ende November 2008 wurde neues Holztragwerk installiert und die Geothermieanlage installiert.

Lagekarten und weitere Details zum Kartiergebiet im Alten Tiefen Fürstenstolln sind dem Kapitel 5.1 zu entnehmen.



Abb. 7: Fotodokumentation wichtiger technischer Bauwerke und Maßnahmen im Rahmen des Geothermieprojekts. **a)** Verspünden (Wehr) Steyer mit dem Wehrverschluss (Grundablass-Stopfen, siehe Pfeil) im Jahr 2005 (Foto: Andreas Benthin). **b)** Reste des Verspünden (Wehr) Steyer nach der Sprengung (2008). **c)** Bohrloch Steyer mit Pumpensumpf (2008). **d)** Übertageausbau des Bohrlochs Steyer (2008). **e)** Bohrung am Meißner Ring (2008). **f)** Bohrungsdurchbruch in den Alten Tiefen Fürstenstolln im Oktober 2008 (Foto: Andreas Benthin). **g)** Schachtdeckel am Meißner Ring (2009).

4 Methodik der Untersuchungen (JD/KK)

4.1 Kartierung (KK)

Die Stollenkartierung erfolgte im Oktober 2008 im ca. 250 m langen Kartiergebiet, welches sich vom Neuen Wehr bis kurz hinter dem neuen Geothermiebohrloch im Alten Tiefen Fürstenstolln erstreckte (siehe Kapitel 3.2 und 5.1). Bei der geologisch-bergmännischen Kartierung, in deren Rahmen Klüftung und Störungszonen des Gebirges mit dem Freiberger Geologenkompass gemessen und in Form von Schmidtschen Netzen dargestellt wurden, haben die Bearbeiter auch Wasseraustrittsstellen kartiert. Wie in den nachfolgenden Kapiteln beschrieben, erfolgte außerdem die Probenahme und Untersuchung von Gestein, Grubenwasser und Grubensediment.

Die durch Mineralausfällungen markierte ehemalige Anstauhöhe wurde aufgenommen und für die Ermittlung des Fließgefälles herangezogen. Zur Berechnung des für die geothermische Grubenwassernutzung benötigten Einstauvolumens wurde an mehreren Stellen der Stollenquerschnitt ermittelt, indem an markanten Stellen – wie z.B. Jahrestafeln des Vortriebs oder den markscheiderischen Referenzpunkten – in mehreren Höhen die Stollenbreite und in der Stollenmitte die Stollenhöhe gemessen wurde. Weiterhin erfolgte die Messung Schlammmächtigkeit und des Wasserstands.

4.2 Probenahme und Probenahmestellen (KK)

4.2.1 Gesteinsproben

Im Rahmen der Bohrung am Meißner Ring wurden mittels eines Siebes Bohrproben in Form von „Bohr-Chips“ aus jedem abgeteuften Meter des **Bohrprofils** aufgefangen (siehe Abb. 8). Anschließend wurde das Bohrklein luftgetrocknet und bis zur späteren makro- und mikroskopischen Analyse in Fächerkisten (siehe Abb. 9) bei Zimmertemperatur gelagert bzw. Teile davon für die Dichtebestimmung bis zur Gewichtskonstanz ofengekroeknet.

Außerdem wurden aus dem anstehenden Gestein im Stollen drei etwa handstückgroße **Gesteinsproben** mit Hammer und Meißel orientiert entnommen (siehe Abb. 9), die später zur Bestimmung der geothermischen Parameter des Freiberger Graugneises verwendet wurden (siehe KRANZ & DILLENARDT 2010): nahe des neuen Bohrloches am Ende des Kartiergebietes (linker Stoß bis Firste, am neuen Bohrloch), nahe des großen Stalagmits zwischen den Jahrestafeln „1833“ und „1832“ (rechter Stoß, in Kopfhöhe) und im Füllort des Familienschachtes (linker Stoß, in Kopfhöhe).



Abb. 8: 52 Bohrkleinproben von der Geothermiebohrung am Meißen Ring (Teufe 1-52 m).

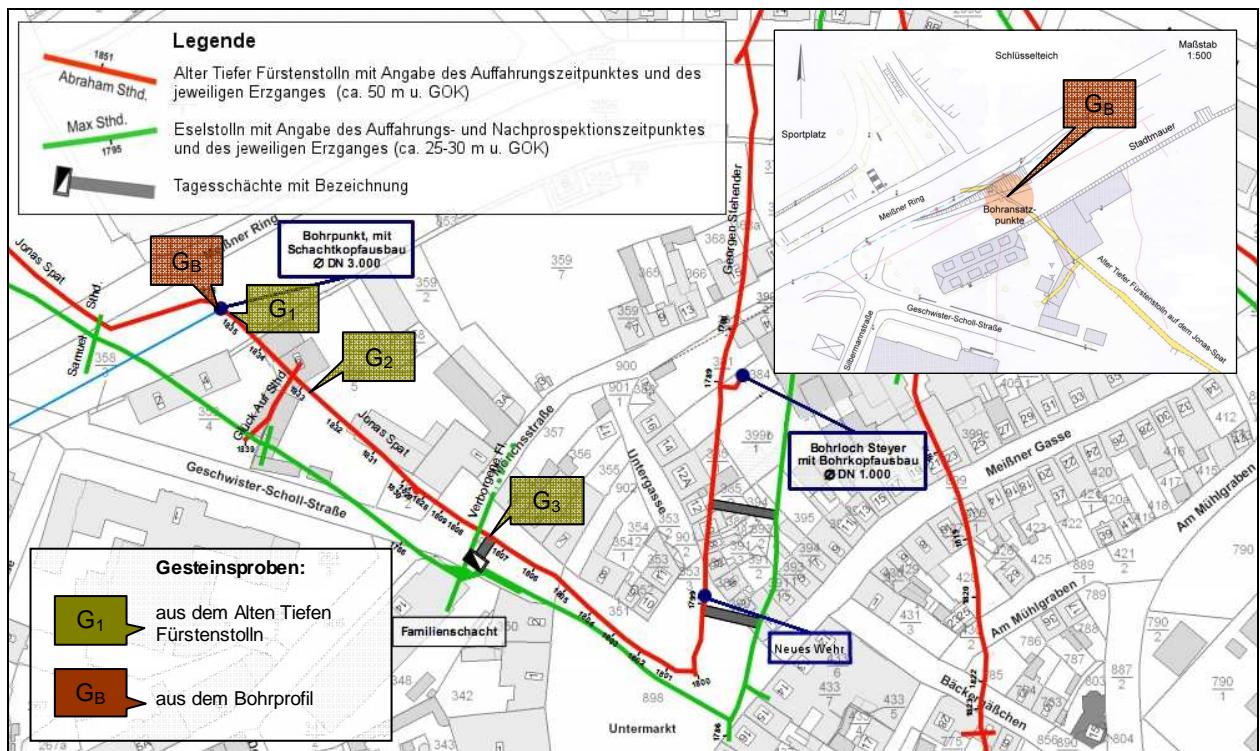


Abb. 9: Übersicht über die entnommenen Gesteinsproben im Alten Tiefen Fürstenstolln mit Detailkarte zum Bohrabsatzpunkt der neuen Geothermiebohrung.

4.2.2 Grubenwasser- und Zuflussproben

Die Entnahme der für die spätere wasserchemische Analytik benötigten repräsentativen **Wasserproben** erfolgte, wenn möglich, direkt aus dem Hauptwasserstrom (Grubenwasserstrom bzw. Zuflüsse), ansonsten mittels Schöpfgefäß. Die Probengefäße wurden zuvor zunächst mit destilliertem Wasser und danach mit Probenwasser gespült. Um Wechselwirkungen mit der Umgebung zu vermeiden, wurden die Probengefäße stets randvoll gefüllt und vom Entnahmepunkt zum Analysezeitpunkt gekühlt gelagert.

In Tab. 4 sind die Eigenschaften der verwendeten Probengefäße dargestellt. Um Sorptionsvorgänge an Kolloiden zu vermeiden, wurden die für die Photometrie und ICP-MS-Analyse bestimmten Proben schnellstmöglich nach der Probenahme mittels Stickstoff-Druckfiltration filtriert (Firma Sartorius, Material Cellulose-Acetate, Porenweite 0,2 µm, Durchmesser 47 mm). Zur Unterbindung von Ausfällungsreaktionen wurden die Proben für die ICP-MS-Messungen zusätzlich mit 6 Tropfen Salpetersäure je 100 ml Probe angesäuert. Zur späteren Analytik des **Schwebs** wurden die verwendeten Filter in PE-Petrischalen aufbewahrt.

Tab. 4: Eigenschaften der verwendeten Probengefäße.

Verwendung	Gefäßmaterial	Gefäßgröße	Filtration	Ansäuerung
IC	PET	100 ml	nein (erst unmittelbar vor der Analyse)	nein
ICP-MS	PET (HNO ₃ -gespült)	50 ml	ja	ja (siehe Text)
TIC Photometrie	Laborglas PET	100 ml 250 ml	nein ja	nein nein

Die Bezeichnung der Probenahmestellen erfolgte in Fließrichtung des Grubenwassers im Alten Tiefen Fürstenstolln, also vom Ende des Kartiergebietes nahe der Geothermiebohrung am Meißner Ring bis zum Anfang des Kartiergebietes am Neuen Wehr (siehe Abb. 10). Die außerhalb des Kartiergebietes gelegenen sind auf der Karte nicht gekennzeichnet.

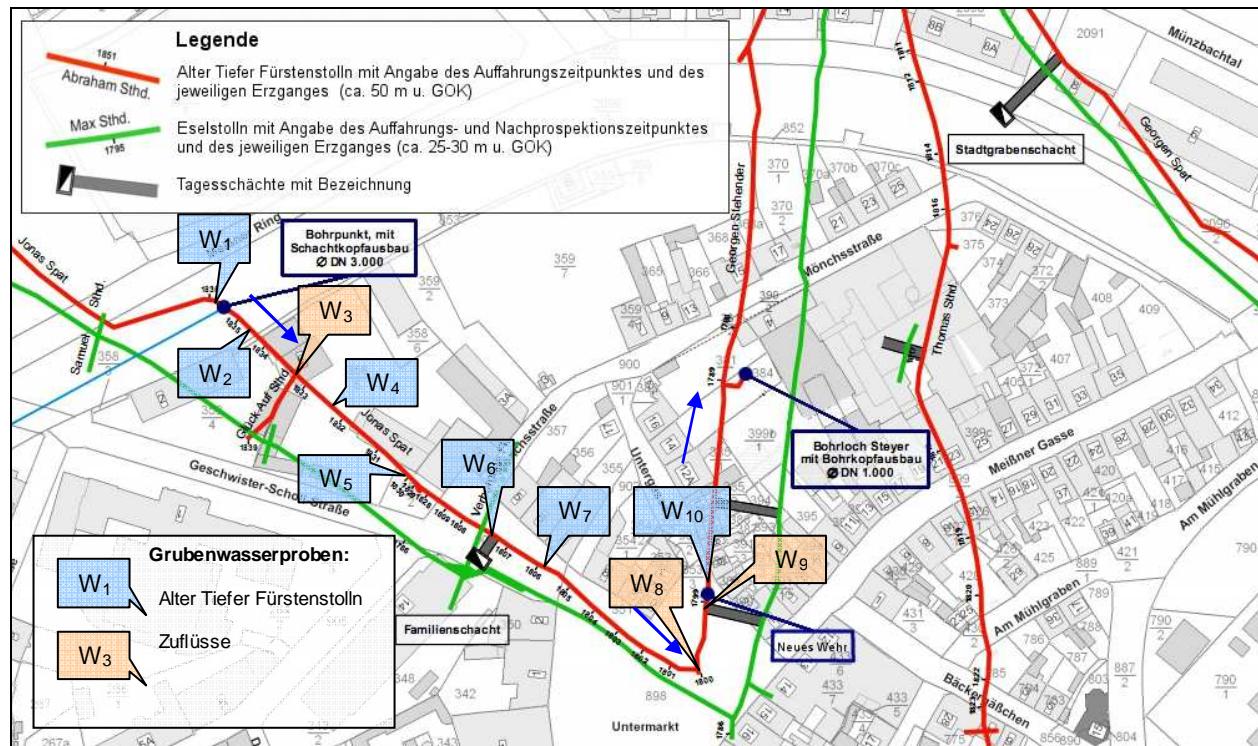


Abb. 10: Übersicht über die entnommenen Grubenwasser- und Zuflussproben im Alten Tiefen Fürstenstolln.

W1: Grubenwasser Alter Tiefer Fürstenstolln auf dem Jonas-Spat

Die Probenahmestelle W1 befindet sich am Ende des Kartiergebietes im Alten Tiefen Fürstenstolln auf dem Jonas-Spat (siehe Abb. 11a). Sie liegt am Stollenknick unmittelbar an der Jahrestafel „1836“ (siehe Abb. 11b), wenige Meter hinter dem neuen Bohrloch am Meißner Ring.

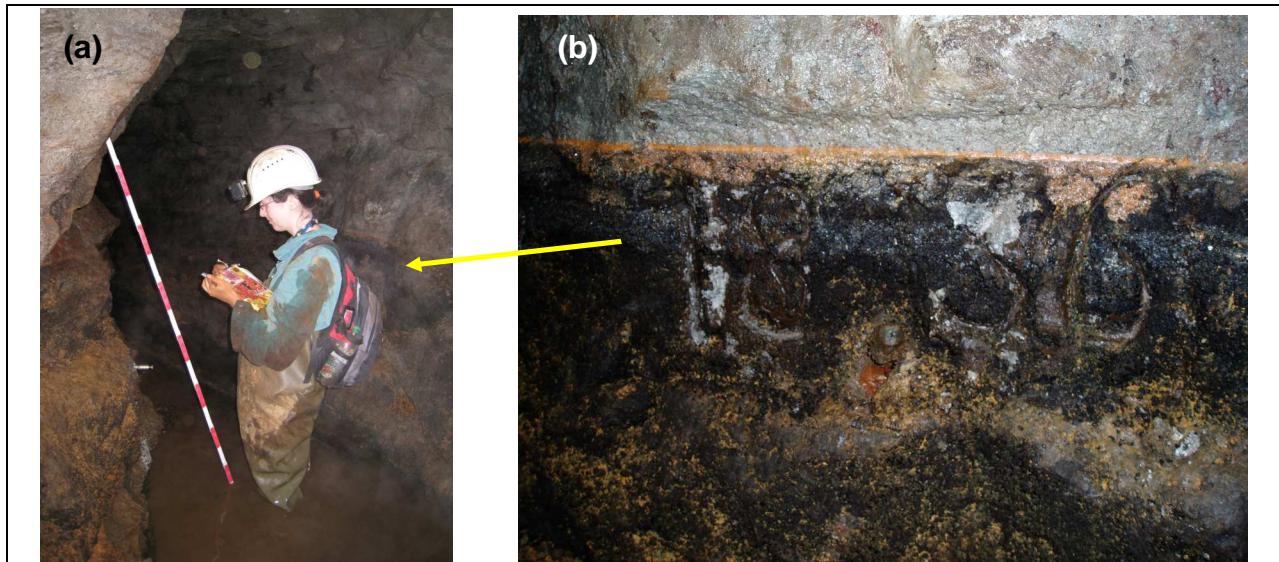


Abb. 11: Grubenwasser-Probenahmestelle W1. **a)** Stollenknick. **b)** Jahrestafel „1836“.

W2: Grubenwasser Alter Tiefer Fürstenstolln auf dem Jonas-Spat

Die Probenahmestelle W2 ist im Alten Tiefen Fürstenstolln auf dem Jonas-Spat vor dem Neuen Bohrloch lokalisiert, im Bereich zwischen den Jahrestafeln „1835“ und „1834“ (siehe Abb. 12a und 12b).

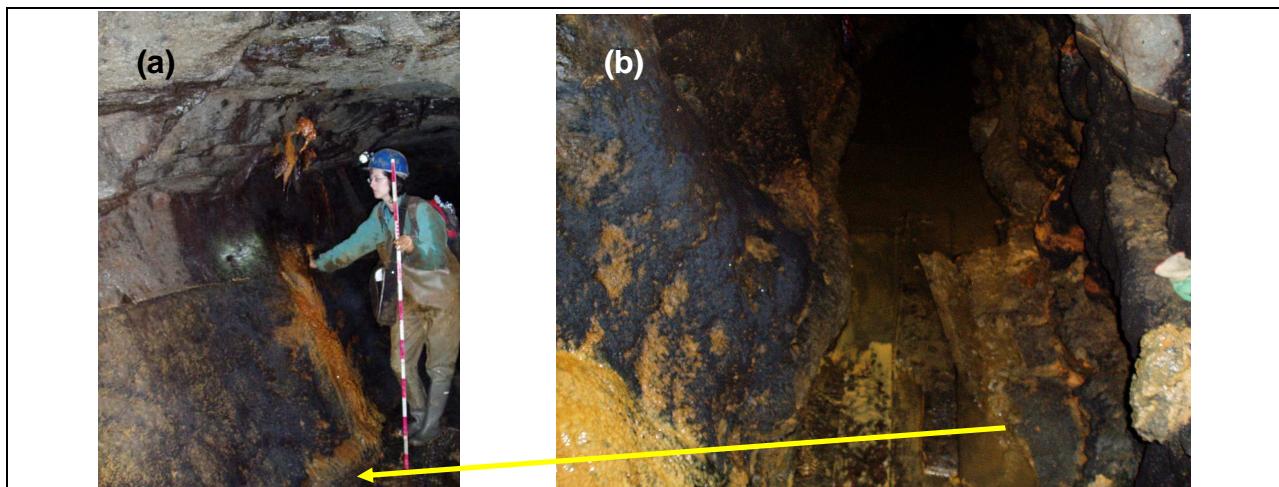


Abb. 12: Grubenwasser-Probenahmestelle W2. **a)** Nahegelegene Wasseraustrittsstelle. **b)** Reste loser Holztragwerks an der Probenahmestelle.

W3: Glück-Auf-Stehender (Zufluss)

Beim Querschlag Glück-Auf-Stehender, der Probenahmestelle W3, handelt es sich um einen wasserführenden, stark versinterten Erzgang (siehe Abb. 13a). Um genug Wasser zur Beprobung zu erhalten, wurde das Wasser des Glück-Auf-Stehenden von den Bearbeitern mittels loser Laufbohlen auf geringe Höhe angestaut (siehe Abb. 13b).

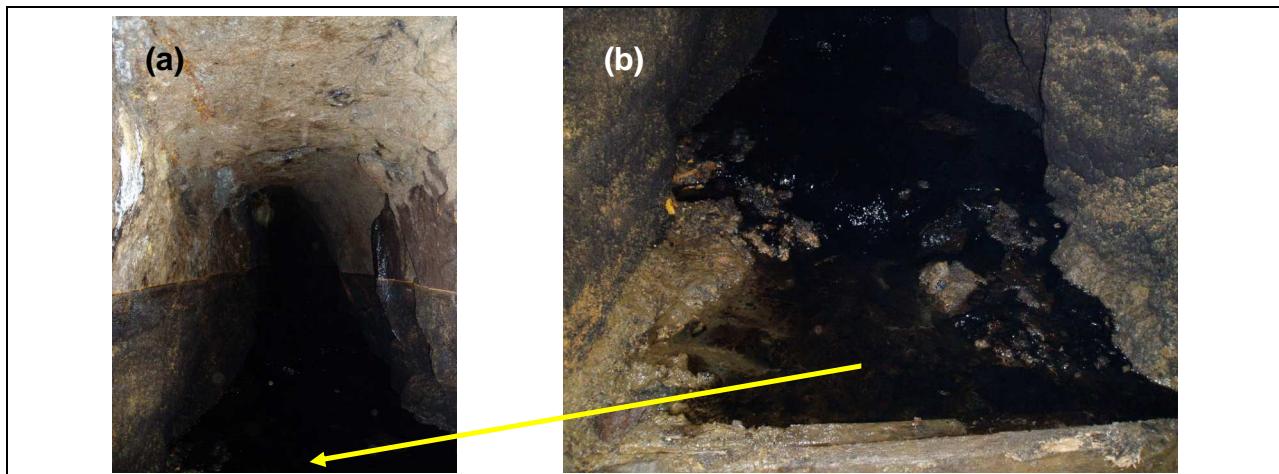


Abb. 13: Zufluss-Probenahmestelle W3. **a)** Wasserführender Querschlag Glück Auf Stehender. **b)** Detailaufnahme des durch die Bearbeiter angestauten Wasserzuflusses.

W4: Grubenwasser Alter Tiefer Fürstenstolln auf dem Jonas-Spat

Die Probenahmestelle W4 befindet sich im Bereich des großen Stalagmits, zwischen den Jahrestafeln „1832“ und „1833“ im Alten Tiefen Fürstenstolln auf dem Jonas-Spat (siehe Abb. 14).



Abb. 14: Grubenwasser-Probenahmestelle W4.

W5: Grubenwasser Alter Tiefer Fürstenstolln auf dem Jonas-Spat

Die Probenahmestelle W5 befindet sich im Alten Tiefen Fürstenstolln auf dem Jonas-Spat im Bereich der Jahrestafel „1830“ (siehe Abb. 15a und 15b).

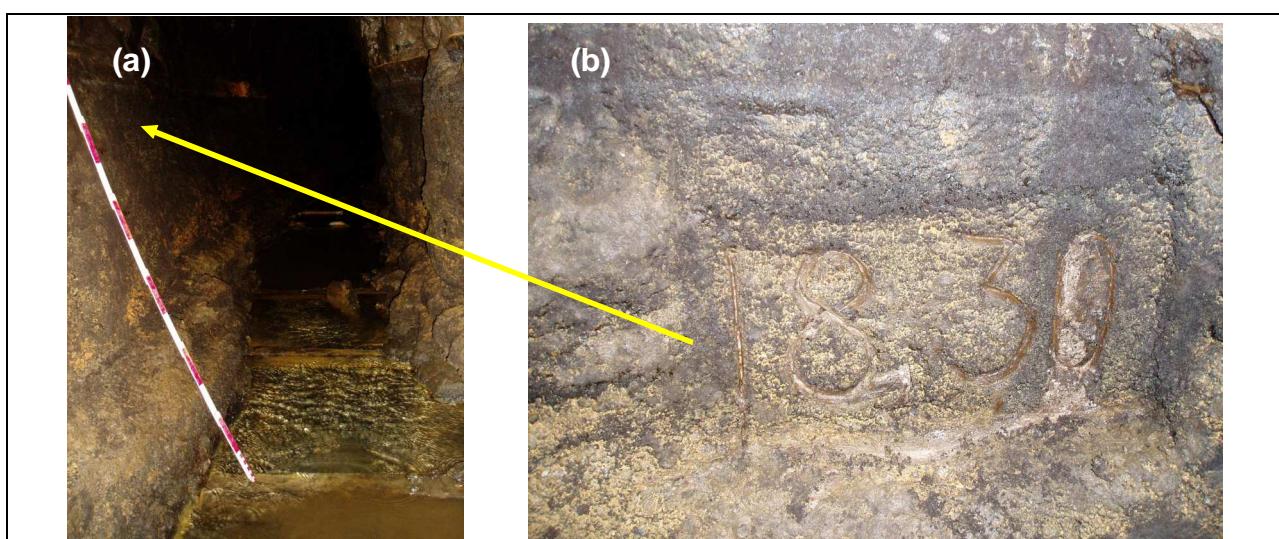


Abb. 15: Grubenwasser-Probenahmestelle W5. **a)** Reste alten Holztragwerks im Bereich der Probenahmestelle. **b)** Jahrestafel „1830“.

W6: Grubenwasser Familienschacht im Alten Tiefen Fürstenstolln auf dem Jonas-Spat

Der Füllort des Familienschachts, der sich auf dem Jonas-Spat des Alten Tiefen Fürstenstollns befindet, wurde als Probenahmestelle W6 ausgewählt (siehe Abb. 16a und 16b).

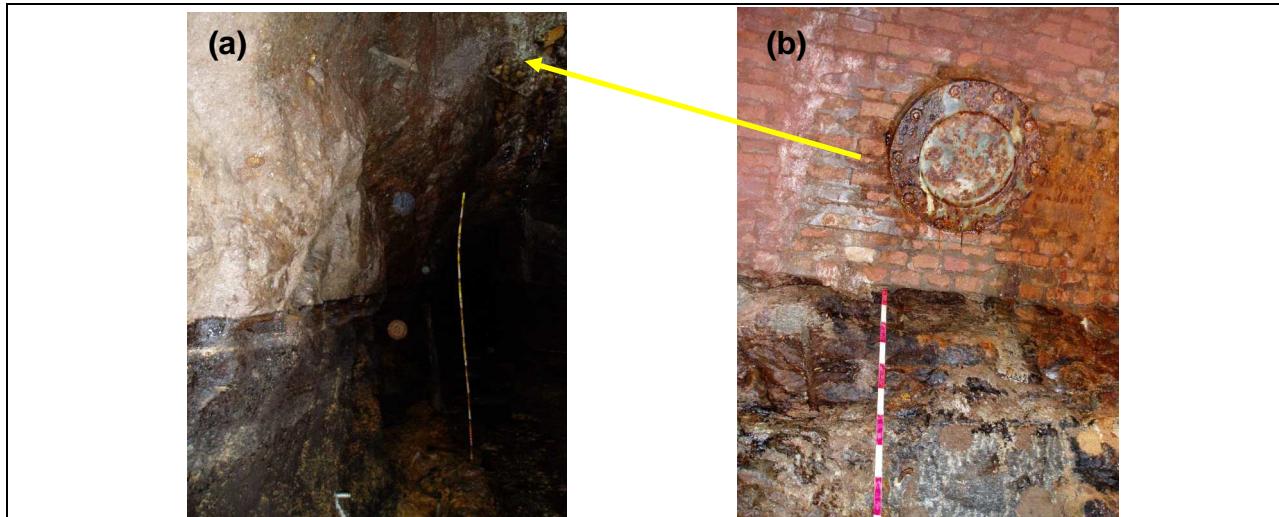


Abb. 16: Grubenwasser-Probenahmestelle W6. **a)** Füllort Familienschacht. **b)** Abmauerung in der Firste (ehemalige Kontrollöffnung bis Hermser Stolln).

W7: Grubenwasser Alter Tiefer Fürstenstolln auf dem Jonas-Spat

Die Probenahmestelle W7 befindet sich vor dem Familienschacht, im Bereich zwischen den Jahrestafeln „1805“ und „1806“, im Alten Tiefen Fürstenstolln auf dem Jonas-Spat (siehe Abb. 17a und 17b).

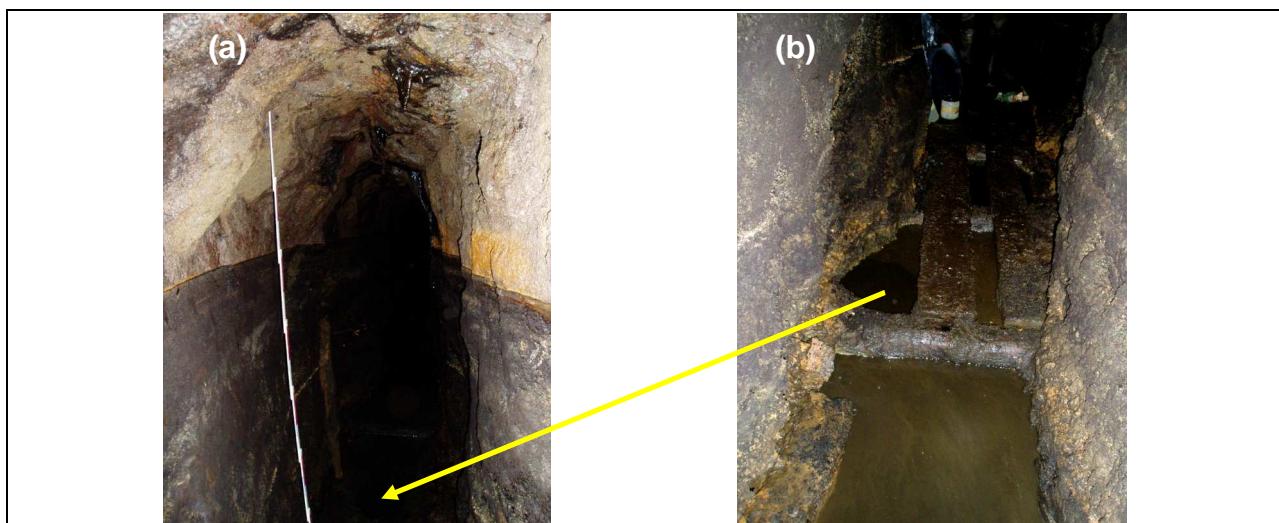


Abb. 17: Grubenwasser-Probenahmestelle W7. **a)** Probenahmestelle. **b)** Detailaufnahme der Holztragwerkreste.

W8: Stalagtit (Zufluss)

Unmittelbar am Kreuzungspunkt Jonas-Spat / Georgen-Stehender (bei der Jahrestafel „1800“) im Alten Tiefen Fürstenstolln wurde das Tropfwasser eines Stalagtiten, Probenahmestelle W8, analysiert (siehe Abb. 18).



Abb. 18: Zufluss-Probenahmestelle W8.

W9: Durchschnittsschacht (Zufluss)

Am Anfang des Kartiergebietes, wenige Meter vor der Jahrestafel „1799“ wurde das zufließende Wasser aus dem Durchschnittsschacht, Probenahmestelle W9, beprobt (siehe Abb. 19).



Abb. 19: Grubenwasser-Probenahmestelle W9.

W10: Grubenwasser Alter Tiefer Fürstenstolln auf dem Georgen-Stehenden

Die Probenahmestelle W10 befindet sich im Bereich der Jahrestafel „1799“, etwa einen Meter vor dem letzten beprobten Zufluss (W9, Durchschnittsschacht) am Anfang des Kartiergebietes (am Neuen Wehr) im Alten Tiefen Fürstenstolln auf dem Georgen-Stehenden (siehe Abb. 20).

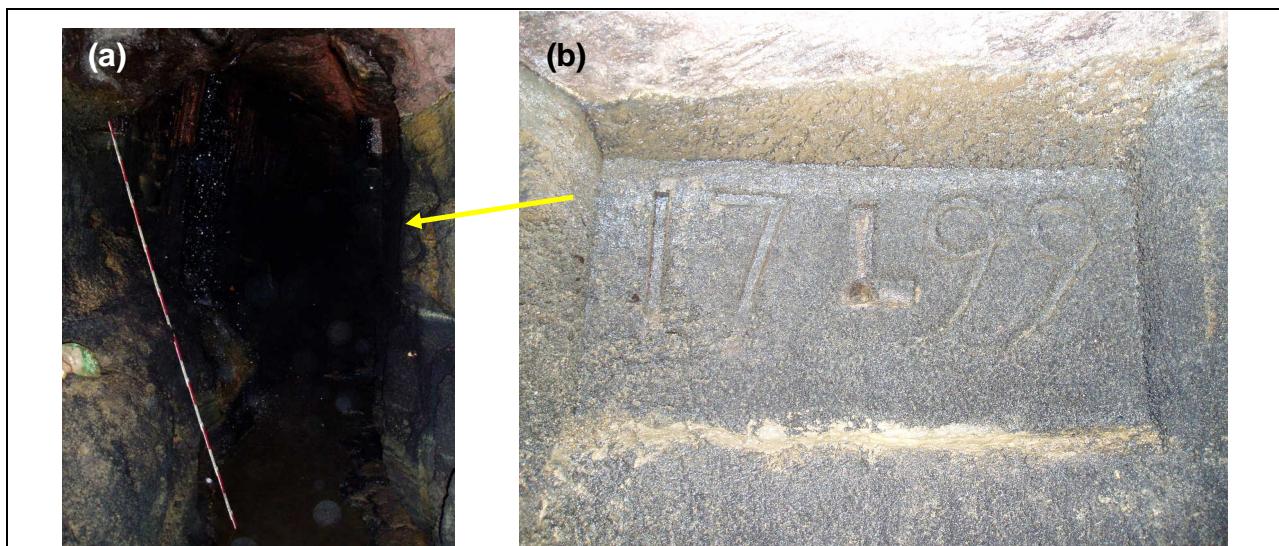


Abb. 20: Grubenwasser-Probenahmestelle W10. **a)** Probenahmestelle. **b)** Jahrestafel „1799“.

W11: Grubenwasser Alter Tiefer Fürstenstolln auf dem Georgen-Stehenden

Bei der Probenahmestelle W11 handelt es sich um einen Grubenwasseraustritt aus einem Rohr außerhalb des untersuchten Kartiergebietes im Alten Tiefen Fürstenstolln auf dem Georgen-Stehenden (wenige hundert Meter vom Bohrloch und Verspünden Steyer entfernt, siehe Abb. 21a). In der Nähe befindet sich eine schlecht erkennbare Jahrestafel („1886“?, siehe Abb. 21b).

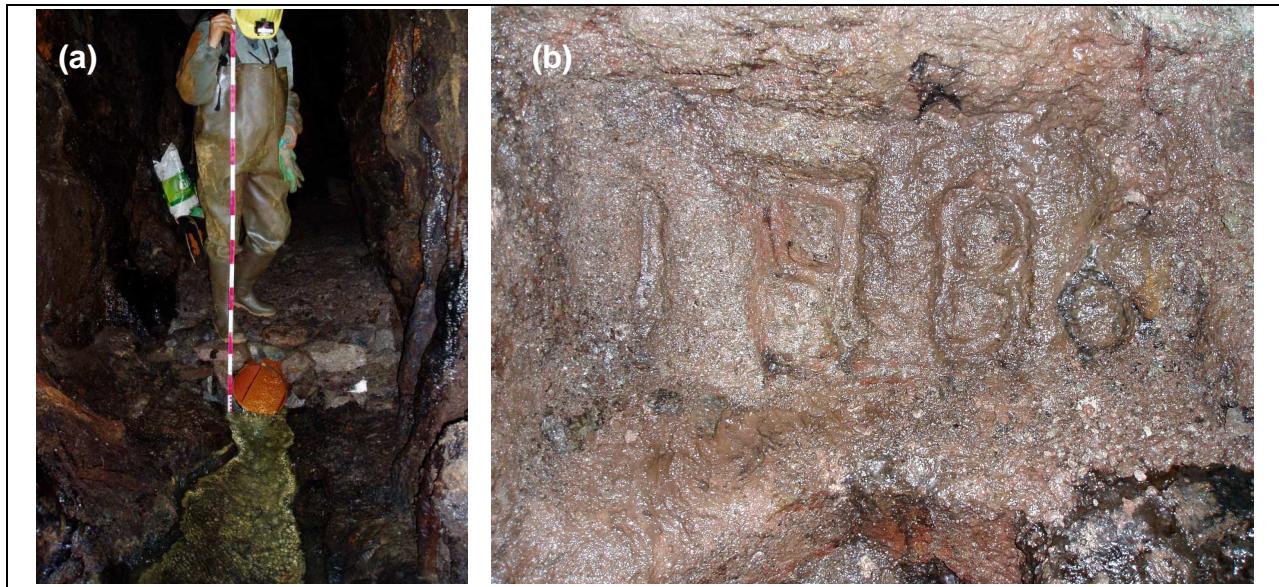


Abb. 21: Grubenwasser-Probenahmestelle W11. a) Probenahme am Rohr. b) Jahrestafel „1886“(?).

W12: Grubenwasser Alter Tiefer Fürstenstolln auf Georgen-Spat

Die Probenahmestelle W12 befindet sich außerhalb des untersuchten Kartiergebietes (einige hundert Meter vom Bohrloch und Verspünden Steyer entfernt). Dabei handelt es sich um ein Dreiecks-Messwehr im Alten Tiefen Fürstenstolln auf dem Georgen-Spat (siehe Abb. 22a und 22b).



Abb. 22: Grubenwasser-Probenahmestelle W12. a) Installiertes Dreiecks-Messwehr. b) Verbotsschild nahe der Probenahmestelle.

4.2.3 Grubensediment- und Stalagtitproben

Aufgrund der Stollengeometrie und dem zum Zeitpunkt der Kartierung teilweise noch vorhandenen alten Tragwerk hat sich der Randbereich an den Stollenstößen zu einer Senke entwickelt, wo sich aufgrund der geringeren Fließgeschwindigkeit des Grubenwassers Schwebstoffe absetzen können. Dieser randnahe, vermutlich unzertretene Sedimentbereich wurde beprobt. Testprobenahmen entlang des zu untersuchenden Stollenabschnitts haben ergeben, dass die Zusammensetzung des Grubensediments makroskopisch sehr variiert und u.a. von nahe gelegenen Zuflüssen abhängig ist. Daher wurden zwei Proben in Stollenabschnitten mit geringerer Grubenwasser-Fließgeschwindigkeit (Glück-Auf-Stehender und Füllort des Familienschachts) und folglich höherer Sedimentationsrate zur weiteren Untersuchung entnommen. Für die **Probenahme von Grubensediment** wurden die verwendeten PET-Rohre („Liner“, Länge ca. 50 cm, Durchmesser 5 cm) zunächst mit destilliertem und danach mit Grubenwasser gespült, um die Reibung an der Rohrwand zu minimieren. Anschließend erfolgte die Probenahme, indem die Rohre mittels Drehbewegungen senkrecht zur Schichtung in das Sediment hineingedrückt wurden. Die randvoll gefüllten Rohre wurden mit Sediment bzw. Grubenwasser künstlich luftdicht aufgefüllt und an beiden Enden mit passenden Kappen und Kreppband abgedichtet. Der Transport erfolgte so gut wie möglich in Oben-Unten-Lage, um interne Verwirbelungen zu reduzieren.

Der **Sedimentkern S₁** wurde in der Nähe des Glück-Auf-Stehenden (nahe des rechten Stoßes, siehe Abb. 23a bis 23c) entnommen, hat eine Gesamtlänge von 44 cm und einen Durchmesser von 5 cm.

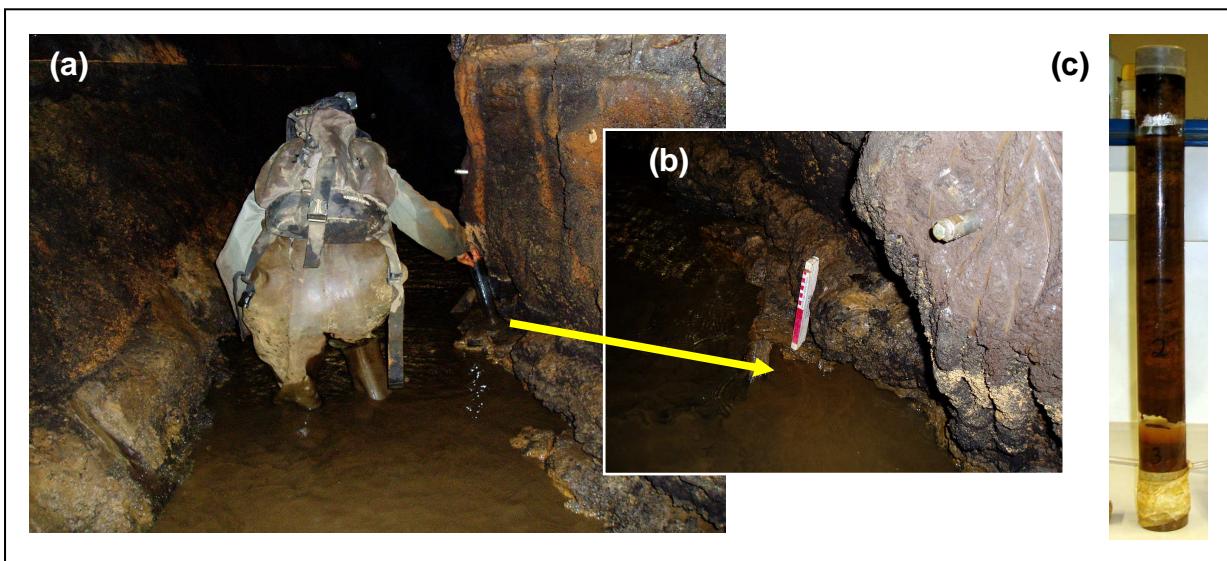


Abb. 23: Probenahme des Sedimentkerns S₁ (Blick entgegen Grubenwasserfließrichtung). **a)** Beim Abteufen des Kerns. **b)** Probenahmestelle (durch Pfeil markiert) nach dem Abteufen des Kerns. **c)** Entnommener Sedimentkern.

Der **Sedimentkern S₂** stammt aus dem Füllort des Familienschachts (nahe des rechten Stoßes, siehe Foto Abb. 24a bis 24c), hat eine Gesamtlänge von 36 cm und einen Durchmesser von 5 cm.

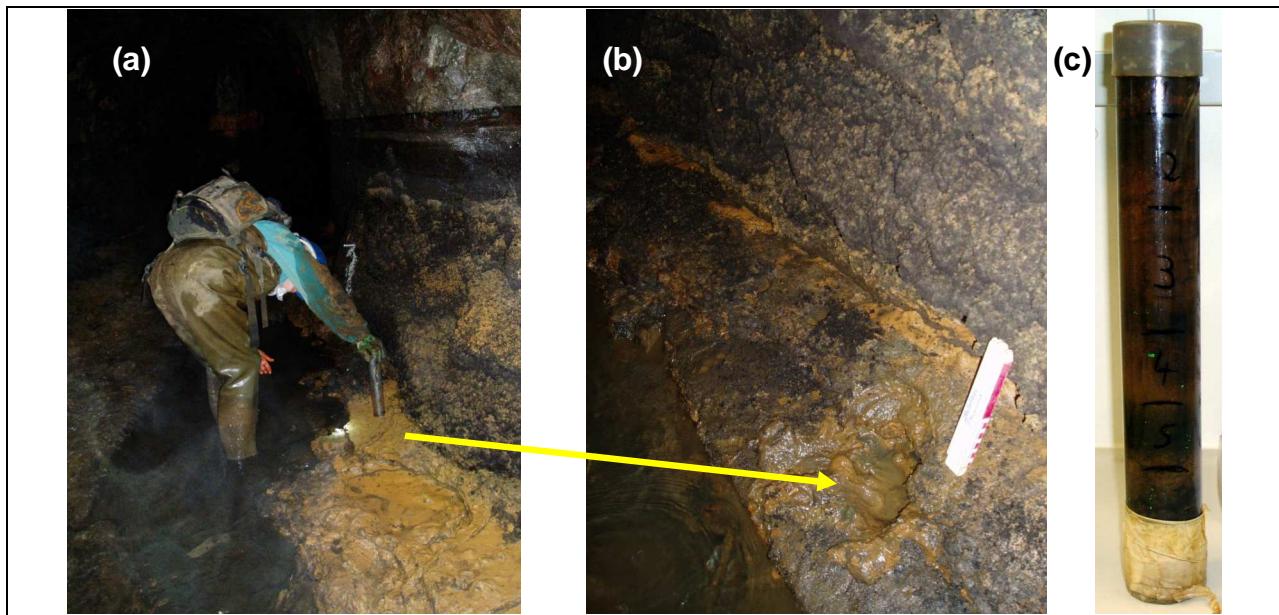


Abb. 24: Probenahme des **Sedimentkern S₂** (Blick entgegen Grubenwasserfließrichtung). **a)** Beim Abteufen des Kerns. **b)** Probenahmestelle (durch Pfeil markiert) nach dem Abteufen des Kerns. **c)** Entnommener Sedimentkern.

Der **Stalagtit S_s** wurde in der Nähe der Jahrestafel „1808“ (am linken Stollenstoß, siehe Abb. 25) beprobt. Das Material wurde in verschließbaren Folientüten transportiert und vor der weiteren Untersuchung bei Raumtemperatur getrocknet.



Abb. 25: Stalagtitprobe S_s (Sammelprobe).

Die Entnahme der Grubensedimentproben (S₁, S₂) und der Stalagtitprobe (S_s) erfolgte an den in der Karte Abb. 26 gekennzeichneten Stellen.

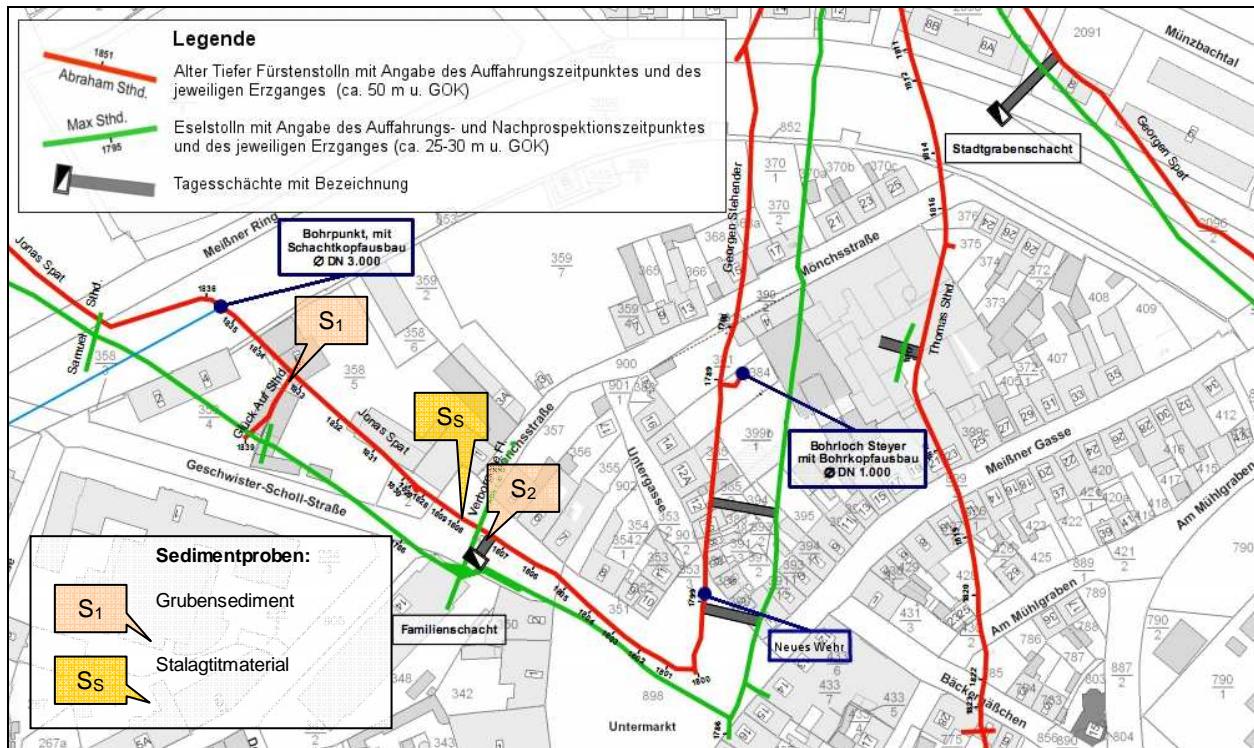


Abb. 26: Übersicht über die entnommenen Grubensediment- und Stalagmitproben im Alten Tiefen Fürstenstolln.

4.3 Vor-Ort-Analytik (KK)

Um Verfälschungen durch physikochemische Reaktionen (z.B. mit Sauerstoff, Kohlenstoffdioxid) zu vermeiden, wurden folgende physikalischen und chemischen Parameter des **Grubenwassers** und der **Zuflüsse** unmittelbar an der Probenahmestelle gemessen: Wassertemperatur (°C), pH-Wert (), Sauerstoffgehalt (mg/L) und Sauerstoffsättigung (%), Redoxpotenzial (mV), elektrische Leitfähigkeit ($\mu\text{S}/\text{cm}$) und Gesamtmineralisation (ppm). In den seltenen Fällen, in denen keine direkte Parameterbestimmung an der Austrittsstelle möglich war, wurden die Vor-Ort-Parameter in einem gespülten Schöpfgefäß gemessen. Des Weiteren erfolgte die organoleptische Prüfung der Wasserprobe. Die Messgeräte wurden vor jedem Gebrauch kalibriert, um die Messfehler zu reduzieren.

4.4 Laboranalytik (JD/KK)

4.4.1 Gesteinsproben (KK)

4.4.1.1 Makro- und mikroskopische Untersuchung

Nach der Reinigung mit Wasser und Lufttrocknung wurden die 52 Proben aus dem Bohrprofil mit Lupe und Auflichtmikroskop weiter untersucht.

4.4.1.2 Dichtebestimmung mit Pyknometer-Versuch

Zur Ermittlung der Dichte des Bohrmaterials wurden die 52 Bohrkleinproben bei 105 °C ofenge-trocknet. Nach der groben Zerkleinerung mittels eines Mörsers erfolgte die Feinzerkleinerung in einer Kaffeeschlagwerk-mühle. Anschließend wurde die Dichtebestimmung für die zur Messung ausgewählten Proben bei einer Zimmertemperatur von ca. 21 °C durchgeführt (Doppelbestim-mung):

1. Wägen des leeren Glaskolbens ($V = 10 \text{ ml}$ oder 50 ml) mit einer Halbmikrowaage $\rightarrow m_1$
2. Wägen von Kolben mit Probenmaterial $\rightarrow m_2$
3. Einfüllen von destilliertem Wasser in das Pyknometer, so dass die Probe gut mit Wasser bedeckt ist (siehe Abb. 27a).
4. Anhängen des Pyknometers an die Vakuumpumpe unter Vorschaltung einer Woulff-schen Flasche (siehe Abb. 27b); die Probe wird so lange evakuiert, bis keine Luftblasen mehr entweichen. Die Probe wird über Nacht stehen gelassen.
5. Vorsichtiges Auffüllen des Pyknometers mit destilliertem Wasser bis zur Eichmarke. Überflüssiges Wasser wird mittels Filterpapier durch den Kolbenhals abgesaugt.
6. Wägen des Pyknometers mit Probe und Wasser $\rightarrow m_3$
7. Entleeren des Pyknometers und erneutes Auffüllen mit destilliertem Wasser.
8. Wägen des Pyknometers mit Wasser $\rightarrow m_4$
9. Die Berechnung der Probendichte erfolgte durch folgende Formel:

$$\rho_{Pr} = \frac{(m_2 - m_1) \cdot \rho_{Fl}}{m_4 + (m_2 - m_1) - m_3} \quad \text{Gl. (1)}$$

mit: ρ_{Pr} = Probendichte (g/cm^3)

m_1 = Pyknometer, leer (g)

m_2 = Pyknometer, mit Probe (g)

m_3 = Pyknometer, mit Probe und Wasser (g)

m_4 = Pyknometer, mit Wasser (g)

ρ_{Fl} = Dichte des Wassers bei gemessener Temperatur (g/cm^3)

Da sich die Ergebnisse der Doppelbestimmungen z.T. recht stark unterschieden, wurde für jede Probe der Mittelwert der Doppelbestimmungen unter Angabe der Standardabweichung zur Auswertung verwendet.

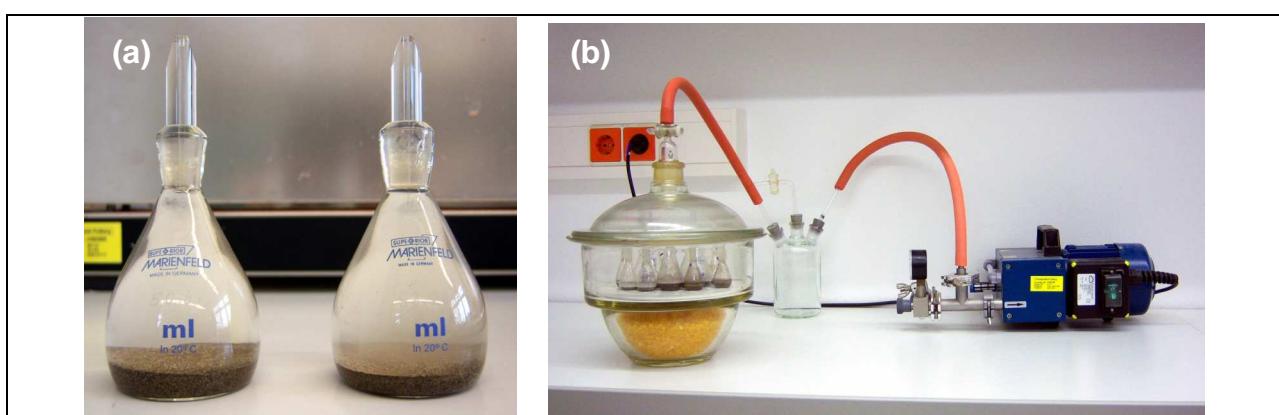


Abb. 27: Dichtebestimmung mittels Pyknometerversuch. **a)** Glaskolben (Pyknometer) mit Probe und des-tilliertem Wasser (Doppelbestimmung jeder Probe). **b)** Evakuierung der Proben mit einer Vakuumpumpe unter Vorschaltung einer Woulffschen Flasche.

4.4.2 Grubenwasser- und Zuflussproben

Weitere Analysen und Ergebnisse sind der Diplomarbeit von Kathrin Kranz zu entnehmen.

4.4.3 Grubensediment- und Stalagtitproben (JD/KK)

4.4.3.1 Entnahme und Ansprache des Grubensediments (KK)

Im Labor wurden die künstlich aufgefüllten Sediment- bzw. Grubenwasserschichten des **Grubensediments** vor der späteren Analyse entfernt. Das Aufsägen der Rohre erfolgte mit Rohrcuttern an vorher festgelegten Schichtgrenzen, die makroskopisch nach geologischen Gesichtspunkten – wie Farbe, Korngröße und Sortierung – ermittelt wurden. Nach der (soweit technisch möglich) horizontierten Einmessung und Entnahme in Bechergläser wurde das Sediment angesprochen.

4.4.3.2 Filtration des Grubensediments zur Porenwassergewinnung (KK)

Anschließend erfolgte schichtweise eine Stickstoff-Druckfiltration (Firma Toyo Roshi - Advantec MFS, Material Mixed Cellulose Ester, Porenweite 0,1 µm, Durchmesser 142 mm), nach der das filtrierte **Porenwasser** für die spätere Untersuchung verwendet wurde. Die Sediment- und Stalagtitproben wurden anschließend zur weiteren Untersuchung zu gleichen Teilen für die Lufttrocknung und Ofentrocknung (105 °C) aufbewahrt.

4.4.3.3 Komponentenanalyse mittels Rasterelektronen-Mikroskopie (JD)

Das Raster-Elektronenmikroskop (REM) wird vorrangig zur Darstellung von Oberflächen genutzt, aber auch die mineralogische Zusammensetzung kann anhand der emittierten Röntgenstrahlung ermittelt werden.

Der komplette Vorgang des Mikroskopierens findet im Hochvakuum statt, um Wechselwirkungen mit Atomen und Molekülen in der Luft zu vermeiden. Durch Erhitzen einer Wolfram-Glühkathode im Wehnelt-Zylinder (Kathode) werden Elektronen erzeugt, und zu einer gesättigten Elektronenwolke konzentriert bzw. fokussiert. Der so entstandene Primärelektronenstrahl wird durch eine angelegte Hochspannung (1-30 keV) zwischen Kathode und Anode beschleunigt und anschließend durch elektromagnetische Spulen (2 Kondensorlinsen, Objektivlinse) fein gebündelt, so dass er fokussiert auf das Objekt auftrifft. Mit Hilfe des XY-Ablenksystems tastet der Primärelektronenstrahl das Objekt Zeile für Zeile in einem Raster ab. Beim Auftreffen des Elektronenstrahls auf das Objekt werden nach Wechselwirkung u.a. RückstreuElektronen und Sekundärelektronen von der Probe emittiert (FLEGLER et al. 1993).

Durch das Auftreffen des Elektronenstrahls auf die Probe werden verschiedene Signale erzeugt, anhand derer mehrere Informationen abgeleitet werden können. Die energieärmeren Sekundärelektronen stammen von der Oberfläche (Meßpunktdurchschnitt ca. 10-15 nm) des Präparats (siehe Abb. 28) und sind Folge unelastischer Streuung. Sie ermöglichen ein hochauflösendes topographisches Bild des Materials mit Reliefkontrast und guter räumlicher Auflösung und Tiefenschärfe. Die energiereicheren RückstreuElektronen werden durch elastische Wechselwirkungen, bei der Primärelektronen an der Elektronenhülle der Objektatome abgelenkt werden, erzeugt. Sie entstehen in tieferen Schichten der Probe und erzeugen ein hochauflösendes Bild mit hoher Schärfentiefe. Die Plastizität der Objekte entsteht unter anderem dadurch, daß der Detektor schräg zum Objekt angeordnet ist. Bei dem Beschuß der Probe mit Elektronen

wird eine charakteristische Röntgenstrahlung emittiert, diese erlaubt Rückschlüsse auf den Chemismus des Materials mit einer Eindringtiefe von ca. 3µm.

Die rückgestrahlten Elektronen können an einem zusätzlichen, großflächigen Detektor (**BSE** = back scattered electron detector) eingefangen werden. Die Anzahl der Rückstrahlelektronen ist ein Maß für die Dichte des Objekts: Je dichter die Materie, um so höher die Anzahl der rückgestreuten Elektronen.

Neben Sekundär- und RückstreuElektronen entstehen auch Röntgenstrahlen. Diese können durch einen **EDX** (= energiedispersive Röntgenanalyse) Detektor erfaßt werden. Die stoffliche Zusammensetzung eines Objekts lässt sich durch diese Methode ermitteln, da jedes Element ein charakteristisches Röntgenspektrum aussendet.

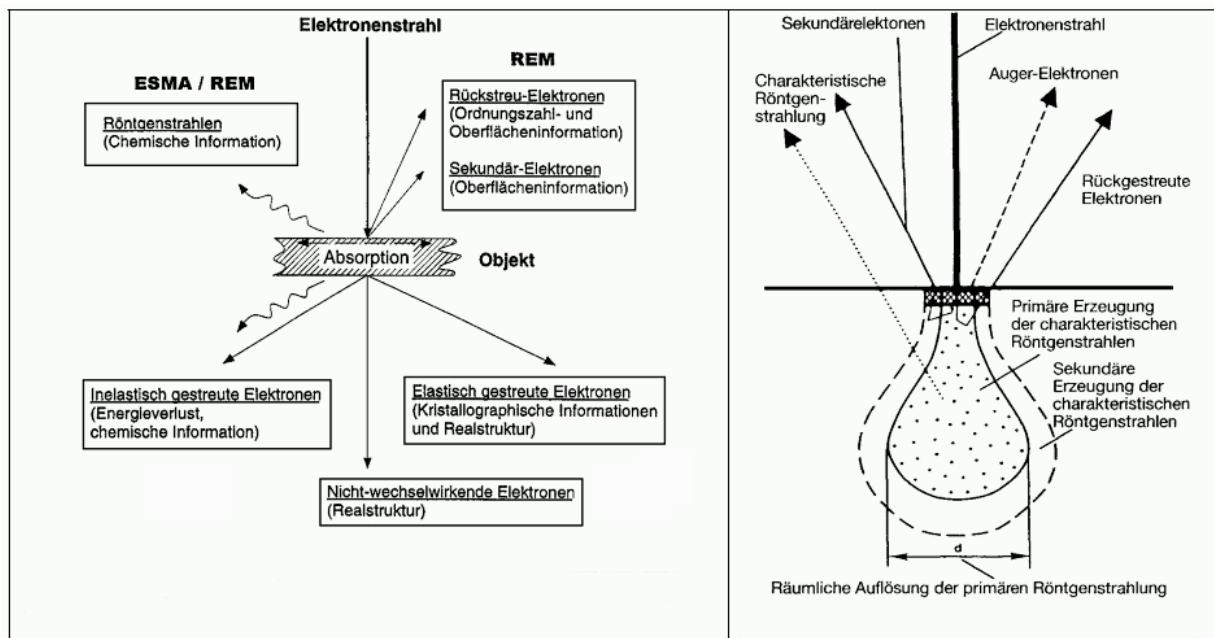


Abb. 28: Grundlagen der Rasterelektronen-Mikroskopie. **a)** Schematische Darstellung der Wechselwirkungsprozesse zwischen Objekt und Elektronenstrahl in elektronenoptischen Geräten: REM-Rasterelektronen Mikroskop, ESMA-Elektronenstrahlmikroanalyse. **b)** RückstreuElektronen und Röntgenstrahlung. Aus: FLEGLER et al. (1993).

Für die Betrachtung eines Objekts im Raster-Elektronen-Mikroskop müssen zwei Grundvoraussetzungen erfüllt sein, die bestimmte **Präparationsverfahren** voraussetzen: Die Probe muss a) trocken und z. T. fixiert und b) gut leitfähig sein. Zur Erfüllung dieser Bedingungen wurde das Sedimentmaterial aus den Kernen des Alten Tiefen Fürstenstollns bei 105°C getrocknet. Bei isolierenden Objekten kommt es unter Beschuss von Elektronen zu Aufladungen, die zu Bildverzerrungen führen. Aus diesem Grund wird die Oberfläche nach Auftragen des Materials auf den Probenträger mit einem dünnen leitfähigen Film überzogen. Dies wird durch "Besputtern" bewerkstelligt, d.h. durch Aufbringung einer sehr dünnen (2 bis 20 nm) Metallschicht (Au, Pd, Cr, o. Ä.) mittels Kathodenersteräubung in einer Glimmentladung.

5 Ergebnisse (JD/KK)

5.1 Kartiergebiet und Stollengeometrie

Das Kartiergebiet umfasst einen ca. 250 m langen Abschnitt des Alten Tiefen Fürstenstollns im Bereich zwischen dem Neuen Bohrloch (nahe der Stadtmauer am Meißner Ring, Ecke Geschwister-Scholl-Straße) und dem Neuen Wehr (ca. 50 m südlich des Bohrlochs Steyer, Gerberpassage) in Freiberg (siehe Abb. 29 und Abb. 30). Dabei handelt es sich um den für die geothermische Grubenwassernutzung anzustauenden Stollenbereich.

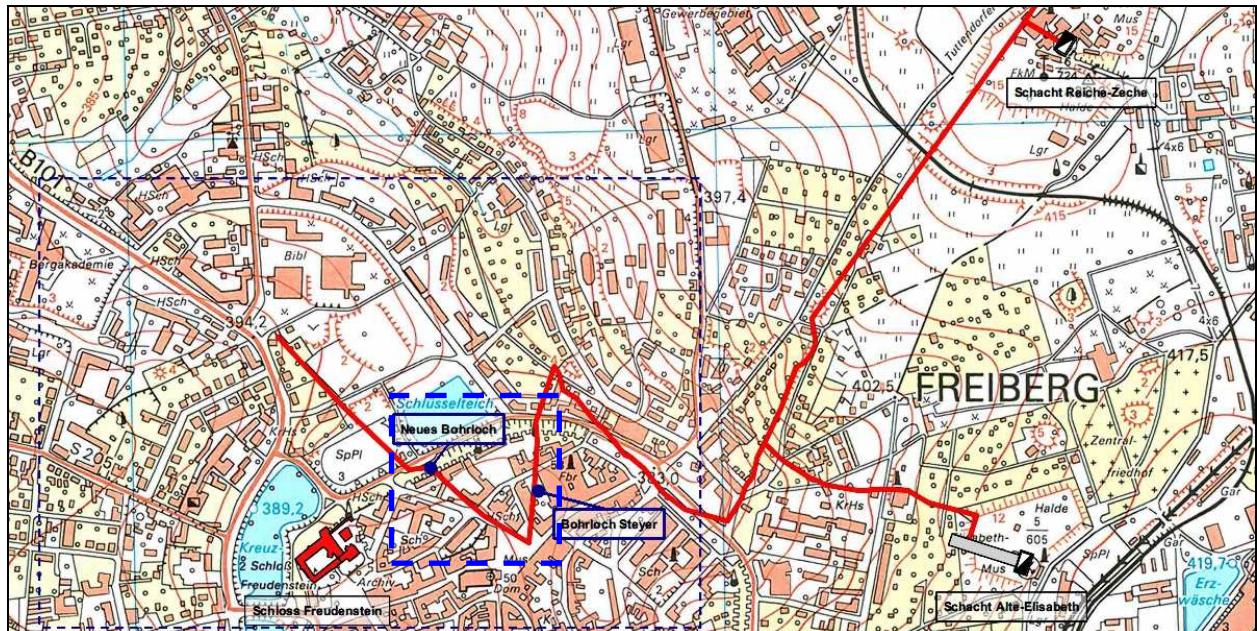


Abb. 29: Verlauf des Alten Tiefen Fürstenstollns in Freiberg. Das Kartiergebiet ist blau gestrichelt und in Abb. 30 detaillierter dargestellt.

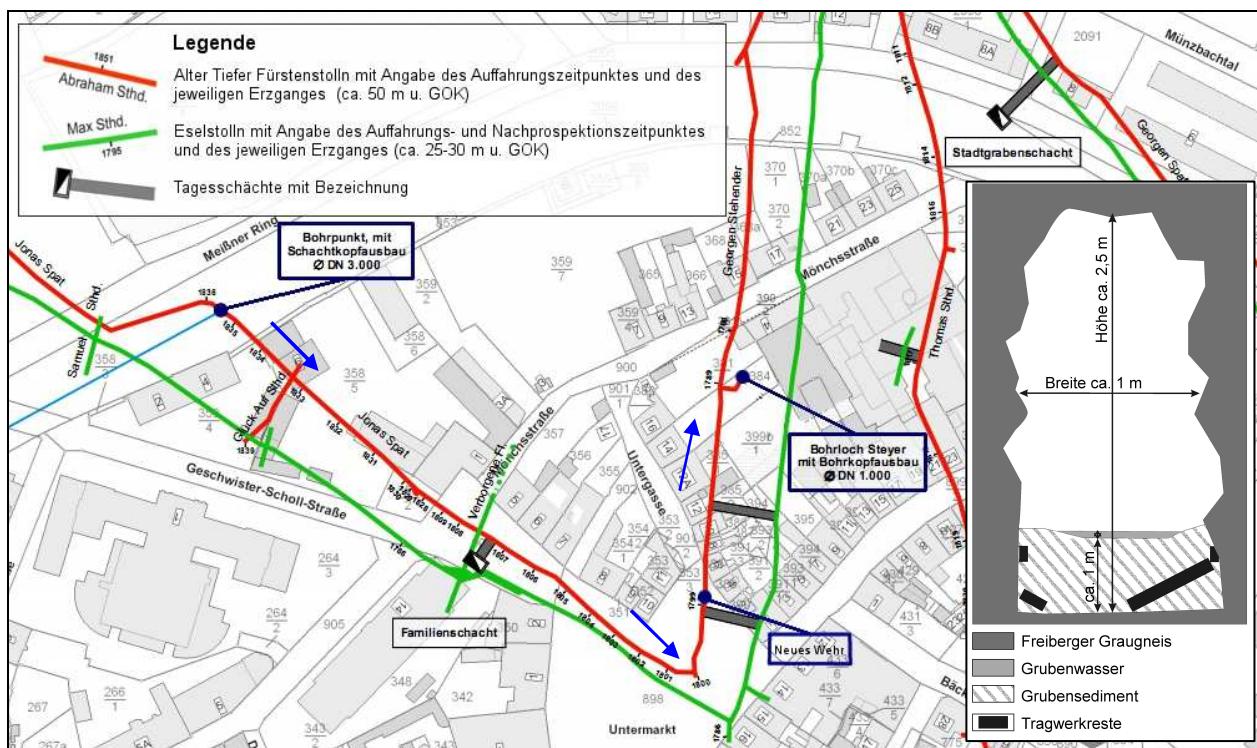


Abb. 30: Kartiergebiet im Alten Tiefen Fürstenstollen zwischen dem Geothermiebohrloch und dem neuen Wehr mit einer Skizze zum Stollenquerschnitt.

Infolge der jahrelangen Wasseranstauung im Kartierabschnitt (siehe Kapitel 3.2) war die ehemalige Einstauhöhe - sichtbar durch Mangan- und Eisenablagerungen an den Stößen (vgl. Abb. 13a) – immer noch sehr gut erkennbar und wurde zur Ermittlung des **Fließgefälles**, welches rund 3° beträgt, an markanten Stellen gemessen (siehe Anlage I). Die ehemalige Einstauhöhe schwankte etwa zwischen 1,50 m und 1,90 m.

Die für die **Einstauvolumen**-Berechnung durchgeführten Stollengeometriemessungen (siehe Anlage I) ergaben eine mittlere Stollenbreite von 1 m und eine durchschnittlichen Gesamthöhe von 2,40 m. Auf der Sohle befinden sich im Durchschnitt ca. 0,40 m Schlamm und darauf eine Schicht von 0,10 m Wasser (siehe Skizze Abb. 30 und Anlage II). Der Gesamtquerschnitt der Strecke liegt bei durchschnittlich 2,2 m². Anhand der Querschnitte und der zuzuordnenden Segmentlängen wurde das Gesamteinstauvolumen des Stollens von ca. 570 m³ berechnet.

5.2 Geologie

5.2.1 Allgemeines

Der vom Alten Tiefen Fürstenstolln durchörterte Gebirgsverband wird aus metamorphen Festgesteinen (Freiberger Normalgneis) aufgebaut, welcher stellenweise aufgrund verschiedener geologischer Prozesse (v.a. tektonische Überprägung, Kluftbildung, chemische Verwitterung der Erzminerale, Oberflächenverwitterung) sowie durch bergmännische Auffahrungen in seiner Festigkeit örtlich gemindert sein kann. Die im Erkundungsbereich anstehenden Gneise sind aus geotechnischer / gebirgsmechanischer Sicht als standsicher einzuschätzen. In den Strecken ist kein Ausbau vorhanden, und die abgebauten bzw. ausgeerzten Gangpartien speziell im Bereich des Durchschnittsschachts sind mit einer Gneisvermauerung und Stahlträgersicherung standsicher verbaut. Durch sprengtechnischen Auffahrung am Ende des 18. bis zur Mitte des 19. Jahrhunderts (BENTHIN 2008) ist das Nebengestein in seiner Festigkeit nicht wesentlich beeinträchtigt worden. Lediglich im Bereich des Füllorts des Familienschachts konnte eine erhöhte Klüftigkeit festgestellt werden, was auch zum Teil durch Störungen bedingt ist. Ausbrüche von Gestein oder Teilverbrüche des Stollens konnten nicht festgestellt werden.

Trotz der Nähe zu zahlreichen Erzgängen der Blei- und Silberformation (siehe Abb. 32) ist der

Gneis im Stollen sehr monoton ausgebildet. Es wurden keinerlei Xenolithe oder Einlagerungen festgestellt. Da ein großer Teil der Stöße von Mineralausfällungen und Versinterungen bedeckt ist, konnte das Gneisgefüge zumeist nur an frisch abgeschlagenem Gestein oder dem frisch abgeteuften Bohrloch bestimmt werden: In diesem Bereich ist der Gneis mittelkörnig, und weist neben einem weitflasrigen Gefüge auch oft eine Augenstruktur auf (siehe Abb. 31).



Abb. 31: Bohrloch der neuen Geothermiebohrung am Meißner Ring.

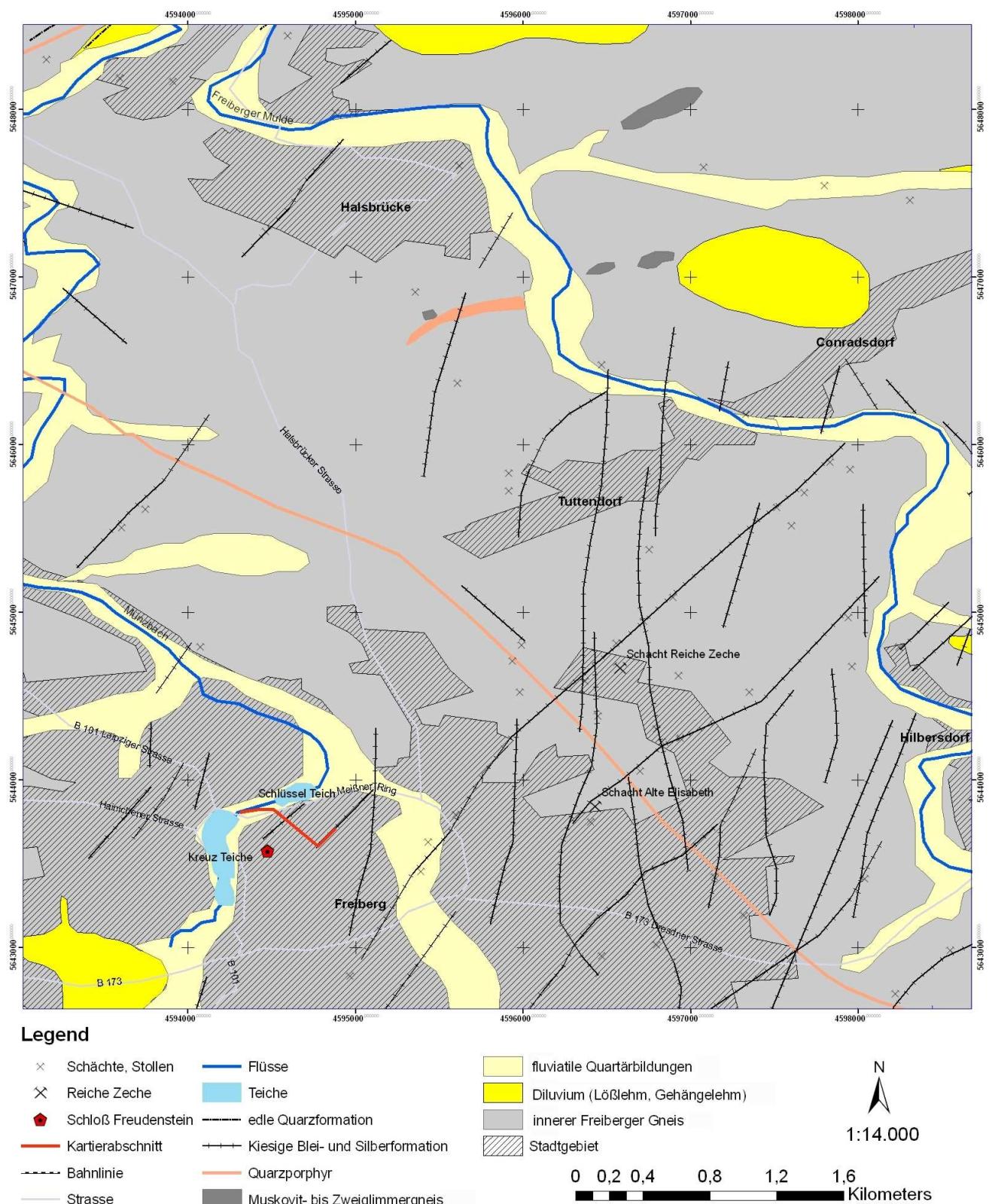


Abb. 32: Geologische Karte des Lagerstättenbezirks Freiberg. Erstellt nach: CREDNER (1887).

5.2.2 Schichtenverzeichnis

Da beim Imlochhammerbohren (Bohrung mit Spülung ohne Kerngewinn), welches beim Abteufen der Geothermiebohrung angewendet wurde, das anfallende Bohrklein (cuttings) mit der Bohrspülung aus dem Bohrloch ausgetragen wird, sind zur lithologischen Beschreibung des Bohrkleins genaue Bohrdaten, wie z.B. Bohrfortschritt und Meißeldruck, oder auch geophysikalische Bohrlochmessungen und Angaben zur Farbänderung der Bohrspülung notwendig. Diese Daten lagen uns nicht vor. Zur Beschreibung des Bohrkleins (siehe Foto Abb. 8) wurden daher makroskopische, mikroskopische und Dichteuntersuchungen durchgeführt, welche im Schichtenverzeichnis Tab. 5 aufgeführt sind. In Abb. 33 und Anlage III sind die Ergebnisse des Pyknometerversuchs (siehe Kapitel 4.4.1.2) dargestellt.

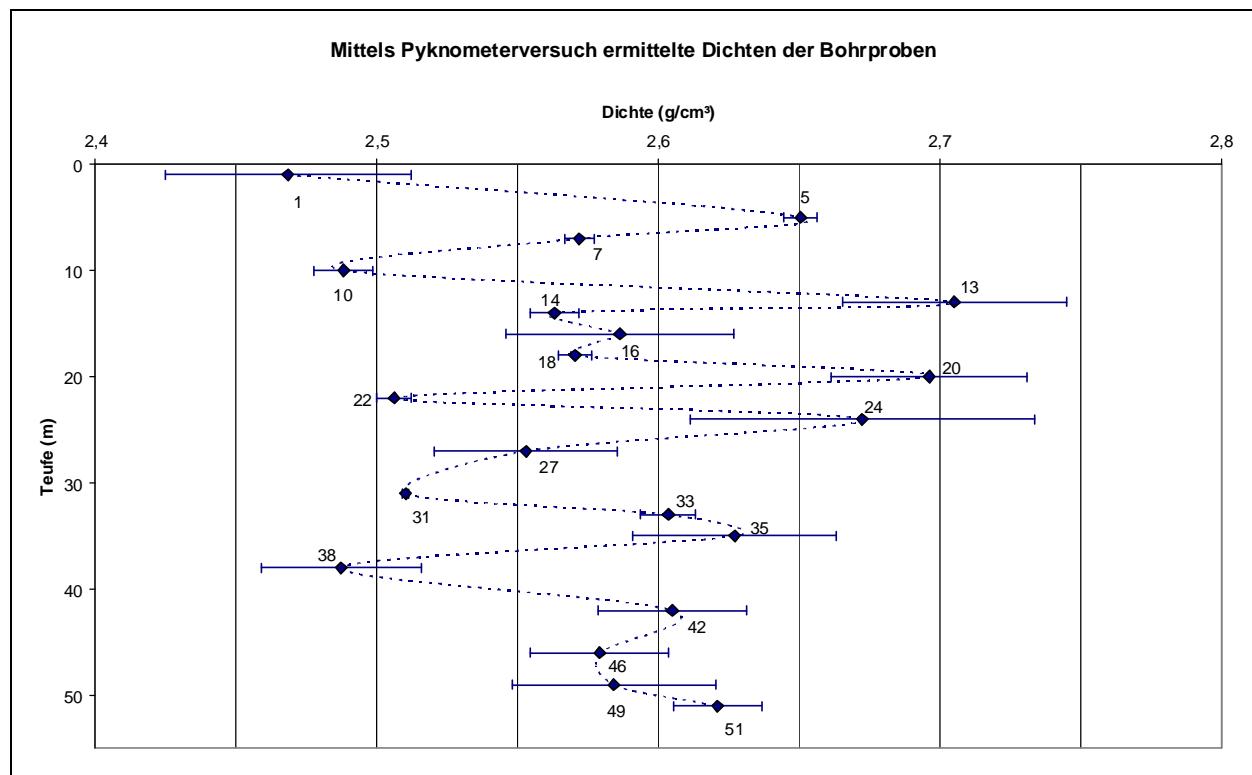


Abb. 33: Mittels Pyknometerversuch ermittelten Dichten der Bohrproben aus der neuen Geothermiebohrung am Meißner Ring.

Die Ergebnisse stimmten recht gut mit denen der mikroskopischen Untersuchung überein: Der durchwurzelte *Mutterboden* (ca. 0,0-0,4 m) und die teilweise ebenfalls durchwurzelte *Auffüllung* (ca. 0,4-4 m) weisen die geringste Dichte mit einer großen Schwankungsbreite auf, welche durch die Inhomogenität des Materials (u.a. Schlacke, siehe Abb. 34a) bedingt ist. Aufgrund der Nähe zur historischen Freiberger Stadtmauer (vgl. Abb. 9) liegt die Schlussfolgerung nahe, dass es sich hierbei um Bauschutt- und/oder Teichauhubmaterial handeln könnte. Die Proben der Bohrmeter 4-12 m wiesen entfärbte Biotite und weiche Plagioklase auf, und wurden als *lehmig-grusiger Gneiszersatz* mit stark schwankender Dichte angesprochen. Bei 6 m wurde Baryt gefunden (siehe Abb. 34b) und bei 8 m Grundwasser angetroffen. Eine *starke Verwitterung* wurde bei den Proben der Tiefe 13-19 festgestellt, die durch Eisenhydroxidkrusten auf den Kluftflächen gekennzeichnet sind. Als noch *deutlich verwittert* wurden die Proben der Bohrmeter 20-24 m beurteilt, was u.a. durch eine geringer werdende Größe des Bohrkleins bekräftigt wird. Die abgeteuften Proben 25-32 m sind durch einen *schwachen Verwitterungsgrad* charakterisiert und weisen größere, aber schlechter ritzbare Feldspäte auf. Bei den Proben der Bohrtiefen 33-40 m schwankt die ermittelte Dichte überwiegend etwas weniger stark (2,60-2,65 g cm⁻³), was auf eine *sehr schwache Verwitterung* hindeutet. In Abb. 34c ist eine Aufnahme von Glimmer dargestellt. Sehr *schwach verwittert bis unverwittert* sind die Proben von 41-46 m. Bei

41 m wurde Pyrit gefunden; möglicherweise wurde mit der Bohrung ein Erzgang getroffen. Die Dichte schwankt wenig um 2,60 g cm⁻³. Die Proben der Bohrteufe 47-52 m weisen Seidenglanz und eine hellgrünlichgraue Farbe auf und sind *unverwittert*. Bei 49 m wurde Pyrit, bei 51 m Calcit gefunden (siehe Abb. 34d und 34e). Die Dichtebestimmung für unverwitterten, anstehenden Graugneis bestätigt das Ergebnis einer Messung von KRANZ & DILLENARDT 2010 von 2,645 g cm⁻³. Zum direkten Vergleich ist in Abb. 34f jeweils ein Gneisbruchstück aus 12 m und 52 m gegeben.

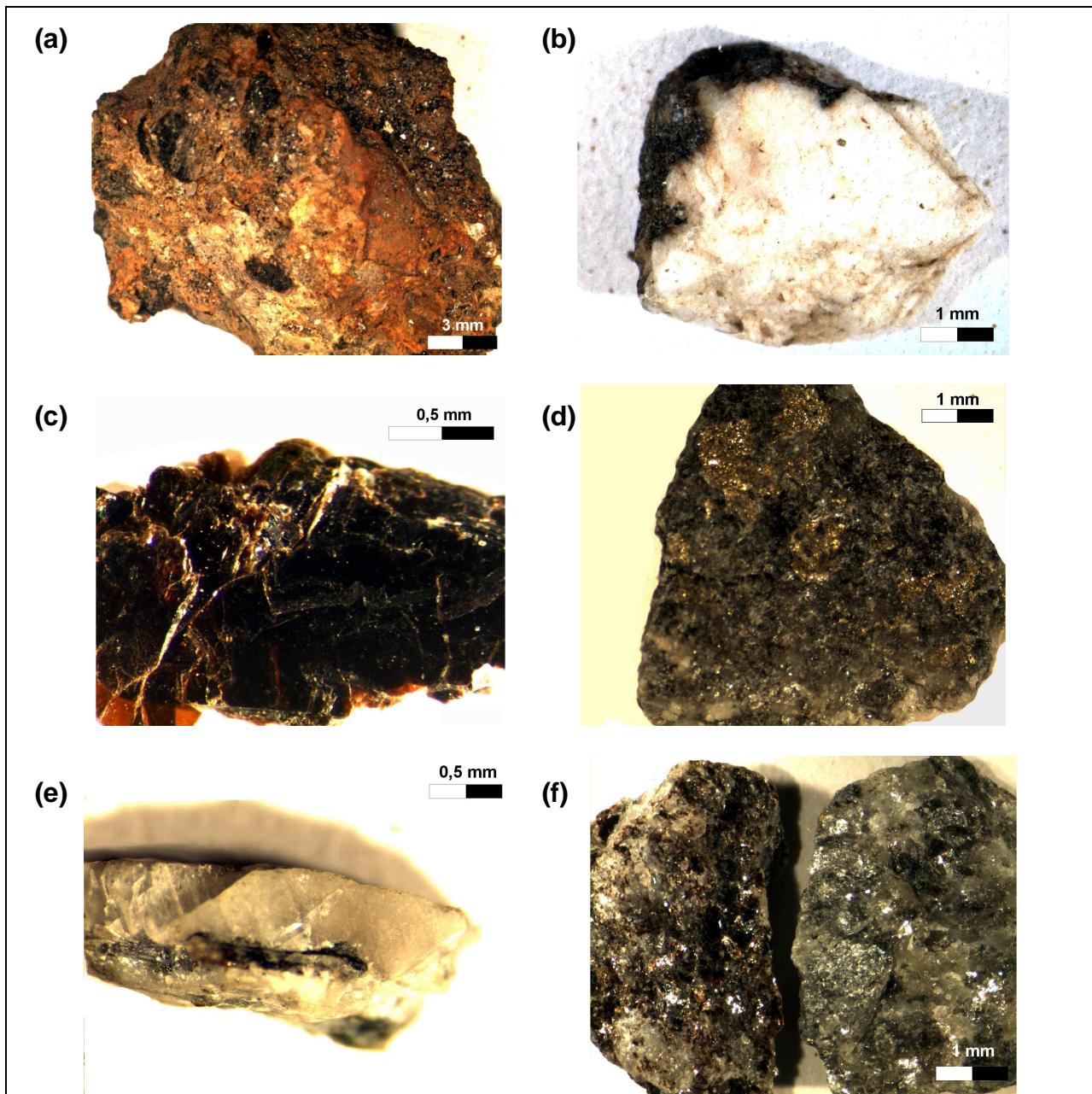


Abb. 34: Detailaufnahmen einzelner Bohrkleinproben. a) Schlacke (Bohrmeter 2)
b) Baryt (Bohrmeter 6). c) Glimmer (Bohrmeter 40) d) Pyrit (Bohrmeter 49) e) Calcit (Bohrmeter 51) f)
Gneisbruchstücke vom Bohrmeter 12 (links) und 52 (rechts) im Vergleich.

Tab. 5: Schichtenverzeichnis der 52 Bohrkleinproben von der Geothermiebohrung (1-52 m).

Teufe (m unter GOK)	Bezeichnung	Beschreibung	Mineralbestand	Bemerkungen
1	Mutterboden (ca. 0,0-0,4 m) auf Auffüllung (ab ca. 0,4 m)	Mutterboden humos, durchwurzelt, mittel- bis schwarzbraun; Auffüllung (Bauschutt, Teichhaushub?), sandig-lehmig, graubraun bis orangebraun, sandig-lehmiger Boden (Braunerde) mit lehmigem Gneiszersatz (Grus); bis handstückgroße, stark verwitterte glimmerreiche Gneis-Bruchstücke, rötlichgrau bis graubraun; kantengerundete, massive bis sehr brüchige Quarzitbruchstücke	hoher Anteil an losen, kanten- bis gut gerundeten milchigweißen bis durchsichtigen Quarzkörnern; hoher Anteil an braunen Biotitplättchen; Feldspäte gelblichweiß und mit Fingernagel ritzbar; Eisenhydroxidkrusten auf Gneisbruchstücken (bis 3,5 cm Länge) und Glimmerplättchen	Ziegelsteinreste und z.T. vollständige Ziegelsteine, Glasscherben, Wurzeln, Kugellagerkugeln (2 mm) Gesteinsdichte 2,47 ± 0,04 g/cm³
2	Auffüllung	dunkelbraun, Feinkornanteil überwiegend schluffig	wie bei 1 m, außerdem Schieferbruchstücke (bis 1,5 cm)	Ziegel-, Wurzel-, Moos-, Holz- und Eierschalenreste, Kugellagerkugeln (2 mm)
3	Auffüllung	dunkelockerbraun, stark lehmig aggregiert	kantengerundete Quarzkörner, alle Bestandteile stark mit Glimmerplättchen bedeckt	wenig Ziegelreste
4	lehmig-grusiger Gneiszersatz	ockerbraun, stark lehmig aggregiert, hoher Feinkornanteil (Ton bis Feinsand)	v.a. Hellglimmer	
5	lehmig-grusiger Gneiszersatz	hellbraun mit goldenem Schimmer, krümelig, z.T. lehmig aggregiert, v.a. Fein- bis Grobsand	hoher Anteil an ungerundeten Quarzkörnern, v.a. Hellglimmer	Gesteinsdichte 2,65 ± 0,01 g/cm³
6	lehmig-grusiger Gneiszersatz	hellbraun mit goldenem Schimmer, wie bei 5 m	wie bei 5 m, Barytkörper	
7	lehmig-grusiger Gneiszersatz	hellbraun mit goldenem Schimmer, wie 5, z.T. Gneisbruchstücke bis 1,5 cm	Quarzkörner bis 2 mm, v.a. Dunkelglimmer	Gesteinsdichte 2,57 ± 0,01 g/cm³
8	lehmig-grusiger Gneiszersatz	hellbraun, krümelig, Fein- bis Grobsand, Lehmaggregate bis 1,5 cm		Grundwasser
9	lehmig-grusiger Gneiszersatz	hellbraun, schlechter sortiert, höherer Anteil an Gesteinsbruchstücken (bis 2,5 cm)	v.a. Dunkelglimmer	
10	lehmig-grusiger Gneiszersatz	hellockerbraun, gut sortiert, v.a. Grobsand bis Feinkies, Lehmaggregate bis 0,5 cm, Gesteinsbruchstücke bis 1,0 cm	Quarzkörner bis 3 mm	Gesteinsdichte 2,49 ± 0,01 g/cm³
11	lehmig-grusiger Gneiszersatz	hellbraun, gut sortiert, ohne lehmige Aggregate, Gneisbruchstücke bis 0,5 cm		
12	lehmig-grusiger Gneiszersatz	hellbraun, Gneisbruchstücke bis 1,0 cm	Glimmerplättchen z.T. bis 4 mm	

Teufe (m unter GOK)	Bezeichnung	Beschreibung	Mineralbestand	Bemerkungen
13	stark verwitterter Gneis	dunkelgraue Gneisbruchstücke bis 1,5 cm, geringer Feinkornanteil (Fein- bis Mittelsand)	hoher Anteil an (Dunkel-)Glimmer, ab hier häufig ockerbraune Eisenhydroxidkrusten auf Kluftflächen, nur noch geringer Anteil an losen Quarzkörnern, Feldspat sehr gut bis gut ritzbar	Gesteinsdichte 2,71 ± 0,04 g/cm³
14	stark verwitterter Gneis	wie 13, etwas heller, etwas höherer Feinkornanteil (Fein- bis Mittelsand)	wie bei 13 m, mittlerer Glimmergehalt	Gesteinsdichte 2,56 ± 0,01 g/cm³
15	stark verwitterter Gneis	wie bei 14 m	wie bei 14 m, weniger Eisenhydroxidkrusten	
16	stark verwitterter Gneis	wie bei 14 m		Gesteinsdichte 2,59 ± 0,04 g/cm³
17	stark verwitterter Gneis		z.T. reine Quarzbruchstücke, ab hier kaum noch ockerbraune Eisenoxidbeläge auf Kluftflächen	
18	stark verwitterter Gneis	stark verwitterte plattierte Gneisbruchstücke bis 2,0 cm	z.T. reine Quarzbruchstücke, ab hier Feldspat mittel bis schlecht ritzbar	Gesteinsdichte 2,57 ± 0,01 g/cm³
19	stark verwitterter Gneis		z.T. reine Quarzbruchstücke, hoher Dunkelglimmergehalt	
20	deutlich verwitterter Gneis	sehr kleines Bohrklein!, ab hier zunehmender Feinkornanteil		Gesteinsdichte 2,70 ± 0,03 g/cm³
21	deutlich verwitterter Gneis	höherer Grobkornanteil		
22	deutlich verwitterter Gneis		ab hier höherer Dunkelglimmergehalt	Gesteinsdichte 2,51 ± 0,01 g/cm³
23	deutlich verwitterter Gneis	dunkler	z.T. größere Feldspatkristalle, ab hier steigender Feldspatgehalt	
24	deutlich verwitterter Gneis	dunkler	vereinzelt große Glimmerblättchen	Gesteinsdichte 2,67 ± 0,06 g/cm³
25	schwach verwitterter Gneis	sehr kleines Bohrklein		
26	schwach verwitterter Gneis	sehr kleines Bohrklein		
27	schwach verwitterter Gneis	sehr kleines Bohrklein		Gesteinsdichte 2,55 ± 0,03 g/cm³
28	schwach verwitterter Gneis	sehr kleines Bohrklein, rel. hoher Feinkornanteil	ab hier Feldspat schlecht bis nicht ritzbar	
29	schwach verwitterter Gneis	dunkler, ab hier kaum noch angewitterte Bruchstücke,	ab hier sinkender Feldspatgehalt und zunehmender Seiden- bis Perlmuttglanz	
30	schwach verwitterter Gneis	rel. hoher Feinkornanteil		
31	schwach verwitterter Gneis		hoher Glimmergehalt	Gesteinsdichte 2,51 ± 0,00 g/cm³
32	schwach verwitterter Gneis		hoher Glimmergehalt	
33	sehr schwach verwitterter Gneis	heller, leichter Hellgrünstich, Seidenglanz,	ab hier hoher Hellglimmergehalt	Gesteinsdichte 2,60 ± 0,01 g/cm³
34	sehr schwach verwitterter Gneis	heller, leichter Hellgrünstich, Seidenglanz		

Teufe (m unter GOK)	Bezeichnung	Beschreibung	Mineralbestand	Bemerkungen
35	sehr schwach verwitterter Gneis	helle und dunkle Gneis- bruchstücke, z.T. Seiden- glanz		Gesteinsdichte 2,63 $\pm 0,04 \text{ g/cm}^3$
36	sehr schwach verwitterter Gneis	höherer Grobkornanteil, helle und dunkle Gneis- bruchstücke		
37	sehr schwach verwitterter Gneis	geringerer Grobkornanteil, dunkler	Hell- und Dunkelglimmer	
38	sehr schwach verwitterter Gneis		ab hier überwiegend Dun- kelglimmer	Gesteinsdichte 2,49 $\pm 0,03 \text{ g/cm}^3$
39	sehr schwach verwitterter Gneis	ab hier dunkler, rel. hoher Feinkornanteil	Feldspatbruchstücke bis 5 mm,	
40	sehr schwach verwitterter Gneis		einzelne Glimmerblätt- chen rotbraun gefärbt, Feldspatbruchstücke bis 3 mm,	
41	sehr schwach bis unverwitterter Gneis	ab hier dunkler	Glimmerblättchen bis 3 mm, Pyritvorkommen (massig-dicht)	
42	sehr schwach bis unverwitterter Gneis		Pyritvorkommen (massig- dicht)	Gesteinsdichte 2,61 $\pm 0,03 \text{ g/cm}^3$
43	sehr schwach bis unverwitterter Gneis	an Kanten der Bruchstü- cke heller gefärbt, Quarz- bruchstücke bis 3 mm		
44	sehr schwach bis unverwitterter Gneis		ab hier sinkender Feld- spatgehalt	
45	sehr schwach bis unverwitterter Gneis		hoher Glimmergehalt, vereinzelt Glimmerblätt- chen bis 1 mm,	
46	sehr schwach bis unverwitterter Gneis		hoher Glimmergehalt	Gesteinsdichte 2,58 $\pm 0,02 \text{ g/cm}^3$
47	unverwitterter Gneis	ab hier deutlich heller, helle und dunkle Bruchstücke, , leichter Hellgrünstich, z.T. Sei- denglanz	nur noch geringerer Glim- mergehalt	
48	unverwitterter Gneis		ab hier kaum noch Dun- kelglimmer, helle und dunkle Bruchstücke	
49	unverwitterter Gneis	leichter Hellgrünstich	Pyritvorkommen	Gesteinsdichte 2,58 $\pm 0,04 \text{ g/cm}^3$
50	unverwitterter Gneis	ab hier Feinkornanteil nahezu Null, Gneis- bruchstücke mit leichtem Hellgrünstich		
51	unverwitterter Gneis		Calcitvorkommen	Gesteinsdichte 2,62 $\pm 0,02 \text{ g/cm}^3$
52	unverwitterter Gneis			Gesteinsdichte 2,645 g/cm^3

5.3 Tektonik

Das Gebirge im Untersuchungsgebiet wird von einem Netz tektonisch bedingter Erz- und Kluftsysteme durchsetzt. Im kartierten Stollenabschnitt sind sowohl Stöße als auch Firste stellenweise bis vollständig bedeckt durch mineralische Ablagerungen (durch ehemaligen Wasseranstau), Versinterungen und Stalagtite. Zur Erfassung des Trennflächengefüges wurde mit Hilfe eines Freiberger Geologenkompasses an gut zugänglichen Bereichen ein Datensatz mit über 200 Fall- und Streichwerten der Trennflächen von Klüften und Schieferung erstellt (siehe Anlage IV). Anhand dieser Daten und zusätzlich kartierten Wasseraustritten, welche an Kluft- und Störungen gebunden sind, wurde eine zusammenfassende Stollenkarte erstellt (siehe Anlage V). Die Werte wurden an deutlich erkennbare Flächen der Klüftung und der Schieferung jeweils mit mindestens drei Messungen aufgenommen. Zur genauen Lokalisierung der Messstellen wurden Jahrestafeln des Vortriebs sowie Referenzpunkte der letzten markscheiderischen Vermessung des Stollens verwendet. Die Schieferung und der Verlauf des Erzganges sind stereografisch in Schmidtschen Netzen dargestellt (Klüfte, Schieferungsgrosen, Polpunkttdarstellung, Großkreisdarstellung), welche mit dem Programm StereoNet (Version 1.2) erstellt wurden. Die Aufnahme der Trennflächen und der Sinter erfolgte in Kartierrichtung von SO nach NW.

Für die Stollenkartierung mussten die gemessenen Daten auf scheinbare Fallwinkel für rechte und linke Ulme umgerechnet werden (siehe Abb. 35). Dies erfolgte nach folgender geometrischen Beziehung:

$$\rho = \text{arc tan}[\tan(\delta) \cdot \sin(\alpha)] \quad \text{Gl. (2)}$$

mit: ρ - scheinbarer (reduzierter) Einfallwinkel
 δ - wahres Einfallen der Fläche
 α - Streichen der Fläche

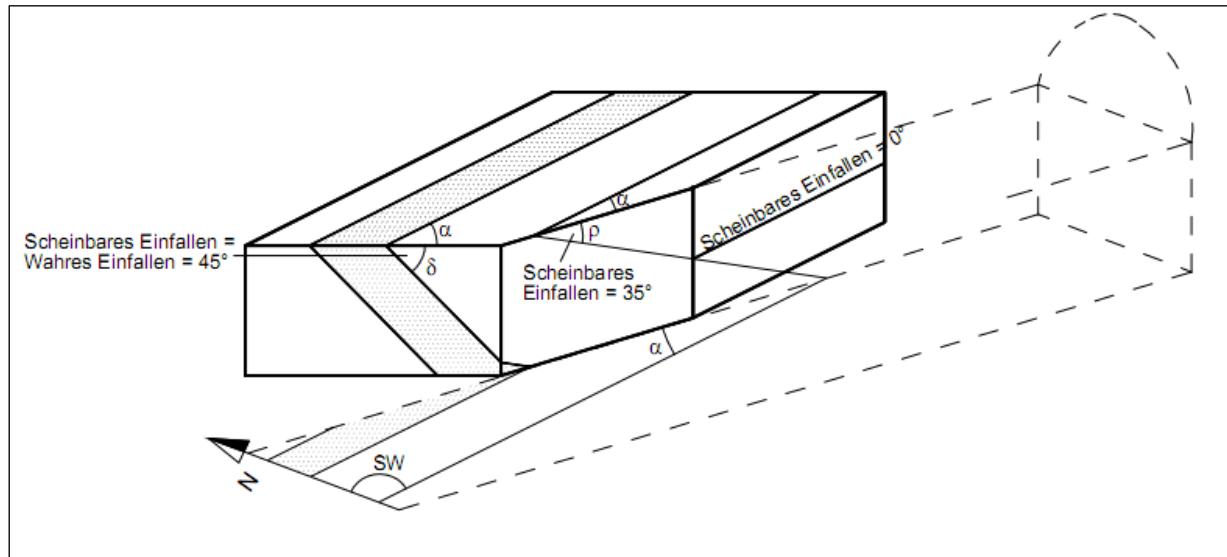


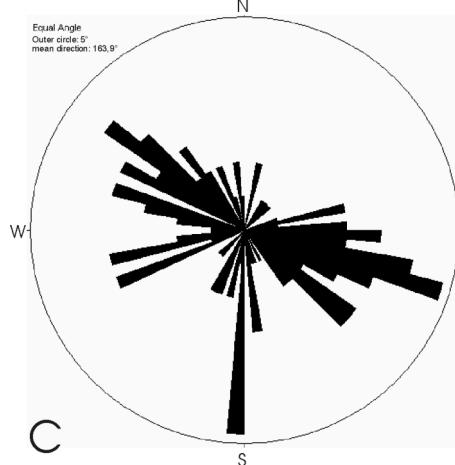
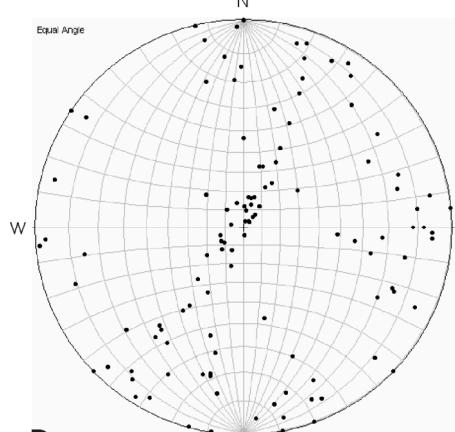
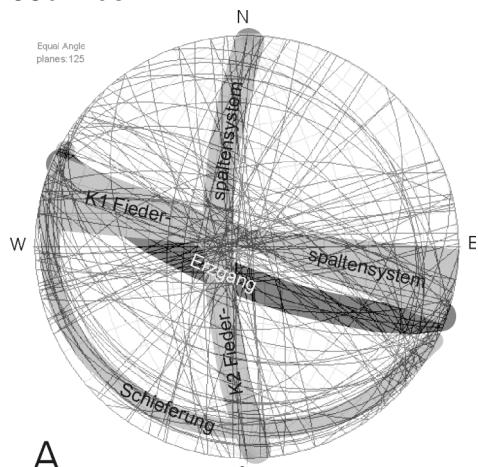
Abb. 35: Schematisches Beispiel zweier Flächen im Gebirge und deren Schnittwinkel in einem Stollen. Aus: Lehrmaterial Ingenieurgeologische Übungen II.

Der Alte Tiefe Fürstenstolln gehört zum Altbergbau und wurde überwiegend mit kleinem Gerät von SO nach NW vorangetrieben. Das heißt, der Stollen entspricht recht genau dem Verlauf des Erzganges der mit 300 bis 315° streicht und einen Fallwinkel von 75° - 90° zeigt. Das erzreiche Gestein hebt sich in zwei Metern Höhe in der Firste des Stollens deutlich vom tauben Gestein ab. Neben dem Erzgang sind auch auf Höhe des Glück-Auf-Stehenden quarzitisch und barytisch verheilte Störungen zu finden. Störungsverlauf und Störungsklüfte beeinträchtigen nur

gering das Nebengestein. Nur stellenweise lassen sich Zerrüttungsstreifen erkennen, und Störungs- und Ruschelzonen sind überwiegend verheilt.

In einem Winkel von 40- 90° zum Erzgang bildeten sich zwei Fiederspaltensysteme, hier mit K1 und K2 bezeichnet (Abb. 36a). Das K1-System entstammt dem Erzgang und streicht annähernd gleich mit sehr schwankenden Fallwinkeln. Das K2-System entspricht der für Freiberg typischen NNE-SSW verlaufenden Erzformation (BAUMANN 1958). Im Untersuchungsgebiet zeigte sich diese Formation in dem ca. 2 m mächtigen Erzgang des Glück-Auf-Stehenden.

Die Schieferung des Gneises ist sehr gut anhand der eingeregelten Glimmerplättchen auszumachen, streicht mit ca. 100-140° und fällt verhältnismäßig flach mit einem Winkel von 3° – max. 15° (Mittelwert: 11°) wechselnd nach Süden und nach Norden ein. Der Wechsel der Einfallrichtung spiegelt sich in einem bandartigen Verlauf der Polpunkte der Schieferflächen in Abb. 36b wider.



In der stereografischen Darstellung wirkt die Darstellung aller gemessenen Trennflächen auf den ersten Blick chaotisch. Bei genauerer Betrachtung sind jedoch Schieferung, sowie Fiederspaltensysteme als Verdichtungen der Großkreise gut zu erkennen (Abb 36a und 36b). In Abb. 36b ist der Verlauf der Schieferung als SSW – NNE verlaufendes Band zu erkennen.

In einheitlicher Betrachtung lässt sich feststellen, dass der Freiberger Normalgneis im Untersuchungsgebiet eine schwache bis deutliche, stellenweise in Verbindung mit Erzgängen auch stärkere Zerklüftung zeigt, sonst aber massiv ansteht. Nur vereinzelt sind Wasseraustritte direkt an Klüften/Störungen zu erkennen. An diesen Punkten bildeten sich auch vermehrt Sinter und Stalagrite aus. Über die gesamte Länge des Stollenabschnitts sind großflächige Verkrustungen aufgrund regelmäßiger Tropfwasseraustritte an der Firste und an den Stößen zu erkennen. Diese wurden, da sie einheitlich über das ganze Untersuchungsgebiet verteilt sind nicht extra in die Karte aufgenommen, sondern sind in einer Übersicht in Anlage VI dargestellt (vgl. Anlage II). Die versinterten Flächen sind meist entsprechend der mineralisierten Wässer rotbraun bis schwarzbraun gefärbt. Es lassen sich zwei Generationen von Sintern ausmachen, die sich meist gegenseitig überlagern (vgl. Abb. 25): Die 1. Generation ist oft verhärtet, aufgrund des oxidierten Mangans schwarzbraun bis schwarz gefärbt und teils trocken. Darüber oder oft auch in geringer Entfernung zu den älteren Sintern sind kleinere, meist hellbraun bis rötliche Sinter geringer Verfestigung und oft tropfend zu finden (Limonit, Hämatit). Ihre Verteilung ist deutlich an Kluftsysteme gebunden und tritt mit besonders groß ausgebildeten Sintern von bis zu 80 cm Breite und 1,5 m Höhe in Nähe des Erzganges und schneidender Störungen zum Vorschein. Des Weiteren kommen auch vereinzelte Calcitsinter vor.

Abb. 36: Darstellung der ermittelten Trennflächen des gesamten Untersuchungsgebietes im Schmidtschen Netz.

a) hellgrau: gemittelter Verlauf der drei Hauptkluffrichtungen K1, K2 und der Schieferungsflächen, dunkelgrau: Verlauf des Erzganges.

b) Polpunktadstallierung .

c) Rosendiagramm der Streichrichtungen.

5.4 Grubenwasser und Zuflüsse

5.4.1 Organoleptik

Im Gegensatz zu den physikalischen und chemischen Parametern sind die organoleptischen Parameter, d. h. die mit menschlichen Sinnen wahrnehmbaren Parameter, nur qualitativ beurteilbar. Bei der Analyse von Oberflächenwasser sind Intensität und Art der Färbung, Intensität der Trübung, Geruch und Geschmack der Wasserprobe zu berücksichtigen. Da der Geruch der beprobten Messstellen mit wenigen Ausnahmen neutral war, wurde auf die Bestimmung des sog. Geruchsschwellenwertes nach B 1/2 der Deutschen Einheitsverfahren (DEV) verzichtet. Weil zum Zeitpunkt der Probenahme eine Kontamination des Wassers durch toxische Fremdstoffe nicht ausgeschlossen werden konnte, wurde von der Prüfung des **Geschmacks** in den meisten Fällen abgesehen. Da die erhaltenen Prüfergebnisse nicht messbar sind, ist deren Vergleichbarkeit aufgrund der unterschiedlichen Sinneswahrnehmungen der Prüfer nicht gewährleistet. Trotzdem spielt die organoleptische Prüfung eine wesentliche Rolle als Indikator für die Wasserqualität, da z.B. viele Stoffe geruchsintensiv sind, jedoch mit Messgeräten nur unzureichend erfasst werden können.

Die meisten der untersuchten Wässer des Alten Tiefen Fürstenstollns und seiner Zuflüsse wiesen im Allgemeinen keine Besonderheiten hinsichtlich der Organoleptik auf: Sie waren ohne Färbung oder Trübung, klar und geruchlos sowie durch einen geringen Schwebanteil charakterisiert. Als Ausnahmen sind jedoch die Grubenwasser-Probenahmestellen W 1, W 4 und W 7 sowie die Zufluss-Probenahmestelle W 3 (Glück-Auf-Stehender) zu nennen, die eine hellgelbbraune bis leicht bräunliche Färbung aufwiesen. Bei W 1 und W 4 sowie dem zufließenden Wasser des Glück-Auf-Stehenden (W 3) war zudem eine geringe bräunliche bis milchig-braune Trübung zu erkennen. Das zufließende Wasser des Durchschnittsschachtes (W 9) war als einzige der beprobten Probenahmestellen durch einen metallischen Geruch und Geschmack gekennzeichnet.

5.4.2 Wassertemperatur

Da die Löslichkeit von Feststoffen und Gasen sowie die Geschwindigkeiten physikalischer und chemischer Reaktionen im Wasser stark von der Temperatur abhängen, ist die Wassertemperatur möglichst direkt vor Ort zu messen. Die Temperaturmessung war stets mit der Messung anderer Vor-Ort-Parameter verbunden und erfolgte mit Hilfe des Temperatursensors des Messgerätes MYRON L Ultrameter II™ (Model 6PII) von Myron L Company (Auflösung 0,1 °C; Genauigkeit 0,1 °C; Messbereich 0...71 °C).

Trotz der hohen Genauigkeit des Temperaturmessgerätes können die erhaltenen Werte nur begrenzt ausgewertet werden, da die Messungen zum einem in einem zu großen Zeitraum stattfanden, und zum anderen bei den Zuflüssen z.T. auch im Probenahmefäß erfolgen mussten. Die ermittelten Temperaturen sind in Anlage VII aufgeführt.

Die Temperatur des **Grubenwassers** schwankte im Messzeitraum bis auf eine Ausnahme (10,9 °C bei W 2) zwischen 10,3 °C und 10,4 °C und bestätigt somit die Ergebnisse der im Zeitraum 10/2005 bis 12/2006 durch BENTHIN et al. (2005) durchgeführten Temperaturmessungen (Messung am Messwehr unterhalb des ehemaligen Wehres Steyer) (BENTHIN et al. (2005)). Das Grubenwasser steht im Temperaturgleichgewicht mit der Grubenluft, deren Temperatur jahreszeitlich nur gering schwankt.

Eine Ursache für die überdurchschnittlich hohe Wassertemperatur von 10,9 °C bei W 2 könnte sein, dass der Durchfluss an dieser Probenahmestelle wegen zahlreicher Laufbohlen im Wasser/Sediment verringert war und sich das Wasser aufgrund der Körperwärme der Bearbeiter schneller erwärmte als an anderen Messstellen.

Die **Zuflüsse** wiesen Temperaturen von 10,7 °C (Glück-Auf-Stehender W 3 und Stalagtit-Tropfwasser W 8) und 11,2 °C (Durchschnittsschacht W 9) auf. Die Temperatur der beiden zuletzt genannten Probenahmestellen könnte allerdings etwas verfälscht sein, da die Messung im Probenahmefäß erfolgen musste.

Der Temperaturverlauf des Grubenwassers vom Alten Tiefen Fürstenstolln und seiner Zuflüsse ist in Abb. 37 dargestellt. Auf Grund der o.g. Ursachen kann – wie auch das Diagramm zeigt – keine eindeutige Abhängigkeit oder Beeinflussung der Grubenwassertemperatur von den Zuflüssen festgestellt werden. So lässt sich z.B. nach Zufluss des Wassers vom Durchschnittsschacht (W 9) nur eine sehr geringe Erhöhung der Grubenwassertemperatur bei der nachfolgenden Probenahmestellen W 10 erkennen.

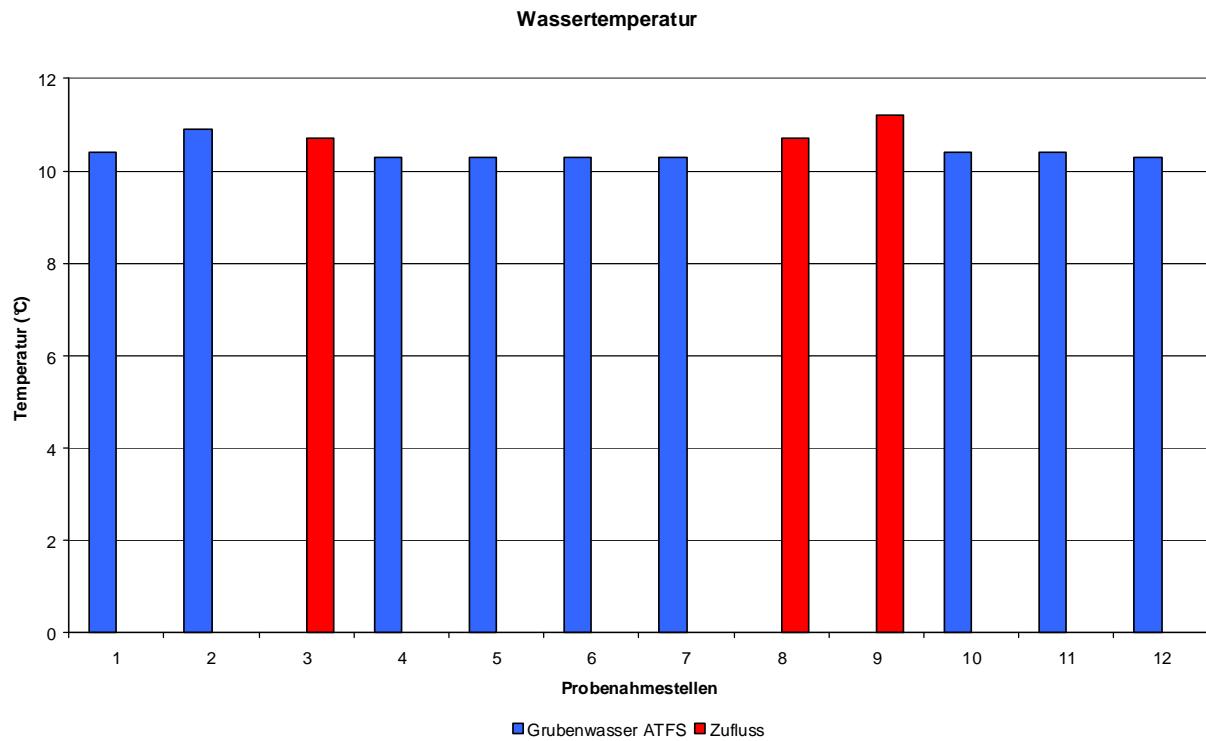


Abb. 37: Übersicht über die gemessenen Wassertemperaturen des Grubenwassers vom Alten Tiefen Fürstenstolln und seiner Zuflüsse. Darstellung in Fließrichtung des Grubenwassers (von links nach rechts).

5.4.3 pH-Wert

Durch den pH-Wert, einer der wichtigsten Vor-Ort-Parameter, können Aussagen über die Löslichkeit von Stoffen und damit einhergehend tendenziell auch über die Ionenkonzentration in Wässern getroffen werden. Der pH-Wert bestimmt die Löslichkeit und Ionenkonzentration vieler Stoffe; nur wenige Ionen (z.B. Na⁺, K⁺, NO₃⁻, Cl⁻) bleiben über den gesamten pH-Bereich in Lösung. So hängen z.B. die Löslichkeiten der meisten Metallionen vom pH-Wert ab, insbesondere die Ampholyte, also Elemente, die je nach Reaktionspartner sowohl als Säure als auch als Base reagieren können (v.a. Metalle wie Zn, Sn, Cr): Diese Verbindungen sind leicht löslich in saurem Milieu und fallen bei steigendem pH-Wert als Hydroxid bzw. Salz aus; bei weiterer Alkalisierung (pH → 9) gehen sie unter Bildung von basischen Komplexen wieder in Lösung (HÖLTING 1996). Über die Kenntnis des Einflusses des pH-Wertes auf die Löslichkeit von Stoffen können tendenzielle Aussagen über die Wasserqualität getroffen werden, weshalb die pH-Wert-Bestimmung ein wichtiger Bestandteil der Vor-Ort-Analytik ist.

Der pH-Wert steht im engen Zusammenhang mit der Temperatur, dem Redoxpotenzial sowie der elektrischen Leitfähigkeit (HÖLTING 1996). Im Allgemeinen besitzen Stollenwässer einen eher sauren pH-Wert, was auf die Sulfidverwitterung im Gebirge zurückzuführen ist. Die ermittelten pH-Werte sind in Anlage VII aufgeführt.

Im **Grubenwasser** liegen nahezu neutrale Verhältnisse vor; es wurde ein mittlerer pH-Wert von 7,1 (bei Berücksichtigung der pH-Werte der außerhalb des Kartierungsgebietes gelegenen zusätzlichen Probenahmestellen W 11 und W 12 ein mittlerer pH-Wert von 7,2) gemessen, wobei der minimale pH-Wert von 6,7 bei W 4 und der maximale pH-Wert von 7,5 bei W 1

festgestellt wurde. Somit ist der durchschnittliche pH-Wert etwas höher als der von BENTHIN et al. (2005) ermittelte pH-Wert von 6,6 (Messung am Messwehr unterhalb des ehemaligen Wehres Steyer) (BENTHIN et al. 2005).

Der pH-Wert der **Zuflüsse** betrug durchschnittlich 7,0. Das Wasser des Glück-Auf-Stehenden (W 3) besaß den kleinsten pH-Wert von 6,7 und das Tropfwasser des Stalagtiten (W 8) den größten pH-Wert von 7,3.

In Abb. 38 ist der Verlauf des pH-Wertes vom Grubenwasser des Alten Tiefen Fürstenstollns und seiner Zuflüsse dargestellt. Es zeigt sich eine Abnahme des pH-Wertes bei der Grubenwasser-Probenahmestelle W 2 um 0,5 Einheiten im Vergleich zu W 1, was möglicherweise durch saures Tropfwasser von Stalagtiten verursacht sein kann. Nach Zufluss des etwas saureren Wassers vom Glück-Auf-Stehenden (W 3) erniedrigt sich der pH-Wert des Grubenwassers bei W 4 weiter um 0,3 Einheiten. Aufgrund eines Defektes des Vor-Ort-Parameter-Messgerätes am letzten Tag der Kartierung sind für die Grubenwasser-Probenahmestellen W 5, 6, 7 und 10 leider keine pH-Werte vorhanden. Die Messstellen W 11 und 12 (außerhalb des Kartiergebietes) wiesen deutlich höhere pH-Werte auf als W 4; dies ist wahrscheinlich hauptsächlich auf das zufließende Wasser des Durchschnittsschachtes (W 9) zurückzuführen.

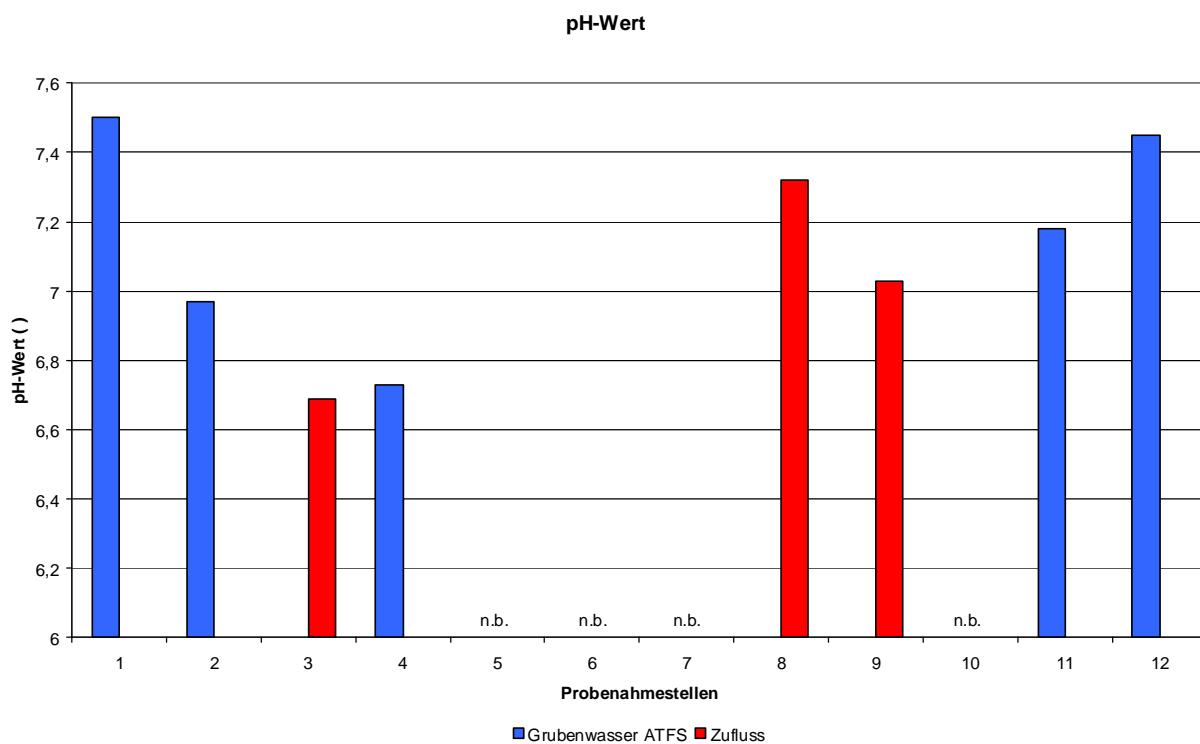


Abb. 38: Übersicht über die gemessenen pH-Werte des Grubenwassers vom Alten Tiefen Fürstenstolln und seiner Zuflüsse. Darstellung in Fließrichtung des Grubenwassers (von links nach rechts).

5.4.4 Sauerstoffgehalt und Sauerstoffsättigung

Das Redoxpotenzial wird maßgeblich vom Sauerstoffgehalt bestimmt. Anhand dessen kann das Oxidationsvermögen von Wässern bestimmt werden, einhergehend mit der Möglichkeit Aussagen über die damit verbundenen Lösungs- oder Fällungsprozesse von Wasserinhaltstoffen zu treffen. Dabei ist der Sauerstoffgehalt bestimmend für das reduzierende bzw. oxidierende Verhalten und für biochemische Prozesse in natürlichen Gewässern. Je höher er ist, desto besser ist die Wasserqualität. Der Sauerstoffgehalt (mg/L) sinkt mit Zunahme von Temperatur – daher ist stets auch die Temperatur zu protokollieren – bzw. Salzgehalt des Wassers und steigt mit Zunahme des Luftdruckes; i.d.R. schwankt er um den Wert von 10 mg/L. Die Sauerstoffsättigung (%) hingegen ist von diesen Einflussgrößen unabhängig; sie kann bei Fließgewässern mit hohen Strömungsgeschwindigkeiten in Folge des Lufteintrages auch Werte >100 % annehmen. Die Sauerstoffbilanz ergibt sich aus folgenden Prozessen:

- Zufuhr von Sauerstoff: Aufnahme aus Atmosphäre, Photosynthese, Vermischung mit Zuflüssen
- Verbrauch von Sauerstoff: biologische Oxidation (Atmung), Destruktion organischer Substanzen, Entgasung in Atmosphäre

Die ermittelten Sauerstoffwerte sind in Anlage VII aufgeführt. Während der Messung wurde sowohl der Sauerstoffgehalt als auch die Sauerstoffsättigung aufgenommen. In Abb. 39 ist ein Zusammenhang zwischen den beiden Messgrößen erkennbar. Jedoch kann es sich dabei nicht um eine direkte Proportionalität handeln, da der Sauerstoffgehalt von der Temperatur, dem Salzgehaltes sowie von dem Luftdruck abhängig ist und die Sauerstoffsättigung davon unbeeinflusst bleibt.

Im **Grubenwasser** des Alten Tiefen Fürstenstollns wurde eine mittlere Sauerstoffsättigung von 91,9 % und ein mittlerer Sauerstoffgehalt von 9,8 mg/L (bei Berücksichtigung der pH-Werte der außerhalb des Kartierungsgebietes gelegenen Probenahmestellen W 11 und W 12 mittlere Werte von 9,9 mg/L bzw. 92,4 %) gemessen, der deutlich höher ist als der von BENTHIN et al. (2005) ermittelte Sauerstoffgehalt von 4,2 mg/L (Messung am Messwehr unterhalb des ehemaligen Wehres Steyer) (BENTHIN et al. 2005). Die Werte schwanken dabei nur gering um das Minimum von 9,6 mg/L bzw. 91,2 % und das Maximum von 10,2 mg/L bzw. 94,5 %. Die letzte Grubenwassermessstelle W 10 besaß einen 0,4 mg/L höheren Sauerstoffgehalt und eine 3,2 % höhere Sauerstoffsättigung als die erste Messstelle W 1. Die Messung des Sauerstoffs ergab für die **Zuflüsse** mittlere Werte von 8,9 mg/L bzw. 84 %. Die Schwankungsbreite liegt dabei zwischen minimal 7,8 mg/L bzw. 73,5 % und maximal 9,9 mg/L bzw. 93,3 %.

In Abb. 39 ist der Verlauf der Sauerstoffwerte vom Grubenwasser des Alten Tiefen Fürstenstollns und seiner Zuflüsse dargestellt. Durch das relativ niedrige Gefälle des Alten Tiefen Fürstenstollns sind auch bei Bewetterung keine größeren Austauschprozesse zwischen Luft und Wasser zu erwarten. Turbulenzen und verwirbelte Strömungen, die eine in Richtung Sättigung strebende Sauerstoffkonzentrationsänderung bedingen, treten somit primär beim Zufluss größerer Wassermengen auf, wie es auch nach Zufluss des Wassers vom Durchschnittsschacht (W 9) der Fall ist: Nach dessen Zufluss erhöhen sich bei W 10 die Sauerstoffwerte um 0,6 mg/L bzw. 3 % im Vergleich zu W 7. Allgemein ist die Wasserbeschaffenheit hinsichtlich der Sauerstoffwerte als sehr gut einzuschätzen.

Sauerstoffgehalt und Sauerstoffsättigung

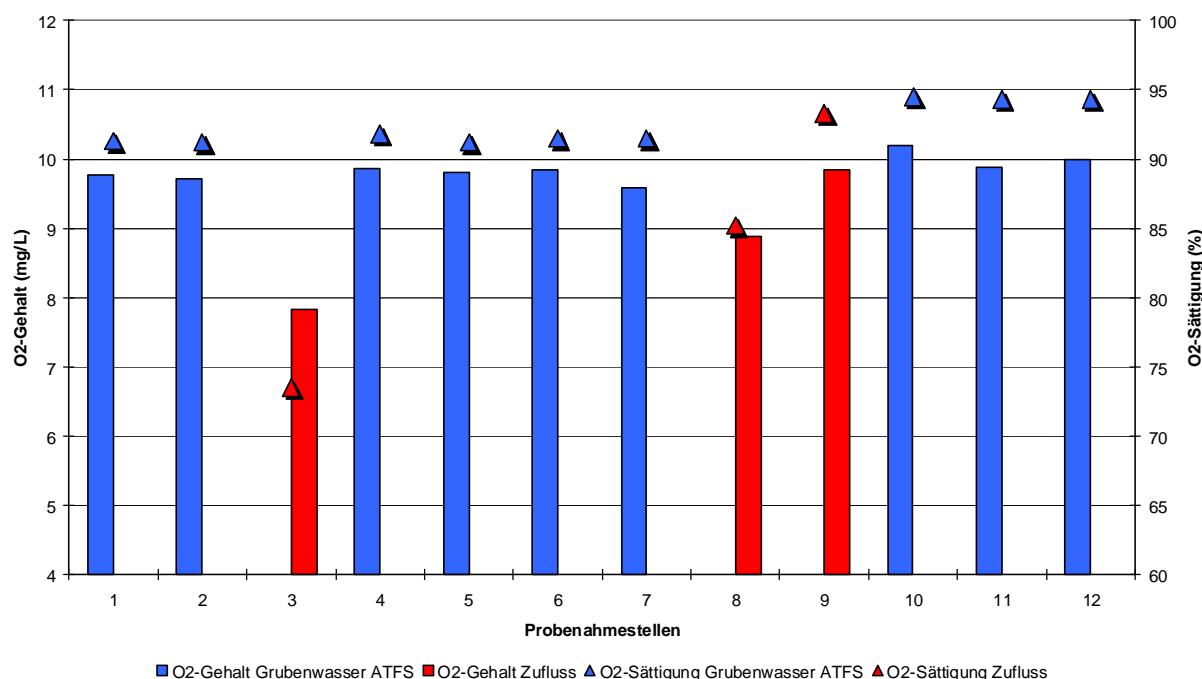
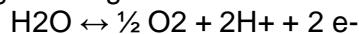


Abb. 39: Übersicht über die gemessenen Sauerstoffgehalte und Sauerstoffsättigungen des Grubenwassers vom Alten Tiefen Fürstenstolln und seiner Zuflüsse. Darstellung in Fließrichtung des Grubenwassers (von links nach rechts).

5.4.5 Redoxpotenzial

Besonders wichtig für das Redoxpotenzial ist im Wasser gelöster Sauerstoff (Kapitel 5.4.4) der aufgrund folgender Reaktion als Oxidationsmittel wirkt:



Das Potenzial hängt jedoch auch von Wassertemperatur und pH-Wert des Wassers ab (Kapitel 5.4.2 und 5.4.3). Bei Prozessen, die zur Sauerstoffzehrung führen, kommt es zu einer Abnahme des Potenzials. Somit ist das Redoxpotenzial ein wichtiges Indiz für aerobe und anaerobe Verhältnisse im zu untersuchenden Gewässer (HÖLTING 1996):

- Aerob: Redoxspannung > 400 mV
- Übergang: Redoxspannung 0...400 mV
- Anerob: Redoxspannung < 0 mV

Unsicherheiten in den Messergebnissen sind nicht auszuschließen, da bei der Messung nicht mit Durchflussmesszellen unter Sauerstoffabschluss gearbeitet wurde, und viele Redoxreaktionen durch eine sehr langsame Kinetik charakterisiert sind. So stellte sich häufig auch bei lang andauernder Messung kein konstanter Wert ein. Außerdem konnte stets nur ein Misch-Redoxpotenzial gemessen werden, so dass nicht auf die Konzentration einzelner Redoxpaare geschlossen werden kann. Weiterhin ist ein direkter Vergleich von verschiedenen Redoxwerten untereinander nur bei gleichen Redoxpaaren, gleicher Ionenstärke und gleichem pH-Wert zulässig, so dass der zugehörige pH-Wert immer mit angegeben werden muss.

Die ermittelten Redoxpotenziale sind in Anlage VII aufgeführt. An den **Grubenwasser**-Probenahmestellen wurde ein mittleres Redoxpotenzial von 358 mV ermittelt, das im Bereich zwischen 304 mV (W 1) und 532 mV (W 2) schwankte. Unter Berücksichtigung der gemessenen Redoxpotenziale der Probenahmestellen W 11 und W 12 *außerhalb* des Kartiergebietes ergeben sich ein Mittelwert von 333 mV und ein Minimum von 232 mV (W 12). Die letzte Grubenwassermessstelle W 10 war durch ein 23 mV höheres Redoxpotential charakterisiert als die erste Messstelle W 1. Somit handelt es sich – wie pH-Wert und Sauerstoffgehalt schon erwartet ließen – um Verhältnisse am Übergang von anaerob zu aerob bis hin zu aeroben Verhältnissen. An der Probenahmestelle W 5 ist die Messelektrode am letzten Kartierungstag ausgefallen, weshalb dort leider kein Messwert vorhanden ist. Das BENTHIN et al. (2005) ermittelte Redoxpotenzial von 20 mV (Messung am Messwehr unterhalb des ehemaligen Wehres Steyer) (BENTHIN et al. 2005) konnte bei dieser Kartierung somit nicht bestätigt werden.

Bei den **Zuflüssen** wurden mit durchschnittlich 548 mV etwas höhere Redoxpotenziale gemessen. Mit 640 mV bzw. 610 mV wiesen die Wässer des Glück-Auf-Stehenden (W 3) und des Durchschnittsschachtes (W 9) die höchsten gemessenen Werte auf.

Wie in Abb. 40, dem Redoxpotenzialverlauf entlang der Fließstrecke des Grubenwassers, ersichtlich ist, zeigt sich keine Abhängigkeit/Beeinflussung des Grubenwassers von den Zuflüssen. Selbst nach dem Zufluss größerer Wassermengen (vgl. Durchschnittsschacht W 9) bleibt das Redoxpotenzial des Grubenwassers nahezu konstant und verringert sich sogar noch, wie an den außerhalb des Kartierungsgebietes lokalisierten Probenahmestellen W 11 und W 12 erkennbar ist.

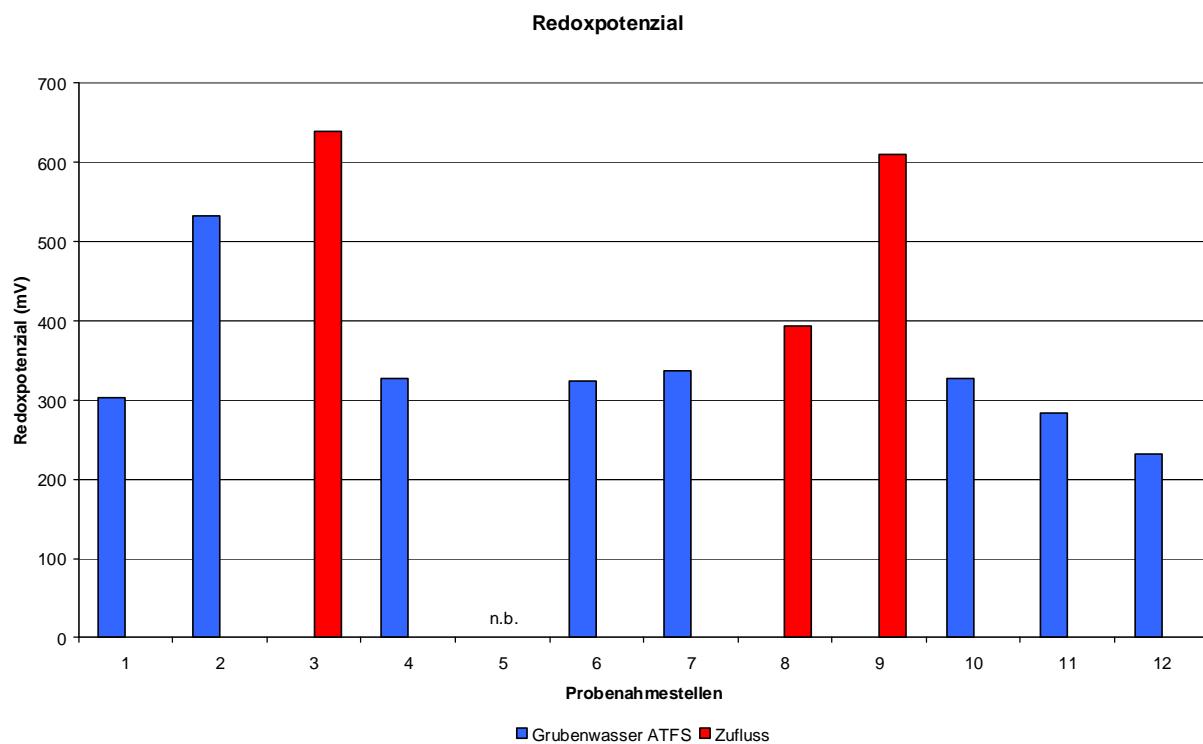


Abb. 40: Übersicht über die gemessenen Redoxpotentiale des Grubenwassers vom Alten Tiefen Fürstenstolln und seiner Zuflüsse. Darstellung in Fließrichtung des Grubenwassers (von links nach rechts).

5.4.6 Elektrische Leitfähigkeit und Gesamtmineralisation (TDS)

Wenn Elektrolyte in wässriger Lösung dissoziieren, wird die Lösung durch die entstehenden Ionen leitfähig. Die **elektrische Leitfähigkeit** spiegelt die Gesamtkonzentration dieser Ionen wider und ermöglicht damit im Gelände eine generelle Abschätzung der Gesamtmineralisation des zu untersuchenden Gewässers. Die Größe der elektrischen Leitfähigkeit ist abhängig von der Wassertemperatur sowie dem Dissoziationsgrad der Elektrolyte. Sie ist direkt proportional zu Konzentration, Ladung und Wanderungsgeschwindigkeit der Ionen.

Die gemessenen elektrischen Leitfähigkeiten und die daraus berechneten Gesamtmineralisationen (TDS) sind in Anlage VII aufgeführt. Die **Grubenwasser**-Probenahmestellen wiesen eine durchschnittliche elektrische Leitfähigkeit von 891 µS/cm auf, was einer Gesamtmineralisation von 597 mg/l entspricht. Der minimale Messwert wurde mit 850 µS/cm (553 mg/L) bei W 1 gemessen, der maximale mit 965 µS/cm (627 mg/L) bei W 10. Die letzte Grubenwassermesstelle W 10 war somit durch eine 115 µS/cm höhere elektrische Leitfähigkeit und eine 74 mg/L höhere Gesamtmineralisation gekennzeichnet als die erste Messstelle W 1. Unter Berücksichtigung der gemessenen elektrischen Leitfähigkeiten der *außerhalb* des Kartiergebietes lokalisierten Probenahmestellen W 11 und W 12 ergeben sich ein Mittelwert von 918 µS/cm (579 mg/L) und ein Maximum von 1040 µS/cm (676 mg/L). Die von BENTHIN et al. (2005) gemessene elektrische Leitfähigkeit von 920 µS/cm (Messung am Messwehr unterhalb des ehemaligen Wehres Steyer) (BENTHIN et al. 2005) konnte bei dieser Kartierung somit bestätigt werden.

Im Mittel konnte bei den **Zuflüssen** eine elektrische Leitfähigkeit von 14450 µS/cm (942 mg/L) gemessen werden. Das Wasser des Glück-Auf-Stehenden (W 3) war dabei mit 1237 µS/cm (804 mg/L) durch den kleinsten Messwert, und das Tropfwasser des Stalagmits (W 8) mit 1676 µS/cm (1089 mg/L) durch den größten Messwert charakterisiert.

In Abb. 41 ist der Verlauf der elektrischen Leitfähigkeit und Gesamtmineralisation vom Grubenwasser des Alten Tiefen Fürstenstollns und seiner Zuflüsse dargestellt. Wie erwartet, zeigt sich beim Grubenwasser ein sukzessiver Anstieg von elektrischer Leitfähigkeit und Ge-

samtmineralisation in Fließrichtung, wobei nach Zufluss des Wassers vom Durchschnittsschacht (W 9) eine deutliche Erhöhung bei W 10 im Vergleich zur vorigen Grubenwassermessstelle W 7 auffällt.

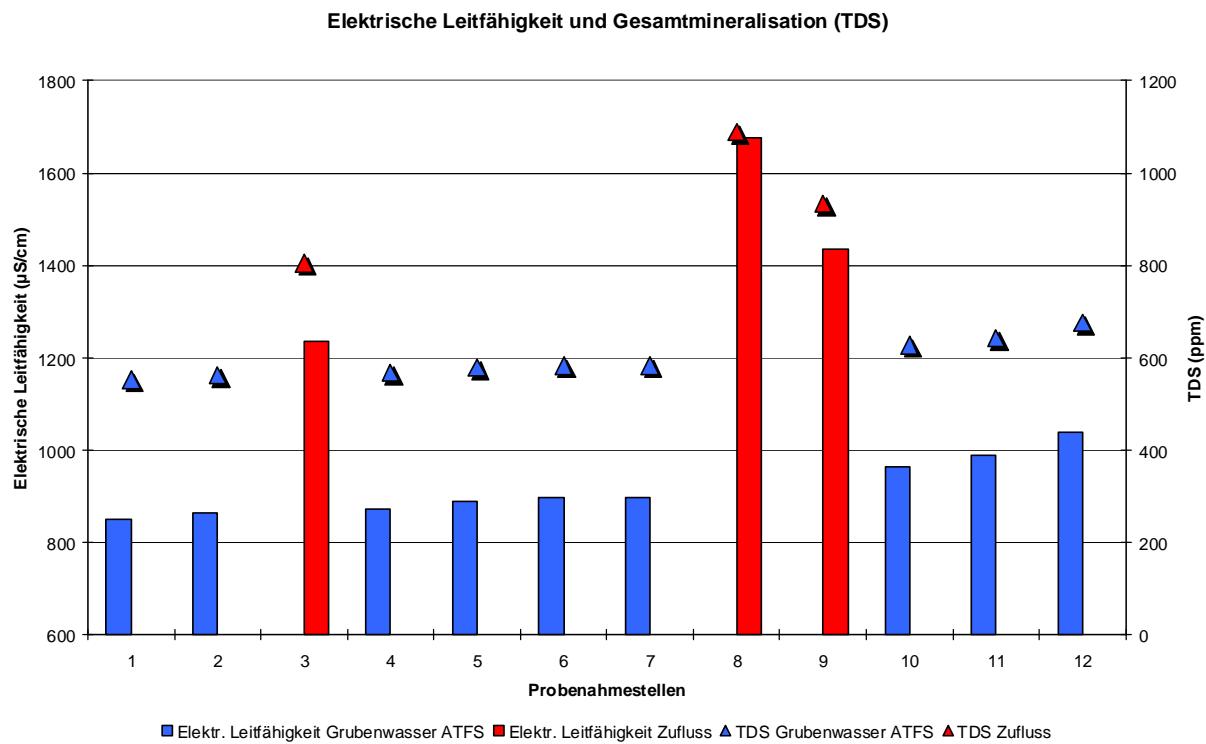


Abb. 41: Übersicht über die gemessenen Elektrischen Leitfähigkeiten und Gesamtmineralisationen (TDS, Total Dissolved Solids) des Grubenwassers vom Alten Tiefen Fürstenstolln und seiner Zuflüsse. Darstellung in Fließrichtung des Grubenwassers (von links nach rechts).

5.5 Grubensediment und Stalagtite

5.5.1 Allgemeines

Trotz der Sprengung des Verspünden Steyer (vgl. Kapitel 3.2) wies der Stollenabschnitt zur Zeit der Kartierung immer noch eine relativ mächtige Sediment- und Wasserschicht von bis zu 1 m auf (siehe Abb. 42), so dass eine Befahrung nur mit Wathosen möglich war. Erst nach dem Entfernen des stark verwitterten Holztragswerks, welches i.d.R. nicht mehr tragfähig war und (v.a. die Laufbohlen, vgl. Abb. 15a und 17b) im Sediment lag, nahm die Sedimentmächtigkeit etwas ab. Das Sediment war sehr dickflüssig bis thixotrop und dabei relativ ortsstabil. Die mächtigen Grubensedimente liefern zudem einen Hinweis darauf, dass es in der Vergangenheit kaum jahreszeitlich wechselnde Ablagerungsmilieus gab.

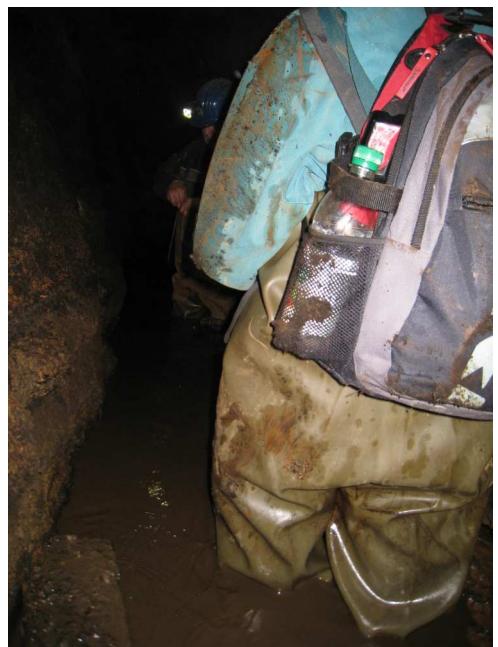


Abb. 42: Sedimentmächtigkeit zur Zeit der Kartierung.

5.5.2 Makro- und mikroskopische Untersuchung

Der Sedimentkern S₁ wurde in der Nähe des Glück-Auf-Stehenden (nahe des rechten Stoßes, siehe Kapitel 4.2.3) entnommen, hat eine Gesamtlänge von 44 cm und einen Durchmesser von 5 cm. Wie in Kapitel 4.4.3.1 beschrieben, erfolgte die Entnahme und Ansprache anhand vorher festgelegter Schichtgrenzen, nach denen auch die Probenbezeichnung vorgenommen wurde.

Der Sedimentkern 2 stammt aus dem Füllort des Familienschachts (nahe des rechten Stoßes, siehe Kapitel 4.2.3), hat eine Gesamtlänge von 36 cm und einen Durchmesser von 5 cm.

Wie die Untersuchung des Grubensediments anhand der Sedimentkerne S₁ (siehe Abb. 43, und Tab. 6) und S₂ (siehe Abb. 44 und Tab. 7) zeigt, besteht es zumeist aus einer Wechsellagerung mit hellbrauner bis orangefarbender Lagen von Schluff im cm-Bereich, und etwas geringmächtiger hellgrauer bis schwarzgrauer Lagen von Mittel- bis Grobsand. In unregelmäßigen Abschnitten sind schwarze Lagen tonig-schluffigen Materials von bis zu 3 cm durchteuft worden. Ein Eintrag organischen Materials ist nicht auszuschließen, da in Testprobenahmen und -untersuchungen des Grubensediments stellenweise haarähnliches Material, Kirschkerne und Grobsand bis feinkiesiges, kantiges Material in schlechter Sortierung festgestellt wurde. Dieses Sediment wurde in unmittelbarer Nähe zum Familienschacht beprobt; dieser (oder möglicherweise auch das Bohrloch Steyer) wurde demnach offensichtlich in der Vergangenheit auch als Abfluss genutzt.

Des Weiteren spiegelt die Grubensedimentmächtigkeit (vgl. Anlage II) deutlich den erhöhten Eintrag über den wasserführenden, versinterten Querschlag Glück-Auf-Stehenden wider. Dies ließ sich auch in Form von trüberem Grubenwasser feststellen, was wahrscheinlich auf Fällungsprozesse – u.a. verursacht durch das pH-Wert-Gefälle (vgl. Kapitel 5.4.3) von zufließendem relativ saurem Tropfwasser in das relativ neutrale Grubenwasser – im Stollen zurückzuführen ist. Der Wechsel der Korngrößenverteilung zeigt, dass unterschiedliche Strömungsgeschwindigkeiten herrschten.

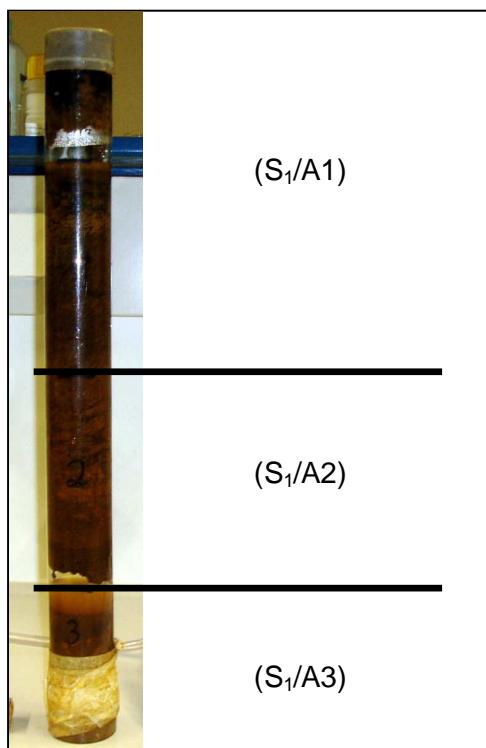


Abb. 43: Sedimentprofil des Sedimentkerns S₁.

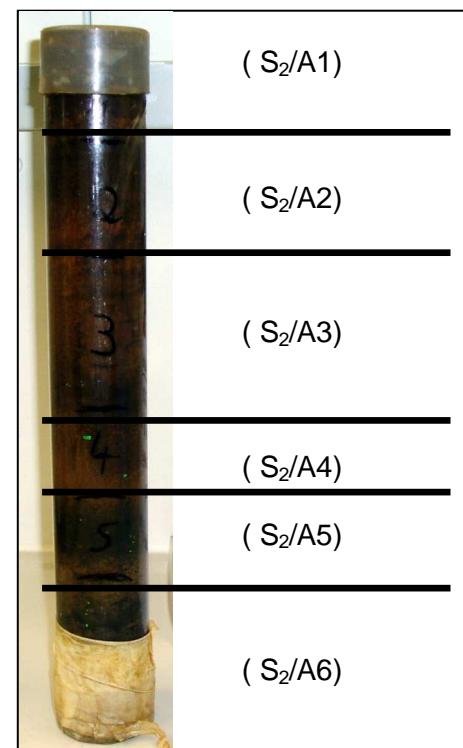


Abb. 44: Sedimentprofil des Sedimentkerns S₂.

Tab. 6: Schichtenverzeichnis Sedimentkern S₁.

Bezeichnung	Teufe (cm)	Mächtigkeit (cm)	Charakteristika
S ₁ /A1	0 - 15	15	grünlichbraun bis dunkelbraun mit orangen Einschaltungen, schluffig, keine Sandkomponenten, mit ca. 2 mm großen dunkelbraunen, zerdrückbaren Komponenten, dünnflüssig, toniger bis tabakartiger Geruch
S ₁ /A2	15 - 32	17	braun mit orangen Einschaltungen, schluffig, z. T. schwarze Komponenten im fS-Bereich, etwas dickflüssiger als S ₁ /A1, mit ca. 2 mm großen dunkelbraunen, zerdrückbaren Komponenten, neutraler Geruch; Basis (27-31 cm) mittel- bzw. dunkelbraun wellig geschichtet, darunter (transportbedingt) Zwischenraum mit Luft
S ₁ /A3	32 - 44	12	ca. 2 cm Wasser im Top-Bereich, mittel- bis dunkelrotbraun und schwarz mit orangen Einschaltungen, schluffig, mit ca. 2 mm großen dunkelbraunen, zerdrückbaren Komponenten, z. T. schwarze Komponenten im fS- bis mS-Bereich, leicht toniger Geruch

Tab. 7: Schichtenverzeichnis Sedimentkern S₂.

Bezeichnung	Teufe (cm)	Mächtigkeit (cm)	Charakteristika
S ₂ /A1	0 - 5	5	dunkelbraun mit hellockerbraunen Einschaltungen, keine Farbgraduierung feststellbar, z. T. schwarze Komponenten im fS-Bereich, recht dünnflüssig, neutraler Geruch
S ₂ /A2 *	5 - 11	6	dunkelbraun mit hellockerbraunen Einschaltungen, Farbgraduierung (Richtung Basis heller), schluffig, z. T. schwarze Komponenten im mS-Bereich, schokoladenartiger Geruch
S ₂ /A3 *	11 - 19	8	Top braun mit hellockerbraunen bis orangen Einschaltungen, wellig geschichtet, schluffig, z. T. schwarze Komponenten im fS-Bereich, neutraler Geruch; bei 14 cm scharfe Grenzschicht (3 mm schwarz, darunter 3 mm orange); Basis eher grünlichbraun (14-18 cm) bis schwarzbraun (18-19 cm) mit schwarzen Komponenten im mS-Bereich
S ₂ /A4 *	19 - 24	5	hellockerbraun mit dunkelbraunen Einschaltungen, schluffig, z. T. schwarze Komponenten im mS-Bereich, schokoladenartiger Geruch
S ₂ /A5 *	24 - 28	4	2 mm dicke orange Schicht an Top, darunter inhomogen mittel- bis grünbraun und schwarz gefärbt, keine Einschaltungen, schluffig, Richtung Basis dunkler und abnehmender Gehalt an schwarzen Komponenten im fS-Bereich, neutraler Geruch
S ₂ /A6	28 - 36	8	Top grünbraun, schluffig, wenig schwarze Komponenten im fS-Bereich, toniger Geruch; bei 31 cm scharfe Grenzschicht (2 mm dunkelgrau) aus Komponenten im gS-Bereich; bei 32-33 cm rotbraun mit ca. 2 mm großen dunkelbraunen, zerdrückbaren Komponenten; bei 34-36 cm grau bis schwarz aus Komponenten im mS- bis gS-Bereich, z.T. Glimmerplättchen, muffiger Geruch

* Hinweis: Aufgrund der schwierigen Probenentnahme aus dem Liner konnten die Schichten S₂/A2 und S₂/A3 bzw. S₂/A4 und S₂/A5 nur jeweils zusammen analysiert werden.

5.5.3 REM-Untersuchungen

Die bestehenden Ablagerungen im ehemaligen Rückstaubereich des Verspünden (Wehr) Steyer zeigen einen hohen Gehalt an Eisen und Mangan im Wasser an. Die Analysen mittels REM und EDX sollen erste Hinweise zur mineralogischen Zusammensetzung des Grubensediments, als auch des Stalagtitmaterials liefern. Die Ergebnisse (siehe Anlage VIII) zeigen, dass der Mangan- und Eisengehalt relativ hoch ist. Während es sich beim beprobten Stalagtiten vorrangig um feines Material calcitischer und mangan- bzw. eisenhydroxitischer Zusammensetzung handelt, weist das Material des Grubensediments erhöhte Werte an Quarz- und Feldspatkörnern im Feinsand- bis Schluffbereich auf. Zudem sind im Grubensediment gehäuft Plättchen aus relativ reinem Mangan- und Eisenhydroxid mit rund 30%-igen Anteil in den analysierten Proben eingelagert. Ursache ist auch hier wahrscheinlich u.a. das pH-Wert-Gefälle.

Es wurden insgesamt 8 Proben – eine Stalagtitprobe und 7 Proben der Sedimentkerne S₁ und S₂ – analysiert. Nach Erstellung der BSE-Übersichtsbilder (siehe Anlage IX) wurde jeweils an 3 bis 5 Punkten der Probe mittels EDX die chemische Zusammensetzung ermittelt. Die Bilder des Stalagtits zeigen ein feinkörniges (20 - <5 µm) Material mit Clustern von 100-20 µm, deren Ausbildung jedoch Trocknungsbedingt sein kann. Im BSE wurden keine großen Dichte-anomalien festgestellt. Die EDX ergab an drei Messpunkten einen erhöhten Anteil von MnO (Mittelwert: $21,3 \pm 0,5$ Gew. %) und Fe₂O₃ (Mittelwert: $54,7 \pm 0,6$ Gew. %), auch erhöhte Werte für Molybdän und Blei konnten festgestellt werden aber aufgrund sehr stark schwankender Werte nicht quantifiziert werden. Weiter Bestandteile in geringeren Anteilen sind As₂O₃, SiO₂ und CaO. Auch Kupfer und Zink wurde festgestellt, dieser Wert kann jedoch nicht verwendet werden, da auch der Objektträger Cu und Zn enthält.

In dem Material des Grubenschlamms konnten Quarz- und K-Feldspatplättchen von ca. 50 bis 100 µm Durchmesser in lockerer Verteilung mit 5-10% in den Bildausschnitten ermittelt werden. Die Grundmasse wies eine dem Stalagtit ähnliche Verteilung der Elemente auf.

Es ist anzumerken, dass diese Werte aufgrund der geringen Anzahl der Messpunkte verglichen zu dem gesamt Material statistisch keine Aussagekraft haben. Zudem ist der Fehler mit 10-50 % sehr hoch. Trotzdem lassen sich deutlich erhöhte Werte für Mangan- und Eisenoxid feststellen, und es kann gezeigt werden, dass es sich bei den größeren Körnern um Quarz und K-Feldspäte handelt.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Aufgrund des jahrhundertelangen Bergbaus bietet das Stollensystem des Freiberger Reviers ein umfangreiches und sehr gut erschlossenes Hohlraumvolumen zur geothermischen Grubenwassernutzung.

Die geologischen Kartierarbeiten konnten das Ergebnis der Bergschadenskundlich-Standsicherheitstechnischen Untersuchung von BENTHIN et al. (2005) bestätigen, da der Freiberger Normalgneis (Freiberger Graugneis) sehr massiv und ab einer Teufe von ca. 25 m nahezu unverwittert ansteht. Die aufgenommenen Trennflächengefüge entsprechen den u.a. von BAUMANN (1958) festgestellten. Die Stollenabschnitte, die v.a. im Bereich von Störungen/Erzgängen eine etwas erhöhte Klüftigkeit des Gesteins aufweisen (Füllort Familienschacht), sind auch ohne Ausbau als standsicher einzuschätzen; das Gestein wird vorrangig von geschlossenen bzw. teilweise quarzitisch/barytisch verheilten Klüften durchzogen.

Über das gesamte Kartiergebiet verteilt konnten (u.a. an Klüften) mehrere Generationen von Tropfwasseraustritten kartiert werden, die entsprechend der Mineralisierung des Wassers an Firste und Stößen überwiegend rotbraune bis schwarze Stalagrite und diffuse Versinterungen in Form von Eisen- und Manganhydroxiden gebildet haben. In Folge des bis in die 1990-er Jahre erfolgten Wasseranstaus durch die Firma Steyer sind diese Mineralausfällungen noch heute sowohl als Verkrustung an den Stößen bis zur ehemaligen Einstauhöhe, als auch in Form einer bis zu 1 m mächtigen Grubensedimentschicht auf der Stollensohle, die z.T. mit Abflussmaterial von über Tage verunreinigt ist und deren Mächtigkeit in Fließrichtung zunimmt, vorzufinden.

Die Ergebnisse der REM-EDX sowie der makro- und mikroskopischen Ansprache zeigen, dass es sich beim Grubensediment vorrangig um toniges bis schluffiges Material handelt, dessen Zusammensetzung durch Ausfällungsprozesse vorwiegend der Mineralisierung des Grubenwassers mit einem hohen Gehalt an Mangan und Eisen entspricht.

Die hydrogeologischen Untersuchungen der Vor-Ort-Parameter zeigen, dass der fast neutrale pH-Wert und die vergleichsweise geringe Mineralisierung des Grubenwassers durch die im Kartiergebiet befindlichen Zuflüsse (Durchschnittsschacht, Glück-Auf-Stehender und Stalagtit-Tropfwasser mit geringeren pH- und Sauerstoffgehalten und deutlich höherer Mineralisierung) beeinflusst wird. Diese Ergebnisse lassen den Schluss zu, dass die abgelagerten Sedimentschichten auf größere Mengen ungelöster Wasserinhaltsstoffe, wie v.a. Eisen und Mangan, zurückzuführen sind. Dies sollte in fortführenden Untersuchungen (u.a. Diplomarbeit von Kathrin Kranz) geprüft werden. Aufgrund der geringen Fließgeschwindigkeit von ca. 3 L s^{-1} kann davon ausgegangen werden, dass es bei der Inbetriebnahme der Geothermieanlage nicht zur Aufwirbelung der Sedimentschicht kommen wird und daher relativ klares Wasser gefördert werden kann, was wiederum für die Reinigungsarbeiten des Wärmetauschers vom Vorteil ist. In weiteren Untersuchungen (u.a. laufende Studienarbeit am Institut für Wärmetechnik und Thermodynamik der TU Bergakademie Freiberg) sollte überprüft werden, dass sich im Laufe der geothermischen Nutzung keine Temperaturschichtung im Wasserreservoir einstellt. Somit entspricht das untersuchte Grubenwasser aufgrund der konstanten Temperatur, des Chemismus und Ergiebigkeit den Anforderungen an eine geothermische Nutzung.

Für die oberflächennahe Grubenwassernutzung von geringerer Bedeutung, jedoch wichtig für weiterführende Untersuchungen hinsichtlich einer möglichen tiefengeothermische Nutzung im Freiberger Raum, wurden an den im Rahmen dieser Kartierung entnommenen Gesteinsproben des Freiberger Graugneises die vom Gebirgsdruck abhängige Permeabilität, die Porosität sowie die geothermischen Parameter Wärmeleitfähigkeit, Wärmekapazität und radiogene Wärmeproduktionsrate ermittelt; die Ergebnisse sind in KRANZ & DILLENARDT 2010 nachzulesen.

Ein wesentlicher Antrieb diese und ähnlicher Anlagen zu verwirklichen, ist das im Jahr 2008 abgeschlossene novellierte Gesetz für Erneuerbare Energien (EEG), das bis zum Jahr 2020 einen Mindestanteil an regenerativen Energien zur Stromerzeugung von 30 % vorsieht (EEG §1). Somit ist das Geothermieprojekt Schloss Freudenstein ein wichtiger Schritt zu einer Grundlastenergieversorgung mittels alternativer Energien.

7 Literaturverzeichnis

BAUMANN, L. (1958): Freiberger Forschungshefte: Tektonik und Genesis der Erzlagerstätte von Freiberg (Zentralteil). Akademie-Verlag, Berlin, 208 S.

BAUMANN L. (1965): Die Erzlagerstätten der Freiberger Randgebiete. Freiberger Forschungsheft C188, Deutscher Verl. für Grundstoffindustrie, Leipzig.

BENTHIN, A. et al. (2005): Bergschadenkundlich-Standsicherheitstechnische Untersuchung des Alten Tiefen Fürstenstolln im Bereich Gerberpassage bis Meißenring. Projektstudie Geothermische Grubenwassernutzung. Unveröffentlichter Bearbeitungsnachweis, Freiberg.

BENTHIN, A. & HAMANN, J. (2008): Technisches Konzept Schloss Freudenstein Freiberg - Geothermische Grubenwassernutzung - Weiterführende Untersuchungen des Grubenwasserhaushalts. Unveröffentlichter Bearbeitungsnachweis, Halsbrücke.

BERGER H.-J. et al. (1994): Neue strukturtektonische und lithostratigraphische Ergebnisse aus dem Freiberger Gneiskomplex. Z. geol. Wiss. 22 (5), 505 - 512.

BERRIOS, D. (1995): Hydrologisch-hydrogeologischer Überblick über die Stadt Freiberg. Diplomarbeit der TU Bergakademie Freiberg, Fakultät für Geowissenschaften, Geotechnik und Bergbau, 148 S.

CLAUSER, C. (2006): Geothermal Energy. Bd. 3 Subvol. C "Renewable Energies", in Energy Technologies - Advanced Materials and Technologiess, Herausgeber: K. Heinloth, 480 – 595. Springer Verlag Heidelberg, Berlin.

CREDNER, H. (1887): Geologische Spezialkarte des Königreichs Sachsen, Section Freiberg, No. 80, Maßstab 1 : 25000.

FLEGLER, S. L. et al. (1993): Elektronenmikroskopie. Spektrum Akademischer Verlag Berlin und Heidelberg.

HEITFELD, M. et al. (2006): Nutzung aufgegebener Tagesschächte des Steinkohlebergbaus für die Gewinnung von Erdwärme – Ergebnisse einer Machbarkeitsstudie für das Aachener Revier. Zeitschrift Glückauf, Heft 10, S. 432 – 438, VGE Verlag GmbH, Essen.

HOFMANN, J. (1974): Petrographische und lithostratigraphische Stellung der Gneise des Osterzgebirges. Freib. For. Hft. C 292, 63 S.

HÖLTING, B. (1996): Hydrogeologie - Einführung in die allgemeine und angewandte Hydrogeologie Enke Verlag, Stuttgart, 441 S.

JOBST, W. et al. (1993): Bergwerke im Freiberger Land, Medienzentrum Freiberg, 227 S.

KLEMM, I. (1995): Druck-Temperaturentwicklung von Metamorphiten im östlichen Erzgebirge (Sachsen). Unveröffentlichte Diplomarbeit, Institut für Mineralogie der Ruhr-Universität Bochum. 121 S.

KRANZ, K. & DILLENARDT, J. (2010): Mine Water Utilization for Geothermal Purposes in Freiberg, Germany: Determination of Hydrogeological and Thermophysical Rock Parameters. Mine Water and the Environment 29(1):68-76, DOI: 10.1007/s10230-009-0094-4.

Lehrmaterial Ingenieurgeologische Übungen II, Inst. Für Geotechnik, TU Bergakademie Freiberg, unveröffentlicht. 43 S.

- LINNEMANN, U. [Ed.] et al. (2003): Das Saxothuringikum: Abriss der präkambrischen und paläozoischen Geologie von Sachsen und Thüringen. In: *Geologica Saxonia*, Bautzen, 160 S.
- MATTHES, R. & SCHREYER, J. (2007): Sanierung des WISMUT-Schachtes 302 in Marienberg und geothermische Nutzung des Grubenwassers. Fachbericht; *bergbau* 9/2007; S. 445-446.
- MEYER, M. (1960): Die Wasserverhältnisse der Betriebsabteilung Freiberg des VEB Bleierzgrube "Albert Funk" unter besonderer Berücksichtigung der Hochwassersicherungsmaßnahmen. *Freiberger Forschungshefte*, A176, 26 - 40.
- MILDE, G. (1973): Gutachterliche Stellungnahme zur Qualität der Wässer des Rothschönberger Stollns und sich andeutenden Tendenzen - Gutachten, Freiberg, unveröffentlicht.
- OFNER, C. & WIEBER, G. (2008): Geothermische Potenziale gefluteter Bergwerke - Heizen mit Grubenwasser, *bbr Jahresmagazin* 12/2008, S.72-77.
- PFORR, H. et al. (1985): Geologie und bergbaulicher Aufschluss der Freiberger Erzlagerstätte am Beispiel der Lehrgrube „Alte Elisabeth“. In: Schriftenreihe: Exkursionsführer, Heft 2/3. Bergakademie Freiberg, 147 S.
- PIETZSCH, K. (1956): Abriss der Geologie von Sachsen. 2. Auflage, VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin, 200 S.
- RÖSNER, G. (1987): Übersichtsgutachten: Hydrogeologie Kreis Freiberg. Unveröffentlichtes Gutachten vom Landesamt für Umwelt und Geologie.
- SCHETELIG, K. et al. (2008): Geothermie aus Grubenwasser – regenerative Energie aus stillgelegten Steinkohlenbergwerken, IWASA 2008, Aachen.
- SCHMIDT, H.-H. (2006): Grundlagen der Geotechnik. 3. Auflage, Teubner Verlag, Wiesbaden.
- SCHMIDT, K. (1959): Zur tektonischen Analyse des Sächsischen Erzgebirges. Abh. zur Geotektonik 18, 104 S.
- SEBASTIAN, U. (2001): Mittelsachsen. Geologische Exkursionen. 1. Auflage, Perthes Verlag, Gotha, 191 S.
- SLUG Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie [Hrsg.] Referat 54 (2006): Rohstoffgeologie: Leitfaden zur Nutzung von Erdwärme mit Erdwärmesonden. Dresden, 32 S.
- TICHOMIROWA, M. (2002): Die Gneise des Erzgebirges - hochmetamorphe Äquivalente von neoproterozoisch-frühpaläozoischen Grauwacken und Granitoiden der Cadomiden. Habilitation, TU Bergakademie Freiberg, 222 S.
- VDI Verein Deutscher Ingenieure (2000): Gesellschaft Energietechnik, Fachausschuss Regenerative Energien Thermische Nutzung des Untergrundes. 1. Grundlagen, Genehmigungen, Umweltaspekte. Blatt 1, Part 1. Berlin, Beuth, Germany, 9 S.
- WAGENBRETH, O. (2000): Atlas zur Geschichte und Landeskunde von Sachsen. Beiheft zur Karte A9: Bodenschätzungen und Bergbau: geologische Einheiten, Bodenschätzungen und historische Bergreviere. Verlag der Sächsischen Akademie der Wissenschaften zu Leipzig und Landesvermessungsamt Sachsen, Dresden, 65 S.
- WAGENBRETH, O. & WÄCHTLER, E. [Hrsg.] (1986): Der Freiberger Bergbau: Technische Denkmale und Geschichte. 1. Auflage, Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 381 S.

WALTHER, K. (1962): Petrographische und gefügekundliche Untersuchungen in den Unteren und Oberen Freiberger Gneisen im Bereich des Tales der Wilden Weißeritz, südlich der Talsperre Klingenberg. Unveröff. Diplomarbeit, Institut für Geologie der TU Bergakademie Freiberg, 56 S.

WERNER, T. (2009): Ökologische Investments – Chancen und Risiken grüner Geldanlagen, Springer Verlagsgruppe, Wiesbaden.

WIEDEMANN, F. (1969): Zur Petrographie und Petrogenese der Gneise und Glimmerschiefer des Sächsischen Erzgebirges. Abh. Staatl. Mus. Min. Geol. Dresden 14, 111 – 251.

WOLF, P. et al. (2007): Zur geothermischen Nutzung von Grubenwässern in Sachsen – Tagungsband Sächsischer Geothermietag 26. November 2007, Marienberg.

WOLKERSDORFER, C. (1996): Hydrogeochemische Verhältnisse im Flutungswasser eines Uranbergwerks – Die Lagerstätte Niederschlema. Clausthaler Geowissenschaftliche Dissertationen, 212 S.

Danksagung

An dieser Stelle möchten wir unseren Betreuern Herrn Prof. Dr. Broder J. Merkel und Herrn Prof. Dr. Steffen Wagner für die Themenbereitstellung, für das stetige Interesse an neuen Erkenntnissen, der Möglichkeit der fachlichen Diskussion und Unterstützung bei der Durchführung unserer Diplomkartierung danken.

Herrn Dipl.-Ing. Geol. Andreas Benthin vom gleichnamigen Geologischen Ingenieurbüro in Halsbrücke danken wir für die tatkräftige Unterstützung bei der Grubenbefahrung und Ge steinsprobenahme, Bereitstellung von Geländeausrustung, Karten, Fotos und Literatur und die zahlreichen wertvollen Anregungen. Danke, dass wir den Bohrungs-Durchschlag vor Ort im Stollen miterleben durften! Den Mitarbeitern der Bohrfirma Pruy KG aus Schönheide danken wir für die zahlreichen Auskünfte über den Bohrungsfortschritt und die Unterstützung bei der Gewinnung der Bohrproben. Herrn Hubertus Radeck vom Hochbau- und Liegenschaftsamt der Stadtverwaltung Freiberg möchten wir für die zahlreichen Informationen und interessanten Führungen rund um das Geothermieprojekt Schloss Freudenstein danken.

Weiterhin gedankt sei Herrn Dr. Klaus Grund für die Erteilung der Einfahrgenehmigung für das Lehr- und Forschungsbergwerk „Reiche Zeche“ sowie die Bereitstellung von hilfreichen Informationen und Geländeausrustung. Für die unkomplizierte Unterstützung vor und nach den Befahrungen und die Bereitstellung von Geländebekleidung danken wir den Mitgliedern des Fördervereins "Himmelfahrt Fundgrube" Freiberg Sachsen e. V. sowie den Freiberger Bergleuten um den Obersteiger Stephan Leibelt.

Ein weiterer Dank geht an Herrn Dr. Nicolai-Alexeji Kummer sowie die weiteren Mitarbeiter des Wasserchemischen Labors des Instituts für Geologie für die Bereitstellung des Vor-Ort-Parameter-Messgerätes und an Frau Dipl.-Geoökol. Mandy Schipek für die Bereitstellung der Liner für die Grubensediment-Probenahme. Bedanken möchten wir uns auch bei Frau Gitta Schneider vom Sedimentforschungslabor für die Unterstützung bei der Dichtebestimmung des Bohrkleins, bei Frau Obst für die EDX-Analyse der Sedimentproben und bei Herrn Dr. Michael Magnus für die Bereitstellung der Mikroskope.

Unseren Familien und Freunden danken wir von ganzem Herzen für Geduld und „Rückendeckung“.

Anlagenverzeichnis

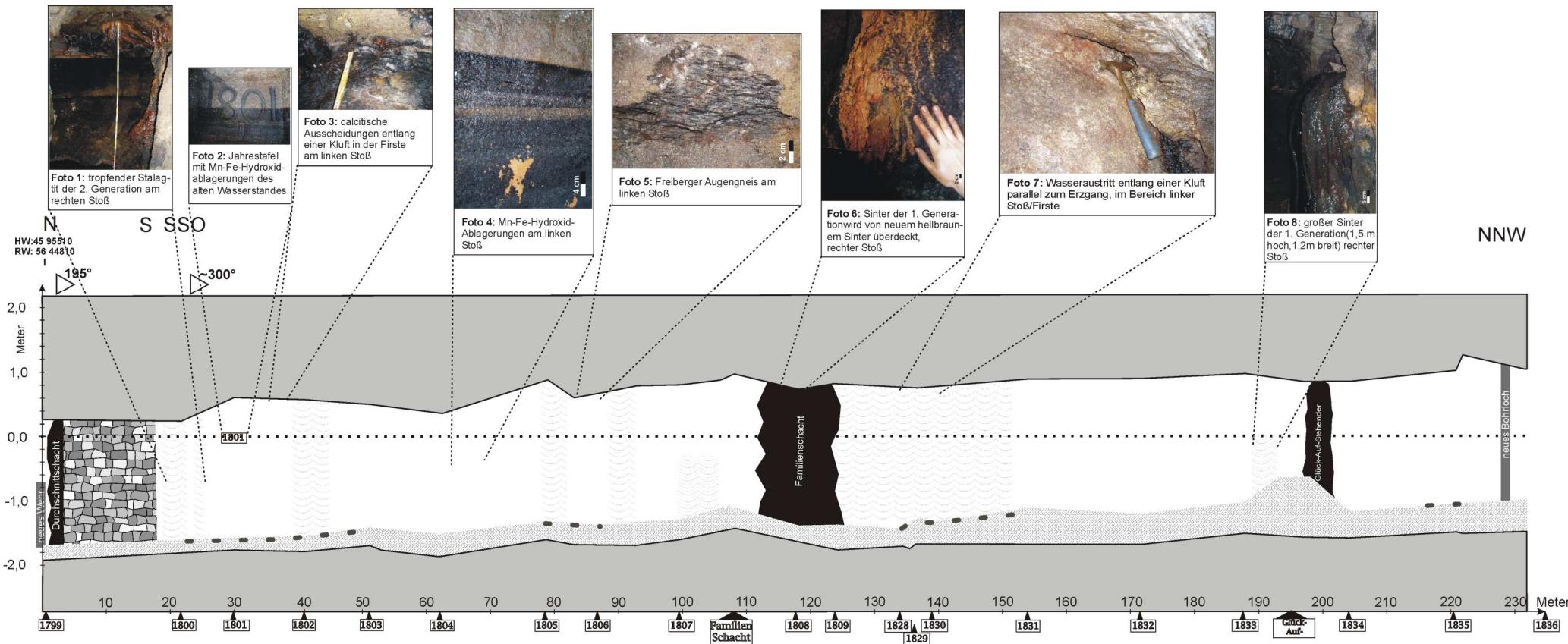
- Anlage I: Messergebnisse der Stollenhöhe, Stollenbreite und ehemaligen Einstauhöhe.
- Anlage II: Stollenquerschnitt mit Ergebnissen der Stollengeometriemessungen und Fotografien aus dem Alten Tiefen Fürstenstolln.
- Anlage III: Ergebnisse der Dichtebestimmung (Doppelbestimmung) mittels Pyknometerversuch.
- Anlage IV: Ergebnisse der Trennflächenkartierung.
- Anlage V: Stollenkarte mit eingezeichneten Trennflächen.
- Anlage VI: Ergebnisse der Wasseraustritt-Kartierung.
- Anlage VII: Übersicht über die Probenahmestellen und gemessenen Vor-Ort-Parameter von Grubenwasser und Zuflüssen.
- Anlage VIII: Ergebnisse der Rasterelektronenmikroskopie.
- Anlage IX: BSE-Aufnahmen der untersuchten Grubensediment- und Stalagtitproben.

Anlagen

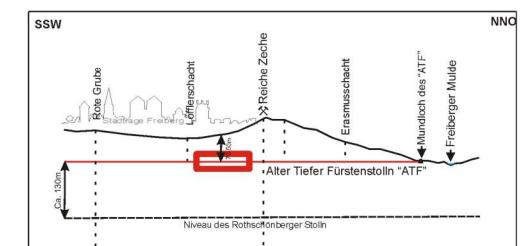
Anlage I: Messergebnisse der Stollenhöhe, Stollenbreite und ehemaligen Einstauhöhe.

Jahrestafel / Referenzpunkt	Stollenhöhe (m)	Stollenbreite (m) Firste/Schulterhöhe/Sohle	Ehemalige Einstauhöhe (m)
1. RP	2,0	1,15	1,85
"1799"	2,22	0,8 / 1,1 / 0,8	1,9
Durchschnittsschacht			
2. RP			1,77
3. RP	2,0	1,6	1,8
Gneisvermauerung			
"1800"	2,05	1,6	1,8
"1801"	2,4	0,6 / 1,0 / 0,9	1,77
5. RP	2,45	0,8	1,8
"1802"	2,33	0,6 / 0,9 / 0,75	1,78
"1803"	2,22	0,5 / 0,9 / 0,8	1,7
6. RP	2,2	0,6	1,77
"1804"	2,25	0,55 / 0,8 / 0,8	1,73
"1805"	2,5	0,5 / 0,8 / 0,9	1,6
7. RP	2,3	0,9	1,66
8. RP	2,4	1,0	1,63
"1806"	2,4	0,7 / 1,0 / 1,0	
9. RP	2,5	1,0	1,7
"1807"	2,4	1,0 / 1,4 / 1,0	1,6
Familienschacht	2,5	1,0 / 1,8 / 1,5	
10. RP	2,43	2,4	1,43
"1808"	2,4	0,75 / 1,0 / 0,8	1,63
"1809"	2,57	0,9 / 0,9 / 0,8	1,75
"1828"	2,25	0,8 / 1,1 / 0,8	1,7
11. RP	2,37	1,1	1,75
"1829"	2,45	0,75 / 1,1 / 0,85	1,7
"1830"	2,35	0,7 / 1,4 / 1,1	1,7
"1831"	2,6	0,8 / 1,1 / 0,75	1,7
12. RP	2,6	1,0	1,7
13. RP	2,45	1,2	1,7
"1832"			1,7
"1833"			1,5
Glück-Auf-Stehender	2,20 bis 2,53	0,8 / 1,0 / 1,2	
14. RP	2,48	1,4	1,57
"1834"	2,45	1,0 / 1,0 / 0,85	
"1835"	2,53	0,85 / 1,0 / 0,85	1,5
15. RP	2,85	1,0	1,5
"1836"	2,5	0,9 / 1,3 / 0,9	1,48

Anlage II: Stollenquerschnitt mit Ergebnissen der Stollengeometriemessungen und Fotografien aus dem Alten Tiefen Fürstenstolln.



Legende:	
Ehemaliger Wasserstand (Anstauhöhe)	Sedimentmächtigkeit
Sohle/Firste	Freiberger Normal- (innerer-)Gneis
Jahrestafeln des Vortriebs	Altes Tragwerk
Z RP	starke Versinterung
Referenzpunkt	großer Sinter



Anlage III: Ergebnisse der Dichtebestimmung (Doppelbestimmung) mittels Pyknometerversuch.

Proben Nr. (=Teufe in m)	Datum der Messung	Dichte (g cm ⁻³), 1. Bestimmung	Dichte (g cm ⁻³), 2. Bestimmung	Mittelwert Dichte (g cm ⁻³)	Endergebnis Dichte (g cm ⁻³)
1	17.11.2008	2.4994	2.4375	2.4685	2,47 ± 0,04
5	12.12.2008	2.6463	2.6549	2.6506	2,65 ± 0,01
7	17.11.2008	2.5684	2.5756	2.5720	2,57 ± 0,01
10	18.11.2008	2.4808	2.4957	2.4882	2,49 ± 0,01
13	18.11.2008	2.6773	2.7334	2.7053	2,71 ± 0,04
14	17.11.2008	2.5694	2.5570	2.5632	2,56 ± 0,01
16	17.11.2008	2.6150	2.5576	2.5863	2,59 ± 0,04
18	18.11.2008	2.5664	2.5747	2.5705	2,57 ± 0,01
20	18.11.2008	2.6715	2.7210	2.6962	2,70 ± 0,03
22	18.11.2008	2.5105	2.5018	2.5062	2,51 ± 0,01
24	12.12.2008	2.7158	2.6292	2.6725	2,67 ± 0,06
27	18.11.2008	2.5301	2.5760	2.5531	2,55 ± 0,03
31	17.11.2008	2.5111	2.5094	2.5102	2,51 ± 0,00
33	17.11.2008	2.5967	2.6105	2.6036	2,60 ± 0,01
35	12.12.2008	2.6527	2.6017	2.6272	2,63 ± 0,04
38	18.11.2008	2.5074	2.4674	2.4874	2,49 ± 0,03
42	17.11.2008	2.6237	2.5864	2.6050	2,61 ± 0,03
46	18.11.2008	2.5965	2.5618	2.5792	2,58 ± 0,02
49	12.12.2008	2.6099	2.5586	2.5842	2,58 ± 0,04
51	12.12.2008	2.6101	2.6321	2.6211	2,62 ± 0,02

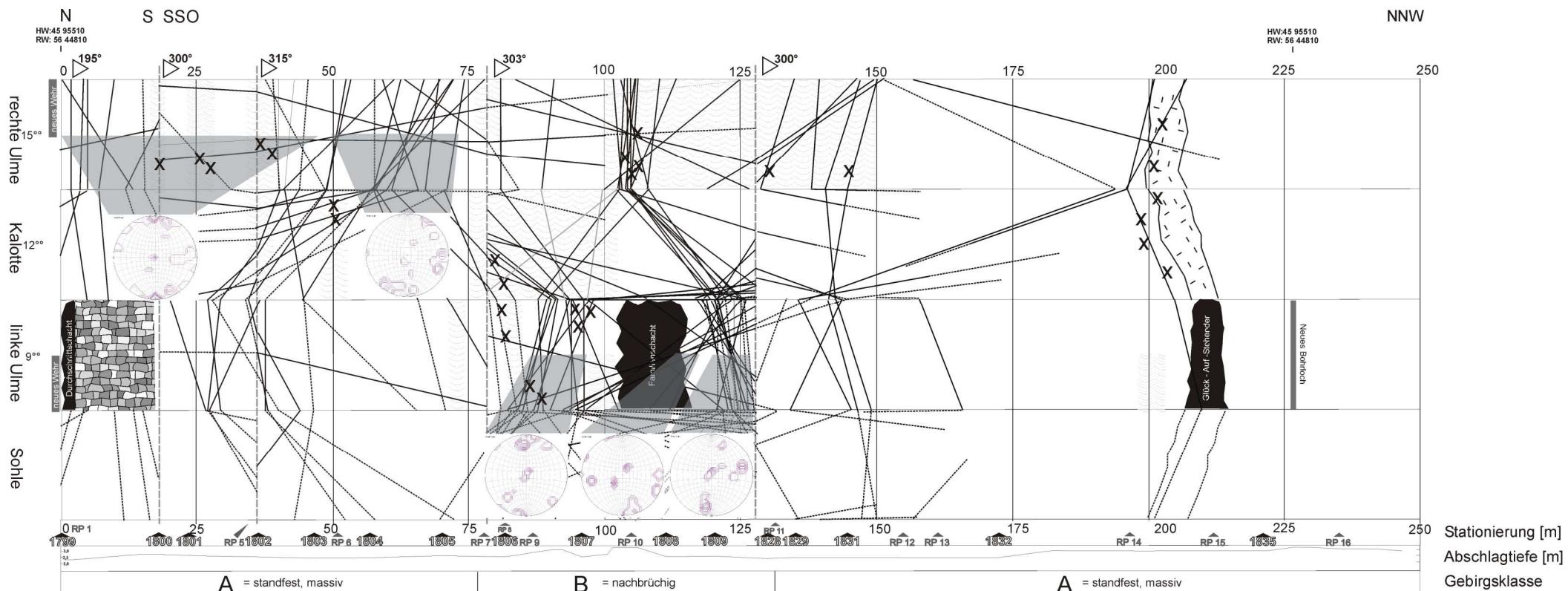
Anlage IV: Ergebnisse der Trennflächenkartierung.

linker Stoß in Kartierrichtung						rechter Stoß in Kartierrichtung						Station in Kartierrichtung (m)
FR (1)	SR (1)	FW (1)	Scheinbares Streichen	Scheinbares Einfallen	Besonderheiten	FR (1)	SR (1)	FW (1)	Scheinbares Streichen	Scheinbares Einfallen	Besonderheiten	
					RP 16	353	443	5	-140	4	Schieferung	
					RP 15, „1835“							
349	79	90	236	90							an Firste	234,90
194	284	61	31	-43	RP 14							203,60
101	191	77	124	-74	Glück-Auf-Stehender							198,80
165	255	14	60	-13	„1832“							192,90
					RP 13	242	332	68	-29	-37		162,00
					RP 12	193	283	4	20	-2		154,10
					„1831“							145,00
												143,90
298	28	72	287	71		293	383	75	-68	74		143,90
						13	103	64	212	48		140,60
212	302	86	13	-74		39	129	65	186	13		138,90
194	284	34	31	-19								137,40
204	294	46	21	-20	„1830“							136,70
						58	148	14	167	3	Schieferung	136,10
197	287	34	28	-18								134,90
					„1829“							134,30
49	139	74	176	-12								132,40
					RP 11							131,30
						189	279	10	36	6		131,00
						203	293	70	23	47		130,10
					„1828“				315			129,00
						69	159	14	156	8	Schieferung	126,90
						183	273	12	42	6	Schieferung	126,80
						277	7	57	308	-54		124,00
						202	292	76	23	38		123,90
						13	103	73	212	-49		123,00
						251	341	77	-26	-69		122,90
						221	311	8	5	-1		122,90

linker Stoß in Kartierrichtung						rechter Stoß in Kartierrichtung						Station in Kartierrichtung (m)
FR (t)	SR (t)	FW (t)	Scheinbares Streichen	Scheinbares Einfallen	Besonderheiten	FR (t)	SR (t)	FW (t)	Scheinbares Streichen	Scheinbares Einfallen	Besonderheiten	
						235	325	35	-10	-15		122,90
						17	107	58	208	-23		122,90
						9	99	78	216	-63		120,70
						256	346	75	-31	-68		120,70
					„1809“							119,30
						41	131	64	185	15		117,40
						34	124	50	191	1		117,40
						200	290	18	25	4		116,30
						52	142	25	173	9		115,50
					„1808“							113,20
						270	360	82	-45	-80		112,20
						212	302	29	13	0		111,30
						41	131	37	184	6		109,70
339	69	68	246	63	Ende Füllort Familienschacht	295	25	85	290	85		109,10
338	68	84	247	82								105,70
348	78	86	237	85								105,60
80	170	76	145	-71								105,60
265	355	90	-40	90	RP 10							104,90
208	298	25	17	-2								104,90
356	86	86	229	82								104,90
198	288	14	27	-4								104,90
260	350	85	-35	-83								104,90
167	257	90	59	-90								104,30
346	76	79	239	75								104,10
71	161	81	154	-76								104,10
86	176	87	139	-87	Beginn Füllort Familienschacht							103,30
					RP 9							104,90
194	284	17	31	-6	Schieferung in Firste							103,20
196	286	86	29	-75	Erzgang in Firste							102,80
						33	123	68	192	1		98,40

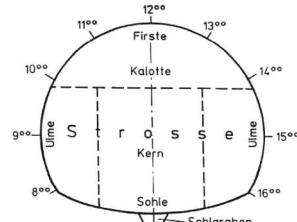
linker Stoß in Kartierrichtung						rechter Stoß in Kartierrichtung						Station in Kartierrichtung (m)
FR (°)	SR (°)	FW (°)	Scheinbares Streichen	Scheinbares Einfallen	Besonderheiten	FR (°)	SR (°)	FW (°)	Scheinbares Streichen	Scheinbares Einfallen	Besonderheiten	
270	360	78	135	74								63,60
282	12	64	303	60								63,60
36	126	85	189	59								63,60
208	298	85	17	-72								62,20
293	23	77	292	76		44	134	86	181	-14	Erzgang	59,80
					„1804“							57,10
												57,10
18	108	23	207	11								51,90
38	128	83	187	45								50,90
29	119	86	196	77								50,90
350	80	82	235	80	RP 6							50,50
												50,50
					„1803“							47,30
						219	309	5	6	0		44,20
125	215	86	100	-85		32	122	88	193	-82		41,90
46	136	90	179	-90								39,90
						29	119	40	196	-13		37,50
						360	90	90	225	-90		37,50
					„1802“	336	66	78	234	-76		36,00
					RP 5							34,60
						275	5	68	296	-65		31,30
						336	66	85	234	-83		28,80
						168	258	86	42	83		28,80
					„1801“							24,50
						199	289	86	11	72		23,30
					RP 4 an Firste, „1800“, Ende Gneisvermauerung							18,30
						104	194	86	181	-9		16,50
						264	354	80	21	64		15,90
						275	5	49	371	12		15,10
					RP 3							14,60
						200	290	82	85	82		8,40

Anlage V: Stollenkarte mit eingezeichneten Trennflächen.



Legende:

- Klüftung, Störung
- Referenzpunkt
- Klüftung, vermutet
- ▷ Streichrichtung des Stollens
- 100 Jahrestafel
- Störungszone
- X vermehrte Wasserabstritte
- N Polpunktadstellung der markierten Klüfte mit 3% Fehlerintervall
- 100 starke Versinterung
- großer Sinter
- Freiberger Normal (innerer) Gneis
- Vermauerung



Anlage VI: Ergebnisse der Wasseraustritt-Kartierung.

Station in Kartier- richtung (m)	Refe- renz- punkt/ Jah- resta- fel	Lage im Stollen (Stoß/Firste)	Anzahl/ Größe der Wasser- austritte	Wasseraustrittart (trocken/ feucht/ tropfend)	Tropfwas- ser- Messung	Beschreibung	Farbe	Mineralische Ausfällung
252		rechts oben und links mittig	mehrere kleine	feucht		max. 45 cm Breite	gräulichweiß	Calcit
		rechts oben	mehrere kleine	feucht bis tropfend		max. 60 cm Länge, 40 cm Breite	gräulichweiß	Calcit
		links	mehrere kleine	feucht bis langsam tropfend			schwarz, z.T. weiß und ockerbraun	Mangan, z.T. Calcit und Limonit
		Firste, z.T. rechts und links oben	mehrere kleine	feucht			schwarz und milchig-weiß	Mangan und Calcit
250,7	RP 16	an Ecke						
		links oben und Firs- te				25 cm Länge, 40 cm Breite	weiß auf rot- braun auf schwarz	Calcit auf Hämatit auf Mangan
		Firste	mehrere kleine	langsam tropfend			schwarz, z.T. auch ocker- braun, weißlich und rotbraun	Mangan, z.T. Limonit, Calcit und Hämatit
		rechts oben		tropfend	5 ml / 20 s	30 cm Länge, 30 cm Breite	ockerbraun auf schwarz	Limonit auf Mangan
		Firste	zwei	langsam tropfend		max. 50 cm Länge, 100 cm Breite	schwarz, z.T. ockerbraun, hohl	Mangan, z.T. Limonit
		rechts		feucht			braun bis ocker- braun	Limonit
241,8	neues Bohr- loch							
		rechts	mehrere kleine	feucht bis langsam tropfend			milchig-weiß	Calcit
		links oben				20 cm Länge, 3 cm Brei- te	ockerbraun auf schwarz	Limonit auf Mangan

Station in Kartier- richtung (m)	Refe- renz- punkt/ Jah- resta- fel	Lage im Stollen (Stoß/Firste)	Anzahl/ Größe der Wasser- austritte	Wasseraustrittart (trocken/ feucht/ tropfend)	Tropfwas- ser- Messung	Beschreibung	Farbe	Mineralische Ausfällung
		links und rechts oben, Störung?		feucht		100 cm Länge, 20 cm Breite	ockerbraun auf schwarz	Limonit auf Mangan
234,9	"1835"	rechts mittig						
		rechts und rechts oben		feucht bis tropfend	5 ml / 10 s	max. 50 cm Länge, 20 cm Breite		
		links und rechts oben		sehr stark tropfend		110 cm Länge, 120 cm Breite	ockerbraun auf schwarz	Limonit auf Mangan
		links oben		stark tropfend	am Stoß dif- fus fließend		ockerbraun bis gelbbraun	Limonit
		rechts oben		tropfend	5 ml / 5 s		ockerbraun und schwarz	Limonit, Mangan
203,6	RP 14							
		links und rechts oben, z.T. Firste	mehrere	langsam tropfend				
		links und rechts oben	zwei	feucht		max- 120 cm Länge, 50 cm Breite	schwarz, ocker- braun, z.T. weißlich	Mangan, Limonit, z.T. Calcit
		links und rechts	zwei	tropfend	5 ml / 15 s und 5 ml / 50 s	max. 15 cm Länge	ockerbraun, weißlich	Limonit, Calcit
		links oben		trocken		Stalagnat, 100 cm Län- ge, 120 cm Breite	dunkelbraun	Limonit
		Firste	mehrere	tropfend	zwei mit 5 ml / 75 s, z.T. langsamere		braun	Limonit
		links und rechts	mehrere	trocken, z.T. feucht bis tropfend	5 ml / 25 s	max. 40 cm Länge	graubraun, z.T. schwarz auf braun	Limonit, z.T. Mangan auf Limonit
198,8	Glück- Auf- Ste- hen- der	rechts oben		trocken		40 cm Breite, lang	graubraun	Limonit

Station in Kartier- richtung (m)	Refe- renz- punkt/ Jah- resta- fel	Lage im Stollen (Stoß/Firste)	Anzahl/ Größe der Wasser- austritte	Wasseraustrittart (trocken/ feucht/ tropfend)	Tropfwas- ser- Messung	Beschreibung	Farbe	Mineralische Ausfällung
				tropfend	5 ml / 100 s			
		links und rechts oben		trocken bis langsam tropfend			weißlich	Calcit
		rechts mittig		trocken		160 cm Länge, halbrund, 30 cm Durchmesser	schwarz auf braun	Mangan auf Limonit
		links mittig		feucht, z.T. lang- sam tropfend		90 cm Länge	schwarz auf ockerbraun	Mangan auf Limonit
		links oben		langsam tropfend		Stalagtitlänge 40 cm, Stalagmitlänge 70 cm, schmal	dunkelbraun	Limonit
192,9	"1832"							
		links oben		trocken bis feucht			weißlich	Calcit
		links oben	mehrere	trocken		10-30 cm Länge	dunkelbraun	Limonit
162	RP 13							
		links oben		trocken		diffus verteilt	dunkelbraun	Limonit
154,1	RP 12							
		Firste und linker Stoß	mehrere	feucht			weißlich	Calcit
		links oben		trocken		40 cm Länge, 140 cm Breite, diffus verteilt	dunkelbraun bis schwarz	Limonit. Mangan
145	"1831"							
		rechts oben		trocken			graubraun	Limonit
		links mittig		trocken		140 cm Länge, halbrund, 15 cm Durchmesser	graubraun	Limonit
136,7	„1830“	links oben	mehrere (ca. 2/m)	feucht			schwarz und z.T. weiß auf braun	Mangan und z.T. Calcit auf Limonit
		rechts oben	mehrere	trocken bis feucht		max. 50 cm Länge	graubraun	Limonit
134,3	"1829"		mehrere				weißlich	Calcit

Station in Kartier- richtung (m)	Refen- renz- punkt/ Jah- resta- fel	Lage im Stollen (Stoß/Firste)	Anzahl/ Größe der Wasser- austritte	Wasseraustrittart (trocken/ feucht/ tropfend)	Tropfwas- ser- Messung	Beschreibung	Farbe	Mineralische Ausfällung
131,3	RP 11	links mittig						
		links oben	mehrere	feucht		60 cm Länge, 80 cm Breite	ockerbraun	
		links oben		tropfend	5 ml / 60 s	20 cm Länge, schmal	milchig-weiß	Calcit
		linker Stoß		trocken bis feucht			milchig-weiß	Calcit
		rechts oben		feucht		max. 70 cm Länge und 40 cm Breite	rot- und ockerbraun auf dunkelgrau	Mangan, Limonit, Hämatit
		rechts oben		langsam tropfend		90 cm Länge		
		linker Stoß ab hier trockener, rechts feucht						
		links oben	mehrere	tropfend	5 ml / 23 s, 5 ml / 35 s und 5 ml / 40 s	40 cm Breite, lang		
119,3	"1809"	links mittig						
		links oben		langsam tropfend		25 cm Länge		
		oben links und rechts	mehrere	trocken bis feucht, z.T. tropfend			dunkelbraun, z.T. gräulich-blau	Mangan, Calcit
113,2	"1808"	links oben						
		links oben		trocken		lang	schwarz und ockerbraun	
		oben links und rechts		feucht bis tropfend		max. 60 cm Länge und 20 cm Breite	schwarz und ockerbraun	Mangan, Limonit
104,9	RP 10	rechts mittig nach Familienschacht						
103,3	Füllort Fami- lien- schac ht	links mittig	mehrere	feucht, Wasseraus- trittsstellen			ockerbraun bis weißlich	Limonit, Calcit

Station in Kartier- richtung (m)	Refen- renz- punkt/ Jah- resta- fel	Lage im Stollen (Stoß/Firste)	Anzahl/ Größe der Wasser- austritte	Wasseraustrittart (trocken/ feucht/ tropfend)	Tropfwas- ser- Messung	Beschreibung	Farbe	Mineralische Ausfällung
94,4	"1807"	links mittig						
		links oben bis oben	mehrere	feucht bis tropfend	1 Tropfen / 60 s	kurz bis lang und schmal	schwarz, z.T. ockerbraun bis weißlich	Mangan, Limonit, Calcit
87,4	RP 8	rechts mittig						
		links oben		feucht bis tropfend		90 cm Länge und 70 cm Breite	schwarz auf dunkel- bis ockerbraun	Mangan, Limonit
		links oben		tropfend	1 Tropfen / 15 s	lang und schmal	ockerbraun	Limonit
80,8	"1806"	links mittig						
		links mittig						
		rechts mittig	klein	feucht			Hellgrün-weißlich	Calcit
		links oben	mehrere	feucht bis tropfend		Max. 50 cm Länge	gräulichweiß, ockerbraun bis dunkelbraun, z.T. grünlich	Calcit, Limonit
		rechts oben	mehrere	feucht bis tropfend		Max. 30 cm Länge	dunkelbraun bis schwarz	Mangan
77,1	RP 7	links mittig						
		oben	stellenweise	feucht			gräulichweiß	Calcit
		rechts oben	mehrere große	trocken bis feucht		Max. 110 cm Länge und 40 cm Breite	dunkelbraun bis schwarz	Mangan
		rechts oben	mehrere große (ineinan- der über- gehend)	feucht bis tropfend			schwarz	Mangan
68	"1805"	oben		Wasseraustritt			schwarz	Mangan
		links und rechts oben	mehrere kleine	trocken		Max. 20 cm Länge	ockerbraun bis graubraun	Limonit, (Calcit?)

Station in Kartier- richtung (m)	Refen- renz- punkt/ Jah- resta- fel	Lage im Stollen (Stoß/Firste)	Anzahl/ Größe der Wasser- austritte	Wasseraustrittart (trocken/ feucht/ tropfend)	Tropfwas- ser- Messung	Beschreibung	Farbe	Mineralische Ausfällung
		rechts mittig		feucht		10 cm Länge und 15 cm Breite	gelblichweiß	Calcit
		oben		nahezu trocken				
57,1	"1804"							
		oben bis oben rechts		trocken bis feucht, z.T. Langsam trop- fend		unterschiedlich	schwarz bis ockerbraun	Mangan, Limonit
		links oben		trocken		50 cm Länge und 20 cm Breite	schwarz	Mangan
50,5	RP 6	rechts mittig					weißlich	Calcit
		oben, z.T. rechts bis links	mehrere	trocken, z.T. Trop- fend	5 ml / 80 s		schwarz	Mangan
47,3	„1803“	links oben	mehrere	langsam tropfend		max. 50 cm Länge und 60 cm Breite	schwarz, z.T. rot	Mangan, Hämatit
		links und rechts oben	mehrere	feucht			schwarz, z.T. braun und ockerbraun	Mangan, Hämatit, Limonit
		rechts oben	mehrere (ca. 2/m)	feucht		80 cm Breite	schwarz, z.T. ockerbraun	Mangan, Limonit
		Übergang der Sinter vom linken zum rechten Stoß (Erzgang!)						
34,6	RP 5	links mittig						
		rechts mittig	groß	tropfend	5 ml / 20 s	90 cm Länge und 30 cm Breite	schwarz	Mangan
24,5	"1801"							
		links oben	mehrere (ca. 1/m)	trocken		max. 40 cm Länge	schwarz	Mangan
		rechts oben		trocken		60 cm Länge und 60 cm Breite	schwarz	Mangan
		links oben	groß	trocken		85 cm Länge, 120 cm Breite	schwarz, z.T. ockerbraun	Mangan, (Limonit)

Station in Kartier- richtung (m)	Refe- renz- punkt/ Jah- restafel	Lage im Stollen (Stoß/Firste)	Anzahl/ Größe der Wasser- austritte	Wasseraustrittart (trocken/ feucht/ tropfend)	Tropfwas- ser- Messung	Beschreibung	Farbe	Mineralische Ausfällung
		oben bis links oben	mehrere gro- ße/breite	feucht bis tropfend		max. 120 cm Länge und 140 cm Breite	dunkel- bis ockerbraun, z.T.milchig- hellgrau oder rötlichbraun	Limonit, Hämatit, (Calcit)
18,3	"1800"	oben						
	Ende Gneis- ver- maue- rung	rechts mittig		Wasseraustritt		30 cm Länge	ockerbraun	Limonit
		rechts mittig		Wasseraustritt		20 cm Länge	dunkelbraun	Limonit, Mangan?
		rechts mittig		Wasseraustritt		10 cm Länge	ockerbraun	Limonit
		rechts mittig		trocken		50 cm Länge	schwarz	Mangan
		links						
14,6	RP 3	links						
		rechts unten	mehrere	trocken bis feucht		max. 90 cm Länge, hart	schwarz	Mangan
		links	mehrere	trocken bis feucht		"Manganknollen" über mehrere "Gitteretagen"	schwarzbraun, z.T. milchig- weißbraune Wassertropfen	Mangan, Limonit, (Calcit)
		links und rechts	mehrere	tropfend			schwarz bis ockerbraun	Mangan, Limonit
	Beginn Gneis- ver- maue- rung	links und rechts	mehrere größere	feucht, z.T. Was- seraustritte		5-70 cm Länge	schwarz, z.T. braun bis ocker- braun	Mangan, Limonit
1,9	Durch schnit tssch.	links	mehrere kleine	langsam tropfend		8-25 cm Länge	braun, z.T. grau- grün	Limonit

Anlage VII: Übersicht über die Probenahmestellen und gemessenen Vor-Ort-Parameter von Grubenwasser und Zuflüssen.

Messstelle in Fließrichtung	ATFS/Zufluss	Messstelle	Datum	Uhrzeit
1	Grubenwasser ATFS auf dem Jonas-Spat	hinter neuer Bohrung, bei Jahrestafel "1836"	28.08.2008	09:00
2	Grubenwasser ATFS auf dem Jonas-Spat	vor neuer Bohrung, zwischen Jahrestafeln "1835" und "1834"	07.10.2008	10:00
3	Zufluss: Glück-Auf-Sthd.	Kreuzungspunkt Glück-Auf-Sthd. / Jonas Spat	06.10.2008	11:45
4	Grubenwasser ATFS auf dem Jonas-Spat	beim großen Stalagmit, zwischen Jahrestafeln "1832" und "1833"	28.08.2008	10:45
5	Grubenwasser ATFS auf dem Jonas-Spat	im Bereich der Jahrestafel "1830"	13.10.2008	10:50
6	Grubenwasser ATFS auf dem Jonas-Spat	Füllort des Familienschachts	13.10.2008	10:00
7	Grubenwasser ATFS auf dem Jonas-Spat	zwischen den Jahrestafeln „1805“ und „1806“	13.10.2008	09:30
8	Zufluss: Stalagtit-Tropfwasser	Kreuzungspunkt Jonas-Spat / Georgen-Sthd., bei Jahrestafel "1800"	07.10.2008	11:00
9	Zufluss: Durchschnittsschacht	wenige Meter vor der Jahrestafel „1799“	07.10.2008	12:30
10	Grubenwasser ATFS auf dem Georgen-Sthd.	im Bereich der Jahrestafel „1799“, nahe des neuen Wehres	13.10.2008	08:45
11	Grubenwasser ATFS auf dem Georgen-Sthd.	Rohr	07.10.2008	08:30
12	Grubenwasser ATFS auf dem Georgen-Spat	vorm Dreiecks-Messwehr	06.10.2008	08:30

Messstelle in Fließrichtung	Wasser-temperatur (°C)	pH-Wert ()	O ₂ -Gehalt (mg/L)	O ₂ -Sättigung (%)	Redox-potenzial (mV)	Elektrische Leitfähigkeit (µS/cm)	TDS (ppm)
1	10,4	7,5	9,8	91,3	300	850	553
2	10,9	7,0	9,7	91,2	530	865	562
3	10,7	6,7	7,8	73,5	640	1237	804
4	10,3	6,7	9,9	91,8	330	873	568
5	10,3	n.b.	9,8	91,2	n.b.	890	579
6	10,3	n.b.	9,9	91,5	320	898	584
7	10,3	n.b.	9,6	91,5	340	897	583
8	10,7	7,3	8,9	85,2	390	1676	1089
9	11,2	7,0	9,9	93,3	610	1436	933
10	10,4	n.b.	10,2	94,5	330	965	627
11	10,4	7,2	9,9	94,3	280	988	642
12	10,3	7,5	10,0	94,3	230	1040	642

Anlage VIII: Ergebnisse der Rasterelektronenmikroskopie.

Probe	Al ₂ O ₃ (Gew.%)	SiO ₂ (Gew.%)	CaO (Gew.%)	As ₂ O ₃ (Gew.%)	MnO (Gew.%)	PbO (Gew.%)	K ₂ O (Gew.%)	SO ₃ (Gew.%)	Fe ₂ O ₃ (Gew.%)
Sedimentkern S₁									
S ₁ /A1	0,9 ± 0,05	6,7 ± 0,9	6,0 ± 0,3	1,2 ± 0,5	30,2 ± 0,4	1,1 ± 0,4	0,8 ± 0,05	19,2 ± 0,2	28,4 ± 0,6
S ₁ /A2	1,8 ± 0,1	11,0 ± 0,1	1,6 ± 0,1	1,6 ± 0,6	21,3 ± 0,5	3,6 ± 0,2	-	0,2 ± 0,05	50,7 ± 0,6
S ₁ /A3	3,2 ± 0,1	10,5 ± 0,2	1,6 ± 0,1	4,8 ± 0,6	24,3 ± 0,5	6,2 ± 0,3	0,2 ± 0,1	-	44,7 ± 0,6
Sedimentkern S₂									
S ₂ /A1	4,9 ± 0,1	10,3 ± 0,1	1,9 ± 0,1	1,2 ± 0,3	49,2 ± 0,6	0,7 ± 0,2	1,5 ± 0,1	0,2 ± 0,1	20,2 ± 0,5
S ₂ /A2+3	1,3 ± 0,1	9,5 ± 0,1	1,4 ± 0,1	-	20,7 ± 0,4	1,3 ± 0,2	0,2 ± 0,1	0,4 ± 0,1	55,1 ± 0,6
S ₂ /A4+5	2,9 ± 0,1	8,7 ± 0,2	2,2 ± 0,1	1,2 ± 0,5	25,9 ± 0,6	0,6 ± 0,2	0,3 ± 0,6	-	41,2 ± 0,6
S ₂ /A6	1,0 ± 0,1	10,0 ± 0,2	1,9 ± 0,1	1,8 ± 0,6	23,7 ± 0,5	1,5 ± 0,3	-	0,3 ± 0,1	50,1 ± 0,7

Anlage IX: BSE-Aufnahmen der untersuchten Grubensediment- und Stalagtitproben.

