

Halden in Freiberg und Brand-Erbisdorf

Institut für Hydrogeologie der
Technischen Universität Bergakademie Freiberg

Diplomarbeit und Diplomkartierung

vorgelegt

von Jörg Winkler



Betreuer: Prof. Dr. Broder Merkel

Dr. Christian Wolkersdorfer

Grödel, November 2006

Danksagung

Herrn Prof. B. Merkel danke ich für die Betreuung der Arbeit. Weiterhin danke ich Herrn Dr. Nicolei Kummer für die gute Betreuung während der Laborarbeit. Frau Anja Obst danke ich für die Hilfe bei den REM- Untersuchungen. Bei Herrn Dipl.- Chem. Arndt Weiske (TU Dresden, Institut für Allgemeine Ökologie und Umweltschutz Außenstelle Tharandt) möchte ich mich für die Durchführung der chemischen Analysen von Eluationslösungen bedanken.

Für die Hilfe beim Ausheben der Schürfe bedanke ich mich sehr bei Herrn Rene „Larry“ Kollhoff. Weiterhin danke ich Frau C. Henke und Frau C. Kleinickel für ihre Motivation.

Besonders möchte ich meinen Eltern danken, die mir das Studium ermöglichten, sowie meiner Schwester für ihre Unterstützung.

Allen anderen Personen, die hier nicht genannt sind, aber zum Zustandekommen dieser Arbeit beigetragen haben, danke ich ebenfalls.

Inhaltsverzeichnis

I. Diplomarbeit

1. Zielstellung.....	5
2. Geologie und Bergbau.....	6
2.1 Geologie und Tektonik.....	6
2.2 Hydrologie und Hydrogeologie.....	7
2.3 Der Freiberger Bergbau.....	8
2.4 Halden im Freiberger Revier.....	10
2.5 Ausgewählte Halden.....	11
2.5.1 Halde entlang des Fürstenstolln.....	12
2.5.2 Halde des Thurmhofschautes 6. und 7. unteres Maß.....	13
2.5.3 Halde des Ludwigschautes.....	13
2.5.4 Halde des Junge Hohe Birke Schachtes.....	15
2.5.5 Halde des Vertrau auf Gott Schachtes.....	16
2.5.6 Bekannte Daten der 5 Halden.....	17
3. Materialien und Methoden.....	18
3.1 Probenahme.....	18
3.2 Lösungsversuche.....	18
3.3 Untersuchungen am Rasterelektronenmikroskop.....	19
3.4 Untersuchungen am Massenspektrometer.....	20
3.5 Königswasseraufschluß.....	22
4. Darstellung und Diskussion der Untersuchungsergebnisse.....	23
4.1 Verwitterung – ein wichtiger Faktor zur Beurteilung der Halden.....	23
4.1.1 Verwitterungsarten.....	23
4.2 Geochemische Charakteristik des Haldenmaterials.....	30
4.2.1 Chemische Zusammensetzung.....	30
4.2.2 Vergleich der Oberflächen.....	31
4.2.3 Ergebnisse der Eluationsversuche.....	34
4.3 Schwermetallbindungsformen und deren Mobilität.....	36
4.4 Vergleich der Eluierbarkeit der Schwermetalle und Spurenelemente der einzelnen Halden.....	42

4.4.1 Fürstenstolln.....	43
4.4.2 Maßschacht.....	44
4.4.3 Junge Hohe Birke.....	44
4.4.4 Vertrau auf Gott Schacht.....	45
4.4.5 Ludwigschacht.....	46
4.5 Abschätzung des Gefährdungspotentials.....	46
4.5.1 Halde des Fürstenstolln.....	46
4.5.2 Maßschachthalde.....	47
4.5.3 Halde des Junge Hohe Birke Schachtes.....	47
4.5.4 Halde des Vertrau auf Gott Schachtes.....	48
4.5.5 Halde des Ludwigschachtes.....	48
4.6 Mechanismen die den Austrag von Spurenelementen verhindern.....	50

II. Kartierung des Haldenaufbaus

1. Aufgabenstellung.....	53
2. Krustenbildung.....	53
3. Durchgeführte Arbeiten.....	54
4. Profile und Schichtenbeschreibung.....	54
4.1 Halde entlang des Fürstenstoll.....	54
4.2 Halde des Maßschachtes	59
4.3 Halde des Junge Hohe Birke Schachtes.....	63
4.4 Halde des Vertrau auf Gott Schachtes.....	67
4.5 Halde des Ludwigschachtes.....	71

III. Zusammenfassung und Einschätzung.....	75
---	----

IV. Literaturverzeichnis.....	77
--------------------------------------	----

V. Anhang (siehe Datenträger)	
--------------------------------------	--

Abkürzungsverzeichnis

FS	Fürstenstolln
MS	Maßschacht
VAG	Vertrau auf Gott Schacht
JHB	Junge Hohe Birke Schacht
LS	Ludwigschacht
ICP-MS	Massenspektrometer mit induktiv gekoppeltem Plasma
REM	Rasterelektronenmikroskop
EDX	Energiedispersive Röntgenfluoreszenz
PE	Polyethylen

k_f Durchlässigkeitsbeiwert

I. Diplomarbeit

1. Zielstellung

Der über 800 Jahre andauernde Bergbau im Freiberger Revier hat anhand von unzähligen Halden und Grubenbauen seine Spuren hinterlassen. Diese Hinterlassenschaften sind teilweise auch nach vielen Jahren noch zu erkennen. Über das gesamte Freiberger und Brander Revier sind mehrere hundert Bergbauhalden unterschiedlichen Alters und Größe erhalten geblieben. Diese Aufschüttungen setzen sich aus taubem Gestein, aus Erzanteilen, welche in der jeweiligen Zeit noch nicht wirtschaftlich von Bedeutung oder nicht bekannt waren sowie aus erzhaltigem Gestein mit so geringem Erzanteil, das eine Weiterverarbeitung nicht lohnte, zusammen. Die in den aufgehaldeten Gesteinen enthaltenen Bestandteile verändern sich im Laufe der Zeit durch exogene oder endogene Vorgänge und führen z.B. zu einer Oxidation von Sulfiden. Durch Lösung gelangen diese Schadstoffe über das Sickerwasser ins Grundwasser.

Durch anlegen eines Schurzes sollen dem Haldenkörper Gesteinsproben entnommen werden sowie der Aufbau der Halde, soweit dieser aufgeschlossen ist, kartiert werden. Die Oberflächen werden unter dem Rasterelektronenmikroskop untersucht und Lösungsversuche mit Oxal- und Essigsäure durchgeführt.

Ziel dieser Diplomarbeit mit angeschlossener Diplomkartierung, ist es, das Gefährdungspotential, welches von Bergbauhalden auf das Sicker- und Grundwasser ausgeht, abzuschätzen.

2. Geologie und Bergbau

2.1 Geologie und Tektonik

Zur Geologie des Freibergerlagerstättenbezirges wurde in der Vergangenheit eine Vielzahl von Publikationen veröffentlicht. So z.B. von Baumann (1958), Pietzsch (1962), Hofmann (1974), Gotte & Schust (1993).

Das Grundgebirge des Freibergerreviers besteht hauptsächlich aus aufgewölbten Gneisen. Es handelt sich hierbei überwiegend um Gneis der unteren Gneisstufe, welcher vor allem als Freiberger Grau- oder Normalgneis mit granodioritischer Zusammensetzung auftritt. Selten wird er von Granatglimmerschiefer, Amphibolith und Quarzporphyr begleitet. Begleitende Gneisvarietäten werden Brander, Himmelsfürster und Wegefahrter Gneis genannt. Der Kerngneis wird in weiten Teilen von Sulfiderzgängen durchzogen. Die Freiberger Gneiskuppel wird vom Äußeren Gneis, dem Marienberger und Annaberger Gneis, umgeben.

Der Kerngneis setzt sich aus den folgenden Hauptmineralen zusammen: Plagioklas, Kalifeldspat, Quarz, Biotit und Muskovit. Diese Minerale verwittern oberflächennah zu einem grusigen Gneiszersatz sowie zu sekundären Tonmineralen und Limonit.

Während der vareszischen Orogenese, speziell während der sudetischen und erzgebirgischen Phase, bildeten sich zwei Bruchspaltensysteme, ein jüngeres und ein älteres, im Kerngneis heraus.

Dabei entstanden zwei Scher- und Fiederspaltensysteme. Die tektonisch stärker beanspruchten Scherspalten dominieren mit hauptsächlich NNO-SSW und O-W streichenden Spalten das tektonische System. Die ruschelartig ausgebildeten Gebilde sind meist steil einfallend und häufig stark vererzte Gangkörper. Die Fiederspalten schließen sich den zugehörigen Scherklüften spitzwinkelig an. N-S streichende Fiedergänge sind oft stark zertrümmert und auskeilend ausgebildet, während NW-SO verlaufende gut ausgebildet sind und z.T. Scherspalten miteinander verbinden. Die Fiederspalten sind oft auch als Erzgänge ausgebildet.

Vererzung ist ausschließlich an das tektonische entstandene Spaltensystem gebunden.

Es kam zu einer zeitlichen Abfolge hydrothermaler Mineralisationen, die in den meisten der durchschnittlich 0,8 m mächtigen, bis mehrere km streichenden Gänge zwei oder mehr Mineralparagenesen hinterließ.

Die in Formationen eingeteilte primäre Mineralisation, umfasst hauptsächlich auftretende Paragenesen von Erzen und Gangart. Für das Freiberger Gebiet sind dabei die kiesig-blendige Bleierzformation (kb-Formation) und die fluor-barytische Bleierzformation (fba-Formation) von besonderer Bedeutung. Bei den auftretenden Hauptmineralen handelt es sich im Besonderen um Pyrit, Pyrrhotin, Arsenopyrit, Sphalerit, Galenit, Kassiterit, Chalkopyrit, Tetraedrit, Proustit, Pyrargyrit und Markasit sowie Quarz, Baryt und Fluorit. Weiterhin von Bedeutung sind die Eisen-Baryt-Formation (eba-Formation), die edle Braunsplatformation (eb-Formation), die BiCoNiAg-Formation sowie untergeordnet die Zinn-Wolfram-Formation (Sn-W-Formation) und als jüngere Bildung Eisen-Mangan-Erzgänge (Fe-Mn-Formation).

Durch die von der Oberfläche auf die Erdkruste einwirkenden Verwitterungsvorgänge wurden sowohl die Gesteine als auch die Minerale in den Gängen im Laufe der Zeit verändert. Eine Vielzahl von Sekundärmineralen entstanden. Durch diese Prozesse kam es auch in dem Bereich von Erzgängen zur Bildung einer Oxydationszone, die sich die Zementationszone anschließt. Darunter folgt das unverwitterte Gestein.

Durch diese Vorgänge kam es unter anderem zu Anreicherungen bestimmter Minerale und Elementen, wie z.B. Silber, die den Freiberger Bergbau ermöglichten.

2.2 Hydrologie und Hydrogeologie

Das Freiberger Bergbaurevier befindet sich im Einzugsgebiet der Freiberger Mulde, der Striegis sowie des Münzbaches. Es handelt sich um ein flachwelliges bis hügeliges Gebiet im Erzgebirgsvorland mit vorwiegend humiden Klima und einem Jahresniederschlag, der im Durchschnitt 840mm beträgt (Berrios 1995).

Die Grundwasserneubildungsrate, welche bei etwa 3,3 bis 3,9 l/s•km² (Berrios 1995, Kraft & Schräber 1982) liegt, wird durch den doch teilweise stark klüftigen und auch stark zerrütteten Gneis, aber auch durch die lößlehmige Hauptlage und die grobklastische Basislage der Bodenbedeckung bestimmt. Die Mächtigkeit der Basislage schwankt zwischen 0 bis mehreren Metern. Die Grundwasseroberfläche befindet sich in einer Tiefe von ca. 1m bis >6m (Rösner 1987). Im Kluftgrundwasserleiter wird von einer gesättigten Grundwasserzone ausgegangen. Die Größe der Klüfte reicht von kleinen Rissen bis zu komplexen Hohlräumen (Drusen) in den Erzgängen.

Neben der geogen entstandenen Hydrosphäre entwickelte sich durch den jahrhunderte dauernden Bergbau und den aufgefahrenen unterirdischen Grubenbauen ein neues internes hydraulisches System heraus, welches als eigenständiger Aquifer angesehen werden kann (Baake 2001). Diese Teilsysteme stehen in unmittelbarer Wechselwirkung miteinander. Die offenen Grubenbaue ermöglichen durch ihre hohe Wasseraufnahmekapazität ($k_f=10^0\text{-}10^1$ (Milde 1973)) eine lokale Entlastung des Grundwasserleiters sowie dem Grund- und Sickerwasser sehr gute Wegsamkeiten. Grubenwasser wird zum Teil über alte Stollen der Mulde zugeführt.

Eine Besonderheit des Freiberger Bergbaureviers ist der von 1844-1890 (Wagenbreth 1988) erbaute Rothsönberger Stolln. Er entwässert die Freiberger Grube und weitere Gruben der Lagerstätte, in den Fluss Triebisch bei Meißen. Dieses Bauwerk, mit einer Länge von 28,9 km, markiert bei 200 m NN die Oberfläche des Grundwassers im gefluteten Teil des Reviers.

2.3 Der Freiberger Bergbau

Der Bergbau in und um Freiberg begann mit den ersten Silberfunden um das Jahr 1168. Die ersten Grubenbaue entstanden wohl in der Nähe der heutigen Wasserturmstraße bzw. in der Gegend des Helmertplatzes. Bis zur endgültigen Stilllegung im Jahr 1969, wechselten sich Perioden lebhaften Bergbaus mit Zeiten der Stagnation und Depression ab. Die Ursachen hierfür sind in der geologischen Situation, sowie in den technischen, wirtschaftlichen und politischen Verhältnissen in den jeweiligen Zeitabschnitten zu suchen. Den über 800 Jahre andauernden Bergbau kann man somit in vier Hauptperioden einteilen.

Die erste Hauptperiode begann mit der Entdeckung des Silbervorkommens im Gebiet der heutigen Freiberger Altstadt. In den folgenden Jahren entwickelte sich eine reiche Schürftätigkeit, welche durch die Freigabe des Bergbaus für jedermann durch den Markgrafen Otto von Wettin hervorgerufen wurde. In wenigen Jahren waren alle Erzgänge bekannt. Die aus der Oxidationszone abgebauten reichen Silbererze führten zu einem großen Wohlstand bei den erfolgreichen Bergleuten und dem Landesherren.

Die erste Blütezeit endete offenbar um 1380, als die reichen Erze abgebaut waren. Geringere Silbergehalte der Erze des unverwitterten Bereichs waren damals schwer abzubauen.

Die zweite Blütezeit des Bergbaus fand um 1500 statt. Der Grund hierfür ist in der Entwicklung des Kapitalismus zu suchen. Reiche Handelshäuser entstanden, z.B. in Nürnberg und Leipzig. Im oberen Erzgebirge wurden neue Silberfunde bekannt. In diese Zeit fällt unter anderem auch die Gründung der Bergstätte Schneeberg und Annaberg. Im Freiberger Revier wurden jedoch keine neuen Erzgänge entdeckt. Freiwerdendes Kapital wurde zum Bau von Entwässerungstönn, Förder-, Wasserhebungs- und Aufbereitungsmaschinen verwendet. Dadurch konnten größere Tiefen erreicht werden und damit auch mehr Erz gefördert werden.

Die Gründung des Freiberger Oberbergamtes 1542 fällt auch in die zweite Hauptperiode des Erzbergbaus.

Die zweite Blütezeit endete um 1600. Ein Grund war, dass mit den damalig zur Verfügung stehenden Techniken die maximalen Teufen erreicht waren.

Die dritte Hauptperiode ging einher mit der Gründung der Bergakademie Freiberg 1765. Man versprach sich davon neue Techniken im Bergbau und Hüttenwesen.

Es war auch die Zeit der Industriellen Revolution in Deutschland und England, welche jedoch keinen direkten Einfluss auf den Aufschwung des Bergbaus in Freiberg hatte.

Teilweise wurden jetzt auch Maschinen bei der Förderung und Wasserhebung eingesetzt. Um die Gruben weiterhin rentabel betreiben zu können, gründete man 1852 den „Revierausschuß“. Seitdem war das ganze Revier eine wirtschaftliche Einheit. Im Jahre 1884 erreichte der Freiberger Bergbau mit 35057,435 kg Silber die höchste Jahresproduktion seiner Geschichte.

Als nach der Gründung des Deutschen Reiches die Silberwährung abgeschafft war, wurden die Freiberger Gruben binnen weniger Jahre unrentabel.

1903 beschloss der sächsische Landtag den Freiberger Bergbau planmäßig stillzulegen. Die umliegenden Hütten blieben weiterhin in Betrieb. Sie verarbeiteten ausschließlich ausländische Erze.

Die letzte Bergbauperiode begann 1935. Durch die Kriegsvorbereitungen im damaligen Deutschland waren die Freiberger Erze wieder von Bedeutung. Gefördert wurden hauptsächlich Erze zur Bundmetallgewinnung.

Nach 1945 wurden die Gruben *Beihilfe* und *Himmelfahrt Fundgrube* erweitert und bis zur geplanten Stilllegung 1969 als „Grube Freiberg“ betrieben.

Damit endete der 800 jährige Bergbau mit seiner wechselvollen Geschichte.

Bis zu diesem Zeitpunkt wurden Silber, Kupfer, Blei, Zink, Arsen, Gold (in geringen Mengen als Nebenprodukt) und Pyrit gewonnen. Als Nebenprodukte bzw. Spurenelemente sind Kobalt, Nickel, Cadmium, Germanium, Indium, Wismut und Zinn in den Freiberger Erzmineralen enthalten.

Insgesamt sind ca. 1100 Erzgänge bergmännisch aufgeschlossen.

2.4 Halden im Freiberger Revier

In den Jahren des Bergbaus in der Freiberger Region entstanden unzählige Halden, auf denen Taubes Gestein und wenig ergiebiges Erz aufgeschüttet wurden. Meist geschah dies unmittelbar um die jeweilige Grube herum. Das auf den Halden verkippte Material, die so genannten Grobberge, besteht zu ca. 90% aus Gneis und zu 10% aus Gangart.

Über 300 Halden, die heut noch in und um die Stadt Freiberg sichtbar sind, sind stumme Zeugen, der über acht Jahrhunderte andauernden Bergbautradition. Das Spektrum reicht von Halden aus der Anfangszeit des Bergbaus, diese Aufschüttungen sind heute als kleine Erhebungen mit einer Höhe bis ca. 2m und einer Länge und Breite von etwa 10-15m zu erkennen, bis hin zu sehr großen Halden aus der letzten Periode des Bergbaus, mit Höhen um die 20 m und einer Länge und Breite von mehreren 100 m. Es lassen sich unterschiedliche Haldentypen erkennen, welche nach Bock (1986) klassifiziert werden können.

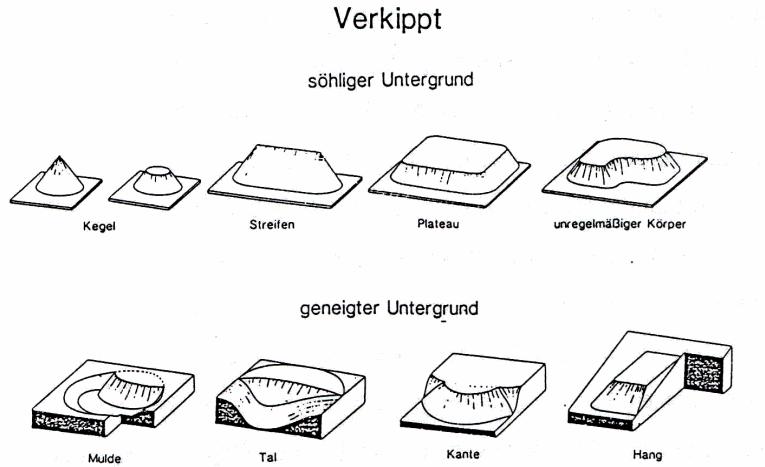


Abb 1: Einteilung der Haldentypen (BOCK , 1986)

Der Ausgangspunkt der Arbeit bildete die Auswahl von 5 Halden, welche gleichmäßig die 800 jährige Entwicklung des Bergbaus wieder spiegeln. Dieses Unterfangen gestaltete sich etwas schwierig, da diese nirgends verzeichnet waren. Die Alter der ausgewählten Halden konnten deshalb nur mit dem Alter des zugehörigen Schachtes bestimmt werden. Angaben über die Art der Schüttung oder die Zeit, wie lange auf jene Halde aufgeschüttet wurde, sind kaum vorhanden. Deshalb ist es nicht auszuschließen, dass auf eine z.B. auf das 14. Jahrhundert datierte Halde noch mehrere Jahrhunderte später Gestein aufgeschüttet wurde. Weiterhin kann es sein, dass im Laufe der Zeit Material aus anderen Regionen oder andere Gruben auf die Halde verkippt wurden. Dies ist insbesondere bei größeren und jüngeren Halden möglich.

2.5 Ausgewählte Halden

Die Auswahl, der zu untersuchenden Halden erfolgte anhand von verfügbaren Karten („Der Bergbau um Brand-Erbisdorf“ und die Karten von Weinhold (1866)), durch die Diplomkartierung von Peggy Melzer, dem von Yvonne Fischer erstellten digitalen Atlas sowie durch Unterlagen des Bergarchivs Freiberg.

Die Auswahlkriterien waren neben der zeitlichen Einordnung auch Eigentumsverhältnisse und Begehbarkeit der Halden.

Die Eigentümer wurden mit freundlicher Unterstützung des Landesvermessungsamtes Zschopau ermittelt. Nach Einholen der Genehmigungen der betreffenden Eigentümer und der unteren Naturschutzbehörde, wurden fünf Halden gewählt. Für die Untersuchungen wurden die *Halde des Fürstenstolln*, die *Maßschachthalde*, die *Halde des Junge Hohe Birke Schachtes*, die *Halde des Vertrau auf Gott Schachtes* und die *Halde der Roten Grube* gewählt. Nach Anlegen des Schurzes auf dem Schacht „*Rote Grube*“ wurde festgestellt, dass die aufgeschlossenen Schichten aus Aufschüttung, z.B. mit Bauschutt, bestanden. Damit war es nicht möglich eine aussagekräftige Probe zu entnehmen und statt dessen die Halde des *Ludwig Schachtes*, die in etwa in die gleiche Zeitspanne einzuordnen ist, für die Untersuchungen ausgewählt.

2.5.1 Halde entlang des *Fürstenstolln*

Diese Halde, welche in der Streifenform verkippt wurde, befindet sich nördlich der *Reichen Zeche*, in der Nähe des Tuttendorferweg. Es handelt sich um eine sehr kleine Halde aus den Anfangsjahren des Bergbaus in Freiberg. Die Entstehung wird auf ca. 1384 festgelegt.



Abb 2: Halde des Fürstenstolln

2.5.2 Halde des *Thurmhofschautes* 6. und 7. unteres Maß

Auf dem Grundstück der Kleingartenanlage „Am Maßschacht“ befindet sich die als Maßschachthalde bezeichnete Halde, welche in Kegelform angelegt wurde. Gegen 1544 wurde damit begonnen, sie aufzuschütten. Die Betriebszeit des Schachtes wird in der Literatur von 1544 bis 1618 angegeben.



Abb 3: Halde des Maßschachtes

2.5.3 Halde des *Ludwig Schachtes*

Östlich der Reichen Zeche und westlich Halsbachs, am rechten Ufer der Freiberger Mulde, erstreckt sich die große Halde des Ludwig Schachtes. Die Grube wurde ab 1852 betrieben. Da auf ihr auch Material aus den 60iger Jahren des 20 Jahrhunderts abgelagert wurde, ist diese Halde in die vierte Hauptperiode des Freiberger Bergbaus einzuordnen.



Abb 4: Halde des Ludwig- Schachtes

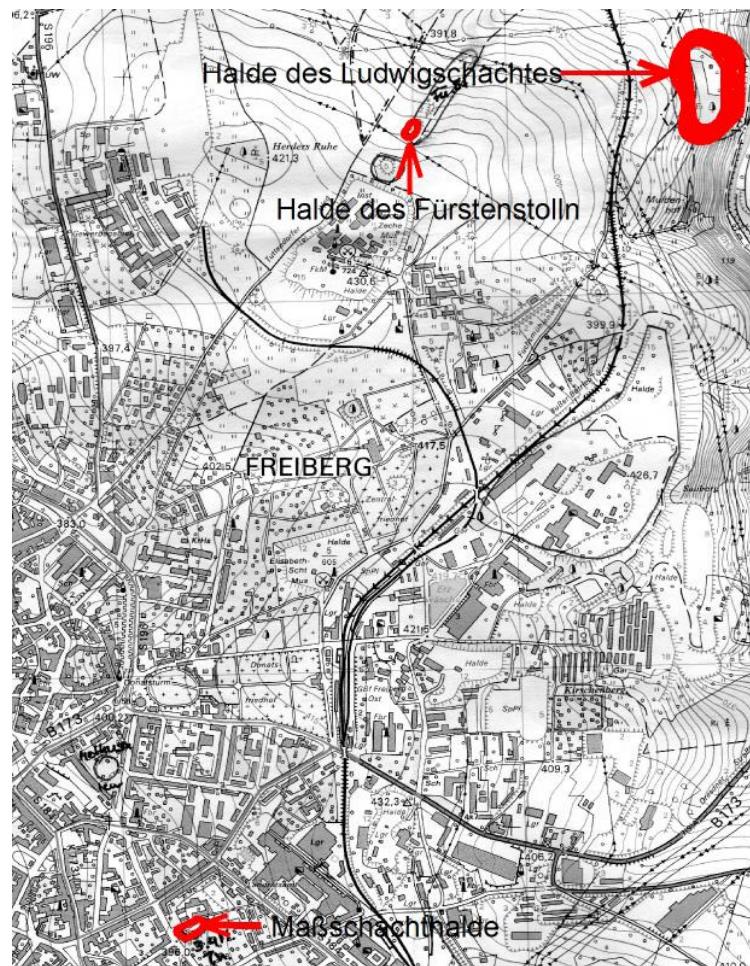


Abb. 5: geographische Lage Halde LS, FS und MS

2.5.4 Halde des *Junge Hohe Birke* Schachtes

5 km südlich Freibergs, im Zuger Ortsteil Langenrinne, befindet sich diese vom Münzbach umflossene Halde. Bei ihr handelt es sich um eine recht große Halde. Der Schacht war im 16 -18 Jhd. in Betrieb. Er gehörte in jener Zeit zu einer der bedeutendsten Gruben der Zeit.



Abb. 6: Halde Junge Hohe Birke

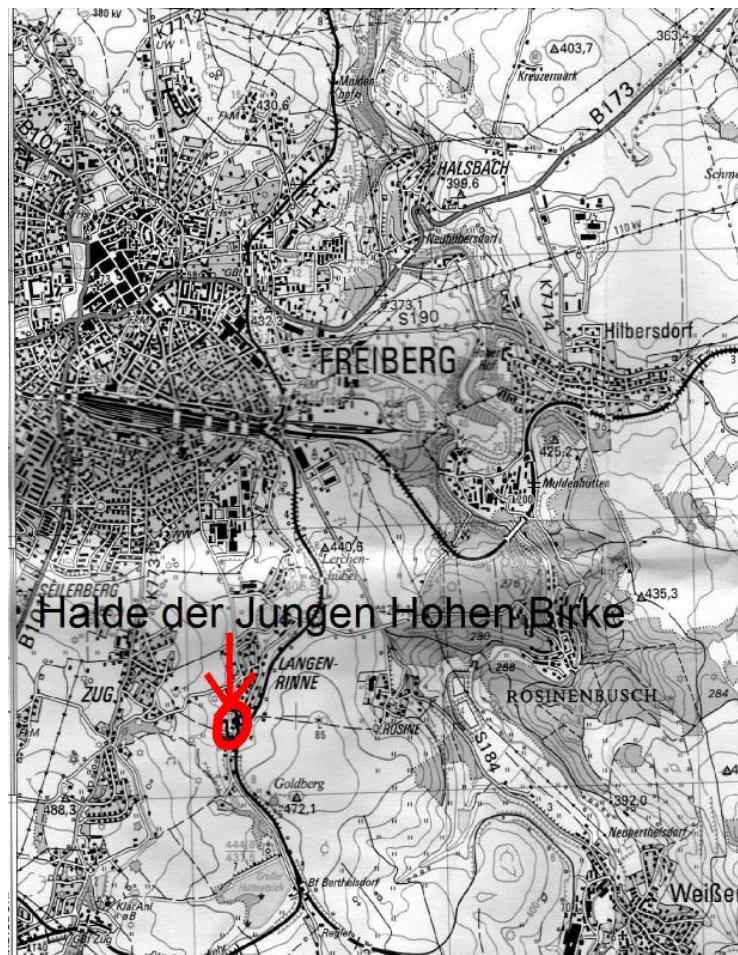


Abb. 7: geographische Lage von JHB

2.5.5 Halde des Vertrau auf Gott Schachtes

Die Halde dieses Schachtes befindet sich linker Hand der Straße von Brand-Erbisdorf nach Himmelsfürst. Es handelt sich um eine große Halde, deren Betriebszeit Mitte-Ende des 18 Jahrhunderts begann.



Abb 8: Halde des VAG-Schachts



Abb. 9: geographische Lage Halde VAG

2.5.6 Bekannte Daten der 5 Halden

In den achtziger Jahren des letzten Jahrhunderts erfolgte durch das Oberbergamt Freiberg eine Aufnahme der bekannten und noch erhaltenen Bergbauhalden der Region Freiberg. Die dabei aufgenommenen Daten für die gewählten Halden sind nachfolgend dargestellt.

Tab. 1: Daten zu den Halden von Fürstenstolln und Maßschacht

Bezeichnung der Halde	Halde am Fürstenstolln	Maßschachthalde
Reg.-Nr	14/07/05/H047	14/07/05/H034
Hochwert	5644850	5642680
Rechtswert	4595720	4595190
Höhe/ [m]	?	?
Fläche / [ha]	0,04	0,15
Volumen/ [m³]	?	?
Erzgang	Hauptstollengang Sth.	Thurmhof Sth
Zusammensetzung	95 % Gneis, 5% GA	90% Gneis, 10% GA
Verwitterungsgrad	ang	ang-ufr

Tab. 2: Daten zu den Halden von Vertrau auf Gott und Ludwigschacht

Bezeichnung der Halde	Vertrau auf Gott	Ludwigschacht
Reg.-Nr	14/04/23/H003	14/07/03/H001
Hochwert	5636310	5644890
Rechtswert	4591720	4596399
Höhe/ [m]	12	30
Fläche / [ha]	8	1
Volumen/ [m³]	320000	10000
Erzgang	Vertrau auf Gott Fl.	Ludwig Sth.+ Fl
Zusammensetzung	90% Gneis, 10% GA	95% Gneis, 5% GA
Verwitterungsgrad	ang-ufr	ang

Tab. 3: Daten zur Halde der Jungen Hohen Birke

Bezeichnung der Halde	Junge Hohe Birke
Reg.-Nr	14/07/32/H002
Hochwert	5639830
Rechtswert	4595410
Höhe/ [m]	6
Fläche / [ha]	1,4
Volumen/ [m³]	28800
Erzgang	Junge Hohe Birke Sth./ Prohpet Jonas Sth.
Zusammensetzung	90% Gneis, 10% GA
Verwitterungsgrad	ang

3. Materialien und Methoden

3.1 Probenahme

Nach Ende der Winterperiode und als kein Bodenfrost mehr herrschte, wurde mit der Geländearbeit begonnen. Die Arbeiten nahmen einen Zeitraum von mehren Wochen in Anspruch. Es wurde jeweils ein Schurf von 1x1 m angelegt. Die Tiefe des angelegten Aufschlusses schwankt von 1 m bis 1,60 m, was mit den vorgefundenen Lagerungsverhältnissen und dem Aufbau der Halde zu begründen ist.

Die Probenahme erfolgte in einer Tiefe von 1 m und wurde so durchgeführt, dass die Oberflächen des Schüttgutes unverletzt blieben. Der so aufgeschlossene Haldenkörper wurde für die sich der Diplomarbeit anschliessenden Diplomkartierung, hinsichtlich seines Aufbaus kartiert.

Die Gesteinsproben wurden in Plastiksäcke verpackt und im Wasserlabor des Instituts für Hydrogeologie bei Zimmertemperatur gelagert.

3.2 Lösungsversuche

Um das Gefährdungspotenzial des Haldenmaterials auf das Sicker-, bzw. Grundwasser abschätzen zu können, wurden Lösungsversuche an Gesteinskrusten und an frisch gebrochenem Material des gleichen Handstückes der fünf verschiedenen Halden durchgeführt. Das dabei verwendete Verfahren ähnelt dem der S4 Eluation mit Wasser (DIN 38414). Der Unterschied bei der Durchführung besteht darin, dass nicht mit Wasser eluiert wird, sondern mit Oxalsäure ($C_2H_2O_4$) und Essigsäure ($C_2H_4O_2$).

Das Probenmaterial wurde mit Hilfe eines Backenbrechers des Instituts für Geologie auf eine Korngröße von ca. 5 mm gebrochen und dann das zerkleinerte Material von Hand nach „Kruste“ und „frischen“ Gestein sortiert. Nach der S4 Eluation sollen etwa 100 g Trockenmasse eingewogen und mit 1000 ml Wasser versetzt werden. 10 Proben des Krustenmaterials und des „frischen“ Materials wurden zu 5 g in 100 ml PE-Flaschen, die zuvor mit Salpetersäure und anschließend mit entionisiertem Wasser gespült wurden, eingewogen. Jeweils 5 Flaschen, welche Krustenmaterial oder unverwittertes Material enthielten, wurden unter Einhaltung des Feststoff /

Flüssigkeitsverhältnisses von 1 / 10 mit zuvor herstellter, 0,1-molarer Oxalsäure versetzt. Zu den je 5 verbliebenen Proben wurde 0,1-molare Essigsäure gegeben.

Je Halde wurden also 4 Proben angefertigt, wobei jeweils 2 Probeflaschen (1x Kruste & 1x frisches Material) mit Oxalsäure und analog dazu 2 Flaschen mit Essigsäure versetzt wurden.

Die angefertigten Proben wurden nun 24 Stunden, bei 20 U/ min und Zimmertemperatur im Überkopfschüttler geschüttelt.

Da dieses Gerät eine Kapazität von 12 Flaschen hat, musste in zwei Durchgängen mit jeweils 10 Flaschen gearbeitet werden.

Nach Ablauf der 24 Stunden wurden die Proben 20 min bei ca. 2300 U/min zentrifugiert, die Flüssigkeit danach abdekandiert und anschließend filtriert. Es wurden dabei Cellulose Acetat Filter mit einer Porengröße von 200 nm verwendet. Die mit Essigsäure versetzten Proben, mussten mit HNO_3 stabilisiert werden. Bei den mit Oxalsäure behandelten Proben war dies nicht nötig, da hier ein pH- Wert von unter 3 vorhanden war.

Die Flaschen wurden bis zu Analyse im Kühlschrank bei ca. 8°C gelagert.

3.3 Untersuchungen am Rasterelektronenmikroskop

Zur Feststellung, ob es zu mineralogischen Veränderungen zwischen Kruste und frisch gebrochenem Gestein kam, wurden Aufnahmen mit dem Rasterelektronenmikroskop *Modell JSM 6400* der Firma JEOL durchgeführt.

Qualitative und standartlose, quantitative Analysen wurden mit dem angeschlossenem *EDX-Spektrometer* der Firma Tracor (jetzt Noran) durchgeführt. Der Abnahmewinkel betrug dabei 40°, der Strahlstrom 0,6 nA und es wurde mit einer Beschleunigungsspannung von 20 kV gearbeitet.

Die Feststoffproben stammen von ausgewählten Handstücken der 5 Halden. Es wurden mit jeweils 2 Proben je Halde gearbeitet (1x frisch gebrochenes Gestein, 1x Kruste desselben Handstückes).

Die gewählten Proben wurden auf Messingträger präpariert und anschließend mit Kohlestoff bedampft.

3.4 Untersuchungen am Massenspektrometer

Zur Messung der bei Lösungsversuchen erzeugten Eluate auf heraus gelöste Elemente, wurde mittels *Massenspektrometer mit induktiv gekoppeltem Plasma* (ICP-MS) gearbeitet.

Die Analysen wurden am Gerät des Institut für Allgemeine Ökologie und Umweltschutz der TU Dresden (Außenstelle Tharandt) gemessen. Die Arbeiten wurden von einem Mitarbeiter des Instituts durchgeführt.

Ein Massenspektrometer mit induktiv gekoppeltem Plasma besteht aus einem Hochfrequenzgenerator, einem horizontal angeordneten Argon- Plasmabrenner, einem hoch auflösenden Quadrupol- Massenspektrometer und einem Rechner zur Steuerung der Messanordnung und Datenausgabe.

Die in Lösung befindlichen Elemente werden über ein Zerstäubersystem mit Hilfe eines Argon- Trägergases dem Plasma als Aerosol zugeführt, verdampft und weitgehend ionisiert. Die Druckdifferenz zwischen dem Atmosphärendruck der Plasmafackel und dem Hochvakuum des Massenspektrometers wird durch ein Vakuuminterface überwunden. Ein geringer Teil des Ionenstroms wird mit elektrischen Linsen und Blenden fokussiert und gelangt in den eigentlichen Quadrupol- Massenanalysator. Die Massentrennung erfolgt in einem, durch vier stabförmige Elektroden erzeugten Quadrupolfeld.

Bewegen sich Ionen durch das Feld, geraten sie in Schwingungen. Bei vorgegebener Gleichspannung, Amplitude sowie Frequenz der Wechselspannung finden nur Ionen mit gleicher Massenzahl pro Ladung den Ausgang des Quadrupolfeldes. Die übrigen werden defokussiert und treffen auf Elektroden. Die auf diese Weise herausgefilterten Ionen gleicher Massenzahl pro Ladung gelangen nach Ablenkung durch einen Deflektor in einen Channeltron- Multiplier. Auf diese Weise lassen sich Ionenströme in elektrische Ströme umwandeln und dadurch impulstechnisch registrieren.

Die Daten werden mit einem Vielkanalanalysator oder im „peak hopping“- Verfahren gesammelt und mit Hilfe des Computers ausgewertet.

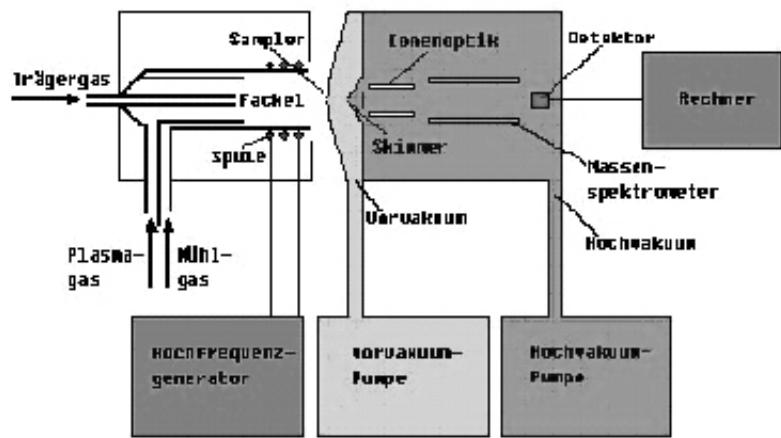


Abb. 10: Funktionsschema eines Massenspektrometers

Die Nachweisgrenze liegt im Idealfall bei ca. 0,001 µg/L. Staubbela stung in der Laborluft oder der geogene Hintergrund, können die Empfindlichkeit der Messung herabsetzen und damit die Nachweisgrenze erhöhen.

Tab.4: Tatsächliche erreichte Nachweisgrenzen

	Al	As	Cd	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn
NG [µg/L]	40,07	1,40	0,03	1,18	33,11	0,92	1,20	0,61	3,04

3.5 Königswasseraufschluss

Um die Hauptbestandteile der Gesteinsproben bestimmen zu können, musste das Gestein aufgeschlossen werden. Der Aufschluss erfolgte mit Königswasser, einem Gemisch aus 1 Volumina Salpetersäure und 3 Volumina Salzsäure.

Eine nach DIN festgelegte Vorgehensweise für Gesteinsproben konnte nicht gefunden werden. Es wurde deshalb mit einer Kombination aus folgenden Vorschriften gearbeitet:

- Aufschluss zur anschließenden Bestimmung des in Königswasserlöslichen Anteils an Elementen in Abfällen (DIN EN 13657)
- Bestimmung von Spurenelementen und Phosphor Extraktionsverfahren mit Königswasser (DIN EN 13346)
- Extraktion in Königswasser löslicher Spurenelemente (DIN ISO 11466)

Das gebrochene Gestein wurde in einer Mühle bis zu einer Korngröße von etwa 250 µm gemahlen. Anschließend wird das gemahlene Probenmaterial in ein dafür vorgesehenes Gefäß gegeben (z.B. Erlmeierkolben) und mit Königswasser versetzt. Das Gemisch wird in Mikrowellen geeignete Gefäße gegeben und anschließend in der Mikrowelle gekocht.

Sollte danach noch ein ungelöster Rückstand vorhanden sein, muss zentrifugiert und anschließend filtriert werden. Die Lösung wird in einen Messkolben mit geeigneten Nennvolumen überführt und kann hinsichtlich Hauptelementen etc. untersucht werden. Die Messung erfolgte ebenfalls mittels ICP-MS.

Die Aufschlussarbeit und die anschließenden Messungen erfolgten ebenfalls im Institut für Allgemeine Ökologie und Umweltschutz der TU Dresden (Außenstelle Tharandt).

4. Darstellung und Diskussion der Untersuchungsergebnisse

4.1 Verwitterung – ein wichtiger Faktor zur Beurteilung der Halden

Der Hauptgrund für die Freisetzung von Schwermetallen und umweltgefährdenden Stoffen ist die Verwitterung.

In den vergangenen Jahren sind viele Untersuchungen zum Thema Verwitterung von Bergematerial durchgeführt worden.

So konnte man feststellen, dass bedingt durch die petrographische und chemische Zusammensetzung, die unterschiedlichen Korngrößen (Ton – Kies) sowie den Porositätseigenschaften, sich ein typisches Verwitterungs- und Erosionsverhalten ergibt (WIGGERING, 1986).

Zunächst überwiegt die physikalische Verwitterung, was eine Zunahme der feinen Kornfraktion zur Folge hat. Dies wiederum begünstigt die chemische Verwitterung, da sich die reaktive Oberfläche der Minerale erhöht (KERTH, 1988). Die kleineren Komponenten werden schneller erodiert, oder durch Sickerwasser und gravitativ nach unten verlagert (WIGGERING, 1986)

Der Prozess der physikalischen Verwitterung erreicht etwa eine Tiefe von 30-40 cm bei verdichteten und 1- 2 m bei lockeren Schüttungen (DUNGER, 1998).

4.1.1 Verwitterungsarten

Der Verwitterungsablauf auf Bergbauhalden ist, im Gegensatz zur Verwitterung ähnlicher Ausgangsgesteine, von technischen Vorgängen wie Abbau und Art der Schüttung und den dadurch geänderten Mineralparametern beeinflusst. Besonders die Veränderung des Korngrößenspektrums, welches sich beim Abbau, bei der Weiterverarbeitung sowie bei der Aufhaldung ergibt, hat ein anderes Verwitterungsverhalten von Bergbauhaldenmaterial zur Folge.

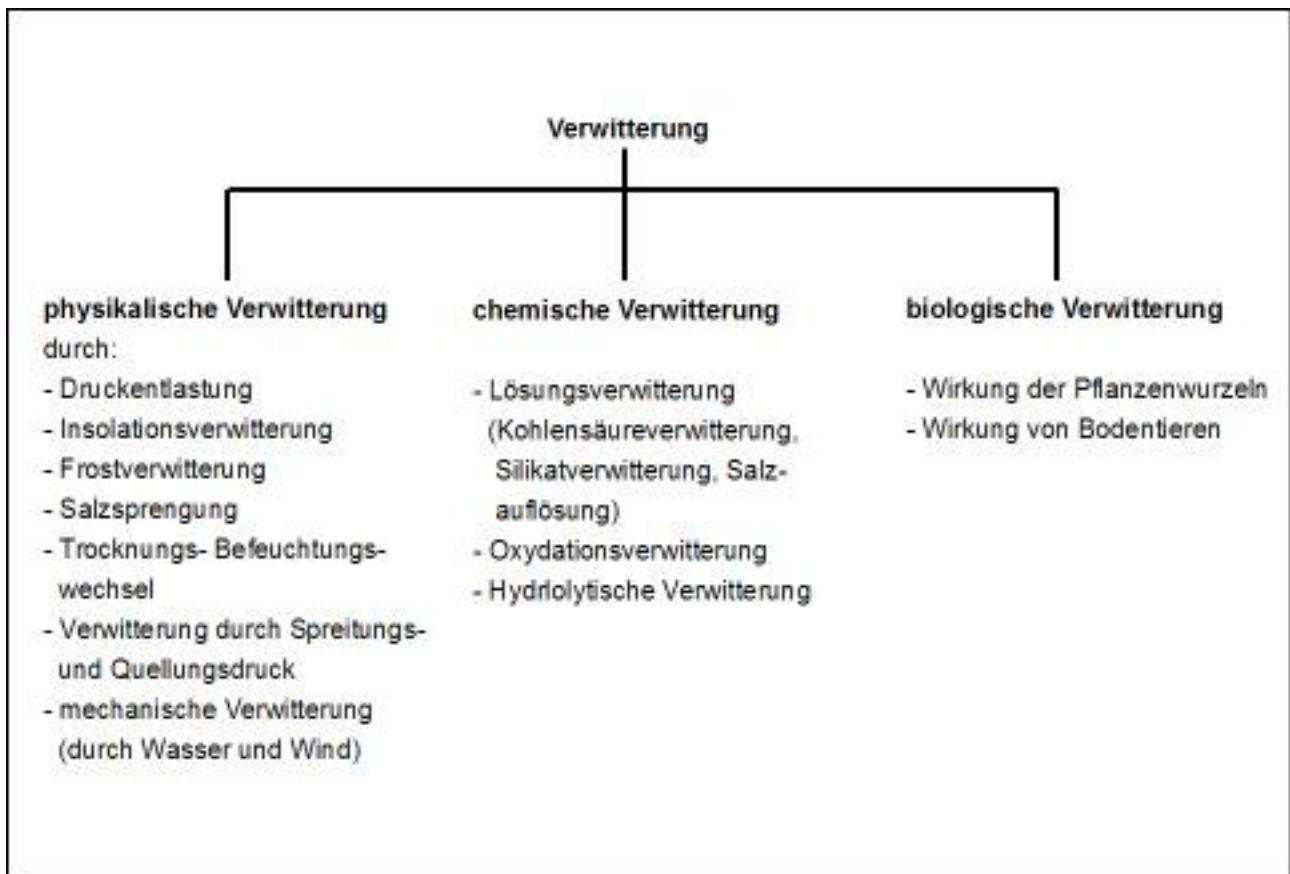


Abb. 11: Verwitterungsarten (DUNGER, 1998)

Nachfolgend wird auf die wichtigsten Verwitterungsarten eingegangen, welche auf Bergbauhalden anzutreffen sind.

Physikalische Verwitterung

Die physikalische Zersetzung des Materials beginnt bereits beim Abbau des Gesteins. Dabei können Korngrößen bis zum Schluff- oder Tonbereich entstehen.

Nach der Aufhaltung wirken hauptsächlich der Trocknungs-Befeuchtungswechsel sowie der Frost-Tauwechsel auf das Gestein. Der vorherrschende Prozess im gemäßigt humiden Klima ist der Trocknungs-Befeuchtungswechsel. Der Einfluß des Frost-Tauwechsels ist durch die geringe Anzahl an Frosttagen vernachlässigbar.

Die Effektivität der Verwitterung ist neben dem Klima stark von der petrographischen Zusammensetzung wie Tonmineralzusammensetzung, Verfestigungsgrad, Porositätseigenschaften und Wasserabsorptionsverhalten abhängig.

Von Bedeutung ist weiterhin die Länge der Trocknungs- und Befeuchtungsphasen, d.h. bei geringen Luftfeuchteschwankungen sind entsprechend lange Trocknungsphasen notwendig um das Gestein auszutrocknen und eine Zersetzung zu bewirken.

Die Verwitterungsvorgänge in den untersuchten Bergbauhalden lassen sich aufgrund der Ablagerung unterschiedlichster Gesteine (Taubes Gestein, Armerz, etc.) schwer einschätzen. Ein Anhaltspunkt sind die Porositätseigenschaften der Gesteine. Dazu gehören Gesamtporosität, Geometrie des Porenraumes sowie die statistische Verteilung der Poren. Als Faustregel kann gesagt werden, dass Gesteine mit großdimensionierten Poren und einer hohen Gesamtporosität sehr frostempfindlich sind. Bei Frost kann es in großen Poren zu Eisbildung kommen. Die Volumenzunahme des Wassers beim Gefrieren kann eine intensive Zerstörung des Gesteins zur Folge haben. Dieser Vorgang ist stärker bei grobporigen als bei kleinporeigen Gesteinen zu beobachten.

Gesteine mit mittlerer bis geringer Gesamtporosität und einem Porositätsanteil überwiegend im Bereich kleinster Poren, zeigen eine hohe Widerstandsfähigkeit (FITZNER; KOWNATZKI, 1991).

Das Wasser spielt bei Verwitterungsvorgängen eine entscheidende Rolle. Bei Anwesenheit von Wasser kommt es zur Zersetzung durch Trocknungs- und Befeuchtungswechsel und zur Frostverwitterung durch Eiskristallisationssprengung. Es gibt jedoch auch noch andere Vorgänge, welche ohne Wasser nicht ablaufen würden, die Verwitterung durch Spreitungs- und Quellungsdruck sowie der rein mechanischen Verwitterung durch Wasserbewegung.

Die Verwitterung durch Spreitungsdruck ist vom Maß der spezifischen Oberfläche der Berge abhängig. Bei Aufnahme von Wasser zersetzen sich Gesteine mit hoher innerer Oberfläche aufgrund mechanischer Wirkung der sich ausdehnenden Oberflächenschichten. Die Größe der spezifischen Oberfläche hat direkten Einfluß auf das Wassersättigungsverhalten und Austrocknungsverhalten der aufgehaldeten Gesteine. Außerdem gilt: je größer der Zersetzunggrad, umso größer die spezifische Oberfläche. Die Zersetzung durch Quellungsdruck tritt erst bei fortgeschrittenem Verwitterungsstadium auf.

Bei der vom Wasserangebot unabhängigen Insolationsverwitterung, werden die Gesteine durch eine starke Aufheizung, besonders bei dunklen Gesteinen, zersetzt.

Bei einer Erhitzung dehnen sich vorhandene Minerale unterschiedlich stark aus, wobei Risse entstehen.

Diese Auflockerung des Gefüges hat letztendlich eine Zersetzung des Gesteins zur Folge. Dieser Vorgang ist am effektivsten, wenn das Gestein unmittelbar der Sonnenstrahlung ausgesetzt ist und die Vegetation fehlt.

Die durch den Verwitterungsprozess feinen Komponenten werden erodiert oder durch Sickerwasser und gravitativen Transport in tiefere Bereiche verlagert. Dieser Vorgang kann zu einer Selbstabdichtung der Halde führen. Dadurch sind Verwitterungsvorgänge, unter der Abdichtung stark verlangsamt und Schadstoffe werden in geringerem Maß ausgetragen.

Chemische Verwitterung

Zur Chemischen Verwitterung zählen die Oxydationsverwitterung, die Lösungsverwitterung, die Kohlensäureverwitterung sowie die Tonmineralverwitterung.

Die Physikalische Verwitterung schafft mit der Zersetzung und Materialzerkleinerung größere spezifische Oberflächen und damit optimale Bedingungen für die Chemische Verwitterung.

In sulfidhaltigem Haldenmaterial ist die chemische Verwitterung sehr stark von der Pyrit-Verwitterung abhängig. Infolge der Pyrit-Verwitterung sinkt der pH-Wert, welcher im frischen Material im leicht basischen bis neutralen Bereich liegt. Bei einem pH-Wert von etwa 3 ist Pyrit vollständig abgebaut. Durch die anhaltende Säureproduktion kommt es zur Auflösung eventuell vorhandener Karbonate. Es kann zu Neutralisationsvorgängen kommen, wobei der pH-Wert bei 7-8 liegt.

Ist das Karbonat verbraucht, sinkt der pH-Wert auf etwa 3. Es erfolgt eine Pufferung von Jarosit, Kaolinit und amorphem Siliziumdioxid (KEHRT, 1988). Bei einem pH-Wert von ca. 2 wird unter Freisetzung von Aluminium der Kaolinit zerstört (VAN BERK, 1996).

Im Gegensatz zur Physikalischen Verwitterung, die oberflächennah überwiegt, sind in tieferen Bereichen die Prozesse der Chemischen Verwitterung vorherrschend.

Der Stoffaustausch aus den Halden ist stark von der Zusammensetzung des Haldenmaterials abhängig. Von Bedeutung sind die chemische Zusammensetzung und die Verwitterungseigenschaften der Haldengesteine sowie der innere Aufbau der Halde (Durchlässigkeitsbeiwert, Porosität, Speichervolumen).

Die chemische Verwitterung setzt sich aus vier aufeinanderfolgende Reaktionsprozesse zusammen.

1. Lösung
2. Ionenaustausch
3. Oxidation
4. Pufferreaktion (SCHÖPEL & THEIN, 1991)

Der bedeutendste Lieferant von Schwermetallen, Arsen und weiteren Umweltgefährdendenstoffen ist die Sulfidverwitterung. Häufige sulfidische Minerale sind neben dem Pyrit das Pyrrhotin ($FeS(1-x)$), Arsenopyrit ($FeAsS$), Sphalerit (ZnS), Galenit (PbS) sowie Chalkopyrit ($CuFeS_2$).

Die wichtigste Sulfidverwitterung und Ausgangspunkt für andere Sulfidmineralverwitterung, ist die Pyritverwitterung.

Die Pyritoxydation erfolgt in mehreren Reaktionsschritten ab, die ausführlich bei SINGER & STUMM (1970) bei KÖLLING (1990) sowie bei SCHWEISFUHRT, M. (1993) aufgeführt sind.

Die Gleichungen (1) und (2) zeigen die Pyritverwitterung, wie diese Zusammenfassend dargestellt werden kann. (1) stellt dabei die Oxydation von Pyrit durch Fe^{3+} -Ionen und (2) die Rückoxydation der für Reaktion (1) benötigten Fe^{3+} -Ionen dar.

Reaktion (2), ist ein durch das chemoautotrophe Bakterium „*Thiobacillus ferrooxidans*“ bei pH- Werten < 4 katalysierter, Prozess. Dadurch läuft diese Reaktion, gegenüber der gleichen Reaktion unter herkömmlichen Bedingungen, beschleunigt ab.

Die Formel (3) zeigt die Gesamtreaktion aus (1) und (2), bei direkter Oxydation des Pyrit durch Sauerstoff.

Wie TAYLOR (1984) zeigt, ist nicht die direkte Oxydation von Pyrit (Gleichung 3) hauptsächlich ablaufender Prozess, sondern die Oxydation durch Fe^{3+} -Ionen und der anschließenden Rückreaktion (Gleichung 1 und 2).

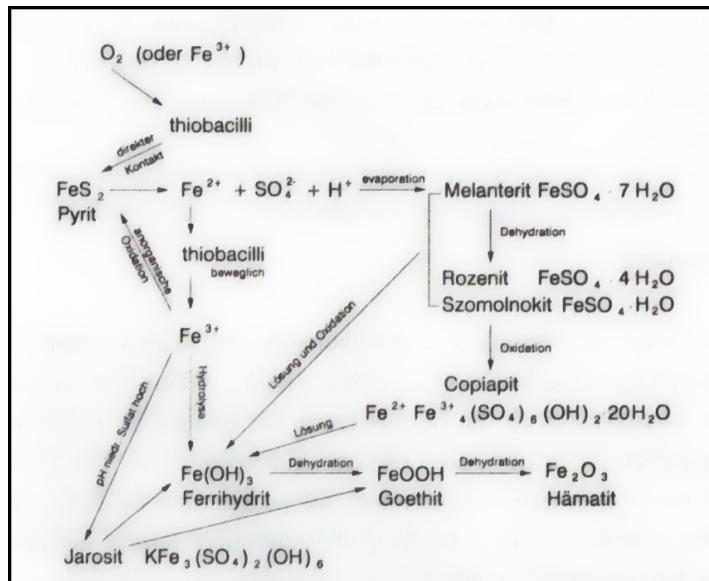
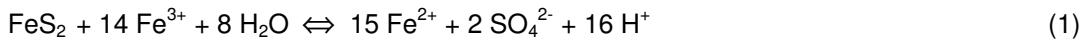
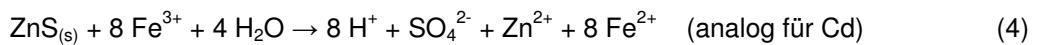


Abb.12: schematischer Ablauf der Pyritverwitterung (NORDSTROM 1982)

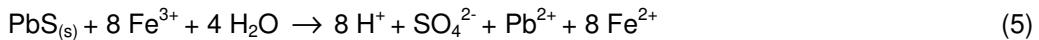
Verwitterung weiterer Sulfidischer Minerale

Die Oxydation des *Sphalerit* ist verantwortlich für die Freisetzung der Elemente Zink und Cadmium. Die ähnlichen geochemischen Eigenschaften sind die Grundlage dafür, dass Cd in das Kristallgitter des Sphalerits eingebaut wird und bei dessen Oxydation im Verhältnis zu Zn freigesetzt wird. Das Verhältnis von Zn/Cd in der Freiberger Zinkblende beträgt ca. 100 (Baake, 2001).

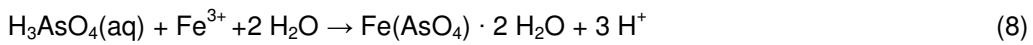
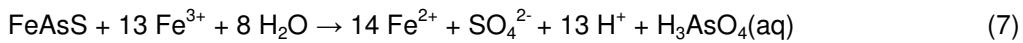
Der wichtigste Reaktionsmechanismus für die Verwitterung ist dabei die Oxydation durch Fe^{3+} .



Die Verwitterung von *Galenit* verläuft als Oxydation durch Eisen-III (Fe^{3+}) (Glg. 5). Der Transport des Bleis ist durch die Bildung von Bleisulfat ($\text{PbSO}_4(\text{s})$) eingeschränkt.



Arsenopyrit (FeAsS) gilt in der Natur als eine recht stabile Sulfidverbindung. Es löst sich jedoch in Eisenchloridlösung schnell und gut. Arsen kann in den Oxydationsstufen As^{5+} , As^{3+} und As^+ auftreten (Baake, 2001).



Bei der Oxydation von *Arsenopyrit* können ebenfalls Spurenelemente, wie z.B. Cobalt, Nickel, Antimon, Mangan und Zinn freigesetzt werden.

Die Verwitterung des *Chalkopyrits* ist ein Lieferant von Kupfer (Cu).



Neben Chalkopyrit gibt es noch andere Kupfer-Lieferanten, wie das Erz Stannin und Kupferfahlerze.

4.2 Geochemische Charakteristik des Haldenmaterials

4.2.1 Chemische Zusammensetzung

Die untersuchten Halden unterscheiden sich in Aufbau und Zustand des Haldenkörpers stark. Auch die Gesteinsproben, der einzelnen Halden, unterscheiden sich in den Elementgehalten zum Teil stark.

Die Proben wurden durch einen Königswasseraufschluss in Lösung gebracht und anschließend die Hauptelementgehalte im ICP-MS gemessen. Es wurde dabei mit zwei verschiedenen Verdünnungsfaktoren gearbeitet (100 u. 31,64).

Die Ergebnisse beider Verdünnungen unterscheiden sich kaum. Das heißt, es kommen kaum Verunreinigungen vor, was wiederum bedeutet, dass mit reinen Chemikalien gearbeitet wurde.

Tab.5: Elementgehalte [ppm]

	Na	Mg	Al	K	Ca	Fe	Mn	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Pb
Fürstenstolln	-	37.628	51.867	1.137	1.926	97.390	16.723	149	40	333	1.026	1	956
Maßschacht	-	266	2.100	1.483	-	409.105	1.284	130	14.813	315	80.217	3	1.522
Ludwigschacht	313	3.141	11.413	2.581	1.237	19.377	189	13	82	209	275	1	135
JHB	-	162	4.230	3.377	609	95.253	258	25	1.160	17.909	2.346	173	10.527
VAG	-	371	10.398	7.233	864	21.559	101	7	30	626	1.279	4	893

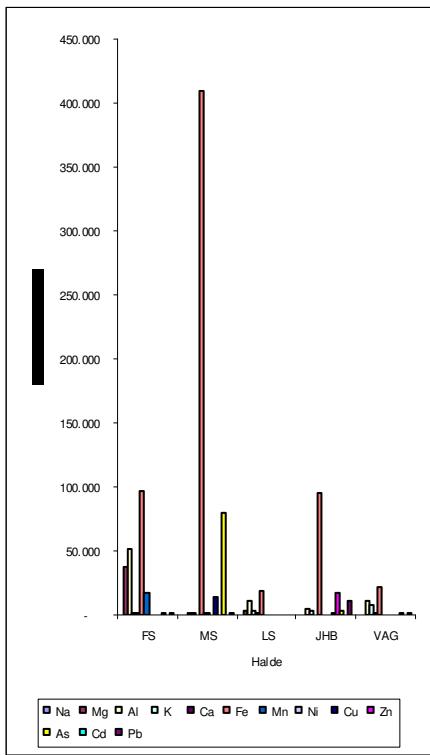
Die Werte weichen teilweise sehr stark von den Elementgehalten des Freiberger Gneises ab. Neben tauben Gestein ist also auch schwächer vererztes Gestein aufgehaldet wurden.

Auffallend ist, das Eisen bei allen fünf Halden die höchsten Elementgehalte aufweist, was durch die Kruste, welche aus Eisenverbindungen besteht, bedingt ist. Besonders hoch sind die Eisengehalte der Maßschachthalde.

In geringen Mengen treten dagegen Cadmium und Natrium auf.

Tab. 6: Ausgewählte Daten zur Geochemie des Freiberger Gneises (Beuge 1978, Scherchan 1980).

Freiberger Graugneis	AS [ppm]	Cd [ppm]	Cu [ppm]	Pb [ppm]	Zn [ppm]
Konzentration	7	1	25	35	58



In Abb. 13 sind die Gehalte ausgewählter Elemente graphisch dargestellt. Deutlich ist zu erkennen, dass Eisen bei allen fünf Proben das überwiegende Element ist. Eine besonders hohe Konzentration von Eisen ist in der Probe enthalten, welche der Maßschachthalde entnommen wurde. Erkennbar war das bereits bei der Probenahme. Die Rottfärbung des aufgeschlossenen Bodenprofils deutete auf das Vorhandensein von Eisen hin. Die hohen Schwermetallgehalte und Arsengehalte sind nicht verwunderlich und waren zu erwarten. Cadmium dagegen ist in sehr geringen Gehalten vorhanden.

Abb.13: chemische Zusammensetzung der Proben

4.2.2 Vergleich der Oberflächen

Untersuchungen unter dem Rasterelektronenmikroskop hatten zur Aufgabe, eventuelle stoffliche und strukturelle Veränderungen von krustenbehaftetem Material gegenüber frischen Bruchflächen des gleichen Handstückes zu ermitteln. Es wurden hierfür jeweils 2 Proben je Halde von ausgewählten Gesteinsstücken präpariert, d.h. pro Halde je eine krustenbehaftete Probe und eine mit frischem Bruch. Qualitative Aussagen wurden mittels EDX-Spektrometer getroffen.

Die Oberflächen der Proben mit Kruste bestehen hauptsächlich aus Eisenoxydverbindungen. Die rötlich-braune bis dunkelbraune Farbe der Handstücke ist ein Zeichen dafür, dass Eisenverbindungen vorkommen. Die Ausbildung der Oberflächen der verschiedenen Krusten unterscheidet sich unter dem Rasterelektronenmikroskop teilweise stark von einander. Die Kruste kann schuppig und knollig ausgebildet sein, kann aber auch von kleinen Eisenoxydkristallen überzogen sein (Abb.14). Es handelt sich dabei um Eisenverbindungen, vor allen dingen Eisenoxyd- und Eisenhydroxydverbindungen. Vereinzelt ist Pyrit auf den Krusten zu finden.

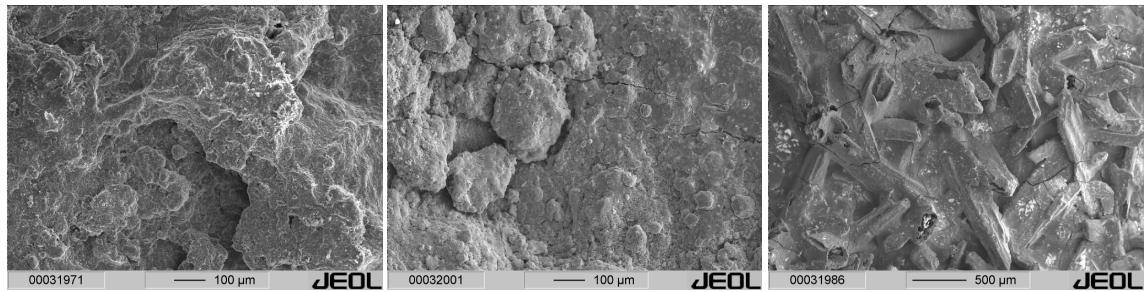


Abb. 14: unterschiedliche Ausbildung der Krusten, links schuppig (FS), mitte knollig (MS), rechts kristallin (LS)

Die Oberflächen der frischen Bruchflächen ähneln sich dagegen im Erscheinungsbild stark. Dabei handelt es sich um eine zumeist dichte Grundmasse.

Auch die Elementzusammensetzung, die mittels EDX qualitativ bestimmt wurde, ähnelt sich stark. Hauptsächlich Aluminium, Silizium, Kalium, Magnesium, Sauerstoff sind Betandteile. Als Nebenbestandteile treten Mangan, Blei, Zink und in zwei Proben Zirkon auf. Dabei kann es sich um Feldspäte und um Glimmer (Biotit) handeln. Außerdem ist Eisen und Schwefel sehr oft zu finden, was auf Pyrit hindeutet.

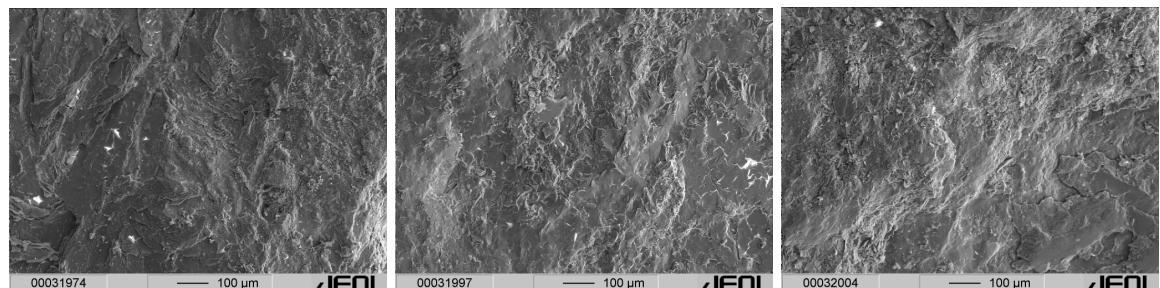


Abb. 15: Aufnahme von Proben frischer Brüche, links FS, mitte JHB, rechts LS

Abb. 14 und 15 zeigen deutlich die Unterschiede zwischen krustenbehafteter und frischer Oberfläche.

Während man in Abb. 14 unregelmäßige, aufgelockerte Oberflächen erkennt, sind die Oberflächen in Abb. 15 sehr dicht, schon fast „glatt“.

In Abb. 16 ist gut zu erkennen, dass die verkrusteten Flächen von SpannungsrisSEN durchzogen sind, die aber bei den frischen Flächen fehlen.

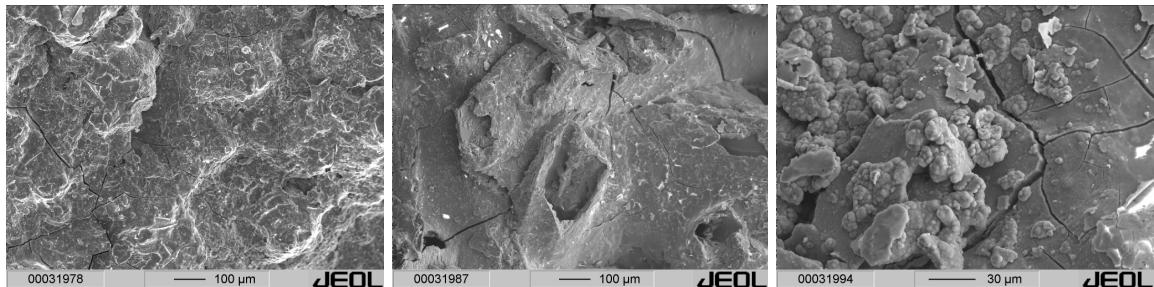


Abb. 16: Spannungsrisse links VAG, mitte LS rechts JHB

Die Dicke der Kruste variiert von unter 1 mm bis ca. 3 mm, was durch die Stärke der Verwitterung und dem daraus resultierenden Verwitterungsgrad bedingt ist.

An den untersuchten Gesteinsproben konnten keine grundlegenden Veränderungen wie Mineralneubildungen und Lösungerscheinungen beobachtet werden.

Wichtigster Unterschied ist die unterschiedliche Zusammensetzung von Kruste und frisch gebrochenem Material (EDX- Messung).

Die EDX-Messung macht deutlich, das die Zusammensetzung der Kruste der unterschiedlichen Haldengesteine sehr ähnlich ist und vor allen Dingen aus Eisenverbindungen besteht. (Abb.17)

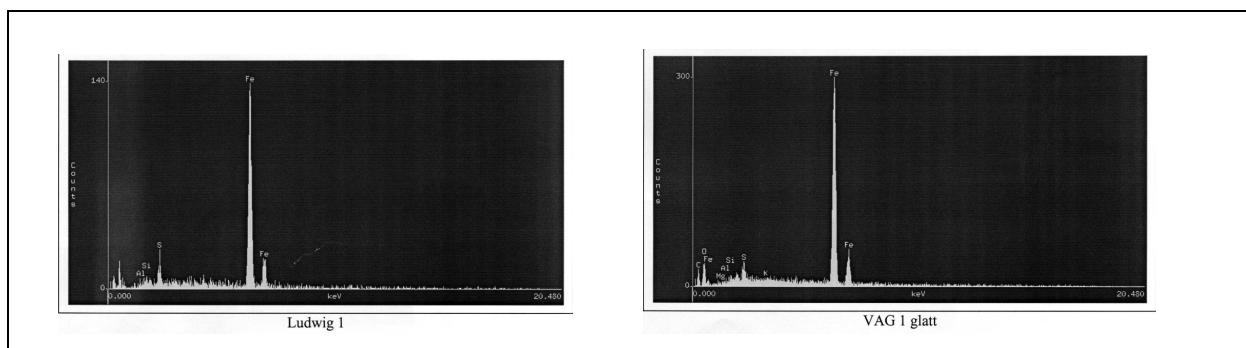


Abb.17; deutlich erkennbar ist die ähnliche Zusammensetzung des Haldengesteins am Beispiel von LS und VAG

Auch die geochemische Zusammensetzung anhand der EDX- Messung der frischen Bruchflächen ist sehr ähnlich, wie die Abb. 18 zeigt.

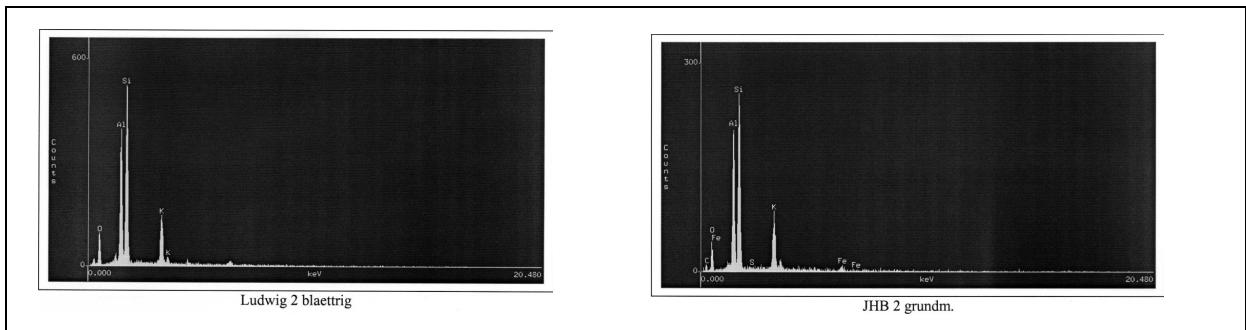


Abb.18: EDX- Analyse an frischen Bruchflächen

4.2.3 Ergebnisse der Eluationsversuche

Zur Bestimmung der eluierbaren Stoffe aus den Probergesteinen wurden Lösungsversuche mit 0,1 molarer Essigsäure sowie 0,1 molarer Oxalsäure durchgeführt.

Das Eluat ist zentrifugiert und anschließend filtriert worden. Diese Säuren wurden wegen des Vorhandenseins in der Natur gewählt. Die Oxalsäure ist im Vergleich mit der Essigsäure die stärkere Säure. Durch Oxalsäure sollten größere Mengen an Spurenelementen gelöst werden. Diese Annahme wurde nach Abschluss des Schüttelvorgangs bestätigt.

Nach Abschluss des 24-stündigen Schüttelvorgangs fielen besonders die Flaschen mit den Eluaten des Maßschachtes durch die Antrazith-Farbe der Flüssigkeit auf. Das Farbspektrum der anderen Flüssigkeiten war weniger auffallend. Es reichte von blassen gelb und grün -Tönen bis hin zu milchig grauen und braunen Tönen. Auffallend dabei ist, das die Probeflächchen, welche Krustenmaterial enthalten, gelb-orange bis braune Färbung der Flüssigkeit aufwiesen. Verantwortlich hierfür ist sicherlich das in den Krusten enthaltene Eisen.

Nach beendeter Filtration zeigten sich die Proben, welche mit Oxalsäure eluiert wurden, in einem Gelbton, die mit Essigsäure versetzten Proben farblos. (Abb. 19)



Abb.19: Erscheinungsbild der Eluate nach Filtration

Die Flüssigkeiten wurden mittels ICP-MS hinsichtlich Spurenmetallen und weiteren umweltgefährdenden Elementen untersucht.

Die gemessenen Werte sind in $\mu\text{g/L}$ angegeben. Die Messwerte, bezogen auf die Originalprobe, werden in mg/kg angegeben.

Chemische Zusammensetzung der Eluate:

aus Kruste eluierte Elemente

Tab. 7: durch Essigsäure und Oxalsäure aus der Kruste gelöste Gehalte in mg/kg

Essigsäure	Cr [mg/kg]	Ni [mg/kg]	Cu [mg/kg]	Zn [mg/kg]	As [mg/kg]	Pb [mg/kg]	Cd [mg/kg]	Mn [mg/kg]	Co [mg/kg]
FS Kruste	0,66	-	-	5,14	1,86	2,06	0,04	47,31	0,23
LS Kruste	-	2,35	9,55	7,94	5,45	4,25	0,10	2,14	0,42
MS Kruste	-	4,60	422,05	8,18	821,27	3,79	0,11	74,99	12,23
JHB Kruste	-	-	-	291,05	3,38	1.111,35	2,83	13,61	0,34
VAG Kruste	-	-	-	5,46	1,40	9,69	0,10	1,44	0,002
Oxalsäure	Cr [mg/kg]	Ni [mg/kg]	Cu [mg/kg]	Zn [mg/kg]	As [mg/kg]	Pb [mg/kg]	Cd [mg/kg]	Mn [mg/kg]	Co [mg/kg]
FS Kruste	45,23	11,16	5,94	24,05	106,97	428,92	0,06	1.529,51	1,23
LS Kruste	1,18	1,85	11,79	11,23	21,62	14,75	0,29	12,34	0,68
MS Kruste	-	3,84	671,19	10,65	9.471,39	96,44	0,09	239,43	10,67
JHB Kruste	-	-	7,66	926,60	33,84	77,78	4,90	36,63	1,09
VAG Kruste	-	-	4,01	54,64	123,28	130,91	0,13	8,57	0,29

aus frischgebrochenem Material eluierte Elemente

Tab. 8: durch Essigsäure/ Oxalsäure aus frischem Material gelöste Elemente in [mg/kg]

Essigsäure	Cr [mg/kg]	Ni [mg/kg]	Cu [mg/kg]	Zn [mg/kg]	As [mg/kg]	Pb [mg/kg]	Cd [mg/kg]	Mn [mg/kg]	Co [mg/kg]
FS frisch	0,49	-	-	3,57	-	0,66	0,06	36,00	0,08
LS frisch	-	-	5,48	20,77	-	3,61	0,27	3,32	0,19
MS frisch	0,19	32,96	238,53	17,29	34,22	6,72	0,18	256,43	12,37
JHB frisch	-	-	22,15	227,90	-	295,41	2,71	88,76	0,56
VAG frisch	-	-	-	6,14	-	57,61	0,11	1,38	0,01
Oxalsäure	Cr [mg/kg]	Ni [mg/kg]	Cu [mg/kg]	Zn [mg/kg]	As [mg/kg]	Pb [mg/kg]	Cd [mg/kg]	Mn [mg/kg]	Co [mg/kg]
FS frisch	48,22	7,12	6,38	40,82	1.423,39	192,56	0,13	784,36	0,68
LS frisch	1,98	-	10,32	20,67	162,63	49,08	0,19	11,34	0,31
MS frisch	1,36	3,62	348,44	38,38	1.229,59	537,53	0,31	397,58	10,25
JHB frisch	0,12	-	19,19	281,91	74,39	756,77	1,18	16,02	0,25
VAG frisch	0,15	1,93	186,37	851,25	358,46	210,97	4,27	101,38	1,24

In geringen Konzentrationen treten Cadmium, Chrom und Nickel im Eluat auf. Generell kann gesagt werden, je höher die Konzentration im Gestein, desto mehr wird während des Lösungsversuches gelöst. Arsen, Zink und Mangan sind in großen Mengen gelöst wurden. Ein weiterer wichtiger Grund der Löslichkeit von Schwermetallen und von Spurenelementen ist die Art ihrer Bindungsform.

Die Messergebnisse machen deutlich, dass bei Lösung mit Oxalsäure, eine höhere Zahl der Elemente und in höheren Konzentrationen gelöst werden. Der pH- Wert ist ein wichtiges Kriterium bei der Mobilisierung von Schwermetallen und Schadstoffen. Man kann sagen, je geringer der pH ist, um so höher ist die Löslichkeit von Schwermetallen und Spurenelementen. Da Oxalsäure die stärkere Säure ist und sich während des Schüttelversuches ein geringerer pH-Wert als in den mit Essigsäure versetzten Proben eingestellt hat, konnte eine größere Zahl und Konzentration an Elementen gelöst werden.

4.3 Schwermetallbindungsformen und deren Mobilität

Eisen

Die Art der Bindungsform der Schwermetalle ist dafür verantwortlich, wie mobil ein Element ist. Eisen kann in Bergematerialien vor allen Dingen in zweiwertiger Form, als Pyrit (FeS_2) und teilweise auch als Siderit ($FeCO_3$) gebunden sein.

In dreiwertiger Form tritt es als Oxid oder Hydroxid auf, wie z.B. als Hämatit (Fe_2O_3). Eisensulfide werden in Gegenwart von Sauerstoff und Wasser sowie schwefeloxidierenden Bakterien zu Eisen(III)sulfat und Schwefel oxidiert. Wie sehr gut an den Krusten der untersuchten Proben zu erkennen ist, wurden die gelösten Fe^{3+} - Ionen von Eisenbakterien in schwer lösliches Eisenhydroxyd umgewandelt und ausgefällt. Eisen geht erst bei pH-Werten von unter 4 in nennenswerten Konzentrationen in Lösung. Jedoch treten selbst bei einem pH-Wert von 3 nur geringe Mengen Eisen in verlagerbarer Form auf.

Bei der Pyritverwitterung freigesetzte Eisenionen werden größtenteils als schwerlösliches Eisen(III)hydroxid und – sulfat ausgefällt (DÖLLING, 1995).

Nach OETTING (1980) ist das Auftreten gelöster Eisenionen trotz hoher Gehalte an z.B. sulfidisch gebundenem Eisen, als gering einzuschätzen, obwohl es durch chemische Prozesse, unter reduzierenden Bedingungen, zu einer Reduktion von Eisen(III)oxiden zu Fe^{2+} - Ionen kommen kann. Dadurch kommt es zu einem Anstieg der Fe^{2+} - Konzentration in der Porenlösung, jedoch im Sickerwasserbereich wird das Eisen oxidiert und als schwerlösliches Hydroxid ausgefällt.

Mangan

Mangan ist in Gesteinen und Böden vor allem in Mangan(II, III, IV)oxiden und Manganhydroxiden verbreitet. Der eluierbare Anteil durch Essigsäure variiert von unter 1% bis ca. 5% in der Kruste und bis ca. 34% vom Gesamtgehalt, im frischen Material. Bei Eluation mit Oxalsäure liegt der Anteil bei 8- 18% aus Krustenmaterial und bei ca. 6- 30% vom Gesamtgehalt, bei frischem Gestein. Daraus ist zu erkennen, dass Mangan schon bei höheren pH-Werten von etwa 5 in größeren Mengen mobilisiert wird. Von den Schwermetallen bildet Mangan die am wenigsten stabilen Komplexe und kann deshalb leicht durch andere Kationen aus ihnen verdrängt werden.

Mangan liegt im sauren Milieu hauptsächlich als Mn^{2+} - Ion vor. Entsprechend der pH-Abhängigkeit der Löslichkeit von Mangan, ergibt sich ein Gleichgewicht der Manganoxide mit den Mn^{2+} - Ionen.



Daraus leitet sich ab, dass der Anteil an Mn^{2+} - Ionen um so höher ist, je stärker reduzierende Verhältnisse vorliegen.

Die Mobilität des Mangans wird vom pH-Wert, dem Angebot austauschbarer Mn^{2+} - Ionen, der Wassersättigung und dem Redoxpotential beeinflusst (SCHMITT & SCHÖPEL, 1984).

Zink

Zink ist in den Gesteinen der 5 untersuchten Halden ein relativ häufiges Element. Es kann anstelle von Eisen oder Magnesium in Silikatgitter eingebaut werden. Sehr oft ist Zink als Sphalerit (ZnS), auch Zinkblende genannt, in sulfidischen Gesteinen anzutreffen.

Bei der Eluation mit Essigsäure wurden Werte für Zink ermittelt, die von ca. 1% bis etwa 4% für das Krustenmaterial und von etwa 1% bis ca. 10% für das frische Material reichen.

Bei Oxalsäure als Extraktionsmittel wurden etwas höhere Anteile, bezogen auf den Gesamtgehalt, mobilisiert. Die Werte reichen von 3- 9% beim Krustenmaterial und ca.

2- 12% bei frisch gebrochenem Material.

Die Mobilisierung des Zink weist auch eine Beziehung zum pH-Wert auf. Mit abnehmenden pH-Wert steigt der eluierbare Anteil des Zinks vom Gesamtgehalt an.

Bei höheren pH-Werten ab ca. 6,5 kann das gelöste Zink als Zn^{2+} - Ionen oder auch als $ZnOH^+$ - Ionen vorliegen. Bei niedrigen pH- Werten unter 5 etwa, liegt das gelöste Zink in anorganischer Form vor.

Eine erhöhte Chloridionen -Konzentration im Haldenmaterial kann möglicherweise einen Einfluss auf das Zinkmobilitätsverhalten haben. Die Zinklöslichkeit im wässrigen System wird vor allen dingen durch ZnS bestimmt (DÖLLING, 1995).

Kupfer

Kupfer ist im Lithosspärenmaterial recht häufig vorhanden. Es bildet recht viele Minerale wie Sulfate, Oxide und Hydroxycarbonate. Im sauerstoffhaltigen Wasser kommt das Kupfer hauptsächlich in zweiwertiger Form vor, ist aber auch im einwertigen Zustand anzutreffen (MATTHESS, 1990).

Bei dem untersuchten Haldenmaterial wird Kupfer durch Essigsäure in Anteilen von 2-11% aus dem Krustenmaterial und 1,6- ca. 7% aus frischem Material, vom Kupfergesamtgehalt gelöst.

Kupfer, hauptsächlich in Mangan- und Eisenoxiden und zum Großteil in Sulfiden gebunden, liegt meist in fest gebundener Form vor.

Der Anteil des austauschbaren Kupfers ist bei pH- Werten >5 in der Regel gering. Bei niedrigen pH- Werten steigt der Anteil der Cu²⁺- Ionen stark an.

Niedermolekulare Komplexbildner, die bei mikrobieller Streuzersetzung gebildet oder aus Vegetationsresten freigesetzt sowie von lebenden Wurzeln ausgeschieden werden, können Kupfer durch Komplexbildung mobilisieren und dadurch eine Erhöhung der Lösungskonzentration bewirken (HERMS & BRÜMMER, 1984). Diese Vorgänge gelten für oberflächennahe und mit Humussubstanzen angereicherte Bodenbereiche. In Abwesenheit organischer Komplexbildner, wie in tieferen Bereichen, tritt Kupfer vor allem als Cu²⁺- Ionen auf. Nach BRÜMMER (1992) können Cu²⁺- Ionen unter stark reduzierenden Verhältnissen gebildet werden, sind aber in Böden instabil. Unter oxidierenden Bedingungen geht Kupfer aus Sulfiden als Sulfat in Lösung.

Kupfer wird hauptsächlich bei niedrigen pH- Werten in nennenswerten Konzentrationen mobilisiert (SCHMITT & SCHÖPEL 1984).

Cobalt

Cobalt ist ein verhältnismäßig geringer Bestandteil des untersuchten Haldenmaterials.

Der durch Essigsäure eluierbare Anteil von Cobalt bewegt sich beim Krustenmaterial im Bereich von <1 % bis etwa 8% und beim frischen Material bewegt sich der Anteil in etwa derselben Größenordnung. Bei der Eluation mit Oxalsäure erreichen die gelösten Anteile Werte von 6- 12% bei Krustenmaterial und 2- 26% beim frischen Material, jeweils bezogen auf den Gesamtgehalt.

Bei höheren pH- Werten von über 5 ist die Cobaltadsorption durch Oxide hoch. Mit sinkendem pH- Wert sinkt auch die Adsorption, so dass die Cobaltlöslichkeit zunimmt. In Bereichen um pH-Wert 3 tritt Cobalt verstärkt in austauschbarer und damit ökologisch verfügbarer Form auf. Cobalt besitzt die Neigung Komplexionen zu bilden, was sich in einer Erhöhung dessen Löslichkeit auswirkt.

Nickel

Nickel ist in erster Linie silikatisch gebunden. Deutlich wird das dadurch, das Nickel aus einigen Proben weder mit Essigsäure noch mit Oxalsäure eluierbar ist. Die Silikatstruktur kann durch die verwendeten Säuren nicht aufgebrochen werden und Nickel wird nicht gelöst. Der gelöste Anteil unter Verwendung von Essigsäure bewegt sich zwischen 3 und 17% bei Material mit Kruste und bis 25% bei frischem Material (siehe Tab.8).

Unter Verwendung von Oxalsäure, werden 3-13% beim Krustenmaterial und etwa 3-30% beim frisch gebrochenen Material gelöst, in Bezug auf den Nickelgesamtgehalt. Die Mobilität des Nickels ist wiederum vom pH- Bereich abhängig. Verfügbarkeit und Verlagerbarkeit steigen mit abnehmenden pH-Wert.

Nickel liegt in Lösung hauptsächlich als Ni^{2+} - Ion vor.

Blei

Blei ist in Gesteinen der Erdkruste in geringen Gehalten verbreitet. Wichtige Mineralphasen sind Bleiglanz (PbS) und Cerrusit (PbCO_3). In einigen untersuchten Haldengesteinen ist Blei in nichtgeringem Maß vorhanden.

Der eluierbare Anteil durch Essigsäure bewegt sich in Größenordnungen von <1-10% bei Kruste und von <1- 6% bei frischen Material. Bei Eluierung mit Oxalsäure werden ca. 1-

44 % bei Krustenmaterial und 7-36% bei frischen Material vom Gesamtanteil des Bleis gelöst.

Im Gegensatz zu anderen Elementen, wie z.B. Cadmium, weist Blei eine geringe Löslichkeit bei pH- Werten >5 auf. Erst bei pH- Werten unter 4 nimmt die Bleiverfügbarkeit entscheidend zu.

Blei ist in wässriger Lösung sehr unbeweglich und ist deshalb in nur sehr geringen Konzentrationen nachweisbar. Bei hohen Sulfatgehalten fällt Blei als schwer lösliches PbSO_4^0 aus. Erhöhte Cl^- und NO_3^- Gehalte in Lösungen können Blei als Pb^{2+} mobilisieren. Bleigehalte werden meist durch die geringe Löslichkeit des Sulfats und des Carbonats bestimmt, was eine Bleiverlagerung nur in geringem Maße zulässt.

Cadmium

Cadmium ist geochemisch gesehen ein seltenes Element. Es tritt zusammen mit Blei- und Zinkerzen auf, in denen es andere Elemente in deren Mineralen ersetzt. Geringe Cadmiumgehalte sind meist in Sphalerit (ZnS) enthalten. Spezielle Cadmiumverbindungen wie CdS, CdO und CdCO₃ stammen nach *WEDERPOHL* (1978) hauptsächlich aus der Verwitterung cadmiumhaltiger Zinkminerale.

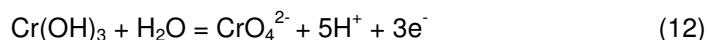
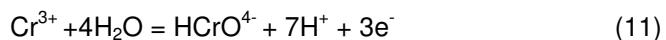
Der durch Essigsäure eluierbare Anteil vom Cadmiumgesamtgehalt der Halden schwankt bei den Proben mit Krustenanteil von 2- 7% und bei den Proben mit frisch gebrochenem Material von 1,6- 19%. 3- 20% (Krustenproben) und <1 bis 13% (frisches Material) werden bei Verwendung von Oxalsäure in Lösung gebracht.

Somit ist das Lösungsverhalten von Cadmium wesentlich vom pH- Wert abhängig. Generell wird mehr Cadmium mobilisiert, je tiefer der pH- Wert ist. Cadmium tritt bei pH- Werten von unter 8 als Cd²⁺- Ion auf.

Chrom

Chrom liegt unter natürlichen Bedingungen in dreiwertiger Form vor. Chromit (FeOx Cr₂O₃) ist das bedeutendste Chrommineral. Weiterhin können auch Chrom(VI)verbindungen auftreten.

Die Oxydationstufe wird durch die Redoxreaktion bestimmt:



In Anwesenheit organischer Substanzen findet möglicherweise eine Umwandlung von Chrom(VI)- in Chrom(III)verbindungen statt (SCHEFFER & SCHACHTSCHNABEL, 1992). Chrom(III) kann auch als Gitterbestandteil von Eisen(III)oxiden auftreten. Chrom ist in allen Analysen der 5 Halden in nicht geringem Maße vorhanden. Der mit Essigsäure eluierbare Anteil am Chromgesamtgehalt liegt bei weniger als 1% bei Kruste und frischem Material. Bei Eluation mit Oxalsäure werden höhere Chromgehalte in Lösung gebracht. Das ist bis 9% aus Krustenmaterial und bis 10% aus Material mit frischen Bruchflächen. Daraus ist erkennbar, dass Chrom erst durch den niedrigen pH- Wert, der mit Oxalsäure erreicht wird, in Lösung zu bringen ist. Chrom kann als schwer zu mobilisierendes Element bezeichnet werden.

In wässriger Lösung tritt Chrom in drei- und sechswertiger Form auf.

Arsen

Arsen ist in den untersuchten Proben in relativ hohen Konzentrationen vertreten. Besonders in der Probe des Maßschachtes ist das der Fall.

Der eluierbare Anteil durch Essigsäure, gemessen am Arsen-Gesamtgehalt, ist verhältnismäßig gering. Er beträgt bis ca. 2% bei Krustenmaterial und unter 1% bei frischem Material. Der durch Oxalsäure gelöste Anteil fällt wesentlich höher aus. Hier liegen die Werte zwischen 1% und 12% (Kruste) und bis etwa 50% aus frischem Material.

Die Arsenlöslichkeit ist wiederum vom pH- Wert abhängig. Größere Mengen werden erst im sehr sauren Milieu, ab pH-Wert 3, mobilisiert.

Teilweise treten Werte von über 100% des eluierten Anteils auf. Das kann jedoch nicht möglich sein und ist unsinnig. Eine mögliche Erklärung ist in der Art des Gesteinsaufschlusses zu finden. Der verwendete Königswasseraufschluß ist keine silikatbrechende Aufschlussart. Silikatisch gebundene Elemente werden nicht gelöst und können somit nicht erfasst werden. Dies gilt generell auch für sämtliche Ergebnisse.

Es wurde außerdem keine sequentielle Extraktion des beprobten Haldenmaterials durchgeführt, wodurch die genauen Bindungsformen nicht festgestellt werden können.

Durch die Verwendung von Essigsäure und Oxalsäure als Lösungsmittel können nur teilweise Rückschlüsse auf die Mobilität der einzelnen Elemente getroffen werden. Aussagen können zur Fähigkeit in Lösung zu gehen in Abhängigkeit zum pH-Wert, getroffen werden.

4.4 Vergleich der Eluierbarkeit der Schwermetalle und Spurenelemente der einzelnen Halden

Die untersuchten Proben des Bergematerials von Bergbauhalden unterscheiden sich zum Teil recht deutlich, was das Löseverhalten der Schwer- und Spurenmetalle betrifft. Eine Systematik der Analyseergebnisse in Betracht der abnehmenden Alter der untersuchten Halden ist jedoch nicht zu erkennen.

Interessant, zur Abschätzung des Gefährdungspotentials einer Halde auf das Sicker- und Grundwasser, ist nicht vordergründig der Gesamtgehalt eines Schadstoffes (Schwermetall, As) im Gestein, sondern in welchen Mengen es zu mobilisieren ist. Aus diesem Grund wurden die Lösungsversuche durchgeführt.

4.4.1 Fürstenstolln

Im Haldengestein der ältesten untersuchten Halde sind trotz des langen Bestehens der Halde noch immer hohe Gehalte an Mangan, Arsen, Blei sowie Chrom nachweisbar. Eine Erklärung dafür ist, dass beim Entstehen der Halde Gestein aufgehaldet wurde, dessen Elementgehalte für die damalige Zeit nicht nutzbar oder nicht von Bedeutung waren, für heutige Verhältnisse jedoch hohe Konzentrationen aufweisen.

Bei den durchgeführten Lösungsversuchen, wurde hauptsächlich Mangan gelöst. Untergeordnet konnte auch Blei gelöst werden. Der Grossteil der gelösten Elemente konnte aus Krustenmaterial gelöst werden. Das ist ein Zeichen dafür, dass verlagerbares Mangan vorrangig im Krustenbereich des Gesteins angereichert ist. Auffallend ist die hohe Arsenkonzentration in der aus frisch gebrochenem Material durch Oxalsäure eluierten, Analyse. Der Grund ist, dass Arsen bei niedrigen pH-Werten in Lösung geht und hauptsächlich innerhalb des Gesteins gebunden ist. Eine Verlagerung von Elementen vom inneren in den Krustenbereich, ist nicht zu beobachten.

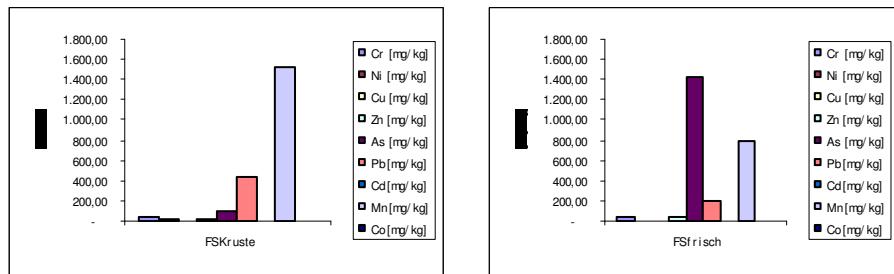


Abb. 20: mit Oxalsäure gelöste Gehalte Kruste (li), frisch (re)

4.4.2 Maßschacht

Die Maßschachthalde ist die zweitälteste der untersuchten Bergbauhalden. Das Haldenmaterial zeichnet sich durch besonders hohe Gehalte an Arsen und Kupfer aus, gefolgt von Blei und Mangan.

Besonders hohe Konzentrationen von Arsen wurden bei der Eluation (mit Oxalsäure) aus Krustenmaterial in Lösung gebracht. In nennenswerten Konzentrationen wurden auch Kupfer und Mangan gelöst.

In diesem Fall ist wiederum zu erkennen, dass die Elemente, vor allem Arsen und Blei, erst bei niedrigen pH- Werten verlagerungsfähig sind.

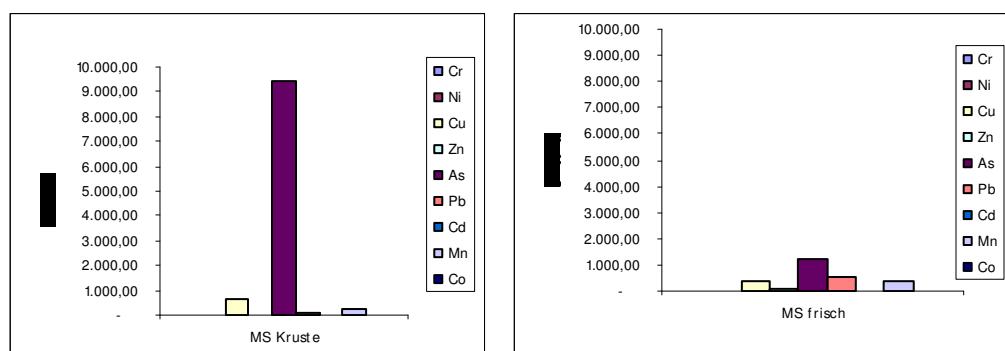


Abb. 21: mit Oxalsäure gelöste Elemente, Kruste (li) frisches M. (re)

4.4.3 Junge Hohe Birke

Die Halde des „Junge Hohe Birke“ Schachtes ist die drittälteste der 5 untersuchten Halden. Das entnommene Gestein besitzt die höchsten Gehalte an Zink, Blei und Cadmium. Die bei den Lösungsversuchen ermittelten Gehalte an gelöstem Zn und Pb sind ebenfalls die höchsten der 5 Halden. Bei Cadmium ist das ebenfalls der Fall, jedoch sind die gelösten Konzentrationen als sehr gering zu bezeichnen, was auch für die Gehalte an gelöstem Cadmium der anderen Halden gilt.

Blei ist vor allem im Krustenmaterial gebunden, ebenso Zink. Jedoch wird Blei in größeren Mengen schon bei geringeren pH- Werten gelöst, Zink jedoch erst unter Verwendung von Oxalsäure als Elutionsmittel. Durch Essigsäure wird mehr Blei als unter Verwendung von Oxalsäure gelöst (aus Krustenmaterial). Zink verhält sich genau entgegengesetzt. Es wird mehr Zn durch Oxal- als durch Essigsäure gelöst.

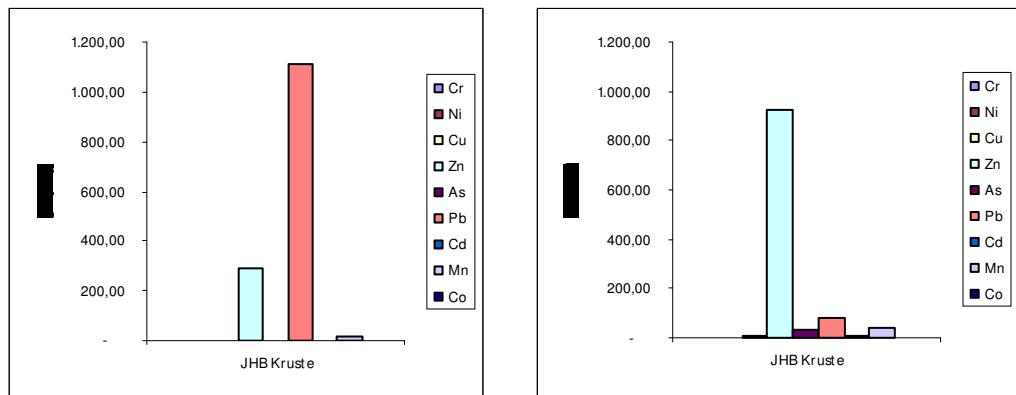


Abb. 22: Lösung durch Essigsäure (li) und Oxalsäure (re)

4.4.4 Vertrau auf Gott Schacht

Das beprobte Haldengestein, der Halde des Vertrau auf Gott Schachtes, hat im direkten Vergleich mit den 4 anderen Halden eher durchschnittliche Gehalte an Schwer- und Spurenmetallen.

Gelöst werden vor allen Dingen Zink, Arsen und Blei, jedoch nur in relativ geringen Konzentrationen und bei niedrigem pH- Wert. Der größte Anteil der Elemente, wird bei niedrigem pH- Wert, aus den Proben mit frischem Material gelöst.

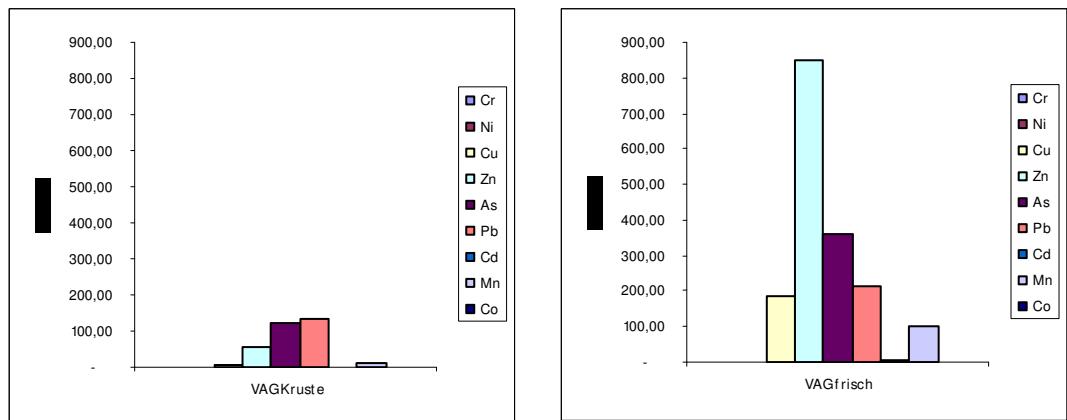


Abb. 23: durch Oxalsäure gelöste Elemente, Kruste M. (li) frisch M. (re)

4.4.5 Ludwigschacht

Das Material, welches auf der Halde des Ludwigschachtes verkippt wurde, ist im Vergleich mit den anderen Haldengesteinen das am spätesten aufgeschüttete Gestein. Auf dieser Halde wurde bis zum Ende des Bergbaus Grobberge abgelagert. Die im Haldenmaterial enthaltenden Gehalte an Schwermetallen und As sind, im Vergleich mit den anderen Halden, eher gering. Es sticht kein Element durch erhöhte Konzentration hervor.

Gelöst werden vor allem Arsen und in geringerem Maß, Blei. Jedoch erfolgt die Lösung erst bei niedrigen pH- Werten, da erst bei der Eluation durch Oxalsäure relativ größere Mengen aus dem Material mit frischen Bruchflächen gelöst werden.

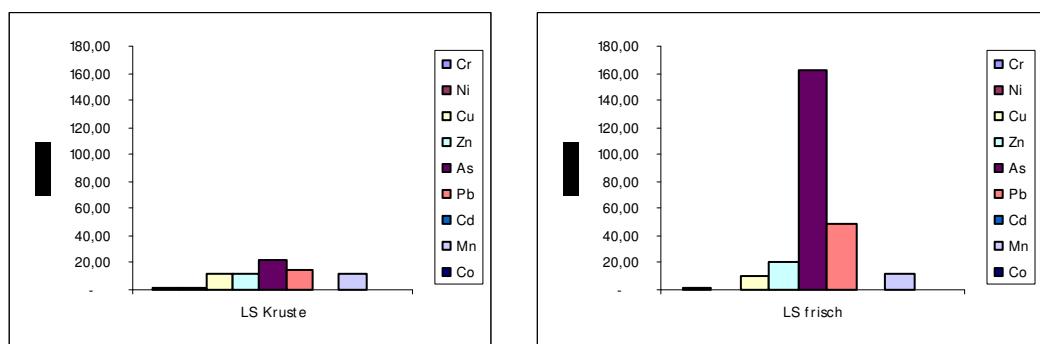


Abb. 24: gelöste Element durch Oxalsäure, Krusten M. (li) frisch M. (re)

4.5 Abschätzung des Gefährdungspotenzials

4.5.1 Halde des Fürstenstolln

Es ist davon auszugehen, dass von der untersuchten Halde des Fürstenstolln (pH-Wert= 4,7) keine potenzielle Gefährdung für das Grundwasser durch Schwermetalle und Spurenelementen ausgeht. Die Lösungsversuche erbrachten für Arsen, Mangan und Blei relativ hohe Werte, jedoch handelt es sich um eine sehr kleine Halde, aus der wenige Grundwasserschadstoffe ausgetragen werden können. Wie die Kartierung des Haldenaufbaus zeigt, befinden sich kaum noch größere Gesteinsstücke im Haldenkörper. Der größte Teil des Haldenmaterials besteht aus erdigen Massen, in denen sich nur vereinzelt ehemaliges Haldengestein befindet. Die über Jahrhunderte auf das Haldenmaterial einwirkenden klimatischen

Bedingungen und die ständig präsente Verwitterung haben das Gestein fast vollständig zersetzt. Weiterhin wirkt der bei der Kartierung festgestellte helle Horizont (Bild: FS 4) durch seine geringe Korngröße und dem daraus resultierenden niedrigen kf- Wert, als Wasserstauer. Dadurch wird das Eindringen von Niederschlagswasser verhindert und somit der Austrag von Schwer- und Spurenmetallen unterbunden. Der Bewuchs mit Laubbäumen, hauptsächlich Birke, und das sehr dicht wachsende Gras verhindern weiterhin einen Austrag von Schadstoffen durch Wind.

4.5.2 Maßschachthalde

Bei der entnommen Gesteinsprobe konnten sehr hohe Gehalte an Arsen und Kupfer festgestellt werden. Die pH-Wert-Messung ergab einen für das Gestein einen Wert von 3,5. Die Lösungsversuche zeigten, dass diese Elemente auch in den höchsten Konzentrationen gelöst werden. Da die Untersuchungen an einer Einzelprobe durchgeführt wurden, sind solche Werte wenig repräsentativ. Sie sind jedoch auch nicht zu vernachlässigen und geben einen ersten Hinweis, mit welchen Kontaminationen des Grundwassers zu rechnen sind. Die Maßschachthalde befindet sich im Stadtgebiet von Freiberg und um den Haldenkörper befindet sich seit über Hundert Jahren eine Kleingartenanlage. Hohe Arsen- und Kupfer-Werte hätten nicht nur zu einer Belastung des Grund- und Sickerwassers geführt, sondern es wäre auch zu gesundheitlichen Beschwerden der Anwohner gekommen.

Es besteht jedoch die Gefahr einer Verunreinigung des Grundwassers durch Arsen und Kupfer, da keine wasserundurchlässige Schicht gefunden werden konnte. Die Oberfläche ist durch Bebauung zu einem Großteil versiegelt und verhindert dadurch das Einsickern von Niederschlagswasser. In wie weit die Halde über ein Entwässerungssystem verfügt, welches die auftretenden Sickerwässer abführen kann, wurde nicht festgestellt.

In Anbetracht dessen, ist von einem geringen Gefährdungspotential auszugehen.

4.5.3 Halde des Junge Hohe Birke Schachtes

Die hohen Gehalte an Zink, Blei und Cadmium des Haldenmaterials sind der Grund für die hohen Konzentrationen dieser Schwermetalle in den Analysen der Lösungsversuche.

Die Konzentrationen der 3 Elemente sind die höchsten der 5 beprobeden Halden. Es besteht die Gefahr einer Belastung des Sicker- bzw. Grundwassers.(Gesteins-pH-Wert=4,1)

Die Kartierung der Halde ergab in einer Tiefe von ca. 60 cm einen verkrusteten Horizont (siehe Anhang Bild: JHB 4 u. 5). Möglicherweise haben sich im Haldeninneren weitere solche Schichten ausgebildet, die durch einen Handschurf nicht aufgeschlossen werden. Solche verkrusteten Horizonte können das Eindringen von Wasser aus Niederschlägen teilweise verringern oder ganz unterbinden. Kann kein Wasser eindringen, ist eine Verlagerung von Schwermetallen nicht möglich.

Die Halde stellt nicht nur eine Gefährdung des Sicker- und Grundwassers dar. Der Haldenkörper wird von einem Bach, dem Münzbach, umflossen und stellenweise durchflossen. Am Haldenfuß austretendes Sickerwasser kann in den Bach gelangen, ihn somit verunreinigen und die Schadstoffe somit in kurzer Zeit weit verbreitet werden.

Durch den Bewuchs mit Bäumen und Sträuchern sowie einer Grasdecke, ist die Gefahr eines Schadstoffaustrags durch äolischen Transport gering.

In wie weit die Kruste das Eindringen von Wässern verhindert, und damit den Austrag von Schwermetallen und Schadstoffen, konnte nicht festgestellt werden. Um weitere Erkenntnisse diesbezüglich zu erhalten müssten umfassendere Untersuchungen zu Vorgängen in der Halde durchgeführt werden. Es ist bis dahin von einem erhöhten Gefährdungspotential für Grund- und Sickerwasser auszugehen.

4.5.4 Halde des Vertrau auf Gott Schachtes

Die Konzentration an Schwermetallen und Spurenmetallen ist im Vergleich mit den anderen Halden durchschnittlich. Es treten jedoch erhöhte Werte bei Zink, Arsen und Blei auf, die sich auch in den Analyseergebnissen der Lösungsversuche wiederspiegeln. Die drei Elemente werden in höheren Konzentrationen gelöst. Die Mobilisierung erfolgt jedoch erst bei niedrigen pH- Werten von ca. 3 in hohen Konzentrationen (pH-Wert des Gesteins ist 5).

Wie in der Kartierung festgestellt wurde, sind relativ grobkörnige Gesteine abgelagert wurden, die in einer Lagerung mit vielen und recht großen Hohlräumen zwischen den einzelnen Aggregaten vorzufinden sind. Diese Hohlräume ermöglichen das Eindringen von Niederschlagswasser und sorgen für eine gute Wasserwegsamkeit.

Da kein verkrusteter Horizont gefunden werden konnte, der das Eindringen von Sickerwasser verhindert, ist von einem Eintrag von Schadstoffen in das Grundwasser auszugehen.

Auf dem Haldengelände sind ständige und periodische Feuchtstellen zu finden, welche von MELZER (2002) erfasst und kartiert wurden. Folglich können Schadstoffe, welche durch die Halde migrieren am Haldenfuß austretenden und somit Oberflächenwasser und umliegende Böden kontaminieren, wodurch das Grundwasser ebenfalls verunreinigt werden kann. Der Bewuchs hat einen tundrenähnlichen Charakter mit einem Bewuchs von Flechten und Moosen sowie Laubgewächsen. Die Überdeckung mit Gras oder Moos ist zu etwa 90% gegeben, was einen äolischen Austrag von Schadstoffen gering ausfallen lässt.

Die Halde des Vertrau auf Gott Schachtes ist die vom Volumen der aufgehaldeten Gesteine die Größte der untersuchten Kippen. Durch die Größe und durch die aus dem Haldenmaterial gelösten Schwermetalle und anderen Schadstoffen ergibt sich eine hohe Wahrscheinlichkeit einer Kontamination des Grund- bzw. Sickerwassers.

Die potentielle Gefährdung, die von der Halde ausgeht, ist deshalb als hoch zu bezeichnen.

4.5.5 Halde des Ludwigschachtes

Die Grobberge dieser, bis in die letzten Jahre des Freiberger Bergbaus betriebenen Halde, zeichnen sich durch geringe Konzentrationen an Schwermetallen und Schadstoffen aus. Der Grund hierfür ist, dass in den letzten Jahren des Bergbaus nur noch geringer vererztes Gestein abgebaut, und somit auch das taube Gestein geringer mit Metallen und Spurenelementen belastet ist. Die Lösungsversuche erbrachten, im Vergleich mit den anderen Halden, geringe Konzentrationen an verlagerbaren Schwermetallen und Spurenelementen.

Die Kartierung ergab einen verkrusteten Horizont in ca. 1m Tiefe. Wie schon bei der Halde des Junge Hohe Birke Schachtes erwähnt, kann sie das eindringen von Wasser verhindern und somit die Verlagerung sowie den Austrag von Schadstoffen unterbinden. In wie weit das der Fall ist, konnte nicht festgestellt werden.

Trotz der, im Verhältnis zu den anderen Halden, relativ geringen verlagerbaren Mengen an Schadstoffen und des pH-Wertes von 6,3, hat diese Halde ein höheres Gefährdungspotential, auf das Grund- und Sickerwasser, als die Halde des

Fürstenstolln und der Maßschachthalde. Durch das recht große Volumen, welche die Grobberge einnehmen, können Schadstoffe in größeren Konzentrationen verlagert und das Grundwasser kontaminieren. Außerdem können migrierende Wässer, welche am Haldenfuß austreten, in die direkt an der Halde verlaufende Freiberger Mulde gelangen und diese kontaminieren. Die umweltgefährdenden Stoffe können sich somit schnell ausbreiten und dadurch auch das Grundwasser belasten.

4.6 Mechanismen, die den Austrag von Spurenelementen verhindern

Um langfristig einen Austrag von Schwermetallen aus den Halden in Oberflächenwasser, Böden oder das Grundwasser zu verhindern, müssen entsprechende Verfahren, die zur Lösungen des Problems führen, gefunden werden.

Hauptsächlich muss das Endringen von Sickerwässern verhindert werden. Ist kein Lösungs- und Transportmittel vorhanden, können keine Schadstoffe ausgetragen werden.

Erreicht wird das, durch eine Abdeckung bzw. Abdichten der Haldenoberfläche und des Haldenbodens mit wasserundurchlässigem Material.

Gleichzeitig wird die Zufuhr von Sauerstoff verhindert, was sich auf die Sulfidoxidation negativ auswirkt, was wiederum die Verfügbarkeit an verlagerbaren Schwermetallen und Spurenelementen herabsetzt. Die Anwendung solcher Verfahren ist vom Verhältnis Aufwand / Nutzen abhängig.

Da die untersuchten Schwermetalle und Spurenelemente erst bei relativ niedrigen pH- Werten in größeren Konzentrationen gelöst werden, kann eine Steigerung des pH- Wertes eine Immobilisierung der Schwermetalle bewirken. Durch Vermischung des Haldenmaterials mit z.B. CaO, wird der pH- Wert erhöht und die Sauerwasserbildung gestoppt. Es müsste jedoch das ganze Haldengestein aus der Halde entfernt, mit CaO versetzt und wieder in die Halde eingebracht werden. Das wäre ein ungeheuerer Aufwand angesichts der Schadstoffgehalte der untersuchten Halden.

Eine weitere Möglichkeit ist das Einbringen von Spund- oder Reaktivwänden, die einen Austrag der Schadstoffe verhindern.

Im Laufe der Haldenentwicklung können sich zwei natürliche Mechanismen entwickeln, die den Schwermetall- und Schadstoffaustausch verringern oder unterbinden.

Im Verlauf der physikalischen Verwitterung kommt es zu einer immer stärkeren Zerkleinerung des Gesteins. Es können dadurch Korngrößen im Tonbereich entstehen.

Durch Sickerwasser oder mittels gravitativem Transportes gelangt dieser Gesteinsbruch in tiefere Bereiche der Halde und wird hier abgelagert. Dadurch wird in einer bestimmten Tiefe (bis ca. 1m) des Haldenkörpers eine Anreicherung feinen Materials erreicht. Dieser Vorgang kann zur Selbstabdichtung der Halde führen und ist ein wünschenswerter Effekt.

Ein weiterer natürlicher Prozess, welchen JUNG in einer Dissertation untersucht, kann zur Abdichtung der Halde führen. Es handelt sich dabei um materialabhängige und klimatisch gesteuerte Stoffmobilitäts- und Krustenbildungsprozesse.

Krusten sind natürliche Oberflächenabdichtungen und stellen passive in-situ Behandlungsmethoden dar.

Von wesentlicher Bedeutung ist der Wasserhaushalt in einer Halde. Bei hoher Durchlässigkeit der Aufbereitungsabgänge und starken Niederschlägen ist der Flüssigkeitstransport abwärts gerichtet und es kommt zur Ausschwemmung von Schadstoffen mit dem Sickerwasser. Bei verdunstungsbetonten Bedingungen findet jedoch vornehmlich ein kapillarer Aufstieg von Lösungen statt, die im Oberflächenbereich

der Halden verdunsten und sekundäre Phasen abscheiden.

Als weitere wichtige klimatische Einflußgröße ist der Niederschlag zu nennen.

Neben der absoluten Menge ist vor allem seine zeitliche Verteilung für Stoffmobilität und Krustenbildung ausschlaggebend. Bei kontinuierlicher Beregnung kommt es nicht zur oberflächlichen Krustenbildung, da eine abwärts gerichtete Flüssigkeitsbewegung etabliert wird. Ein verstärktes Ausschwemmen von Schadstoffen mit dem Sickerwasser ist zu befürchten. Alternieren Niederschlagsereignisse jedoch mit Trockenzeiten (episodische Wasserzufuhr), kommt es zu einem Wechsel von abwärts gerichteter Flüssigkeitsbewegung und aufwärts gerichtetem kapillarem Transport, da die Verdunstung zeitweise das dominierende Element ist und die Bildung einer Kruste ermöglicht. Auch durch erneute Niederschlagsereignisse wird die frische Kruste nicht

wieder völlig aufgelöst, da die Zugänglichkeit im Krustenbereich verringert ist. Somit ist eine Krustenbildung nicht nur auf verdunstungsbetonte, aride Gebiete, in denen sich die Wasserversorgung wesentlich aus dem Grundwasser speist, beschränkt, wie auch die Krustenbildungen auf den Halden im Freiberger Bergbaurevier (humides Klima) zeigen.

Die Tiefenlage einer Krustenbildung wird neben Neutralisations- und Redoxreaktionen von der Verdunstungsrate bestimmt. Bei zu starker Verdunstung kommt es zum Abriss der Kapillaren und mobile Stoffe werden nicht mehr zur Oberfläche einer Halde transportiert. Stattdessen scheiden sich sekundäre Phasen in einer tiefer gelegenen Krustenbildungszone ab, die noch vom aufwärts gerichteten Flüssigkeitsstrom erreicht wird (JUNG, 2003)

Es existieren also natürliche Prozesse, die zu einer Abdichtung der Halde führen und somit den Austrag von Schadstoffen verhindern.

II. Kartierung des Haldenaufbaus (Diplomkartierung)

1. Aufgabenstellung

Im Zusammenhang mit der Diplomarbeit „Halden in Freiberg und Brand-Erbisdorf“ wurde eine Kartierung der gewählten Halden durchgeführt. Nach Anlegen eines Handschurfs sollen die so aufgeschlossenen Halden auf ihren Aufbau untersucht werden. Ziel der Arbeiten ist es, Aufschluss über den Aufbau der Halden und Veränderungen des Haldenmaterials unterschiedlich alter Halden zu erhalten. Bei der Kartierung ist besonders darauf zu achten, ob sich eine verkrustete Schicht ausgebildet hat.

2. Krustenbildung

Das Aufhalten tauben Gesteins oder Aufbereitungsabgängen aus dem Abbau sulfidischer Erze verursacht verschiedene Umweltprobleme, wie zum Beispiel Sauerwasserbildung oder Staubemission. Um dem entgegenzuwirken gibt es verschiedene Möglichkeiten, zum Beispiel Abdichtung oder Abdeckung des Haldenkörpers. Eine natürliche Art der Oberflächenabdichtung zur Verhinderung des Austrags von Schadstoffen ist die Krustenbildung. Diese Krusten können das Eindringen von Niederschlagswasser verringern oder gar unterbinden und somit den Austrag von Schadstoffen wie z.B. Schwermetallen verhindern.

Die Bildung einer solchen Kruste ist im Wesentlichen vom Material und vom Klima abhängig. Ein weiteres Kriterium zur Bildung von Krusten ist der Wasserhaushalt der Halde. Bei hohen Niederschlagsmengen und hohen Durchlässigkeiten des Haldengesteins ist der Flüssigkeitstransport abwärts gerichtet. Überwiegt jedoch die Verdunstung, so findet hauptsächlich ein kapillarer Aufstieg statt. Die aufsteigenden Lösungen verdunsten oberflächennah und scheiden sekundäre Phasen ab. Es kommt zu einer Anreicherung von verschiedenen Spuren- und Schwermetallen. In seiner Dissertation befasst sich Hagen Gunther Jung ausführlich mit der Krustenbildung und deren Einflussfaktoren.

3. Durchgeführte Arbeiten

Nach Beendigung der Frostperiode wurde mit der Geländearbeit begonnen, die mehrere Wochen in Anspruch nahm. Die gewählten Halden sind die Halde am *Fürstenstolln*, Halde des *Thurmhofschautes 6. und 7.* unteres Maß, Halde der *Jungen Hohen Birke*, Halde des *Vertrau auf Gott Schachtes* sowie die Halde des *Ludwig Schachtes*. Die genaue Lage der Halden ist unter 2.5 in der zugehörigen Diplomarbeit zu finden.

Vor Beginn der Arbeiten wurde eine Begehung der einzelnen Halden durchgeführt, die zur Aufgabe hatte, einen günstigen Platz für die Lage des Schurfes zu erkunden. Nun wurde mit dem Anlegen der Schürfe begonnen. Da keine Technik eingesetzt werden konnte, was durch die Lage der Halde bedingt wurde sowie dadurch, dass einige Halden als Flächennaturdenkmäler eingeordnet sind, wurde ein Handschurf mit Spaten und Spitzhacke angelegt. Die Größe wurde auf 1x1m für die Grundfläche festgelegt. Die Tiefe des Schurfes war abhängig von den vorgefundenen Verhältnissen auf den Halden. Sie lag bei etwa 1m bis ca. 1,60m. Die Endteufe des Schurfes richtete sich danach, ob mit zunehmender Tiefe Veränderungen im aufgehaldeten Gestein auftraten. Jedoch waren nicht viel mehr als 1,60m möglich, da mit zunehmender Tiefe immer wieder die Böschung einbrach.

Kartiert wurden der Bewuchs, die Gesteinsart (Farbe, Beschaffenheit, Korngröße) sowie eventuelle Krusten. Die Arbeiten wurden mit Fotos dokumentiert.

4. Profile und Schichtenbeschreibung

4.1 Halde entlang des „Fürstenstolln“

Zu den ältesten Halden (ca. 14.Jhd) im ehemaligen Bergaugebiet in und um Freiberg gehören die Halden, die entlang des Fürstenstolln verlaufen. Sie sind im Vergleich zu anderen, jüngeren Halden sehr kleine Halden. Der Abbau erfolgte damals mit Hammer und Schlägel. Es wurden dadurch Gesteinsbruchstücke mit geringer Korngröße aufgeschüttet, ganz im Gegensatz zu der beim Abbau durch Bohren und Sprengen erzielten Korngrößen.

Der angelegte Schurf zeigte eine deutliche Horizontausbildung innerhalb der Halde.

Im Laufe der Jahre war das Haldengestein der Verwitterung und Erosion ausgesetzt.

Durch die häufig auftretende physikalische und chemische Verwitterung ist das Material zerkleinert wurden. In mehr als 6 Jahrhunderten ist somit nicht viel von dem ursprünglichen Gestein übrig geblieben. Nur noch vereinzelt können größere Stücke gefunden werden. Diese haben maximal eine Größe von 10-20 cm. Überwiegend ist jedoch nur Gesteinsgruß und kleiner Gesteinsbruch zu finden.

Deutlich sind helle und dunkle Schichten im Aufbau zu erkennen. (Abb.25)



Abb. 25: Schichtenaufbau Fürstenstollenhalde

Dieser Schichtenaufbau ist auf Auswaschungs- und Anreicherungsprozesse zurückzuführen. Deutlich wird es durch den als Schicht 4 bezeichneten, hellgrauen Horizont, welcher Korngrößen im tonig-schluffigen Bereich aufweist. Aus darüber liegenden Schichten ist feines Material, wie z.B. bei der Feldspatverwitterung entstehende Tonminerale, abtransportiert worden. Dadurch kam es in tieferen Bereichen zu einer Anreicherung.



Abb. 26: Schicht 4

Im Laufe der Jahre ist es zu Bodenbildungsprozessen gekommen, die den ursprünglichen Aufbau der Halde nicht mehr erkennen lassen. Dies ist wahrscheinlich auch der Grund dafür, dass kein verkrusteter Horizont gefunden wurde.

Der gesamte Haldenkörper ist mit einer Humus-Auflageschicht bedeckt. Mit 7cm Mächtigkeit ist sie im Gegensatz zu jüngeren Halden gut entwickelt.

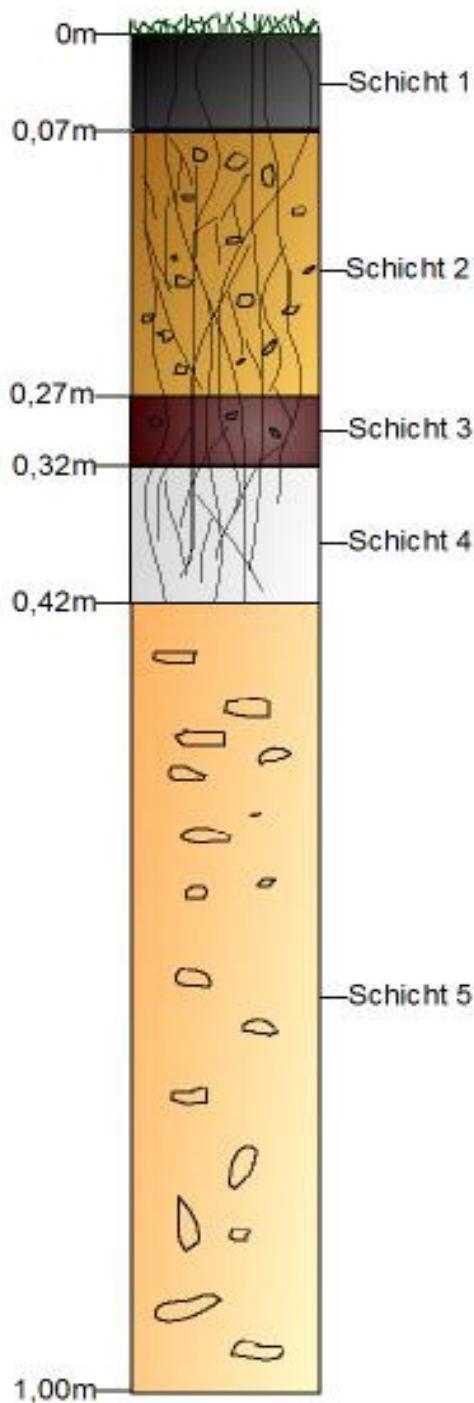
Auf dem Halden-Top und an den Böschungen hat sich eine Zahl von Pflanzen angesiedelt. Es handelt sich dabei hauptsächlich um Sträucher (Hagebutte) und Laubbäumen. Überwiegend ist die Birke anzutreffen. Aber auch Eichen sind zu finden. Auffällig ist das fehlen von Nadelhölzern.

Das Grundstück auf dem die Halde liegt befindet sich in Privatbesitz und wird als Wiese genutzt. Die Halde selber ist ungenutzt.

Profil 1

Halde: Fürstenstolln

Maßstab: 1:5



Schichtenverzeichnis

Halde: Fürstenstolln
Datum: 10.05.2006

Aufschluß: Schurf 1x1x1m
Aufschlußpunktthöhe: 451.1 m ü NN

Schicht-Nr.	Teufe [m]	Mächtigkeit [m]	Beschreibung der Schichten	Fotos
1		0,03-0,07	Auflageschicht, Mutterboden, humusführend, durchwurzelt, dunkelbraun, dunkelgrau, braun, Gesteinsbruch <3cm	
2		~0,20	sehr stark verwittert (zersetzt), sandig, feinsandig, hell-ocker - hellbraun, Gesteinsbruch 2-3cm, Ausgangsgestein kaum zu erkennen, gneistypischer Mineralbestand, kaum Resterzablagerungen, durchwurzelt	FS 2, FS 3
3		~0,05	deutlich abgegrenztes dunkler Horizont, erdig, schluffig, sandig, dunkelbraun, braun, kaum Gesteinsbruch, Auswaschungshorizont?, durchwurzelt	FS 2, FS 3
4		~0,10	sehr gut abgegrenztes helles Schicht, hellgrau, tonig-schluffig, knetbar, Anreicherung von Tonmineralen, kein Gesteinsbruch durchwurzelt	FS 4
5		>0,5	stark verwittert, Feinsand- Mittelsand, Gesteinsbruchstücke -25cm, ocker, gelblich, keine Wurzeln, mit zunehmender Tiefe größere Gesteinsstücke, teilweise mit dunkelglänzenden Kruste, Gneis	FS 6

4.2 Halde des Maßschachtes

Die Halde des heutigen Maßschachtes ist in die Zeit des 16. Jahrhunderts einzuordnen und es sind hauptsächlich Gneis und Gangart abgelagert worden.

Die Schichten sind deutlich voneinander getrennt. Man kann das am Farb- bzw. Materialwechsel erkennen.

Sehr deutlich ist der Übergang von der obersten Schicht (Auflageschicht) zur Schicht 2 abgegrenzt.



Abb. 27: Übergang von Auflageschicht zum Haldenmaterial

Gut lässt sich das am Farbwechsel von dunkelbraun/ schwarz zu rotbraun erkennen. Die Humusschicht variiert in ihrer Mächtigkeit sehr stark, was auf einen nachträglichen Eingriff hindeutet. Der Grund hierfür könnte der Bau der hier befindlichen Gaststätte sein. Aufgehaldet wurde hier Gneis und Gangart. Bis in eine Tiefe von 70 cm(unter GOK), besteht die Halde hauptsächlich aus rotbraunem, sandig-kiesigem Material. Vereinzelt können größere Gesteinsstücke von bis zu 15 cm vorhanden sein.



Abb. 28: Haldenaufbau Maßschachthalde

Unterhalb dieser Schicht sind große Bruchstücke von bis zu 50cm anzutreffen. Dadurch gibt es hier auch Hohlräume. Die Beschaffenheit des Haldenmaterials reicht von angewittert bis stark verwittert. Einzelne Stücke lassen sich mit der Hand zerbrechen.

Auffallend beim Anblick des Aufschlusses ist die rote Farbe des Materials. Dies weist auf einen hohen Anteil von Eisenoxid (Hämatit) im Boden hin.

Einige Gesteinsstücke sind mit einer schwarzen, teilweise glänzenden Schicht überzogen.

Ein weiteres Merkmal der Maßschachthalde ist die tiefe und starke Wurzelbildung. Baumwurzeln sind auch in einer Tiefe von 140 cm anzutreffen.

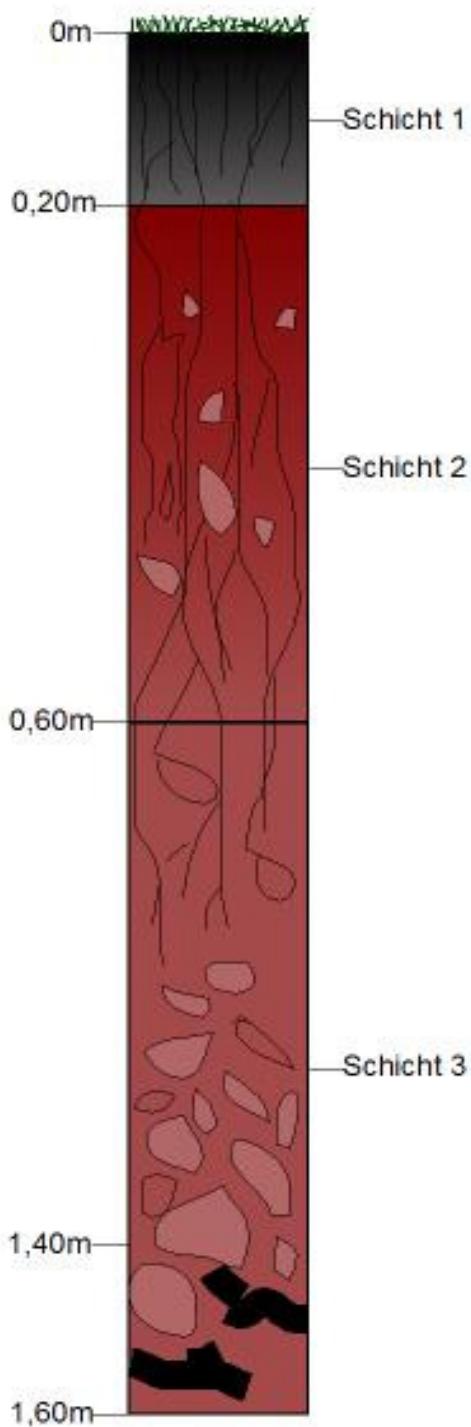
Ein genaueres Bild des Haldenaufbaus könnte möglicherweise durch Anlegen des Schurfs auf der Böschung erhalten werden. Die Böschung ist jedoch zu steil und so das Anlegen mit einfachen Mitteln nicht möglich.

Die Halde ist mit Laubbäumen wie Ahorn, Eiche und Birke bewachsen. Eine Sonderstellung nimmt sie außerdem ein, da sie die Einzige von den 5 untersuchten ist, auf der Nadelhölzer wachsen, was auf das eingreifen des Menschen zurückzuführen ist.

Die Halde ist Eigentum der Stadt Freiberg und wird als Gartenland sowie gastronomisch genutzt.

Profil 4

Halde: Maßschacht



Maßstab: 1:8

Schichtenverzeichnis

Halde : Maßschacht
Datum: 02.06.2006

Aufschluß: 1x1x1,60m
Aufschlußpunktthöhe: 460,0 m ü NN

Schicht-Nr.	Teufe [m]	Mächtigkeit [m]	Beschreibung der Schichten	Fotos
1		0,20-0,60	Auflageschicht, Mutterboden, grau-schwarz, hoher Humusanteil, starke Schwankungen der Mächtigkeit-> Aufschüttung, stark durchwurzelt	MS 2,4
2		0,60-0,70	rot-rotbrauner Horizont, verwittert, wenig Haldenmaterial, hauptsächlich Feinsand-Mittelsand Bereich, Gestein bis 20cm, Gneis, Gangart, größtenteils Quarz, auch Glimmer, Wurzeln	MS 2,4,5
3		~0,70	Haldenmaterial in ursprünglicher Lagerung, verwittert, rotbraun, Gneis, Gangart, teilweise sehr brüchig, z.T. mit glänzender dunkler auch rotbrauner Kruste überzogen, bei 1,40m Baumwurzeln	MS 6,7

4.3 Halde des „Junge Hohe Birke“ Schachtes

Dieser Schacht, welcher in das 16.-18. Jahrhundert einzuordnen ist, war einer der bedeutendste jener Zeit. Auf der dazugehörenden Halde wurde neben dem überall anzutreffenden Gneis auch Gangart aufgehaldet. Es ist keine klare Schichtung zu erkennen. Es sind Körnungen anzutreffen, die im Feinsand- bis Steinbereich liegen (DIN 4188, 1957). Die Maximalkorngröße liegt bei ca. 25 cm. Die Hohlräume zwischen dem Haldenmaterial sind mit feinerem Material verfüllt. Dadurch ist kaum Porenraum vorhanden (Abb. 30).



Abb. 30: Handschurf auf der Halde der „Jungen Hohen Birke“

Ein Großteil des abgelagerten Materials ist mit Aggregaten im Fein- bis Mittelkiesbereich behaftet bzw. „verklebt“. Möglicherweise wird dies durch Verwitterungstätigkeit bzw. Lösungerscheinungen hervorgerufen. Außerdem ist ein Grossteil der Gesteine mit einer glänzenden, rotbraunen bis schwarzen Kruste überzogen.

Bei ca. 60 cm ist ein verkrusteter Bereich mit einer Mächtigkeit von ca. 5 cm zu erkennen.



Abb. 31: Verkrusteter Horizont auf JHB

Diese Schicht zeichnet sich durch ihre sehr dunkle Farbe aus. Aufgebaut ist diese Kruste aus Material im Mittelsandbereich, welches mit Gesteinsbruch (bis 3cm) durchsetzt ist. Auffallend ist die erhöhte Feuchte dieser und der darunter liegenden Schichten.

Die Halde wird vom Münzbach um- bzw. durchflossen. Die Gefahr des Austrags von Schadstoffen ist hier besonders gegeben.

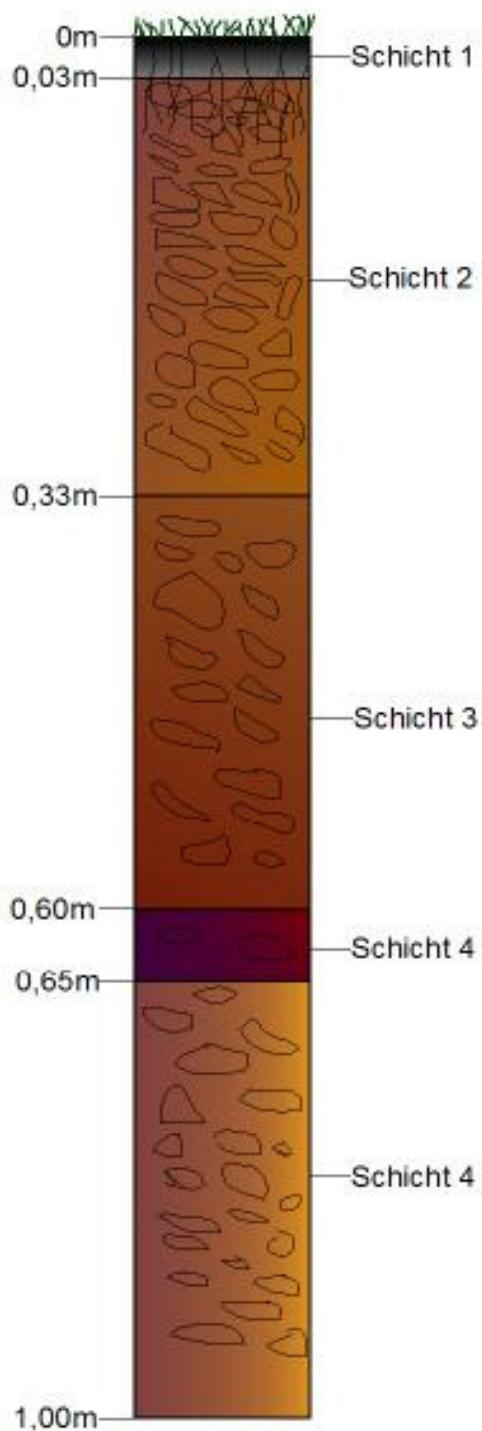
Bewachsen ist die Halde hauptsächlich mit Laubgewächsen, insbesondere mit Birke. Die Halde ist von einer dünnen Grashabne bewachsen. An einigen Stellen ist auch Heidekraut anzutreffen. Nach Auskunft der unteren Naturschutzbehörde wächst auch eine Orchideenart auf den Böschungen der Halde.

Die Halde ist im Besitz des Landes Sachsen und wird zurzeit in keiner Weise genutzt.

Profil 3

Halde: Junge Hohe Birke

Maßstab: 1:5



Schichtenverzeichnis

Halde : Junge Hohe Birke
Datum: 24.05.2006

Aufschluß: 1x1x1m
Aufschlußpunktthöhe: 480,9 m ü NN

Schicht-Nr.	Teufe [m]	Mächtigkeit [m]	Beschreibung der Schichten	Fotos
1		0,01-0,03	Auflageschicht, Mutterboden, grau, dunkelgrau, teilweise sehr dünn ausgebildet, durchwurzelt	JHB 2
2		0,20-0,30	verwittertes Haldenmaterial, Gneis, Gangart, Resterz, (Quarz, Glimmer, Feldspat, z.T. Pyrit, Bleiglanz), mit zunehmender Tiefe Kruste um Gestein ausgebildet (schwarz- violet, glänzend) kaum Hohlräume- Zwischenräume zwischen einzelnen Aggregaten mit Feinkorn ausgefüllt, Korngröße 0,5cm- ca. 20cm	JHB 2,3
3		~0,30	Haldenmaterial, braun- dunkelbraun, Zusammensetzung wie Schicht 2, Material mit deutlicher Kruste überzogen, auf Kruste Anhaftungen feineren Materials, Material z.T. mit weißer Schicht überzogen- Pilz?	JHB 2,3,4
4		0,03-0,05	sandige Schicht, mittel- dunkel braun, rötlich braun, Material miteinander "verbacken", -> verkrusteter Horizont, erhöhter Wassergehalt deutlich sichtbar, Material im Korngrößenbereich von Fein- Mittelsand mit Gesteinsbruch von 2-3cm	JHB 4
5		> 0,50	Material wie über Kruste, rot- dunkelbraun, glänzende Kruste um Material mit Anhaftung von feinerem Material, Gesteinskruste z.T. stärker ausgebildet als darüber	JHB 4

4.4 Halde des „Vertrau auf Gott“ Schachtes

Diese große Halde stammt aus dem 18 Jahrhundert. Im Gegensatz zur Halde des Fürstenstollns ist die ursprüngliche Schüttung zu erkennen. Eine deutliche Schichtung ist nicht vorhanden. Das Haldenmaterial besteht hauptsächlich aus Gneis, welcher angewittert ist. Teilweise ist er so stark verwittert, dass er in der Hand zerfällt. Neben dem Gneis ist auch Gangart und gering vererztes Gestein zu finden. Auffallend ist die lockere Schüttung des Haufwerkes.



Abb. 32: Grobberge der Vertrau auf Gott Halde

Zwischen den einzelnen Gesteinsstücken, mit einer Körnung von bis zu 20-30 cm, sind Höhlräume von mehreren Zentimetern zu finden. Eine gute Wasserwegsamkeit ist die Folge, was wiederum die Verwitterung begünstigt. Das Anlegen eines Schurfs gestaltet sich recht schwierig, da es immer wieder zu Einbrüchen kommt.

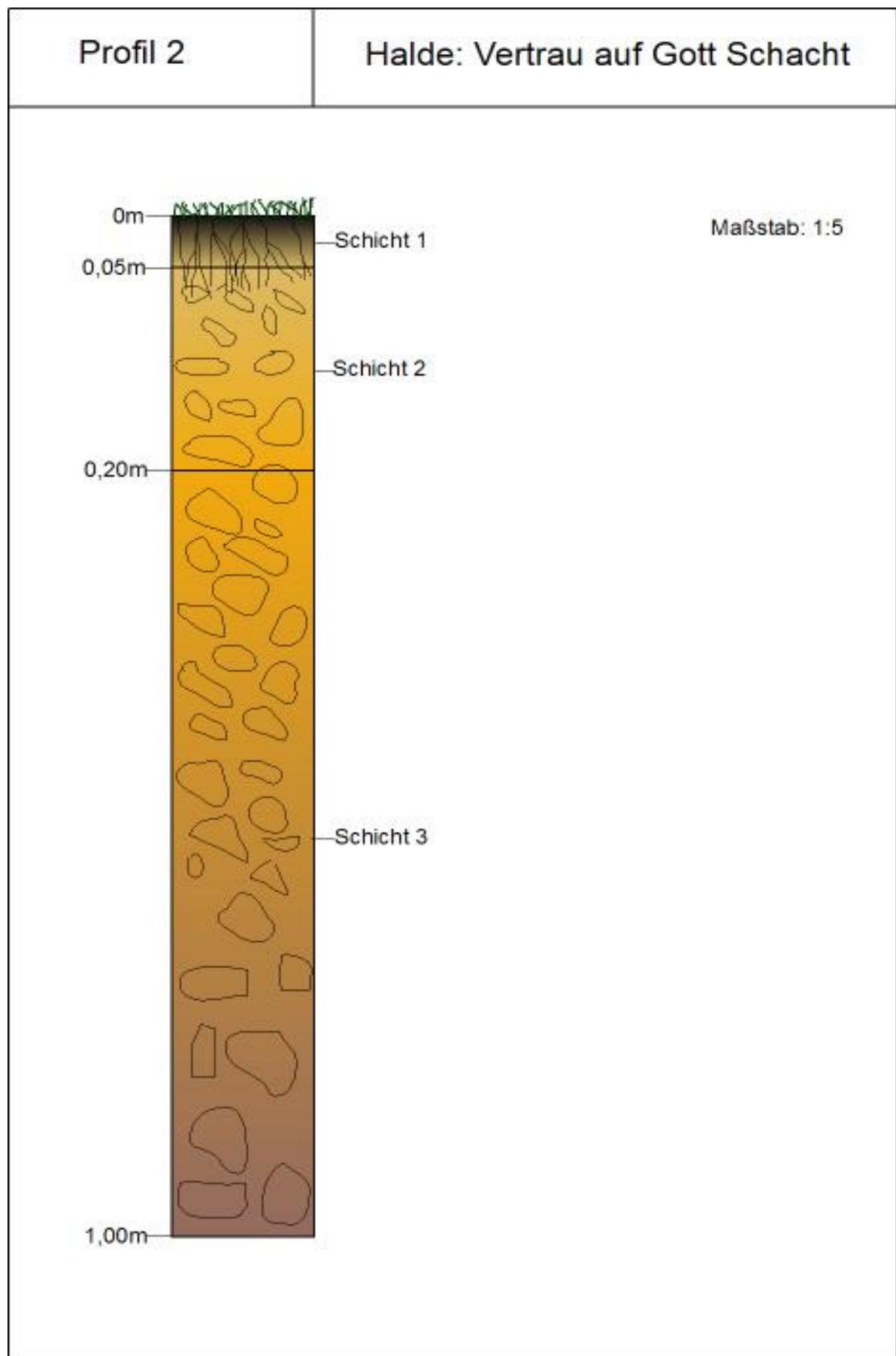
Soweit der Haldenaufbau durch den Schurf aufgeschlossen ist, war kein verkrusteter Horizont erkennbar. Dafür kann es mehrere Gründe geben.

Die lockere Schüttart kann darauf hinweisen, dass sich die Halde nicht in ihrem ursprünglichen Schüttzustand befindet. Nach Aussage des Besitzers ist die Halde während des Bestehens der DDR von der Wismut AG umgeschüttet wurden. Es sollte laut seiner Aussage nach Uran gesucht werden.

Die Zeit kann möglicherweise ein Faktor sein, das sich keine Kruste bildete. Weiterhin ist die Verwitterung noch nicht soweit fortgeschritten, dass es zur Ausbildung einer solchen Kruste kam.

Der Haldenkörper ist mit einer dünnen Auflageschicht aus Gras bedeckt, wobei die Grasdecke lückenhaft ist.

Auf dieser Bergbauhalde haben sich Birken angesiedelt. Es sind aber auch Pappeln zu finden. Auffallend ist wiederum das fehlen von Nadelbäumen. Die Halde befindet sich in Privatbesitz und ist ungenutzt.



Schichtenverzeichnis

Halde : Vertrau aug Gott
Datum: 17.05.2006

Aufschluß: 1x1x1m
Aufschlußpunktthöhe: 554,4 m ü NN

Schicht-Nr.	Teufe [m]	Mächtigkeit [m]	Beschreibung der Schichten	Fotos
1		0,03-0,05	Auflageschicht, Grasnabe, dunkelgrau bis schwarz, mit kleinen Gesteinsbruchstücken durchsetzt bis ca. 5 cm	VAG 2
2		~0,20	angewitterter Gneis und Gangart, kaum Erzreste erkennbar. Gestein gräulich, gelblich, ocker, Korngröße bis 10er cm, lockere Lagerung	VAG2, 6
3		>0,20	Wechsellagen von stark und weniger stark verwittertem Haldenmaterial, zerbricht teilweise in der Hand, Material von Kruste überzogen ocker-dunkelbraun, Korngrößebis mehre 10er cm, lockere Lagerung	VAG2,4

4.5 Halde des „Ludwig-Schachtes“

Auf diese Halde wurde noch Mitte des letzten Jahrhunderts aufgehaldet. Von den untersuchten Halden handelt es sich bei dieser um die Größte. Sie liegt direkt an der Mulde. Bei Niederschlag ist die Gefahr des Austrages von Schadstoffen in die Mulde gegeben.

In einigen Punkten besteht eine Ähnlichkeit mit der Halde der „Jungen Hohen Birke“. Die Halde wird von einer dünnen Grasschicht bedeckt. Eine Schichtung ist nicht vorhanden. Hauptsächlich besteht sie aus Gneis und Gangart. Die Bruchstücke können eine Körnung von bis zu 50 cm erreichen.



Abb. 33:Haldenmaterial des Ludwigschachtes

Der Verwitterungsgrad schwankt zwischen angewittert bis verwittert. Die Hohlräume zwischen den Gesteinsstücken, sind oft mit feinem Material verfüllt. Teilweise ist dieses feinere Material auf Bruchstücken „aufgeklebt“.

Bei etwa 100 cm ist ein verkrusteter Horizont zu erkennen. Dabei handelt es sich um eine zähe Schicht, in der das Material miteinander „verbacken“ ist (siehe Anhang Bild LS 10).



Abb. 34: Verkrusteter Horizont

Hohlräume sind gar nicht mehr vorhanden. Sie sind vollkommen mit feinem Material verfüllt. Wie bei der „Jungen Höhen Birke“, ist sehr gut die zunehmende Feuchtigkeit unterhalb der Kruste zu erkennen.



Abb. 35: Kruste mit hoher Feuchtigkeit

Unterhalb dieser Schicht schließt sich eine Schicht mit ähnlichen Eigenschaften an. Der Unterschied ist das Vorhandensein größerer Gesteinstücke von 10- 20 cm. Die Halde ist von Birken und Eichen aber auch Moos bewachsen. Einer Nutzung unterliegt sie nicht.

Profil 5

Halde: Ludwigschacht



Maßstab: 1:7

Schichtenverzeichnis

Halde : Ludwigschacht
Datum: 16.06.2006

Aufschluß: 1x1x1,40m
Aufschlußpunktthöhe: 411,0 m ü NN

Schicht-Nr.	Teufe [m]	Mächtigkeit [m]	Beschreibung der Schichten	Fotos
1		-0,03	dünne Auflageschicht, mittel- hell Grau, durchwurzelt, Gesteinsbruch - 5cm	LS 6
2		0,90-1,00	Haldenmaterial, ocker, gelblich, dunkelbraun-schwarz, Gneis, Gangart, anngewittert-verwittert, außer Quarz auch Pyrit und Galenit, z.T. Feldspäte heraus gewittert, Material teilweise mit glänzender Kruste überzogen, kaum Hohlräume zwischen Haldegestein da mit feinerem Material verfüllt, Korngröße 10-50cm, feineres Material auf Gesteinskruste "aufgeklebt", oberhalb Wurzeln vorhanden	LS 2,3,4
3		~0,10	verkrusteter Horizont, sandigkiesig, rostigbraun, Material miteinander verbacken, keine Hohlräume da mit feinem Material verfüllt, Gestein bis 10cm, auf einigen Aggregaten Kristallneubildungen (Eisenverbindungen)	LS 8,9,10
4		>0,20	lockerersandig kiesige Schicht, rotbraun-rostigbraun, Hohlräume mit feinem Material verfüllt, Korngröße 0- 20cm, Material mit dunkler Kruste überzogen,	LS 8,9,10

III. Zusammenfassung und Einschätzung

In der vorliegenden Arbeit wurde versucht, Informationen über die Veränderung von Haldenmaterial unterschiedlich alter Halden, deren Gehalt an Schwermetallen und Spurenelementen sowie dessen Lösungsverhaltens zu sammeln und auszuwerten.

Mit den angewandten Methoden und den daraus gewonnenen Ergebnissen lassen sich nur im begrenzten Maß Aussagen über das Gefährdungspotential, welches von Halden des Freiberger Sulfidbergbaus für das Grund- und Sickerwasser ausgeht, treffen.

Die Untersuchungen am Rasterelektronenmikroskop zeigten vor allem, dass die gesteinsumgebende Kruste hauptsächlich aus Eisenoxiden und Eisenhydroxiden besteht, sowie die unterschiedliche Ausbildung dieser Kruste.

Durchgeführte Lösungsversuche mit Essig- und Oxalsäure machten deutlich, welche Elemente gelöst werden und in welcher Konzentration diese auftreten.

Es wurde deutlich, dass das Haldengestein, welches über 600 Jahre auf Halde gelegen hat, immer noch hohe Gehalte an verlagerbaren Schwermetallen und Spurenelementen aufweisen kann. Darüber hinaus konnte kein Zusammenhang von Elementgehalt, den sich daraus ergebenden gelösten Anteil an Schwermetallen, und dem Alter der beprobten Halden festgestellt werden. Es zeigte sich, dass Elemente mit hohen Konzentrationen im Gestein auch im Eluat hoch konzentriert sind. Außerdem wurde erkannt, dass die Mehrzahl der untersuchten Elemente bei sehr niedrigen pH- Werten in höheren Konzentrationen gelöst werden können. Eine Versauerung des Haldenbodens, wie sie durch die Pyritverwitterung entsteht, zieht eine erhöhte Schwermetallmobilität nach sich. Die erhaltenen Analysewerte für die gelösten Elemente sind so nicht auf die natürlichen Prozesse in Halden anwendbar. Schwermetalle und Spurenelemente werden in den durchgeführten Versuchen in wesentlich höheren Konzentrationen gelöst, als unter natürlichen Bedingungen. Die erhaltenen Ergebnisse geben einen ersten Überblick über die Lösungseigenschaften der Haldengesteine. Die Kartierung des Haldenaufbaus machte die unterschiedlichen Alter der Halden deutlich. Die Halde des Fürstenstolln zeigte nicht den klassischen Aufbau durch Grobberge. Das ehemals verkippte Material ist im Laufe der Jahrhunderte so stark verwittert, dass nur selten größere Gesteinstücke aufgefunden werden konnten. Es hatte sich bereits ein neuer Boden gebildet.

Anders erwies sich der Aufbau der Halde des Vertrau auf Gott Schachtes. Diese jüngere Bergbaukippe bestand größtenteils aus so genannten Grobbergen. Es konnte kaum feines Material gefunden werden.

Aus den durchgeführten Arbeiten und den daraus gewonnenen Ergebnissen und Erkenntnissen wurde versucht, die potentielle Gefährdung der Bergbauhalden abzuschätzen. Eine relativ hohe Gefährdung für das Grundwasser gehen von den großen Halden, wie der des Vertrau auf Gott Schachtes und der Jungen Hohen Birke, aus. Die Analyse ergaben keine Spitzenwerte an Konzentration von Schadstoffen, jedoch eine relativ konstant hohe Konzentration. Durch die großen Volumina der abgelagerten Gesteine können auch größere Mengen an Schadstoffen mobilisiert werden und das Grundwasser kontaminieren.

Mechanismen, die das Eindringen von Wässern in den Haldenkörper verhindern und damit den Austrag von Schwermetallen und anderer Schadstoffe unterbinden, wurden aufgezeigt. Krustenbildung, als ein solcher Mechanismus, konnte bei der Kartierung der Halde der Jungen Hohen Birke und der Halde des Ludwig Schachtes festgestellt werden. In welchem Maß Krustenbildung jedoch den Austrag von Schadstoffen unterbindet, konnte nicht festgestellt werden.

Die durchgeführten Arbeiten sind jedoch für eine genaue Ermittlung des Gefährdungspotentials, welches von Halden ausgeht, nicht ausreichend.

Die Probenahme muss in größerem Umfang erfolgen. Der durch den Handschurf aufgeschlossene Bereich gewährt nur einen geringen Einblick auf den Haldenaufbau. Ein Aufschluss von 1m Tiefe, bei einer Böschungshöhe der Halde von 30m, ist natürlich nicht repräsentativ und lässt die tieferliegenden Haldenbereiche außer acht. Das Abteufen einer Kernbohrung, die eine aussagekräftige, über das gesamte Haldenprofil verteilte Probenahme zulässt, ist für genaue Untersuchungsergebnisse notwendig. Außerdem sollte die Probenahme an mehreren Stellen, möglichst regelmäßig, durchgeführt werden.

Variierende Materialeigenschaften des Haldengesteins werden so berücksichtigt. Dies wird jedoch kaum durchführbar sein, da es einen erhöhten Aufwand in Anspruch nimmt und viele Halden als Flächennaturdenkmäler eingetragen sind. Zur Untersuchung der Proben müssen weitere Methoden, wie z.B. die Sequentielle Extraktion, zur Anwendung kommen, um genaue Ergebnisse der Mobilität und der auftretenden Spezies von Schwermetallen und Spurenelementen zu erhalten und somit treffende Aussagen zum Gefährdungspotential zu treffen.

IV. Literaturverzeichnis

- BAAKE, D.: Geochemisches Verhalten umweltrelevanter Elemente in stillgelegten Polysulfiderzgruben am Beispiel der Grube „Himmelfahrt“ in Freiberg/ Sachsen, Diss., TU Bergakademie Freiberg 2000.
- BAUMANN, L.: Tektonik und Genesis der Erzlagerstätte von Freiberg. Freiberger Forschungsheft C46, Akademie-Verlag Berlin 1958.
- BENSELER, G.: Geschichte Freibergs und seines Bergbaus (12. Jhd- 1830), Freiberg 1853.
- BEUGE, P.: Gesteine und Boden. In: Rösler H., J. (Hrsg.) (1982): Spurenelementverteilung im biogeochemischen Kreislauf von zwei unterschiedlich belasteten Gebieten der DDR. Bericht "Nr. 1" der interdisziplinären Arbeitsgruppe für Spurenelemente (IAGS), Forschungsbericht, TU BA Freiberg, 1978. [unveröff.]
- BHK: Chronik der Grube Freiberg, unveröff. Freiberg
- BOCK, K.: Untersuchungen zum Abbau von Bergwerks- und Aufbereitungshalden. Dissertation, Technische Hochschule Aachen, 1986.
- BRÜMMER, G. W.: Schadstoffe.- in: SCHEFFER, F. & SCHACHTSCHNABEL, F. [Hrsg.]: Lehrbuch der Bodenkunde.- 13. Aufl., 491 S.; Stuttgart (Enke) 1992.
- DEUTSCHE EINHEITSVERFAHREN zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung (1984): Schlamm und Sedimente (Gruppe S) – Bestimmung der Eluierbarkeit mit Wasser (S4). – DIN 38 414 Teil 4, Berlin 1984.
- DEUTSCHE NORM, Bodenbeschaffenheit, Extraktion in Königswasser löslicher Spurenelemente, DIN ISO 11466, 1997.
- DEUTSCHE NORM, Charakterisierung von Schlämmen, Bestimmung von Spurenelementen und Phosphor Extraktionsverfahren mit Königswasser, DIN EN13346, 2001
- DEUTSCHE NORM, Charakterisierung von Abfällen, Aufschluss zur anschließenden Bestimmung des in Königswasser löslichen Anteils an Elementen in Abfällen, DIN EN 13657, 2003
- DUNGER, C.: Sickerwasser- und Schadstoffbewegungen aus ausgewählten Bergehalden Sachsens und Sachsen- Anhalts, Dissertation, TU Bergakademie Freiberg 1998.

DÖLLING, M.: Bindungsformen und Mobilität ausgewählter Schwermetalle in Abhängigkeit des Verwitterungsgrades aufgehaldeter Ton-, Silt- und Sandsteine (Berge) des Oberkarbons, Diss., Universität Essen, Essen 1995.

FISCHER, Y.: Digitaler Atlas zu Halden und Mundlöchern im Freiberger Stadtgebiet, Diplomkartierung, Freiberg 2003 (unveröff.)

FITZNER, B.; KOWNATZKI, R.: Porositätseigenschaften und Verwitterungsverhalten von sedimentären Naturwerksteinen, Zeitschrift Bauphysik, Sonderdruck aus 13, Heft 4, 1991.

GOTTE, W.; SCHUST, F.: Zur Genese erzgebirgischer „Grauer Gneise“. Zeitschrift für Angewandtegeologische Wissenschaften 16, H 8, 1993.

HERMS, U. & BRÜMMER, G.W.: Einflußgrößen der Schwermetalllöslichkeit und –bindung in Böden. – Z. Pflanzenernähr. Bodenk., 147: 400 – 424; Weinheim 1984.

HOFMANN, J.: Petrographische und lithostratigrafische Stellung der Gneise des Osterzgebirges. Freiberger Forschungsheft C191, Deutscher Verl. für Grundstoffindustrie, Leipzig 1974.

JUNG, H. G.: Sekundäre Prozesse in Bergbauhalden und Aufbereitungsabgängen (Steuerung von Stoffmobilität und Krustenbildung), Dissertation, Universität Marburg, 2003

KERTH, M.: Die Pyritverwitterung im Steinkohlenbergematerial und ihre umweltgeologischen Folgen.- Dissertation, Universität Essen, Essen 1988.

KÖLLING, M.: Modellierung geochemischer Prozesse im Sickerwasser und Grundwasser.- Berichte aus dem Fachbereich Geowissenschaften der Universität Bremen, Bremen 1990.

LANDESVERMESSUNGSAKT SACHSEN: die topografischen Karten im Maßstab 1:10000: 5045-SO Freiberg West, 5046-SW Freiberg, 5145-NO Brand-Erbisdorf, 5145-NO Brand- Erbisdorf, 5146-SW Mulda (Sachsen), 1996.

MATTHESS, G.: Die Beschaffenheit des Grundwassers.- in RICHTER, W. [Hrsg.]: Lehrbuch der Hydrogeologie, 2. überarbeitete u. erweiterte Auflage, X u. 498 S.; Berlin, Stuttgart (Bornträger) 1990.

MELZER, P.: Bergbau in Freiberg - Brand – Erbisdorferrevier, TNT Atlas, Diplomkartierung, Freiberg 2002 (unveröff.)

MIBUS, J. U.: Geochemische Prozesse in Halden des Kupferschieferbergbaus im südöstlichen Harzvorland, Diss., TU Bergakademie Freiberg 2001.

OETTING, R.: Hydrogeochemische Laboruntersuchungen an Bergematerialien und einer Hochofenschlacke.- Schriftenreihe des Vereins für Wasser-, Boden- und Lufthygiene, 50: 162 S.; Kiel 1980.

PIETZSCH, K.: Geologie von Sachsen. Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin 1962.

SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE, „Der Bergbau um Brand-Erbisdorf“ 1990.

SAHELI, H. G.: Untersuchungen zur Mobilisierung und Immobilisierung von Schwermetallen in offenen Grubenräumen, Halden und Böden, Diss., TU Clausthal 1996.

SCHEFFER, F. & SCHACHTSCHNABEL, P.: Lehrbuch der Bodenkunde.- 13 Aufl., 491 S.; Stuttgart (Enke) 1992.

SCHERCHAN, O.: Methodische Untersuchungen zur geochemischen Bilanz zwischen Muttergestein, Böden und Umweltbelastung in der Umgebung von Freiberg. Dissertation, TU Bergakademie Freiberg, Institut für Mineralogie 1980.

SCHÖPEL, M. & THEIN, J.: Stoffaustausch aus Bergehalden.- in: WIGGERING, H. & KERTH, M. [Hrsg.] Bergehalden des Steinkohlenbergbaus- Beanspruchung und Veränderung eines industriellen Ballungsraumes. Reihe Ökologie und Geologie im Kontext, Wiesbaden 1991.

SCHWEISFURTH, M.: Untersuchungen zur Sulfatreduktion in einem simulierten Grundwasserleiter unter unterschiedlichen Redoxbedingungen.- Dipl.- Arb. Univ. Essen, Essen 1993. [unveröffentlicht]

SINGER, P.C. & STUMM, W.: Acid mine drainage: the rate determining Stepp.- Science, Washington D.C. 1970.

SCHMIDT, R. & SCHÖPEL, M.: Die Abgänge des Steinkohlenbergbaus. Verwitterungs- und Lösungsvorgänge im Bergematerial, dargestellt an Lysimeteruntersuchungen,- Mitt. Westf. Bergwerkschaftskasse; 54: 338 S.; Bochum 1984

STAATSARCHIV DRESDEN, Außenstelle Freiberg: (Zusammenstellung wichtiger, ausgewählter Quellen):

- (a): Autorenkollektiv: Chronik der Grube Freiberg 1973.
- (b): Jobst: Bergschadenskundliche Analyse 1973.

TAYLOR, B.E.; WHEELER, M.C.; NORDSTROM, D.K.: Stable isotope geochemistry of acid mine drainage:Experimental oxidation of pyrite. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 48, 2669-2678., Oxford 1984

VAN BERK, W.: Die Auswirkungen der Eisendisulfidoxidation auf die hydrogeochemischen Verhältnisse im Umfeld von Lagerstätten. in: Mitteilungen zum Grundwasser- Kolloquium am 14./15. Februar 1996, Heft 1, Grundwasserschutz, Konzepte' 96, Institut für Grundwasserwirtschaft, TU Dresden, 1996.

WAGENBRETH, O.: Wo begann der Freiberger Bergbau; in Sächsische Heimatblätter, Dresden 1970

WAGENBRETH, O., & WÄCHTLER, E.: Der Freiberger Bergbau, 2. durchgesehene Aufl., VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie Leipzig 1988

WEDERPOHL, K. H.: Handbook of Geochemistry.- 2 (5): Loseblattsammlung, 32 + 1546 S.; Berlin – Heidelberg – New York (Springer) 1978.

WEINHOLD C.W.: Karten „S.Freiberg.“ und „S.Brand.“, 1866.

WIGGERING, H.: Verwitterung auf Steinkohlehalden: Ein erster Schritt von anthropogenen Eingriffen zurück in den natürlichen exogen- dynamischen Kreislauf der Gesteine.-Z. dt. Geol. Ges, Hannover 1986.

Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass die vorliegende Arbeit von mir selbständig angefertigt und nur die aufgeführte Literatur verwendet worden ist.

Grödel, den 2006-11-12

Lebenslauf

Name: Jörg Winkler
Geboren: 09.01.1975 in Riesa/Elbe
Eltern: Gunter Winkler
Erika Winkler, geb. Ackermann
Familienstand: ledig

Schulbildung:

1981-1991	Allgemeinbildende Polytechnische Oberschule Nünchritz
1991-1994	Technisches Gymnasium Riesa
1994	Abschluß: Abitur

Hochschulausbildung:

1995-1997	Studium der Geodäsie an der TU Dresden (ohne Abschluß)
1997-2006	Studium der Geologie an der TU Bergakademie Freiberg
2002	Diplom- Vorprüfung

sonstiges:

1994-1995	Ableistung des Grundwehrdienstes
-----------	----------------------------------