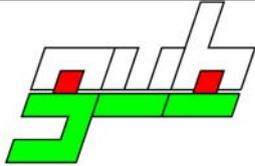


Kurzbericht

zu den Forschungsberichten 2005 bis 2007 zur Thematik



Forschungsnehmer:

 <p>G.U.B. Ingenieur AG Katharinenstraße 11 08056 Zwickau Bearbeiter: M. Frenzel</p>	 <p>beak CONSULTANTS Beak Consultants GmbH Am St. Niclas Schacht 13 09599 Freiberg Bearbeiter: Dr. T. Hertwig</p>	 <p>TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN</p>  <p>Fakultät Forst-, Geo- und Hydrowis- sensschaften Institut für Abfallwirtschaft und Altlasten TU Dresden, Pratzschwitzer Str. 15, 01796 Pirna Bearbeiter: Dr. S. Willscher</p>
---	---	--

Freiberg, den 16.10.2009

Erstellt durch: Dr. M. Felix, A. Sohr, Dr. P. Riedel, L. Assmann

Freistaat		Sachsen
-----------	---	---------

Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie

0	VORBEMERKUNG	5
1	ZUSAMMENFASSUNG	5
2	ANLASS UND ZIELSTELLUNG.....	11
3	KURZCHARAKTERISTIK DER STEINKOHLENBERGEHALDEN	12
3.1	Bestand Steinkohlebergehalde Reviere Zwickau und Lugau/Oelsnitz	12
3.2	Haldenrelevante Kenndaten	12
4	UNTERSUCHUNGSKONZEPT	20
4.1	Literatur- und Datenrecherche	20
4.2	Feldbegehungen, Kartierung	20
4.3	Grablöcher, Schürfe	21
4.4	Kleinrammbohrungen.....	21
4.5	Bohrungen, Grundwassermessstellen	21
4.6	Probenahme und chemische Analytik	21
4.7	Temperaturmessungen.....	23
4.8	Durchflussmessungen	23
4.9	Forstliche und vegetationskundliche Betrachtungen.....	23
4.10	Sickerwassermodellierung (BOWAHALD)	24
4.11	Strömungsmodellierung (FEFLOW).....	24
4.12	Stofftransportmodellierung (PHREEQC).....	24
4.13	Säulenversuche und sequentielle Extraktion	25
4.14	Untersuchung von Haldenmaterialien auf Schwefelmodifikationen	25
4.15	Mikrobiologie.....	25
4.16	Ableitung des formalisierten Bewertungsschemas für die Steinkohlenhalden	27
4.17	Haldenpriorisierung mit Einschätzung des Gefährdungspotenzials	27
4.18	Erarbeitung Branchenblatt Steinkohlenbergbauhalden.....	27
5	ERGEBNISSE DER DETAILUNTERSUCHUNGEN	27
5.1	Feststoffuntersuchungen (Bergematerial und Boden).....	27
5.1.1	Feststoffanalysen.....	27
5.1.2	Untersuchung der Schwefelmodifikationen.....	32
5.1.3	Eluatanalysen	35
5.1.4	Säulenversuche und sequentielle Extraktion	39
5.1.5	Mikrobiologische Untersuchungen	41
5.2	Wasseruntersuchungen	44
5.2.1	Haldensickerwasser.....	44
5.2.2	Grundwasser.....	51
5.3	Hydrogeologische und geochemische Modellierung.....	57
5.3.1	Sickerwassermodellierung (BOWAHALD)	57
5.3.2	Strömungsmodellierung (FEFLOW).....	59
5.3.3	Stofftransportmodellierung (PHREEQC).....	61
5.4	Bodenluft.....	70
6	FORSTLICHE STANDORTAUSWERTUNG.....	71
7	VERALLGEMEINERBARE ERGEBNISSE	75
7.1	Formalisiertes Bewertungsschema für Steinkohlenhalden	75
7.2	Haldenpriorisierung mit Einschätzung des Gefährdungspotenzials	82

7.2.1	Revier Zwickau	83
7.2.2	Revier Lugau/Oelsnitz.....	84
7.3	Branchenblatt Steinkohlenbergehalde	84
8	DATENBANK STEINKOHLHALDEN SACHSEN	85
9	EINZULEITENDE/WEITERZUFÜHRENDE MAßNAHMEN	86
9.1	Weiterer Forschungsbedarf.....	86
9.2	Behördlicher und sonstiger Handlungsbedarf	87
9.2.1	Kurzfristige Maßnahmen	87
9.2.2	Mittel- bis langfristige Maßnahmen	88
10	LITERATUR.....	90
11	TABELLENVERZEICHNIS	90
12	ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	92
13	ANLAGENVERZEICHNIS.....	93

Abkürzungsverzeichnis

ALASKA	Altlastenkataster Bergbau
AOX	Adsorbierbare Organisch gebundene Halogene
AP	Arbeitspaket
APV	ausgetauschtes Porenvolumen
BG	Bestimmungsgrenze
B GW	Besorgniswerte für Grundwasser, Wirkungspfad Boden → Grundwasser → Mensch, LfUG, ORIENT
B OW	Besorgniswerte für Oberflächenwasser – aquatische Lebensgemeinschaften nach LfUG 6/02
BHD	Brusthöhendurchmesser
BBodSchV	Bundesbodenschutzverordnung
D GW	Dringlichkeitswerte für Grundwasser, Wirkungspfad Boden → Grundwasser → Mensch, LfUG, ORIENT
DU	Detailuntersuchung
ESA	Eluierbare Stoffmengenanteile
FEB	Formale Erstbewertung
FIS	Fachinformationssystem
G	Geringfügigkeitsschwellen für Schadstoffgehalte im Grundwasser nach LAWA 12/2004
GEFA	Computerprogramm zur Erfassung und Bewertung von Altlastverdachtsflächen
GEFAHALD	steinkohlenhaldenspezifische Erweiterung der konventionellen Bewertungsmethodik GEFA
GOK	Geländeoberkante
GV	Glühverlust
GW	Grundwasser
GWM	Grundwassermessstelle (Stand und Beschaffenheit)
GWN	Grundwasserneubildung
HE	Historische Erkundung
HW 2002	Luftbilder aus der Befliegung zum Hochwasser 2002
Θ_s	Wassergehalt bei Sättigung
Θ_{FC}	Wassergehalt bei Feldkapazität
Θ_{WP}	Wassergehalt bei Welkepunkt
Θ_r	Residualer Wassergehalt
KA 5	Bodenkundliche Kartieranleitung
K_f	hydraulische Leitfähigkeit [m/s]
K_s	gesättigte hydraulische Leitfähigkeit [m/s]
K_u	ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit [m/s]
LF	Elektrische Leitfähigkeit
LRA	Landratsamt
MAK	maximale Arbeitsplatzkonzentration
MPN	Most Probable Number
n_{eff}	nutzbares Porenvolumen / nutzbare Porosität
OBA	Sächsisches Oberbergamt
OE	Orientierende Erkundung
OU	Orientierende Untersuchung
OW	Oberflächenwasser
pF	Saugspannung
PW SiWa	Prüfwert für Schadstoffgehalte im Sickerwasser nach LfUG 6/2002 (BBodSchV)
RKS	Kleinrammbohrung
SA	Sanierung
SALKA	Sächsisches Altlastenkataster
S_s	Spezifischer Speicherkoeffizient
SI	Sättigungsindex
SW	Sickerwasser / Infiltration
TIN	Triangulated Irregular Network
UBG	Umweltbetriebsgesellschaft
UIS	Umweltinformationssystem (des LfUG)
Vfm/ha	Vorratsfestmeter je Hektar
ZAZ	Zweckverband Abfallwirtschaft Zwickau

0 VORBEMERKUNG

Der Bericht stellt eine Kurzfassung der umfangreichen Forschungsberichte zum Thema „Gefährdungspotenzial Steinkohlenhalden Zwickau/Oelsnitz“ dar. Das Forschungsvorhaben wurde von einer Gemeinschaft von Forschungsnehmern, bestehend aus G.U.B. Ingenieur AG Zwickau, Beak Consultants GmbH Freiberg und dem Institut für Abfallwirtschaft und Altlasten der TU Dresden im Zeitraum 2005 bis 2007 realisiert. Eingegangen sind außerdem Arbeitsergebnisse der Boden- und Grundwasserlabor GmbH Dresden und des Ingenieurbüros Neef Zwickau.

Die Inhalte wurden im Vergleich zu den Originalberichten stark gekürzt bzw. zusammengefasst. In Ergänzung zu den im Sächsischen Altlastenkataster SALKA erfassten Daten wurde eine Steinkohlenhaldendatenbank für Sachsen (Reviere Zwickau, Lugau/Oelsnitz und Freital) aufgebaut.

Als Grundlage für weiterführende fachliche Diskussionen bzw. Entscheidungen zu dieser Thematik sollten neben dem SALKA, die Steinkohlenhaldendatenbank bzw. die Originalberichte (in den Archiven des LfULG und des SOBA einsehbar) zu Rate gezogen werden.

Um eine eindeutige Zuordnung der Halden zu gewährleisten, erfolgt im vorliegenden Kurzbericht die Haldenkennzeichnung über das Revierkürzel „ZWI“ für Zwickau und „OEL“ für Lugau/ Oelsnitz und die jeweilige laufende Nummer. Die verbalen Haldenbezeichnungen sind Tab. 1 bzw. 2 zu entnehmen.

1 ZUSAMMENFASSUNG

In den ehemaligen Steinkohlenbergbaureviere Zwickau und Lugau/Oelsnitz existieren rund 80 Steinkohlenbergehalde, die eine wesentliche Schwermetallquelle für die Schutzgüter darstellen.

Da sich das bergbaulich gewonnene Haldenmaterial signifikant vom Ablagerungsort unterscheidet, sind die Steinkohlenbergehalde gemäß sächs. Handbuch zur Altlastenbehandlung generell als Verdachtsflächen zu betrachten.

Bisher lagen nur wenige systematische Untersuchungen zu den Bergehalde vor. Im Rahmen des Forschungsprojektes wurde der inhomogene Kenntnisstand zu den Steinkohlenbergehalde beider Reviere durch intensive Literatur-, Datenbank- und Archivrecherche analysiert, zusammengefasst und systematisiert.

Zur Verbesserung des Prozessverständnisses und zur Bewertung des Gefährdungspotenzials der Steinkohlenbergehalde wurden außerdem in den Revieren Zwickau und Revier Lugau/ Oelsnitz je zwei Halden vertiefend untersucht. Die Auswahl dieser 4 vertiefend zu untersuchenden Halden erfolgt unter dem Gesichtspunkt, die halde-spezifischen Probleme möglichst in ihrer gesamten Breite zu erfassen, um eine Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Halden zu ermöglichen. Folgende Halden wurden anhand typischer Eigenschaften ausgewählt.

Halde 10 Revier Zwickau:	Plateauhalde mit aktuellen Branderscheinungen (Steinkohlenbergehalde mit angrenzendem Kohleschlammteich und aufliegender Deponie), kein öffentlicher Zugang
--------------------------	---

- Halde 45 Revier Zwickau: Plateauhalde (Steinkohlenbergehalde mit mehreren Kohleschlammteichen) Nutzung u. a. als Kleingarten
- Halde 10 Revier Lugau/Oelsnitz: ältere Kegelhalde, teilweise abgeflacht (Steinkohlenbergehalde mit kleineren Müllhalden), bewaldet. Sie repräsentiert mehr als 50 % der Halden im Gebiet Lugau/Oelsnitz
- Halde 17 Revier Zwickau/Oelsnitz: jüngere Plateauhalde mit aktuellen Branderscheinungen (Steinkohlenbergehalde mit Kohleschlamm und Schlackeablagerungen), Nutzung als Park- und Freizeitfläche, hier nur Untersuchung der Vegetation

Die Untersuchungen umfassten folgende Themenkomplexe:

- Historische Nacherkundung
- Detaillierte technische Erkundung und Monitoring
- Spezielle geochemische und mikrobiologische Untersuchungen
- Untersuchungen zum Prozessverständnis (Säulenversuche, Sickerwasser-, Strömungs- und Transportmodellierungen u. a.)
- Forstliche Standortauswertung
- Entwicklung, Verifizierung und Anwendung eines Haldenbewertungsschemas.

Die Ergebnisse der Untersuchungen an den 4 Halden erlauben folgende Aussagen:

I. Halden als Schadstoffquelle

• **Schadstoffpotenzial (Ist-Stand)**

- Das bergbauspezifische Haldeninventar besitzt hohe Schwermetallkonzentrationen im Feststoff und im Eluat. Besonders die Gehalte an As, Cd, Ni und Zn sind typisch für die Bergehalden der Steinkohlenreviere. Die Gehalte überschreiten die entsprechenden Prüfwerte des Bodens und die Sickerwasserprüfwerte nach Bundesbodenschutzverordnung um das Mehrfache. Insbesondere die Prüfwerte des Bodens für die Kleingartennutzung werden an der Halde ZWI 45 gravierend überschritten (um das 10- bis 200-fache).
- Die Halden weisen auf Grund ihrer spezifischen Schüttungsentwicklung, unterschiedlicher Produktionszeiten und unterschiedlicher geologischer Herkunft des Bergematerials ein unterschiedliches Stoff- und demzufolge Schadstoffpotenzial auf.
- Das spezifische Austragspotenzial der unterschiedlichen Haldenmaterialien sowie die verschieden hohe Mobilität der Metalle wurden durch Eluatuntersuchungen sowie sequenzielle Extraktion und Säulenversuche belegt. Hohe mobile Anteile zeigen vor allem die Schwermetalle Cd, Ni und Zn. Da vielen Halden eine wirksame Oberflächenabdichtung fehlt, sind diese Schwermetalle in den Haldensickerwässern in Konzentrationen bis in den mg-Bereich wiederzufinden. Es zeigen sich direkte Abhängigkeiten vom Disulfidgehalt der Haldensubstrate sowie dem Stadium des Versauerungsprozesses. Die in den Sickerwässern gelösten Schwermetalle gehen bei ungünstigen hydrogeologischen Verhältnissen in die oberen Grundwasserstockwerke über. Haldennahe Oberflächengewässer werden teilweise stark durch den Eintrag von Schwermetallen beeinträchtigt. Sowohl im Oberflächenwasser als auch in den Sedimenten sind Schwermetall-

- Aktive Haldenbrände bewirken eine Veränderung der Haldensubstrate in Richtung erhöhtes Austragspotenzial der Schadstoffe (Untersuchungen dazu an der Halde 10 Zwickau, insgesamt werden an 6 Halden aktuell Haldenbrände beobachtet).
- **Typische Umsetzungsprozesse in den Halden**
 - Die Haldenbrände bewirkten bezüglich des Austragspotenzials der Schadstoffe durch das „Rösten“ der Sulfide eine Freisetzung der ursprünglich in den wenig/nichtlöslichen Sulfiden enthaltenen Schwermetalle (z. B. Cd, Zn, Ni), so dass sie für die Auslaugung durch infiltrierende Niederschlags- bzw. sich nach der Teufe zu bewegendes Haldensickerwässer zur Verfügung stehen.
 - Die Sulfidoxidation erfolgt weiterhin im Rahmen der „normalen“, nicht thermisch induzierten Verwitterungsvorgänge. Damit erfolgt eine chemisch und mikrobiologisch kontrollierte Schadstofffreisetzung, mit der eine Versauerung der Sickerwässer, eine Lösung der Schwermetalle sowie eine starke Erhöhung der Salzfrachten einhergehen.
 - Der endgültige Schadstoffaustrag aus der Halde wird weiterhin von Prozessen der Schadstofffixierung/-immobilisierung im Haldenkörper gesteuert. Diese Prozesse gehen vordergründig an Schichtgrenzen vor sich, die meist geochemische Barrieren darstellen.
- **Methodik zur Untersuchung der Umsetzungsprozesse**
 - Die Umsetzungsprozesse in den Haldenkörpern können durch Feststoff- und Eluatuntersuchungen ansatzweise erkannt werden. Effektivere Methoden stellen die unterschiedlichen Säulenversuche, eine sequentielle Extraktion der Proben, die Untersuchung der vorkommenden Schwefelmodifikationen sowie eine Quantifizierung schwefel- und eisenoxidierender bzw. sulfat- und eisenreduzierender Mikroorganismen dar.
 - Gesättigte Säulenversuche nach der Musterleistungsbeschreibung „Laborative Untersuchungen zur Sickerwasserprognose im Rahmen der DU“ des LfUG ergeben schnelle Informationen über das allgemeine Elutionsverhalten der Haldenmaterialien in Abhängigkeit von der Zeit. Es können Daten zum Quellterm und zum Transportterm für die Sickerwasserprognose daraus ermittelt werden.
 - Ungesättigte Säulenversuche erbringen Daten über das Mobilisierungsverhalten der Schadstoffe unter veränderten pH- und Redoxbedingungen, die den Felddaten, z. B. den Sickerwassergehalten, sehr nahe kommen (z. B. für Cd, Zn und Ni als mobile Metalle; Cu, Pb und As als eher gebundene Metall(oid)e), da hier realitätsnähere Versuchsbedingungen vorliegen. Durch den höheren Sauerstoffanteil finden biochemische Umsetzungsprozesse und eine verstärkte Oxidation mineralischer Disulfide statt.
 - Inokulierte ungesättigte Säulenversuche schaffen Erkenntnisse über das verstärkte Mobilisierungsverhalten der Metall(oid)e, das die Bedingungen vor allem in den chemisch und mikrobiologisch aktiven Zentren der Halde nachvollziehen lässt.
 - Mit o. g. drei verschieden durchgeführten Säulenversuchen (Quellterm) konnten umfangreiche Erkenntnisse über das Elutionsverhalten des Haldeninventars gewonnen werden. Auf Grund der inhomogenen Zusammensetzung und der unterschiedlichen biogeochemischen Aktivitäten in den Halden existieren unterschiedliche Zonen, die jeweils durch die verschiedenen Säulenversuche abge-

- Die Ergebnisse der sequentiellen Extraktion erlauben ein gesichertes Verständnis der Ergebnisse aus den Untersuchungen der S4-Eluate, der Säulenversuche, sowie des Verhaltens der Schwermetalle in Abhängigkeit vom Teufenprofil der Halden, da die Bindungsverhältnisse und das Mobilitätsverhalten der Elemente in unterschiedlichen Haldenbestandteilen beschrieben werden.
- Für die Umsetzungsprozesse in den Halden sind außerdem die unterschiedlichen Schwefelmodifikationen in den Ausgangs-, Zwischen- und Endprodukten von Bedeutung. Durch die Haldenbrand-, Verwitterungs- sowie die geochemisch und mikrobiologisch induzierten Oxydationsvorgänge erfolgt generell die Umwandlung des Sulfidschwefels in Sulfatschwefel (mit Schadstofffreisetzung und Versauerung). Überwiegend mikrobiologische Vorgänge können aber auch eine Sulfatreduktion bewirken, die wiederum zur Immobilisierung der ehemals mobilisierten Schadstoffe führt.
- Die Umsetzungsprozesse haben die Bildung unterschiedlicher Sekundärminerale zur Folge. Im Zuge der bisherigen Untersuchungen konnte lediglich Gips eindeutig diagnostiziert werden. Von anderen Haldenstandorten ist eine Vielzahl von Sekundärmineralen bekannt.
- An allen Haldenstandorten konnte ein enger Zusammenhang der gefundenen Mikroorganismen-Populationen mit den chemisch-physikalischen Parametern des jeweiligen Standortes festgestellt werden. Die Mikroorganismen können sehr gut zur Charakterisierung der biogeochemischen Vorgänge in den Halden herangezogen werden und stellen geeignete komplexe Indikatoren der unterschiedlichen Stoffströme (saline und saure Wässer, anorganische und organische Nährstoffe) in den einzelnen Halden dar. Infolge der unterschiedlichen Umweltbedingungen an den verschiedenen Haldenstandorten zeigen die Mikroorganismen eine hohe standort-spezifische Diversität.

- **Schadstoffpotenzial (Prognose)**

- Anhand der Säulenversuche konnten Prognosen bezüglich des weiteren Versauerungspotenzials der verschiedenen Halden gegeben werden. Im Falle der Vertrauens-Schacht Halde in Lugau konnte für viele Schwermetalle gezeigt werden, dass bei einer fortschreitenden Versauerung des Haldenmaterials mit einer Erhöhung der Konzentrationen in den Sicker- und Grundwässern um ein Vielfaches zu rechnen ist, so dass Handlungsbedarf besteht. Auch für die nicht von der Deponie beeinflussten Bereiche der Morgenstern-Schacht III-Halde in Zwickau, in denen thermisch aktive Zonen die Umsetzungsprozesse der mineralischen Disulfide vorantreiben, ist Handlungsbedarf zur Unterbindung dieser Prozesse und damit eines Eintrages von Metall(oid)en in das umliegende Grund- und Oberflächenwasser gegeben.
- Mit Hilfe der Säulenversuche und der Abschätzung der Sickerwasserneubildungsrate konnte eine erste Quantifizierung des Schadstoffaustrages aus den Halden vorgenommen werden (Frachtabschätzung durch Grund- und Sickerwassermodellierung). Aus einer stärker versauerten Halde wie der Halde OEL 10 können bis zu 6.000 kg/a Zink, 33 kg/a Cadmium, 1,6 kg/a Blei, 126 kg/a Nickel sowie 74.000 kg/a Sulfat in das Grund- und Oberflächenwasser abfließen. Bei einer Hochrechnung über alle Haldenstandorte ergibt sich daraus eine erhebliche weiträumige Befrachtung des Grund- und Oberflächenwassers.

- Werden keine weiteren Maßnahmen zur Verminderung des Schadstoffaustrages unternommen, werden der Schadstoffaustrag aus den Halden und der Eintrag in die Grund- und Oberflächenwässer noch über mehrere Jahrhunderte andauern.

Die Charakterisierung der Steinkohlebergehalde (wesentliche Primärdaten wurden in der ACCESS-Datenbank „Gefährdungspotenzial Steinkohlenhalde Sachsen“ abgelegt) bildet die Grundlage für eine Gefährdungsabschätzung.

II. Gefährdungspotenzial

• *Wirkungspfadbezogene Einschätzung*

Für den direkten Wirkungspfad **Boden-Mensch** ergaben sich an allen drei untersuchten Halden Überschreitungen der Prüfwerte für As, Pb und Cd bei Nutzung als Park- und Freizeitfläche. Für die Halde OEL 10 stellen die Schadstoffe der Haldensubstrate auf dem direkten Kontaminationspfad **Boden-Mensch** aufgrund der Höhe der Gehalte sowie der meist vorhandenen Haldenabdeckungen und Vegetationsentwicklung solange keine Gefährdung für den Menschen dar, solange die Vegetationsschicht nicht zerstört wird.

Auf der kleingärtnerisch genutzten Halde ZWI 45 ergaben sich zusätzlich für den Wirkungspfad **Boden-Nutzpflanze-Mensch** Überschreitungen der Prüf- und teilweise der Maßnahmewerte für As, Pb und Cd. Ein Gefährdungspotenzial ist nachgewiesen und im Einzelfall zu bewerten. Kritisch ist nach derzeitigem Kenntnisstand vor allem die kleingärtnerische Nutzung.

Der Sickerwasserabstrom der drei untersuchten Halden weist erhebliche Belastungen durch die Schwermetalle Cd, Ni und Zn auf. Dies führt über Direkteintrag durch fehlende Deckschichten zu einem erheblichen **Grundwasserschaden** der oberflächennahen Grundwasserleiter. Die Geringfügigkeitsschwellen werden um ein Vielfaches überschritten. Derart kontaminierte Grundwässer sind nicht ohne kostenintensive Aufbereitung nutzbar. In der Halde „An der Planitzer Straße“ ist eine Verunreinigung des oberen lokalen GWL aufgrund der vorhandenen Deckschichten nicht ableitbar.

Durch mittel- und unmittelbar ins Oberflächenwasser gelangende Haldensickerwässer wird besonders die Qualität der kleineren Gewässer beeinträchtigt. Für den Wirkungspfad **Oberflächenwasser-Aquatische Lebensgemeinschaft** ergeben sich teilweise sehr starke Überschreitungen der Besorgniswerte der Parameter Cd, Ni, Hg und Zn. Ein hinreichender Gefahrenverdacht für das Vorliegen einer Altlast ist bei den untersuchten Halden im Zwickauer und im Lugau/Oelsnitzer Revier gegeben. Der Zustrom haldenbürtiger Sickerwässer führt zur Befruchtung der Oberflächengewässer mit Schwermetallen sowie zur Anreicherung dieser in den Sedimenten der Gewässer und damit zur Beeinträchtigung des Lebensraumes Fließgewässer.

Gelangen die stark kontaminierten sowie stark betonaggressiven Haldensickerwässer in die Kanalisation, dann bewirken sie eine Befruchtung der Aufgabewässer der kommunalen Wasserreinigungsanlagen. Dies führt zur Erhöhung der Instandhaltungskosten am kommunalen Abwasserentsorgungsnetz sowie zur Erhöhung der Entsorgungskosten der schwermetallhaltigen Klärschlämme.

Durch die noch vereinzelt auftretenden Haldenbrände kommt es in den aktuell untersuchten Fällen nicht zu einer unmittelbaren Beeinträchtigung des Menschen über den **Luftpfad**. Ein längerer Aufenthalt, vor allem in bodennahen Luftschichten über dem Brandherd ist aufgrund der Anreicherungen von SO₂ und CO₂ sowie der Abreicherung von O₂ zu vermeiden.

Das Monitoring der Haldensickerwässer im Revier Lugau/Oelsnitz ergab für drei Halden über das Jahr gleichbleibende Sickerwassertemperaturen, die für Haldenbranderscheinungen bzw. relevante exotherme Umsetzungen sprechen (brennende Halde OEL 17, Halde OEL 10 und, mit Abstrichen Halde OEL 16). Im Durchschnitt der 12 Messungen lagen die pH-Werte der Haldensickerwässer bei 3,7 bis 3,8. Die anderen Halden wiesen pH-Werte der Sickerwässer zwischen 5,5 und 7,4 auf.

Eine Gefährdung für das umliegende Grund- und Oberflächenwasser geht im Gebiet der Halde OEL 10 (Vertrauen-Schacht-Halde Lugau) vor allem von Zn, Cd, Ni, Co und Mn aus. Eine regelmäßige Überwachung wird aber auch für die Elemente Cu, Pb, As und U empfohlen, vor allem auch im Hinblick auf eine allmähliche Änderung der pH- und Redoxbedingungen aufgrund von Versauerungsprozessen in der Halde, deren Potenzial gerade am Standort dieser Halde am höchsten ist.

- **Priorisierung der Steinkohlebergehalde aufgrund des Gefährdungspotenzials**

Die Bewertung der Halden erfolgte mittels dem entwickelten und verifizierten Bewertungsmodul GEFAHALD (= steinkohlenhaldenspezifische Erweiterung der konventionellen Bewertungsmethodik mit GEFA). Die Ergebnisse führten zur Priorisierung der Einzelhalden. Das höchste Gefährdungspotenzial pro Revier weisen jeweils folgende drei Halden auf (Reihenfolge nach Gefährdungspotenzial):

Revier Zwickau	Halde ZWI 23	- Am Forst- und Schaderschacht,
	Halde ZWI 24	- Am Wasserhaltungsschacht,
	Halde ZWI 20	- An den Arnim-Schächten
Revier Lugau/Oelsnitz	Halde OEL 17	- Deutschland-Schacht-I,
	Halde OEL 5	- Concordia-Schacht
	Halde OEL 10	- Vertrauen-Schacht

Für diese Halden besteht aufgrund ihres Gefährdungspotenzials vordringlicher Untersuchungs- bzw. Handlungsbedarf. Für alle anderen Halden muss der Kenntnisstand mindestens auf das Beweinsniveau der Historischen Erkundung gehoben werden.

III. Empfehlungen zur zukünftigen Untersuchungsmethodik der Halden

- Um ein zwischen den Halden vergleichbares Gefährdungspotenzial ableiten zu können, ist für alle Halden ein einheitlicher Kenntnisstand (mindestens Beweinsniveau Historische Erkundung) herzustellen.
- Um einen umfassenden Überblick über das Gefährdungspotenzial der Steinkohlehalde im Freistaat Sachsen zu erhalten, sind die Halden des Steinkohlenreviers Freital ebenfalls zu betrachten.
- Nach Schaffung eines einheitlichen Beweinsniveaus ist auf Grundlage einer aktualisierten Gefährdungsabschätzung für priorisierte Standorte die Ermittlung / Modellierung der Schadstofffreisetzung/-immobilisierungsprozesse (z. B. durch Säulenversuche, Schwefel-Bestimmungen, Sickerwassergewinnung innerhalb der

- Beobachtung des langfristigen Versauerungspotenzials und des daraus folgenden Schadstoffaustrages mit einem langjährigen Monitoring der Haldensickerwässer.
- Die Datenbank „Gefährdungspotenzial Steinkohlenhalden Sachsen“ ist als effektives Arbeitsinstrument zur Steuerung zukünftiger Maßnahmen weiter zu pflegen und zu qualifizieren.

Im Rahmen des Projektes wurden erste Maßnahmen zur Minimierung des Schadstoffaustrages (für Pfad Boden-Pflanze: Bodenverbesserungen, gezielter Pflanzenanbau; für den Pfad Boden-Mensch und Boden-Grundwasser: Ertüchtigung der vorhandenen Vegetation mit Aufbringung von Pflanzennährstoffen und Kalk) bzw. zur Unterbindung der Nutzung (Nutzungsbeschränkung Kleingarten, Pilzsammler, Nutzung von Haldensickerwasser, Grundwasser erst einmal prüfen etc.) vorgeschlagen. Es ist in jedem Einzelfall entsprechend dem Vorgehen nach BBodSchG nachzuweisen, ob eine Altlast oder eine schädliche Bodenveränderung vorliegt und welche Maßnahmen dann am Standort sinnvoll und effektiv sind.

Außerdem wurden Vorschläge abgeleitet, die sich gliedern in Untersuchungen mit Forschungscharakter und Untersuchungen im Rahmen behördlicher Maßnahmen mit Orientierung an den Zielen der EU-WRRL.

2 ANLASS UND ZIELSTELLUNG

Die Steinkohlenbergehalde in Sachsen wurden bisher relativ unsystematisch untersucht. Daraus ergaben sich Hinweise auf erhöhte Schwermetallausträge in die Umweltmedien.

Insbesondere unter Berücksichtigung der Forderungen aus der EU-WRRL ergab sich die Notwendigkeit einer systematischen Analyse des Wissensstandes, der Verbesserung des Prozessverständnisses bezüglich der Schadstoffmobilisierung und der Bewertung des Gefährdungspotenzials der Steinkohlenbergehalde als Basis für eine effektive Bewältigung der haldenspezifischen Bergbaufolgen in den Bergbaurevieren Zwickau und Lugau/Oelsnitz.

Das Forschungsvorhaben wurde von einer Gemeinschaft von Forschern, bestehend aus G.U.B. Ingenieur AG Zwickau, Beak Consultants GmbH Freiberg und dem Institut für Abfallwirtschaft und Altlasten der TU Dresden im Zeitraum 2005 bis 2007 realisiert. Eingegangen sind außerdem Arbeitsergebnisse der Boden- und Grundwasserlabor GmbH Dresden und des Ingenieurbüros Neef Zwickau.

Untersuchungskonzept und zeitliche Reihenfolge orientierten sich an den Aufgaben der 3 Arbeitspakete:

- Literatur- und Datenrecherche, Entwicklung Haldenbewertungsmethodik, erste Haldenkategorisierung
- Prozessidentifikation, Prozessbeschreibung, Untersuchungen zum Prozessverständnis und vertiefende Standortuntersuchungen
- Verifizierung und Anwendung der Haldenbewertungsmethodik, Aktualisierung der Haldenkategorisierung mit Einschätzung des Gefährdungspotenziales, Entwicklung Vorschlag Branchenblatt Steinkohlenbergehalde

Die wesentlichen Primärdaten zu den einzelnen Steinkohlenbergehalden wurden in einer von der Fa. G.E.O.S. GmbH entwickelten Datenbank abgelegt (s. Kap. 8).

3 KURZCHARAKTERISTIK DER STEINKOHLBERGEHALDEN

3.1 Bestand Steinkohlebergehalden Reviere Zwickau und Lugau/Oelsnitz

Im Revier Zwickau existieren nach bisherigen Kenntnissen 59 Haldenkörper (Tab. 1, Anl. 1) und im Revier Lugau/Oelsnitz unterlagen 21 Halden der Bewertung (Tab. 2 und Anl. 8).

Im Rahmen des Projektes wurden an 4 Halden Detailuntersuchungen durchgeführt (ZWI 10, ZWI 45, OEL 10 und OEL 17). Ihre Auswahl erfolgte mit der Zielstellung, die haldenspezifischen Probleme möglichst in ihrer gesamten Breite zu erfassen, um eine Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Halden zu ermöglichen.

3.2 Haldenrelevante Kenndaten

Bei der Bewertung der Halden unter Anwendung der Altlastenbewertungsmethodik bis zur Stufe der OU (Programm GEFA) stellte sich schnell heraus, dass die dort verwendeten Kenndaten nicht ausreichen, um das Gefährdungspotenzial der Halden ausreichend zu charakterisieren.

Deshalb wurden wichtige, bisher nicht erfasste haldenspezifische Daten zu deren Charakterisierung abgeleitet. Es handelt sich um folgende ergänzende Kenndaten:

a) Haldeninventar/Schadstoffpotenzial

Standortcharakteristik: Die eigentlichen **Steinkohlenbergehaldenkörper** umfassen hauptsächlich bergbautypische Ablagerungen, die aus der Schachtabteufung, dem Vortrieb von Strecken sowie dem eigentlichen Abbau der Steinkohle stammen. Auf zahlreichen Halden sind zudem Rückstände aus der Aufbereitung und der Veredelung der Steinkohlen anzutreffen. Diese liegen u. a. in Form von **Kohleschlammteichen**, **Absetzbecken** zur Phenol- und Benzol aufbereitung sowie Säureharzbecken vor. Im Bereich der Haldenstandorte befanden sich oftmals in der aktiven Sturzzeit des Haldenkörpers Anlagen zur Herstellung von Steinkohlenkoks (Kokereien) sowie Brikettfabriken. **Schlacke-** und **Ascheablagerungen** sind Dampfkesselanlagen zuzuordnen, die zur Energiegewinnung betrieben wurden.

Weiterhin sind die Steinkohlenhalden im Untersuchungsgebiet häufig mit Ablagerungen, die originär keine Beziehung zum eigentlichen Bergbaugeschehen aufweisen, verknüpft. Zu diesen zählen kommunale und gewerbliche Abfälle in Hausmüll- und **Aschedeponien** sowie Bauschutt ablagerungen. Diese Massen wurden meist nach der aktiven Sturzzeit der Halden aufgebracht.

Aus der Kombination dieser Einzelobjekte resultiert oft ein multiples objektspezifisches Schadstoffpotenzial der Standorte.

Haldenspezifische Ablagerungen: Zu diesen bergbautypischen Ablagerungen zählen Teufmassen, trocken aufbereitete Berge sowie Massen aus der Nassaufbereitung.

Tab. 1: Übersicht zu den Halden im Bergbaurevier Zwickau

Halden-Nr. ¹	Haldenbezeichnung	aktuelle Nutzung	Fläche (in ha)	Ident-Nr. Haldendatenbank	Haldenbrand aktuell
ZWI 1	An der Kokerei und Teerdestillation, Brückenbergschacht I	Park-, Freizeitfläche; Industrie und Gewerbefläche	6,26	101	nein
ZWI 2	Am Brückenbergschacht I	Park-, Freizeitfläche	4,35	102	nein
ZWI 3	An der Pöhlauer Straße, Brückenbergschacht III	Park-, Freizeitfläche	7,07	103	nein
ZWI 4	An der Pöhlauer Straße, Brückenbergschacht II	Park-, Freizeitfläche; Industrie und Gewerbefläche	7,23	104	nein
ZWI 6	Am Schacht IV des Brückenbergschachtes	Park-, Freizeitfläche; Sportanlage	11,03	106	nein
ZWI 8	Am Morgensternschacht I	Park-, Freizeitfläche; Sportanlage	9,60	108	nein
ZWI 9	Am Morgensternschacht II	Park-, Freizeitfläche; Kleingarten	1,63	109	nein
ZWI 10	Am Morgensternschacht III	Park-, Freizeitfläche	11,18	110	Ja
ZWI 11	Am Schacht V des Martin-Hoop-Werkes	Park-, Freizeitfläche	0,54	111	nein
ZWI 13	Am Kästnerschacht I	Park-, Freizeitfläche	7,07	113	nein
ZWI 14	Am Kästnerschacht II	Park-, Freizeitfläche; Industrie und Gewerbefläche; Kleingarten	1,23	114	nein
ZWI 15	Am Wilhelm-Schacht I, westlich	Park-, Freizeitfläche	13,65	115	nein
ZWI 16	Am Wilhelm-Schacht I, nördlich	Park-, Freizeitfläche	6,85	116	nein
ZWI 17	Halde 3 am Wilhelmschacht II	Park-, Freizeitfläche; Industrie und Gewerbefläche; Kleingarten	6,33	117	nein
ZWI 18	Halde 2 am Wilhelmschacht II	Park-, Freizeitfläche; Wohngebiet	0,84	118	nein
ZWI 19	Halde 1 am Wilhelmschacht II	Park-, Freizeitfläche; Industrie und Gewerbefläche; Kleingarten	0,85	119	nein
ZWI 20	An den Arnim-Schächten	Park-, Freizeitfläche; Sportanlage; Kleingarten	11,73	120	nein
ZWI 21	An den Altgemeinde-Schächten	Park-, Freizeitfläche; Industrie und Gewerbefläche; Kleingarten	12,90	121	nein
ZWI 22	Am August-Bebel-Werk, Malzinsel	Park-, Freizeitfläche; Sportanlage	6,53	122	nein
ZWI 23	Am Forst- und Schader Schacht	Park-, Freizeitfläche; Industrie und Gewerbefläche; Kleingarten	13,00	123	Ja
ZWI 24	Am Wasserhaltungsschacht	Park-, Freizeitfläche; Kleingarten; Kinderspielplatz	12,36	124	nein
ZWI 26	Am Westsachsenstadion, Vereinsglück Schacht	Park-, Freizeitfläche; Sportanlage	7,16	126	nein
ZWI 27	Am Hilfe-Gottes Schacht	Park-, Freizeitfläche	0,42	127	nein
ZWI 28	Am Segen-Gottes Schacht	Park-, Freizeitfläche; Industrie und Gewerbefläche	2,35	128	nein
ZWI 29	Am Bürger Schacht I, westlich	Park-, Freizeitfläche; Industrie und Gewerbefläche; Sportanlage	2,36	129	nein
ZWI 30	Am Neuen Alexander Schacht	Park-, Freizeitfläche; Kleingarten; Sportanlage	3,14	130	nein
ZWI 31	Am Augustus-Schacht	Park-, Freizeitfläche; Sportanlage; Wohngebiet	3,86	131	nein
ZWI 32	Am Martin-Hoop Schacht IV	Park-, Freizeitfläche	11,14	132	Ja

¹Die Haldenkörper Nr. 5, 7, 12 und 25 sind gegenwärtig nicht mehr existent.

Tab. 1: Übersicht zu den Halden im Bergbaurevier Zwickau - Fortsetzung

Halden-Nr.	Haldenbezeichnung	aktuelle Nutzung	Fläche (in ha)	Ident-Nr. Haldendatenbank	Haldenbrand aktuell
ZWI 33	Am Martin-Hoop Schacht IX	Park-, Freizeitfläche; Industrie-/Gewerbefläche; Kleingarten; Wiese	1,46	133	nein
ZWI 34	Am Martin-Hoop Schacht X	Park-, Freizeitfläche; Industrie und Gewerbefläche	0,95	134	nein
ZWI 35	Halde Birkenweg	Wohngebiet	0,09	135	nein
ZWI 36	Halde Helmholtzstraße	Kleingarten; Wohngebiet	0,89	136	nein
ZWI 37	Halde Hofleite	Park-, Freizeitfläche; Kleingarten	0,30	137	nein
ZWI 38	Halde KGA Gartenfreunde/Halde 1 Oberhohndorf	Park-, Freizeitfläche; Kleingarten; Wohngebiet	0,56	138	nein
ZWI 39	Halde Comeniusweg/Halde 2 Oberhohndorf	Park-, Freizeitfläche; Wohngebiet	0,81	139	nein
ZWI 40	Aurora-Schacht-Halde	Park-, Freizeitfläche; Industrie-/Gewerbefläche; Kleingarten; Wohngebiet	1,78	140	nein
ZWI 41	Hoffnung-Schacht-Halde	Industrie und Gewerbefläche	0,08	141	nein
ZWI 42	Sarfert-Schacht-Halde	Kleingarten	0,57	142	nein
ZWI 43	Halde Eberts-Doppel Schacht	Park-, Freizeitfläche; Kleingarten	0,44	143	nein
ZWI 44	Fortuna-Schacht-Halde	Park-, Freizeitfläche	0,59	144	nein
ZWI 45	An der Planitzer Straße, Glück-Auf Schacht	Park-, Freizeitfläche; Kleingarten; Wohngebiet	1,81	145	nein
ZWI 46	Halde am Steigerhaus Fritsche Schacht	Park-, Freizeitfläche	0,10	146	nein
ZWI 47	Halde Schacht Altgemeinde Bockwa, Am Hammerwald	Park-, Freizeitfläche; Wohngebiet; Kleingarten	1,32	147	nein
ZWI 48	Halde Tagesfallort 4	Industrie und Gewerbefläche	0,32	148	nein
ZWI 49	Halde Tagesfallort 2	Industrie und Gewerbefläche	0,52	149	nein
ZWI 50	Halde des Communschachtes (Nr. 88)	Industrie und Gewerbefläche	0,37	150	nein
ZWI 51	Halde am Bahnhof Schacht	Park-, Freizeitfläche; Industrie-/Gewerbefläche; Kleingarten; Wohngebiet	2,09	151	nein
ZWI 52	Halde am Himmelsfürst Schacht	Park-, Freizeitfläche; Kleingarten; Wohngebiet	0,25	152	nein
ZWI 53	Halde am Bürger Schacht II	Industrie und Gewerbefläche	1,61	153	nein
ZWI 54	Halde Beschert-Glück Schacht ?	Wohngebiet	0,36	154	nein
ZWI 55	Halde westlich Lindenstraße	Wiese	0,57	155	nein
ZWI 56	Halde am Bürger Schacht I, östlich	Park-, Freizeitfläche; Industrie und Gewerbefläche	1,22	156	nein
ZWI 57	Am Wilhelmschacht III	Park-, Freizeitfläche; Kleingarten	0,80	157	nein
ZWI 58	Am Drei Fritzen Schacht	Park-, Freizeitfläche; Wohngebiet; Wiese; Ackerland	0,59	158	nein
ZWI 59	Am Wilhelm Schacht I (östlich)	Park-, Freizeitfläche; Industrie und Gewerbefläche	2,86	159	nein

Tab. 2: Übersicht zu den Halden im Bergbaurevier Lugau/Oelsnitz

Halden-Nr.	Bezeichnung	aktuelle Nutzung	Fläche (in ha)	Ident-Nr. Hal-dendatenbank	Haldenbrand aktuell
OEL 1	Helene- und Idaschachthalde	Kleingarten	7,375	201	nein
OEL 2	Pluto-Merkur-Schachthalde	nördl. Industrie und Gewerbefläche	14,250	202	nein
OEL 3	Kaisergrube-Halde	Kleingarten	4,519	203	nein
OEL 4	Vereinigtfeld-Schacht-II-Halden	Kleingarten	4,647	204	nein
OEL 5	Concordia-Schacht-Halde	Kleingarten; Kinderspielplatz	2,617	205	nein
OEL 6	Vereinigtfeld-Schacht-I-Halden	Kleingarten; Sportanlage, Bauhof	1,425	206	nein
OEL 7	Concordia-Schacht-Halde	Kleingarten, kleiner Bolzplatz	7,290	207	nein
OEL 8	Frieden- und Hedwig-Schacht-Halde	Kleingarten, Hundesportplatz	8,233	208	nein
OEL 9	Hoffnung-Schacht-Halde	Kleingarten	1,100	209	nein
OEL 10	Vertrauen-Schacht-Halde	Kleingarten	6,516	210	nein
OEL 11	Gottes-Segen und Glückauf-Schacht-Halde	Motorcrossstrecke	3,559	211	nein
OEL 12	Carl-Schacht-Halde	Sportplatz;	1,748	212	nein
OEL 13	Carl-Schacht-Halde	Tiefbauunternehmen; Autowaschanlage	0,541	213	nein
OEL 14	Victoria-Schacht-Halde	Kleingarten; Kinderspielplatz	3,603	214	nein
OEL 15	Saxonia-Schacht-Halde	Hundeplatz	1,113	215	nein
OEL 16	Vereinigtfeld-Schacht-III-Halden	Kleingarten, Hundeplatz	6,837	216	ja
OEL 17	Deutschland-Schacht-I-Halden	Kleingarten, Aussichtsturm, Ostteil Lagerplatz	17,831	217	ja
OEL 18	Deutschland-Schacht-II-Halden	südl. Industrie und Gewerbefläche	3,733	218	nein
OEL 19	Kaiserin-Augusta-Schacht-Halde	Kleingarten; Kinderspielplatz; Sportanlage, südöstl. Hälfte Industrie und Gewerbefläche	25,957	219	nein
OEL 20	Gottes-Hilfe-Schacht-Halde	Industrie und Gewerbefläche	0,792	220	nein
OEL 21	Vereinsglück-Halde	Sportanlage, Industrie und Gewerbefläche	6,420	221	nein

- **Teufmassen:** Diese Berge beinhalten das Ausbruchmaterial, das bei der Schachtabteufung im Rotliegenden und im Karbon angetroffen wurde. Die Rotliegendeteufmassen bestehen je nach Position des Schachtes vorwiegend aus Konglomeraten/Fanglomeraten, fanglomeratischen Sandsteinen, Arkosen, Tonsteinen und Vulkaniten. Die Teufmassen des Karbons werden hauptsächlich durch graue Tonsteine, Sandsteine, Konglomerate sowie untergeordnet Steinkohle gebildet. Im Lugau/Oelsnitzer Revier wurden die Strecken zum Teil auch im Phyllit des Grundgebirges aufgeföhren, so dass dieser im dortigen Haldenmaterial wieder zu finden ist. Die Stückigkeit der Teufmassen ist relativ grob.
- **Grobberge:** Zu den Grobbergen gehören nach ihrer Korngröße die oben genannten Teufmassen, Bergemassen aus Aus- und Vorrichtungsgrubenbauen sowie die Leseberge aus der Trockenaufbereitung. Die Leseberge bestehen zum Großteil aus karbonischem Tonstein, der bei der manuellen Trennung der Kohle auf Klaubetischen und an Lesebändern in Korngrößen über 80 mm anfiel. Häufig ist das Nebengestein noch mit Kohle, die nicht abgetrennt werden konnte, verwachsen.
- **Waschberge:** Diese nicht verwertbaren Bestandteile aus der Nassaufbereitung (Kohlenwäsche) setzen sich wie die Grobberge aus karbonischen Tonschiefer und untergeordnet aus nicht abtrennbarer feinverteilter Kohle zusammen. Durch die je nach Fortschritt der Aufbereitungstechnologie vorgeschaltete Klassierung lag die Korngröße am Ende der Nassaufbereitung zwischen 10 mm und 80 mm. Die Waschberge wurden nach der Aufbereitung zusammen mit den Lesebergen auf die Halde verstützt. Durch Haldenbrandprozesse wurden die grauen Tonsteine dort teilweise in rotgebrannte Tonsteine umgewandelt.
- **Kohlenschlamm:** Das aus den Feinkornsetzmaschinen (Nassaufbereitung) resultierende Feinkohle-Berge-Wasser-Gemisch unter 10 mm Korngröße wurde je nach Entwicklung der Aufbereitungstechnologie direkt mit Spülrohren in Schlammteiche eingebracht oder einer weiteren Aufbereitung über Flotationsanlagen zugeführt. Der Kohlenschlamm enthält neben Kohlestaub einen hohen Anteil an tonig-schluffiger Substanz des Tonschiefers. Der Schluff- und Tonanteil liegt im Kohleschlamm je nach Aufbereitung zwischen 70 % und 90 %. Der Kohleanteil kann 25 % überschreiten. Bei entsprechend hohem Kohleanteil erfolgte oft eine Rückgewinnung von sogenannter Teichfilterkohle, die als Zuschlagsprodukt für die Kesselfeuerung, aber auch zur Verkokung Verwendung fand. Die Schlammteiche können Ausmaße bis zu einer Fläche von 10 ha und eine Schlammmächtigkeit bis 25 m erreichen.
- **Kesselschlacke, Kesselasche und Flugasche:** Eine Vielzahl von Schachtanlagen erzeugte durch Verfeuerung von Steinkohle Dampf zum Betreiben von Förder-, Aufbereitungs- und Bewetterungsanlagen. Zum Einsatz kamen Rost- und Mühlenkessel. Die Rostkessel wurden mit Kesselkohle und hochwertiger Nusskohle beschickt, so dass als Abprodukt zu großen Klumpen zusammengebackene Kesselschlacke (Schweißschlacke) entstand. Die Mühlenkessel wurden mit Kohlen mittlerer Korngröße aus getrockneter Teichfilterkohle nach deren Aufmahlung und Vermischung befeuert. Durch die effektive Verbrennung des staubförmigen Mischproduktes entstanden Kesselasche und teilweise kleinstückige Kesselschlacke. Diese Abprodukte wurden auf die Halden verbracht. Die feinkörnige Flugasche wurde in Rührwerken mit Wasser vermengt und über Rohrleitungen in Spülteiche bzw. einfachen Vertiefungen der Halden eingespült. Des Weiteren kam es auch zur Ablagerung von Aschen aus Heizkraftwerken.
- **Kokereiabfälle:** Seit Anfang des 19. Jh. entstanden im Zwickauer Steinkohlenrevier Kokereien. Neben dem Hauptprodukt Steinkohlenkoks wurden seit Anfang des 20. Jh. auch Nebenprodukte wie Teer, Ammoniak, Benzol, Toluol, Xylol,

Naphthalin, Phenole und Schwefel aus dem beim Verkokungsprozess entstehenden Gas gewonnen. Auf einigen Haldenstandorten verbrachte man die Abprodukte aus der Koks- und Gaserzeugung. Diese nehmen meist einen sehr geringen Anteil am Haldenvolumen ein, besitzen jedoch aufgrund ihres Schadstoffpotenzials hohe Umweltrelevanz.

Abfälle aus weiteren Ablagerungen: Als Abfälle aus weiteren Ablagerungen auf den Haldenkörpern sind deponiespezifische Abfälle wie Haus- und Gewerbemüll, Aschen, Bauschutt sowie Lehm zu verstehen.

- **Deponieartige Ablagerungen:** In beiden Revieren wurden mehrere Deponien im Bereich der Halden nach dem aktiven Versturz von Haldenmaterial angelegt. Die Ablagerungen sind überwiegend als ungeordnete deponieartige Ablagerungen zu bezeichnen. Die Schüttung von Hausmülldeponien (Halden ZWI 8, 10, 20 und 24) erfolgte dabei direkt auf vorhandene nicht anderweitig nutzbare Brachflächen wie Kohleschlammteiche (Halde ZWI 24 und 10) oder die Halde selbst. Regelkonforme Deponiebasisabdichtungen sind nicht bekannt. Die Deponiekörper bestehen hauptsächlich aus Hausmüll, Straßenkehrschutt, Kanal- und Klärschlämmen, Bodenaushub, Bauschutt, Asche, Holz, Papier und Pappe. Neben diesen Abfällen wurden untergeordnet auch hinsichtlich ihres Schadstoffpotenzials zum Teil bedenkliche Abfälle wie Batterien und Akkumulatoren, Krankenhausabfälle, Chemieabfälle wie Lacke, Farben, Gaswerksfiltermassen sowie Textilabfälle abgelagert.
- Des Weiteren kam es zur Ablagerung von Aschen aus Heizkraftwerken mit Volumina bis zu mehreren 100.000 m³ (Aschedeponien Halde ZWI 16 bzw. 32).
- **Bauschuttabelagerungen:** Von mehreren Halden ist die ungeordnete Ablagerung von Bauschutt bekannt. Der Bauschutt stammt zum Teil aus dem Abriss der Bergwerksgebäude, zum Teil aus wilden Ablagerungen auf dem Haldenkörper. Einige Halden wurden gewerblich als Zwischenlager für derartige Abfälle genutzt.
- **Lehm, Bodenaushub:** Diese mineralischen Ablagerungen stammen meist aus der Umgebung der Halde und wurden beim Bau der Dämme von Schlammteichen, für Geländeausgleichsmaßnahmen und zur Vorbereitung der Haldenbegrünung aufgebracht. Der Lehm und Bodenaushub ist meist den quartären Deckschichten (Auelehm, Lößlehm) und dem Rotliegenden (Zersatzlehm) zuzuordnen.
- **Sonstige Abfälle:** Eine Besonderheit stellt die Ablagerung von radioaktiven Bergen und Aschen aus dem Freitaler Revier (Halde OEL 16) dar. Die Ablagerungen erfolgten ungeordnet im oberen Haldenkörper selbst und sind mittels ODL-Messung noch nachweisbar.

b) Branderscheinungen

Die Branderscheinungen sind ein haldenspezifischer Prozess, der zur Umwandlung des Haldenmaterials einschließlich der Veränderung des freisetzbaren Stoffbestandes führt.

Die Ursachen der Haldenbrände finden sich in der Zusammensetzung des Haldenmaterials. Wichtigste Voraussetzungen sind der Kohleanteil in den Bergen, das Vorhandensein von Sulfiden und die Möglichkeit von Luft- und Wasserzutritten zum Haldenmaterial. Der Brandprozess startet nach bzw. während der Haldenschüttung durch die Oxidation der Sulfide, die fein verteilt in den Bergen hauptsächlich als Pyrit und Markasit, aber auch als Sphalerit und Galenit vorliegen. Initialfaktor (Trigger) ist hierbei die Zufuhr von Luftsauerstoff und Wasser (z. B. Sickerwasser).

Beschleunigend wirken biochemische Prozesse durch sulfidoxidierende Bakterien wie *Thiobacillus* und *Sulfolobus*. Die Reaktionen sind stark exotherm. Wärmefreisetzung erfolgt zudem durch die Lebenstätigkeit der sulfidoxidierenden Bakterien, durch Adsorption und chemische Bindung von Sauerstoff an Kohle, durch Oxidation von Protohuminen und das Verbringen heißer Schlacken und Aschen auf die Halde. Diese exothermen Prozesse führen zur Freisetzung der flüchtigen Bestandteile aus der Kohle, u. a. der brennbaren Gase Wasserstoff und Methan, die den eigentlichen Brandprozess der Steinkohle initiieren.

Im Bereich der Zwickauer Halden konnten aktuell noch Oberflächentemperaturen bis zu 82°C gemessen werden. Die Brände sind durch den relativen Sauerstoffmangel als Schwelbrände zu bezeichnen und betreffen in der Regel grobkörniges Haldenmaterial mit genügend hoher Luftdurchlässigkeit. Das Haldenmaterial erfährt durch Temperaturen von mehreren hundert Grad Umsetzungsprozesse, bei denen vielfältige Mineralneubildungen im Zusammenhang mit keramischen Prozessen hervorgerufen werden. Dabei werden graue Tonsteine in rötlich, zum Teil weißlich gefärbte verfestigte silikatische Gesteine umgewandelt.

Die Fortsetzung des Brandprozesses wird im Verlauf durch das Brandpotenzial (Gehalt an kohligem Substanz), von der Luftzufuhr (Kamineffekt) und untergeordnet vom Wassergehalt gesteuert. Vermutlich werden durch Sackungen infolge Volumenschwunds immer neue Wegsamkeiten für die Zufuhr von Luftsauerstoff geschaffen, die ein Wandern des Brandherdes und damit ein langsames Durchschwelen der Halde verursachen.

Historische Branderscheinungen sind von 25 Halden im **Zwickauer Revier** bekannt. Für die meisten Halden wurde der Brandprozess durch das Vorliegen der roten Schiefertone indirekt nachgewiesen. Von den übrigen Halden können aufgrund fehlender Hinweise keine Aussagen über Brandprozesse getroffen werden. Das umsetzbare Potenzial ist meist nur durch oberflächennahe Einschätzung des vorliegenden Haldenmaterials möglich. Aktuelle Branderscheinungen sind von den Halden ZWI 23, ZWI 10 und ZWI 32 bekannt. Nähere Untersuchungen zum Schadstoffpotenzial von rotgebranntem Haldenmaterial und freigesetzten Schwelgasen liegen nur für die Halde ZWI 23 vor.

Aus dem **Lugau/Oelsnitzer Revier** sind Branderscheinungen von der Halde OEL 16, dem Bereich südöstlich der Halde OEL 6 und von Halde OEL 17 bekannt.

c) Mineralneubildungen

Mineralneubildungen sind durch die chemische Oxidation der Metallsulfide möglich. Hier ist vor allem die Bildung von Gips und Metallsulfaten wie Jarosit, Halogeniden (z. B. Salmiak) sowie von Schwermetallsulfaten, aber auch Elementen (Schwefel, Selen) bekannt. Die Sulfate sind vor allem für einen Austrag über das Sickerwasser verfügbar.

Da bisher nur eine konkrete Untersuchung von Mineralneubildungen vorliegt, bedarf es zur Abschätzung des Gefährdungspotenzials weiterer Untersuchungen.

d) Infiltration/Bewuchs

Der Bewuchs und damit die Infiltrationsmöglichkeiten für Niederschlagswässer sind Haldencharakteristika, die eine wesentliche Rolle für die Gefährdungsabschätzung der Schutzgüter Grundwasser und Oberflächenwasser spielen. Durch den Wasserhaushalt wird der Austrag des löslichen Stoffinventars hauptsächlich gesteuert.

Für die Bildung von Haldensickerwässern wesentlich ist zum Beispiel die Art der Nutzung und des Bewuchses sowie Oberflächenbeschaffenheit und Haldenform (Plateauflächen, Böschungsneigung).

Die Nutzung der Haldenoberfläche ist in beiden ehemaligen Steinkohlenbergbaurevieren vielfältig. Die Nutzung besteht im Normalfall aus Waldbewuchs. Weiterhin sind Kleingärten, Wohnhäuser, Sportplätze, Gewerbe- und Verkehrsflächen sowie Deponien auf den Halden angelegt. Selten werden Haldenteile als Wiese und Weide sowie als Ackerfläche genutzt. Auf Einzelhalden können bis zu vier verschiedene Nutzungen angetroffen werden.

Dies wirkt sich aufgrund der unterschiedlichen Oberflächenbeschaffenheit auf die Menge des Sickerwassers aus. Dabei verschlechtern Versiegelung und Bodenverdichtung die Infiltrationsbedingungen und erhöhen den Oberflächenabfluss. Die Ausdünnung des Waldbewuchses und das Anlegen von Wiesen- und Grünflächen ändern Evapotranspiration und Interzeption. Die Bewässerung von Kleingärten erhöht einerseits das Wasserdargebot, zum anderen werden durch die Ausbildung von Brachflächen die Infiltrationsbedingungen verbessert. Bei überwiegendem Waldbewuchs sind für die Neubildung von Sickerwasser die Bewuchsintensität, der Stockwerksbau, die Schadstufe und das Bestandesalter von Bedeutung.

Zusätzlich beeinflussen aufgebrachte Lehmabdeckungen (Halde ZWI 26) sowie Fremdböden infolge Kleingartennutzung das Infiltrationsgeschehen. Die Lehm- und Bodenschichten wirken u. a. als Zwischenspeicher (Wasserhaushalt im Sommer) und als Hindernis beim Infiltrationsprozess.

Zur empirischen Fassung der differenzierten Einflüsse auf den Haldenwasserhaushalt wurden drei Bewuchskategorien eingeführt. Diese ermöglichen ohne Haldenwasserhaushaltsmodellierung eine Bewertung des Potenzials der Sickerwasserneubildung.

Auch die Haldenmorphologie beeinflusst den Sickerwasserhaushalt wesentlich. Im Untersuchungsgebiet liegen Halden mit ausgeprägter Plateaufläche und Kegelhalden vor. Halden mit Plateaufläche überwiegen.

e) Standsicherheit

Standsicherheitsprobleme der Steinkohlenhalden können zu mannigfaltigen Gefährdungen der Schutzgüter führen. Durch die Schüttung der Halden stellte sich aufgrund der Korngröße des Schüttgutes der natürliche Böschungswinkel ein. Dieser weist vermutlich bei einer Vielzahl der Halden nicht die nach DIN 1054 notwendigen Standsicherheitsreserven auf. Bermen bzw. Böschungsabflachungen wurden nur in den seltensten Fällen angelegt. Baumbewuchs auf Böschungen wirkt meist standsicherheitserhöhend.

Weitere Standsicherheitseinschränkungen können z. B. durch vorhandene Kohleschlammteiche (Aufbau der Halde), Setzungen, Wasserzutritte und Erosion verursacht werden.

Zusätzlich können folgenden Gefährdungen der Schutzgüter durch Rutschungen und somit durch Freilegen von Haldenmaterial entstehen:

- ⇒ erhöhte dermale Kontaktmöglichkeit,
- ⇒ Zutritt von Luftsauerstoff → Auswirkungen auf das Brandgeschehen,
- ⇒ Schaffung verbesserter Infiltrationsbedingungen mit verstärkter Sickerwasserbildung,
- ⇒ Haldenmaterial kann in die Vorflut gelangen.

Von den Steinkohlenhalden sind folgende die Standsicherheitsprobleme anzeigende Erscheinungen bekannt: Säbelwuchs, Umbrechen von Bäumen, Erosion, Sackungen, Dehnungsrisse, Ausbauchung von Böschungen und Rutschungen. Historische und aktuelle Standsicherheitsprobleme sind von 14 Halden aus dem Zwickauer Revier und von 6 Halden aus dem Lugau/Oelsnitzer Revier bekannt.

f) Sickerwasseraustritte

Haldenspezifisches Charakteristikum ist der Austritt von Sickerwasser aus der Haldenschüttung selbst. Aufgrund der wasserhaushaltlichen Situation bildet sich in jeder der Halden ein gewisser Sickerwasseranteil. Relevant für die Einschätzung des Gefährdungspotenzials sind vor allem die Kontaktmöglichkeit und damit der oberirdische Austritt des Sickerwassers inkl. der Austritte von Sickerwasser in die Vorflut. Wesentlich ist auch die Nutzung als Gießwasser, die zum Teil in Kleingartenanlagen praktiziert wird. Weiterhin ist der Sickerwassereintrag in das Grundwasser hinsichtlich dessen nachteiliger Beeinflussung zu erwähnen.

g) Sonstiges

Unter sonstigen haldenspezifischen Kenndaten sind u. a. Umlagerungsprozesse von Haldenmaterial, der Abbau von Kohleschlamm, Schlacke sowie Schüttungen von Fremdhaldenmaterial zu erfassen. Diese Informationen lassen Rückschlüsse auf eine Beeinträchtigung des Umfeldes zu.

4 UNTERSUCHUNGSKONZEPT

4.1 Literatur- und Datenrecherche

Bei folgenden Einrichtungen, Behörden und Personen wurden Literatur, digitales Karten- und Datenbankmaterial sowie Informationen recherchiert: LfULG Freiberg und Dresden, Stadtverwaltung Zwickau Stadtplanungsamt, Zweckverband Abfallwirtschaft Zwickau (ZAZ), Stadt- und Regionalbahn Zwickau GmbH, G.U.B. Ingenieurgesellschaften, Bergarchiv Freiberg, LRA Stollberg, Herr Dr. Stoll, Herr Hamperl, Herr Fresch und Herr Brohs.

4.2 Feldbegehungen, Kartierung

Vor dem Anlegen der Grablöcher, Handschürfe, Kleinrammbohrungen und Bohrungen wurde eine Kartierung der Halden hinsichtlich der oberflächennahen Verteilung des Haldenmaterials, der aus den Standortverhältnissen resultierenden Bodenbildung und der Verteilung, der Ausbildung und zum Zustand der Vegetation, der Si-

ckerwasseraustritte, des Zustandes der Haldenböschungen und der Gasaustritte durchgeführt.

An Sickerwasseraustrittsstellen wurden Kartierungen der physikochemischen Parameter Temperatur, pH-Wert und Leitfähigkeit vorgenommen bzw. Durchflussmessungen durchgeführt.

4.3 Grablöcher, Schürfe

Auf den Halden wurden Grablöcher mittels Spaten bis in 40 cm Tiefe angelegt. Die Grablöcher dienten zur Feststellung des oberflächennah vorhandenen Haldenmaterials, gegebenenfalls der Abdeckung, der Dokumentation der Bodenbildung und der Probenahme. Zur Ermittlung der Wirkung bodenbildender Prozesse in die Tiefe wurden weiterhin Schürfe bis in 1 m unter GOK angelegt. Alle Aufschlüsse wurden gemäß der Bodenkundlichen Kartieranleitung KA 5 dokumentiert und digital im FIS Boden erfasst.

Die Mächtigkeit der Abdeckung wurde aufgrund ihrer besonderen Relevanz für die kleingärtnerische Nutzung an ausgewählten Standorten über Sondierungen mittels Pürckhauer-Bohrstock erkundet.

4.4 Kleinrammbohrungen

Zur Feststellung des Haldenaufbaues wurden in Zwickau 21 (183,8 Bohrmeter) und in Oelsnitz 16 (112,5 Bohrmeter) Rammkernsondierungen abgeteuft. Im Bereich aktiver Brandherde wurden in Zwickau zur Untersuchung der entstehenden Brandgase fünf Gaspegel (1 ¼", Stahl) gesetzt.

Die Rammkernsondierungen wurden durch das LfUG mittels Bohrraupe ausgeführt. Teilweise erfolgte der Ausbau zu Sickerwassermessstellen.

4.5 Bohrungen, Grundwassermessstellen

In den Haldenkörpern wurden durch die Firma Kling Bohrtechnik Dresden Trockenkernbohrungen abgeteuft. Im Revier Zwickau wurden 5 Bohrungen und im Revier Lugau/Oelsnitz 9 Bohrungen niedergebracht. Der Ausbau zu GWM erfolgte insgesamt für 9 Bohrungen.

4.6 Probenahme und chemische Analytik

Boden

Bodenproben wurden aus den Grablöchern, Schürfen, Rammkernsondierungen und Bohrungen entnommen. Zur Bewertung des Gefährdungspotenzials über den Direktpfad Boden-Mensch wurden oberflächennahe Proben aus den Intervallen 0,0 m bis 0,1 m (Park- und Freizeitfläche), 0,0 m bis 0,1 m, 0,1 m bis 0,3 m (Wohngebiet) und 0,0 m bis 0,3 m, 0,3 m bis 0,6 m (Kleingärten) entnommen. Die Probenahmeintervalle der Grablöcher repräsentieren die in der BBodSchV festgelegten nutzungsorientierten Beprobungstiefen.

Die Schürfe wurden jeweils in Intervallen von 0,0 m bis 0,1 m, 0,1 m bis 0,3 m, 0,3 m bis 0,6 m und 0,6 m bis 1,0 m beprobt.

In den Rammkernsondierungen und Trockenkernbohrungen wurde das komplette Intervall der Halde nach „geologischen“ Grenzen, teilweise wurde auch der geologische Untergrund beprobt.

Proben für die sequenzielle Extraktion wurden aus den Kernbohrungen entnommen.

Folgendes Analysenspektrum wurde untersucht:

Bodenproben aus den Kernbohrungen und Rammkernsondierungen:

Feststoff: Glühverlust, As, Pb, Cd, Cr, Cu, Hg, Mo, Ni, Zn, PAK,
Eluat: pH-Wert, Leitfähigkeit, Na, Ca, Mg, K, SO₄, Cl⁻, As, Pb, Cd, Cr, Cu, Hg,
Mo, Ni, Zn, PAK, AOX, Phenole.

Insgesamt wurden 346 Bodenproben zur analytischen Untersuchung übergeben. Zusätzlich wurden 16 Bodenproben für die sequenzielle Extraktion entnommen. Um die Pflanzenverfügbarkeit der Inhaltsstoffe im Bodensubstrat der Nutzgärten zu untersuchen, wurden 6 Proben mittels Ammoniumnitrat auszug untersucht.

Die Untersuchung des Feststoffs erfolgte durch die UBG Neusörnewitz, die Eluatuntersuchungen führte die Analytis GmbH Zschopau aus.

Wasser

An Grund-, Sicker- und Oberflächenwässern erfolgten hydrochemische Untersuchungen.

Dazu wurde im Revier Zwickau ein vierteljährliches Monitoring am vorhandenen Messstellennetz der Halde ZWI 10 durchgeführt. Insgesamt je vier Grundwassermessstellen im Tertiär, vier Grundwassermessstellen im Rotliegenden, zwei Sickerwässer und je drei Oberflächenwässer beprobt und untersucht. Insgesamt wurden 54 Wasserproben im Rahmen des Monitorings für Halde ZWI 10 untersucht.

An der Halde ZWI 45 wurde die GWM 1/06 als Abstrommessstelle errichtet. Zur Erstuntersuchung wurde diese am 08.01.2007 beprobt. Nach Fertigstellung von weiteren zwei GWM und der insgesamt vier Sickerwassermessstellen im Februar 2007 wurden alle Messstellen am 19.04.2007 beprobt. Zusätzlich wurde eine Stichtagsmessung, bei der drei weitere Messstellen einbezogen wurden, durchgeführt (Anl. 5).

Im Revier Lugau/Oelsnitz erfolgte ein Monitoring von Haldensickerwässern (Anl. 8).

Dazu erfolgten im Monatsabstand 12 Beprobungen an 10 SW-Messstellen und 6 Beprobungen an der OW-Messstelle. Die 6 GWM im Revier Lugau/Oelsnitz sind ein- bzw. 2-mal beprobt worden.

Die Untersuchung der Wässer erfolgte auf folgendes Parameterspektrum:

physikochemische Leitparameter:	T, pH, Lf, O ₂ , Redoxpotenzial (Vor-Ort-Messung),
Hauptkomponenten:	Na, K, Ca, Mg, Cl ⁻ , SO ₄ ,
Spurenelemente:	As, Pb, Cd, Cr _(gesamt) , Cu, Hg, Mo, Ni, Zn,
Organische Summenparameter:	PAK, AOX, Phenolindex.

Die Analytik führte das Prüflabor Dr. Oelsner & Kollegen GmbH St. Egidien durch.

Luft

Im Bereich des aktiven Brandherdes von Halde ZWI 10 wurden fünf Bodenluftproben aus den Gaspegeln entnommen. Die Bodenluftuntersuchung beinhaltete folgendes Parameterspektrum:

Hauptkomponenten: CO₂, O₂, CH₄, SO₂, N₂, H₂S,
Organische Spurenstoffe: BTEX, Alkane/Aliphaten C3-C18, BTEX (einschl. Phenole/Kresole), PAK, Oxidations- und Teiloxidationsprodukte der Alkane/Aliphaten, Brand- und Teerriechstoffe (u. a. NSO-Heterozyklen).

Die Analytik wurde vom Prüflabor Dr. Oelsner & Kollegen GmbH St. Egidien durchgeführt.

4.7 Temperaturmessungen

Im Bereich der Halde ZWI 10 waren aktuelle Branderscheinungen bekannt. Mit der BRG 1/06 wurde dieser Brandherd näher erkundet. Hier wurden über das gesamte Profil direkt nach der Entnahme des Bohrgutes Temperaturmessungen an diesem durchgeführt. Nach Fertigstellung der Bohrung wurde über das gesamte Profil (55 Bohrmeter) ein Temperaturlog aller 25 cm durchgeführt.

Da auch in zwei benachbarten Rammkernsondierung Temperaturanomalien festzustellen waren, wurde auch in diesen Temperaturmessungen aller 0,25 m durchgeführt.

Weiterhin erfolgte die Messung von Temperaturprofilen in je zwei Kernbohrungen auf Halde ZWI 45 und Halde OEL 10 über die gesamte Profiltiefe.

4.8 Durchflussmessungen

Im Revier Lugau/Oelsnitz wurden an 4 Messpunkten Durchflussmessungen mit dem Ziel durchgeführt, halbwegs gesicherte Mischungsverhältnisse bei den hydrochemischen Gleichgewichtsberechnungen abzuleiten und die Ergebnisse bei der Verwendung der Quelltermergebnisse der Säulenversuche zu nutzen.

4.9 Forstliche und vegetationskundliche Betrachtungen

Erste Untersuchungen der Halden in den Steinkohlerevieren Zwickau und Lugau/Oelsnitz mit den Schwerpunkten Standort und Bewuchs erfolgten durch WÜNSCHE (1963). Seit der Einstellung des Bergbaus und der Aufforstung der Halden in den 1960-er Jahren haben sich Waldökosysteme etabliert und weiterentwickelt.

Seitdem erfolgten keine systematischen forstlichen und vegetationskundlichen Untersuchungen mehr.

Die Untersuchungen hatten das Ziel, Schlussfolgerungen über die weitere Entwicklung des Waldbestandes und weitere forstliche Handlungsmaßnahmen abzuleiten, die nicht im Widerspruch zur Minimierung des Schadstoffaustrages aus den Haldenkörpern stehen.

Zur Untersuchung des biologischen Potenzials der Halden erfolgte durch das Ingenieurbüro Neef Zwickau eine Kartierung der forstlichen Standorte, Waldbestände und Vegetation der Halden OEL 10 und OEL 17.

Um die durchgeführten Untersuchungen auch in einem späteren Monitoring überprüfen und Veränderungen feststellen zu können, wurde über beide Halden ein Probeflächennetz verteilt. Die Probeflächen mit einem Radius von 10 Metern (Fläche 314 m²) wurden gleichmäßig unter Berücksichtigung der Exposition über die Haldenkörper gelegt. Auf diesen wurden alle Pflanzenarten in einer Florenliste erfasst. Zur vegetationskundlichen Auswertung erfolgten auf den Probeflächen Vegetationsaufnahmen nach Braun-Blanquet (1921, 1928).

Das Pflanzeninventar wurde anschließend mittels der ökologischen Zeigerwerte nach ELLENBERG et. al (1992) ausgewertet. Es erfolgte eine Auswertung nach Lichtzahl, Temperaturzahl, Feuchtezahl, Reaktionszahl, Stickstoffzahl und Kontinentalitätszahl.

Weiter erfolgten auf den Probeflächen waldwachstumkundliche Erhebungen. Dazu wurde auf jeder Probefläche der Stammdurchmesser in 1,3 m Höhe aller Bäume > 7cm BHD und deren Höhe bestimmt. Die Naturverjüngung nach Art, Stück und Wuchshöhe sowie der Wildverbiss wurden aufgenommen.

4.10 Sickerwassermodellierung (BOWAHALD)

Zum Aufbau des numerischen Wasserhaushaltsmodells für die Sickerwasserprognose im Bereich der Halde OEL 10 wurde eine Niederschlags-Abfluss-Modellierung der Halden mit dem numerischen 2D-Box-Modell Programm **BOWAHALD** durchgeführt. Die durch **BOWAHALD** berechneten Sickerwasserraten bzw. Infiltrationsmengen dienten als Grundlage der zu erstellenden Wasserhaushaltsbilanz für das Untersuchungsgebiet.

4.11 Strömungsmodellierung (FEFLOW)

Zur Modellierung der Grundwasserströmung im Revier Lugau/Oelsnitz wurde ein komplexes, numerisches 3D-Grundwasserströmungs-Modell des gesamten Untersuchungsgebietes verwendet. Dieses wurde auf Basis der Richards-Gleichung angesetzt, um Wasserhaushaltsbilanzierungen gleichzeitig im gesättigten als auch im ungesättigten Bereich des Grundwassers zu ermöglichen. Dazu ist die Finite Elemente Modell Software **FEFLOW** verwendet worden. Die durch **FEFLOW** berechneten Grundwasserfließraten dienten als weitere Grundlage der zu erstellenden Frachtbeurteilungen durch die Aufstandsfläche der Halde OEL 10.

Während der darauffolgenden Modellierung des Wasserhaushaltes und der Grundwasserströmung wurde der Ist-Zustand des Untersuchungsgebietes unter instationären Bedingungen analog der Modellierung mit **BOWAHALD** berechnet.

4.12 Stofftransportmodellierung (PHREEQC)

Der Transport der Schadstofffrachten aus der Haldenaufschüttung mit dem Sickerwasser durch die Haldenaufstandsfläche im Untergrund der Halde OEL 10 und der Weitertransport über den unterirdischen Abfluss im Hangschutt wurden mittels PHREEQC eindimensional und mit konstanter Geschwindigkeit geochemisch modelliert.

4.13 Säulenversuche und sequentielle Extraktion

Das Boden und Grundwasserlabor Dresden (BGD) führte Laborversuche entsprechend Musterleistungsbeschreibung des LfUG 2004 zur Klärung des Prozessverständnisses beim Austrag von Schadstoffen sowie der Parametrisierung von Prognosemodellen durch. Dazu wurden Prozessuntersuchungen mittels IBSV - intermittierend betriebene, gesättigte Säulenversuche (Porenraum vollständig mit Wasser gefüllt) zur abiotischen Elution sowie Substratuntersuchungen mittels sequenzieller Extraktion durchgeführt.

Für die Säulenversuche wurde rotes, durchgebranntes und nicht gebranntes, schwarzes, deutlich kohlehaltiges Grobbergematerial aus den Bohrungen verwendet. Die in die Säulen eingebauten gestörten Bohrproben wurden mit synthetischem Regenwasser bei 10 Grad Temperatur bis zu einem 10-fachen Porenvolumenaustausch durchströmt. Nach jedem Porenvolumenaustausch erfolgte eine Beprobung des Eluates.

Parallel dazu wurden an der TU Dresden an ausgewählten Proben Säulenversuche durchgeführt. Schwerpunkt dieser Arbeiten waren gesättigte und ungesättigte Säulenversuche (Porenraum nur teilweise bzw. temporär mit Wasser gefüllt) und deren Vergleich. Gesättigte Säulenversuche (entsprechend LfUG 2004, Durchflussrate etwa 1,5-faches der monatlichen Regenmenge pro Tag) simulieren Starkniederschlagsverhältnisse im Boden (und auch Grundwasserverhältnisse) und sind verfahrenstechnisch gut beherrschbar.

Säulenversuche unter ungesättigten (oxischen) Bedingungen (Durchflussrate etwa 0,81-faches der monatlichen Regenmenge an einem Tag) wurden durchgeführt, um das mikrobielle Oxidations- und Mobilisierungspotential für die enthaltenen Schadstoffe zu ermitteln, den Anteil des mikrobiell generierten Schadstoffaustrages zu untersuchen, und somit die realen Verhältnisse in den Halden besser nachzubilden (standortnahe Bedingungen).

Sequenzielle Extraktionen entsprechend dem Extraktionsschema nach ZEIEN & BRÜMMER wurden an 5 Proben aus den Halden ZWI 10 bzw. ZWI 17 sowie an 5 Proben aus der Halde OEL 10 durchgeführt.

4.14 Untersuchung von Haldenmaterialien auf Schwefelmodifikationen

Eine der Ursachen für die Freisetzung von Schadstoffen aus den Halden ist das Vorhandensein von Pyrit bzw. Markasit sowie weiterer Metallsulfide. Durch deren langsame geochemische und biogeochemische Verwitterung kommt es zu einer langfristigen Freisetzung von Säure und gelösten Salzen.

Zu einer Einschätzung des Vorhandenseins verschiedener Schwefelspezies und zur weiteren Klärung des Verständnisses der in den Steinkohlenhalden ablaufenden Verwitterungs- und Umsetzungsprozesse wurden Haldenproben sowohl auf ihren Gesamt-Schwefelgehalt als auch auf ihren Gehalt an mineralischem Disulfidschwefel in einem Schwefel-Analysator untersucht.

4.15 Mikrobiologie

Ausgehend von internationalen Erfahrungen war es Ziel der mikrobiologischen Untersuchungen, chemolithotrophe Eisen- und Schwefeloxidierer sowie eisen- und sul-

fatreduzierende Bakterien quantitativ zu erfassen und eine Einzuschätzung des Einflusses der mikrobiellen Prozesse auf die Migration der Schadstoffkomponenten vorzunehmen.

Dazu wurde eine Quantifizierung der in den verschiedenen Modellhalden vorkommenden Bakterien durchgeführt.

Eisen- und schwefeloxidierende Bakterien (z. B. Bakterienstamm *Thiobacillus denitrificans*) führen bei stärkerer Aktivität zu einer Versauerung (Produktion von H^+), Erhöhung der Salinität (v. a. durch die Freisetzung von Sulfat) und einer Freisetzung von Schwermetallen.

Eisenreduzierende (z. B. Bakterienstämme *Geobacter*, *Geospirillum* und *Shewanella*) und sulfatreduzierende (z. B. Mikroorganismengattungen *Desulfovibrio*, *Desulfotomaculum*, *Desulfobulbus* und *Desulfobacter*) Bakterien senken das Redoxpotential in ihrer Umgebung ab und vermindern die Salinität. Die sulfatreduzierenden Bakterien heben außerdem den pH-Wert an und fällen Metalle als Sulfide. Dadurch kommt es zu einer Immobilisierung der im Haldenmaterial enthaltenen Schwermetalle.

Insgesamt wurden 55 Proben aus dem Bohrkern, auch aus dem Grund-, Oberflächen- und Sickerwasser sowie aus den Sedimenten der Oberflächen- und Sickerwasser entnommen und untersucht.



Abb. 1: Nachweis von *Thiobacillus denitrificans* auf Mikrotiterplatten mittels MPN-Methode (gefärbten Areale zeigen eine positive Reaktion an)

Die Untersuchung der Halden- und Sedimentproben auf mineraloxidierende Bakterien und Sulfatreduzenten erfolgte mittels MPN-Methode in mehreren Parallelansätzen. Dafür wurden sowohl aerobe als auch anaerobe Proben genommen (Splitting bei der Probenahme), und parallel jeweils aerob bzw. anaerob aufgearbeitet.

Insgesamt wurden 22 Halden- und 6 Sedimentproben untersucht. Die Untersuchung erfolgte auf Mikrotiterplatten mit jeweils 96 Einzeltests pro Probe. Dabei wurden für

jede Probe 10 Paralleltests in jeweils 8 Verdünnungsstufen sowie 2*8 Blindproben zur Qualitätssicherung durchgeführt.

Die Untersuchungen von Sickerwasser-, Oberflächenwasser- und Grundwasserproben auf die Anwesenheit mineraloxidierender und sulfatreduzierender Bakterien erfolgte an insgesamt 27 Proben, ebenfalls jeweils aerob und anaerob genommen und aufgearbeitet. Auch hier erfolgte eine Untersuchung auf Mikrotiterplatten mit der oben beschriebenen Anzahl an Einzeltests pro Probe.

Von allen 55 Proben wurde eine Bestimmung von koloniebildenden Einheiten (KBE) als Indikator für die allgemeine mikrobielle Besiedlung der Proben durch die Ermittlung der Lebendkeimzahlen von aeroben heterotrophen Mikroorganismen durchgeführt. Zur allgemeinen mikrobiologischen Charakterisierung wurden außerdem jeweils 2 Paralleltests in 7 Verdünnungsstufen auf Agarplatten durchgeführt.

4.16 Ableitung des formalisierten Bewertungsschemas für die Steinkohlengalden

Im Rahmen des Projektes wurde eine steinkohlengaldenspezifische Erweiterung der konventionellen Bewertungsmethodik mit GEFA - GEFAHALD - entwickelt. GEFAHALD wurde dafür konzipiert, haldenspezifische und bisher nicht in GEFA bewertbare Merkmale zu erfassen und auf den Beweismustern der HE und OU zu bewerten.

4.17 Haldenpriorisierung mit Einschätzung des Gefährdungspotenzials

Die Priorisierung der Halden erfolgt nach ihrem Gefährdungspotenzial auf die Schutzgüter. Dazu wurden alle Halden, bei denen sich die Erkundung auf dem Stand einer HE oder höher befindet, mit der Kombination aus GEFA und GEFAHALD bewertet. Halden, bei denen der Erkundungsstand nicht über eine FEB hinausging, wurden mit einem Punktbewertungsschema bewertet.

4.18 Erarbeitung Branchenblatt Steinkohlenbergbauhalden

Als Handlungshilfe für die praktische Bearbeitung in den verschiedenen Stufen wurde ein Vorschlag für ein Branchenblatt Nr. 18 „Steinkohlebergehalde“ erarbeitet. Dieses ist in der Reihe branchenbezogener Merkblätter im FIS Altlasten des LfULG eingestellt und im Internet zugänglich unter: <http://www.umwelt.sachsen.de> → Boden, Altlasten → Altlasten → Fachinformationen.

5 ERGEBNISSE DER DETAILUNTERSUCHUNGEN

5.1 Feststoffuntersuchungen (Bergematerial und Boden)

5.1.1 Feststoffanalytik

Die Auswertung der physikochemischen und geochemischen Ergebnisse war hauptsächlich auf die Verifizierung der Haldenbewertungsmethodik in Hinblick auf die Unterteilung der Haldenmaterialien nach ihrem Gefährdungspotenzial ausgerichtet.

Glühverlust

Der Glühverlust korreliert mit dem Restkohlegehalt (Tab. 16) und dem Grad des Durchbrennens der Haldensubstrate, welcher sich mittelbar durch die Farbe des Bergematerials ausdrückt (Abb. 2). Durchgebranntes Haldenmaterial weist insgesamt deutlich niedrigere Glühverluste auf als ungebrannte graue Schiefertone, Koh-

leschlamm und sandige Waschabfälle. Insgesamt wird eine Erhöhung des Glühverlustes mit Absinken der Korngröße deutlich.

Tab. 3: Mittelwerte der Glühverluste haldenspezifischer Ablagerungen

Haldenspezifische Ablagerungen	Halde ZWI 10		Halde ZWI 45	
	n	GV [%]	n	GV [%]
grauer Schieferthon	22	25,3	27	38,5
rotgebrannter Schieferthon	16	7,2	2	4,0
weißgebrannter Schieferthon	1	9,4	2	15,9
Kohleschlamm	3	38,4	8	43,8
sandige Waschabfälle	-	-	8	45,2
Kesselschlacke	2	19,7	-	-
Teufberge	2	15,1	1	15,8
arithmetisches Mittel (gewichtet)	-	18,4	-	37,4

Neben den roten Haldensubstraten stellen auch die weiß und gelb gefärbten Proben durchgebranntes Material dar. Auch die rot-schwarz gemischten Bergemassen sind bereichsweise als gebrannt anzusehen.

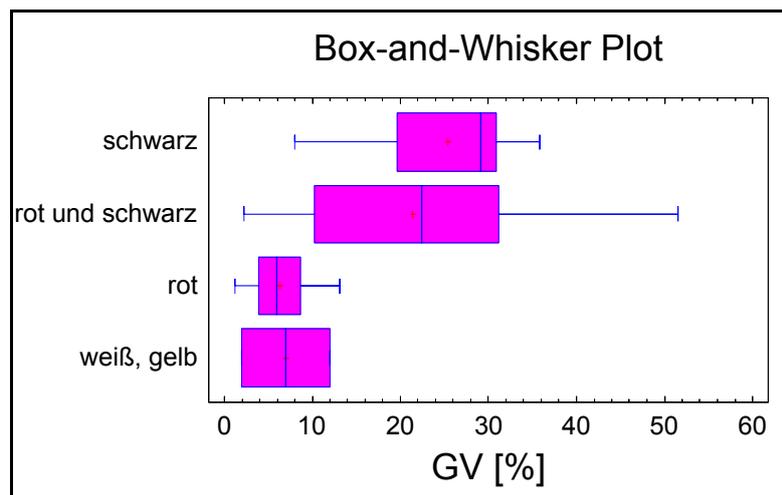


Abb. 2: Beziehung zwischen Farbe der Grobberge und dem Glühverlust (Halde OEL 10)

Ergebnisse der Diskriminanzanalyse bestätigen z. B. für die Halde OEL 10, dass ausgehend von der Farbe des Bergematerials für ca. 30 % des Haldenvolumens von deutlichen Kohlegehalten und somit einem weiteren Brandpotenzial auszugehen ist.

Zur chemischen Charakteristik

Ein erhöhter Kohleanteil in den Bergeproben führt dazu, dass diese signifikant mehr Pb, Cd und PAK führen als kohlefreie Bergeproben. Eine etwas undeutlichere positive Korrelation besteht zwischen dem Kohlegehalt und den Gehalten an As, Mo, Hg, Zn, Chlorid und Thallium. Eindeutig negativ korreliert mit den Kohlegehalten sind die Gehalte an Cr und Ni. Cr und Ni sind als lithogene Elemente zu bezeichnen und stammen i. w. aus dem Schieferanteil der Bergeproben. Pb, Cd, As und Zn sind chalkogene Elemente und korrelieren mit den Sulfidanteilen aus der Kohle.

Tab. 4: Ergebnisse der Substratuntersuchungen Halden ZWI 10 und ZWI 45

Probenmaterial	n	TR	GV	As	Pb	Cd	Cr	Cu	Ni	Mo	Hg	Zn	
		[%]	[%]	[mg/kg]									
grauer Schieferton ¹	ZWI 10	22	88,5	25,3	255	155	4,05	38	53	51,0	10,10	0,45	305
rotgebrannter Schieferton ¹		16	88,2	7,2	335	103	1,75	54	48	55,5	8,15	0,13	125
weißgebrannter Schieferton ¹		1	82,1	9,4	800	200	1,90	43	32	37,0	16,40	0,14	370
Kohleschlamm		3	69,2	38,4	96	83	0,42	29	31	58,0	11,30	0,46	85
Kesselschlacke		2	87,3	19,7	275	79	8,20	49	56	72,0	13,25	1,30	400
Teufberge		2	96,2	15,1	101	58	1,84	42	44	51,0	5,45	0,22	270
Boden über rotem Schieferton		4	84,9	13,6	360	115	1,08	61	41	38,0	9,85	2,35	110
Boden über grauem Schieferton		9	81,5	24,2	250	130	1,50	38	41	30,0	6,90	0,75	160
Bauschutt		2	87,5	6,4	33	150	1,30	32	66	32,5	2,50	0,51	265
Auesedimente		6	77,7	12,1	34	40	1,63	38	24	43,0	1,95	0,13	195
grauer Schieferton ¹	ZWI 45	27	84,1	38,5	81	1.400	33,00	24	58	35,0	3,70	1,10	3.400
rotgebrannter Schieferton ¹		2	85,5	4,0	140	600	10,35	28	47	48,5	5,80	0,12	1.700
weißgebrannter Schieferton ¹		2	86,6	15,9	150	290	11,05	31	43	45,5	3,30	0,15	1.500
Kohleschlamm		8	71,3	43,8	26	485	6,65	16	34	24,5	2,50	0,37	1.050
sandige Waschabfälle		8	80,8	45,2	69	2.000	51,50	21	69	32,5	2,95	1,25	5.750
Teufberge		1	99,0	15,8	22	80	3,30	28	31	58,0	1,00	0,16	280
Lehm (Abdeckung)		7	83,7	10,7	20	170	3,40	44	24	34,0	1,10	0,24	420
Mutterboden (Abdeckung)		11	78,3	22,6	48	590	14,00	35	62	60,0	2,90	0,69	1.100
Auelehm		7	78,8	6,6	12	29	0,36	49	20	39,0	0,50	0,08	120
Auesedimente		7	80,7	4,6	11	21	0,66	54	21	52,0	0,80	0,13	150
Prüfwerte nach BbodSchV ²	-	-	-	125	1.000	50	1.000	-	350	-	50	-	

- Maximum-Medianwerte haldenspezifische Ablagerungen
 - Maximum-Medianwerte nicht haldenspezifische Ablagerungen

¹Grobberge/Waschberge

²als Vergleichswert bezogen auf Nutzung als Park- und Freizeitanlage, Wirkungspfad Boden Mensch

Die Ergebnisse der Substratuntersuchungen der zwei Zwickauer Halden sowie der der Oelsnitzer Halde sind in Tab. 4 und 5 zusammengestellt.

Die chalkophilen Elemente Pb, Cd, Zn und Cu sind in den Grob-/Waschbergen mit Maximumwerten vertreten. Dabei werden die sandigen Waschabfälle zu den Waschbergen gerechnet. Die Grob-/Waschberge zeigen zusammen mit dem Kohleschlamm die höchsten Kohlegehalte. Während das im Nebengestein der Kohle enthaltene Sulfid durch den Mahl- und Waschprozess im Kohleschlamm relativ abgereichert wurde, sind in den Grobbergen noch die höchsten Elementgehalte der chalkophilen Elemente vorhanden.

Bemerkenswert sind die vergleichsweise hohen Gehalte an As, Cr und Hg im oberflächennahen Bodenhorizont der rotgebrannten Schiefertone. Die roten Schiefertone selbst weisen die zweithöchsten Gehalte an As, Cr, und Ni auf.

Die Gehalte an Ni und Mo sind vor allem im grauen Schiefertone hoch.

Aus den unterschiedlichen Elementgehalten der Halden ZWI 10 und ZWI 45 wird die Hypothese abgeleitet, dass die höheren Elementgehalte an Pb, Cd und Zn vornehmlich aus der tieferen Flözgruppe der Zwickau Schichten stammen.

Die getrennte Korrelationsanalyse von ungebranntem und gebranntem Haldenmaterial am Beispiel der Halde ZWI 10 zeigte folgende Ergebnisse (K größer 0,6):

ungebrannt (n=26): As - Pb, Zn - Cd , Cu - Cr
gebrannt (n=18): Ni - Cu - Zn, Mo - As - Pb, GV - Pb.

In Halde OEL 10 weisen die Müllproben bzw. die Spülberge auf (Tab. 5) die geringsten Trockenrückstände auf. Die mehr grobkörnigen und demzufolge weniger Wasser speichernden Grobberge hingegen zeigen deutlich höhere TR zwischen 88 und 92 %. In diesen Bereich fallen auch die trockenen Hangschutte und das Rotliegende, wobei die Auensedimente naturgemäß eine etwa höhere Feuchtigkeit besitzen.

Die höchsten mittleren Gehalte an As, Pb, Cd und Zn führen die Grobberge mit deutlichem Kohleanteil (Tab. 5), was auf ihre Sulfidführung (Arsenopyrit, Bleiglanz und Zinkblende) zurückzuführen ist.

Die Proben mit deutlicher Asche- und Schlackeführung (Verbrennungsprodukte) zeigen die höchsten Gehalte aller Substrate an Cr, Cu und Ni bzw. Mo und Hg.

Die geringsten Elementgehalte sind in den liegenden Gesteinen der Grobberge zu finden - Auensedimenten, Hangschutt und/oder dem anstehenden Rotliegenden. Lediglich das Element Cr (Cr_{gesamt}) wurde in allen Substraten in ungefähr gleicher Größenordnung nachgewiesen.

Für die Halde OEL 10 lässt sich z. B. in der Korrelationsmatrix die Elementassoziation As, Pb, Cd, Mo und Zn deutlich ablesen. Die Assoziation der lithogenen Elemente tritt nicht so deutlich hervor.

Tab. 5: Ergebnisse der Substratuntersuchungen Halde OEL 10

	n	TR %	As mg/kg	Pb mg/kg	Cd mg/kg	Cr mg/kg	Cu mg/kg	Ni mg/kg	Mo mg/kg	Hg mg/kg	Zn mg/kg	GV %
Grobberge	110	88.3	249.9	892.5	7.27	46.2	66.0	64.2	6.17	2.32	1097	14.6
Grobberge, K=3	28	89.1	253.5	1163.2	13.20	36.4	74.9	53.1	6.29	4.13	1600	31.7
Phyllit	4	91.5	71.3	252.5	1.53	35.3	53.5	42.8	2.05	1.63	225	12.3
Spülberge	4	75.5	44.3	222.5	4.58	27.5	79.8	51.0	3.95	1.08	750	23.6
Asche / Schlacke	15	86.0	191.3	769.5	4.17	49.4	87.3	77.3	8.51	5.23	564	15.2
Müll	4	64.6	49.0	279.0	1.77	34.3	53.3	36.8	2.38	1.66	475	18.5
oberste Proben	22	83.6	120	437	2.71	38.6	62.0	46.9	5.12	5.67	431	18.1
Auensediment	4	80.7	35.5	61.5	0.91	37.0	19.0	33.8	0.84	0.18	195	6.5
Hangschutt	3	88.3	21.7	32.3	1.95	31.7	14.7	36.7	0.40	0.05	339	3.8
Rotliegendes PW Boden	15	89.5	29.3 125	31.1 1000	0.93 50	35.3 1000	18.7	39.3 350	0.50	0.10	172	3.7

- ... nur Werte < BG
- hohe (maximale) arithmetische Mittelwerte
- geringe (minimale) arithmetische Mittelwerte

PW Direktpfad Boden→Mensch, Flächennutzung als Park- und Freizeitanlage, nach BBodSchV und LfUG 6/2002

Tab. 6: Korrelationsmatrix Spurenelemente im Feststoff (Halde OEL 10, n=160)

	lgAs	Pb	lgCd	Cr	Cu	Ni	Mo	lgHg	lgZn
lgAs	1.00								
Pb	0.70	1.00							
lgCd	0.64	0.64	1.00						
Cr	0.45	0.29	0.30	1.00					
Cu	0.53	0.42	0.54	0.31	1.00				
Ni	0.41	0.30	0.51	0.55	0.45	1.00			
Mo	0.70	0.49	0.50	0.38	0.71	0.53	1.00		
lgHg	0.43	0.43	0.33	0.01	0.57	0.01	0.52	1.00	
lgZn	0.60	0.65	0.88	0.38	0.46	0.62	0.47	0.22	1.00

- signifikante Korrelationskoeffizienten

5.1.2 Untersuchung der Schwefelmodifikationen

Um das Vorhandensein verschiedener Schwefelspezies zu prüfen, wurden die Proben der Halde OEL 10 sowohl auf ihren Gesamt-Schwefelgehalt als auch auf ihren Gehalt an mineralischem Disulfidschwefel untersucht.

- **Gesamt-Schwefel**

Abb. 3 zeigt die Gesamt-Schwefelgehalte der untersuchten Proben.

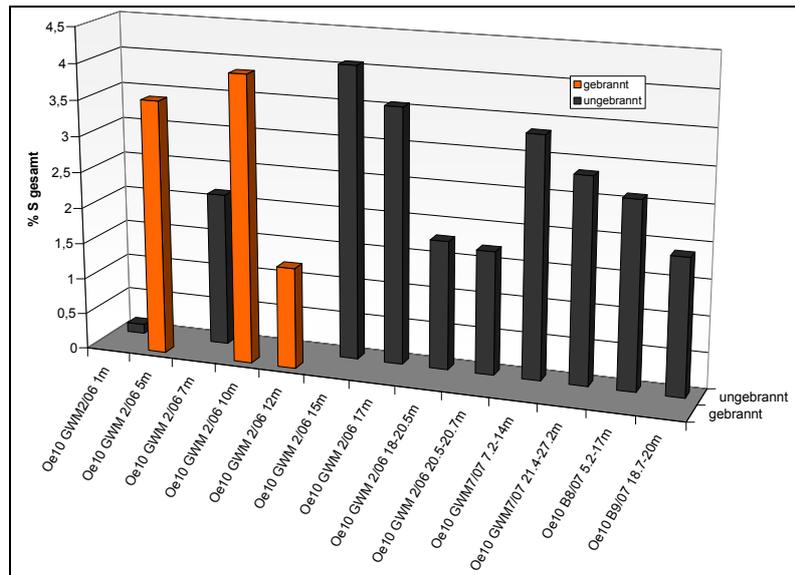


Abb. 3: Ergebnisse der Gesamt-Schwefelbestimmung in Proben der Halde OEL 10

Insgesamt enthalten die Proben, mit Ausnahme der obersten Schicht, etwa 1.4-4 % Gesamt-Schwefel. Die gebrannten und ungebrannten Schichten lassen sich bezüglich ihres Gesamt-Schwefelgehaltes nicht klar voneinander unterscheiden. Bei beiden Materialarten gibt es sowohl Proben mit hohen als auch niedrigen Gesamt-Schwefelgehalten. Die Gehaltsunterschiede ergeben sich aus

- den ursprünglichen unterschiedlichen S-Gehalten der verschiedenen Kohlenflöze
- dem Aufbereitungsprozess der Kohlen (z.B. über Dichtentrennung)
- der früheren Lagerung dieser Schichten als jeweils oberste Abdeckung der Halde.

Aus der Gesamt-Schwefelbestimmung ist abzuleiten, dass bei einer vollständigen Umsetzung des primären Sulfidschwefels durch Oxidation bzw. Verwitterung Sulfatgehalte der Haldenmaterialien von bis zu 12 % zu erwarten sind, was erhebliche Sulfatfrachten in den Sickerwässern ergibt. Dieses Ergebnis korreliert sowohl mit den realen Messwerten in den Grund- und Sickerwässern als auch mit den Eluatensäulenversuchen.

- **Disulfidschwefel**

Abb. 4 zeigt die Disulfidgehalte in Abhängigkeit vom gebrannten oder ungebrannten Zustand des Haldenmaterials. Es ist eine sehr deutliche Abhängigkeit des Disulfidgehaltes vom gebrannten oder ungebrannten Zustand zu erkennen. Während die ungebrannten, kohligen Materialien (mit Ausnahme der obersten Schicht) wechseln-

de Disulfidgehalte zwischen 0,76 und 2,32 % enthalten, sind in den gebrannten, roten Schichten nur noch 0,036-0,070 % Disulfid-Schwefel nachweisbar. Es ist zu vermuten, dass der Disulfidschwefel in den roten Schichten durch die Brand- bzw. dadurch hervorgerufenen Oxidationsprozesse weitgehend in Sulfate umgewandelt worden ist.

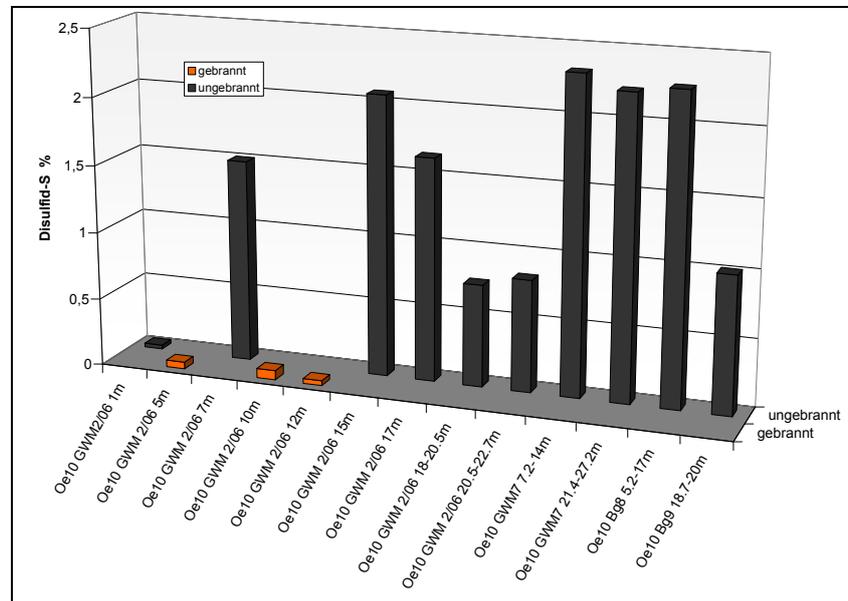


Abb. 4: Ergebnisse der Disulfidschwefel-Bestimmung in Proben der Halde OEL 10

- **Oxidations- bzw. Verwitterungsgrad**

Abb. 5 zeigt den Oxidations- bzw. Verwitterungsgrad der einzelnen Haldenproben. Der Oxidationsgrad wurde aus dem Verhältnis von Disulfid- zu Gesamtschwefel berechnet. Alle gebrannten (roten) Proben weisen einen Oxidationsgrad von 97,5-98,6 % auf; sie sind also fast vollständig umgesetzt. Die kohligen Proben, mit Ausnahme der Oberflächenproben, besitzen Oxidationsgrade zwischen 12,8 und 57,75 %. Damit ist in geologischen Zeiträumen noch mit langfristigen geochemisch und mikrobiell induzierten Umsätzen und nachfolgende Sulfatfreisetzung zu rechnen.

Die Untersuchung der Schwefelmodifikationen in den Haldenproben ergab somit einen eindeutigen Zusammenhang zwischen dem gebrannten (roten) bzw. ungebrannten (kohligen) Zustand der Proben und deren Disulfidgehalt. Die ungebrannten Proben enthalten wesentlich höhere Disulfidgehalte zwischen 0,76-2,32 % im Vergleich zu den gebrannten Proben mit 0,036-0,07 % Disulfidschwefel. Damit enthalten die ungebrannten Proben etwa 1,4-4,35 % an Pyrit oder anderen mineralischen Metallsulfiden.

Da die ungebrannten (kohligen) Proben lediglich zu 12,8-57,75 % oxidiert bzw. verwittert sind, ist zukünftig noch mit einer Sulfatfreisetzung „in geologischen Zeiträumen“ zu rechnen. Entsprechend den gemessenen Gehalten an Gesamtschwefel können theoretisch bis zu 12 Ma-% Sulfat in der Halde generiert werden.

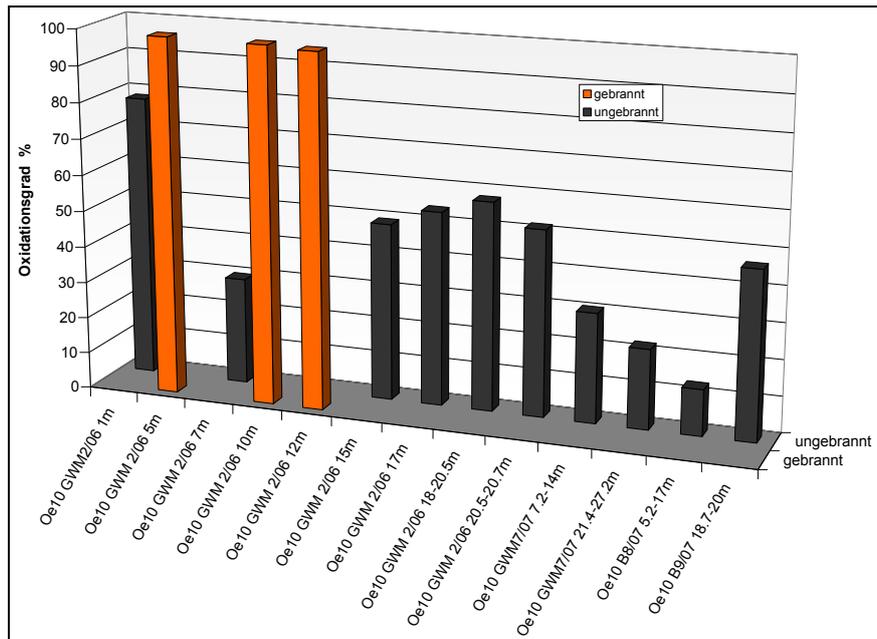


Abb. 5: Berechneter Oxidations- bzw. Verwitterungsgrad des Disulfidschwefels in den Proben der Halde OEL 10

Tab. 7: Physikochemische Parameter und Makrokomponenten im Eluat, Halden ZWI 10 und ZWI 45

Probenmaterial	n	pH	Lf	Cl	SO ₄	Ca	K	Mg	Na
		[-]	[µS/cm]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]
grauer Schiefer-ton	22	4,7	1.900	5,0	1.200,0	350,0	10,5	28,0	2,4
rotgebrannter Schiefer-ton	16	6,0	1.160	5,0	510,0	116,0	4,0	2,7	1,5
weißgebrannter Schiefer-ton	1	6,2	2.300	25,0	1.600,0	520,0	7,6	17,0	7,9
Kohleschlamm	3	6,0	1.900	5,0	1.200,0	350,0	7,6	17,0	2,4
Kesselschlacke	2	5,0	1.850	3,0	1.200,0	400,0	4,7	10,2	1,9
Teufberge	2	7,3	995	74,5	395,0	77,5	24,5	20,5	47,0
Boden über rotem Schiefer-ton	4	5,3	63	4,0	15,0	3,8	2,6	0,5	0,6
Boden über grauem Schiefer-ton	9	5,9	78	4,0	13,0	5,0	4,6	1,0	0,8
Bauschutt	2	7,6	366	11,5	104,5	34,2	10,0	3,5	20,2
Auesedimente	6	7,1	355	22,5	101,5	14,0	8,8	13,7	14,0
grauer Schiefer-ton	27	6,7	270	3,0	100,0	26,0	2,5	4,4	1,1
rotgebrannter Schiefer-ton	2	7,2	84	2,5	20,5	9,5	3,0	1,2	0,9
weißgebrannter Schiefer-ton	2	7,1	100	2,5	33,5	9,2	3,6	1,8	2,4
Kohleschlamm	8	7,5	378	4,5	100,0	40,5	1,7	8,8	1,5
sandige Waschabfälle	8	7,1	700	3,5	307,5	98,5	2,7	7,6	1,0
Teufberge	1	7,7	94	4,0	26,0	12,0	2,7	2,9	1,2
Lehm (Abdeckung)	7	7,1	94	3,0	40,0	13,4	1,4	1,4	1,6
Mutterboden (Abdeckung)	11	7,7	130	3,0	9,0	17,0	2,7	1,3	1,5
Auelehm	7	7,1	328	5,0	94,0	13,7	2,0	8,5	9,6
Auesedimente	7	7,6	160	5,0	34,0	17,1	2,4	2,7	4,6

- Maximal-Medianwerte

5.1.3 Eluatanalysen

Die Ergebnisse der Eluatuntersuchungen der Halden ZWI 10 und ZWI 45 sowie OEL 10 sind nachfolgend zusammengefasst.

Physikochemische Parameter und Hauptkomponenten

Die pH-Werte in den S4-Eluaten (Elution Wasser/Feststoff im Verhältnis 10/1 nach DIN 38414-4) bei den haldenspezifischen Ablagerungen zeigen Werte zwischen 4,7 und 7,7 (Tab. 10 und 11). Bei den grauen ungebrannten Schiefertönen liegen die pH-Werte am niedrigsten. Die Leitfähigkeiten schwanken zwischen 84 und 2.300 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Die höchsten Leitfähigkeiten weisen die Eluate der grauen Schiefertone sowie die Kohleschlämme und die sandigen Waschabfälle auf.

Dies spiegelt sich auch in den Gehalten der Makroelemente wieder. Die ungebrannten Schiefertone wiesen höhere Gehalte auf als die gebrannten Schiefertone. Besonders wird dies bei Halde ZWI 10 deutlich. Dort erreichen die Eluatgehalte der gebrannten Schiefertone lediglich 50 % der der ungebrannten.

Die Oberböden der Halde ZWI 10 werden durch deutlich geringere Eluierbarkeiten charakterisiert.

Tab. 8: Physikochemische Parameter und Makrokomponenten im Eluat, Halde OEL 10

	n	pH	pH _{CaCl₂}	LF	LF _F	Cl	SO ₄	Ca	K	Mg	Na
				[$\mu\text{S}/\text{cm}$]		[mg/l]					
Grobberge	110	5.8	4.8	799	1343	4.1	475.0	114.2	5.5	18.1	3.0
Grobberge, K=3	28	5.3	4.1	995	1715	6.75	586.7	150.1	4.3	18.8	3.2
Phyllit	4	7.1	6.3	101	106	3.0	14.3	8.7	3.4	1.7	1.3
Spülberge	4	6.9	5.8	108	108	3.3	15.5	7.7	5.4	1.7	1.5
Asche/Schlacke	15	6.0	4.5	470	644	4.1	246.9	70.6	3.2	4.2	1.8
Müll	4	7.1	5.9	1590	1439	25.0	542.5	118.3	29.6	27.2	35.4
Auensediment	4	6.5	5.0	217	331	3.4	83.0	8.3	4.7	7.7	1.9
Hangschutt	3	5.7	5.3	296	382	1.3	140.3	6.3	5.1	9.5	2.0
Rotliegendes	15	6.8	5.1	157	290	2.4	58.4	5.3	3.9	6.9	2.1

- hohe (maximale) arithmetische Mittelwerte
- geringe (minimale) arithmetische Mittelwerte

Die S4-Eluate in Halde OEL 10 sind alle als schwach sauer bis neutral zu bezeichnen (Tab. 8). Der minimale mittlere pH-Wert wurde mit 5.3 in den stark kohleführenden Grobbergen gefunden. Die Kohleführung bewirkt, dass auch alle Grobberge im Schnitt einen schwach sauren pH-Wert von 5.8 aufweisen.

Im Schnitt neutral sind die Eluate der phyllithaltigen Berge, der Spülberge, der Müllproben und des Rotliegendes.

Die von den Feststoffproben im CaCl_2 ermittelten pH-Werte liegen naturgemäß etwas bis deutlich unter denen mit destilliertem Wasser hergestellten S4-Eluaten. Der geringste mittlere pH-Wert (CaCl_2) wurde auch hier für die stark kohleführenden Grobberge gefunden (pH 4.1), die höchsten – für die phyllithaltigen Berge und die Müllproben.

Im Allgemeinen ist im Eluat von einer Na-K-Cl- und einer Ca-Mg-SO₄-Assoziation auszugehen. Die Leitfähigkeit im Eluat wird mehr von der letzteren, die im Schnitt die 10- bis 20fach höheren Gehalte im Eluat aufweist, gebildet. Auch ist ihr Einfluss auf den pH-Wert des Eluates deutlich höher, als der der Na-K-Cl-Assoziation.

Schwermetalle und Arsen

Nachfolgend werden die Schwermetallgehalte und die Gehalte an As der untersuchten Halden im Eluat aufgeführt.

Tab. 9: Schwermetallgehalte und der Gehalte an As im Eluat, Halden ZWI 10 und ZWI 45

Probenmaterial	n	As	Pb	Cd	Cr	Cu	Hg	Mo	Ni	Zn
		[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[mg/l]	[µg/l]	[µg/l]
grauer Schieferton	22	3,5	5,5	37	2	15	0,2	0,005	280	1.450
rotgebrannter Schieferton	16	2	1	2	2	10	0,2	0,01	10	92
weißgebrannter Schieferton	1	5	2	18	2	10	0,2	0,005	40	1.300
Kohleschlamm	3	3,5	2	18	2	13	0,2	0,005	40	1.300
Kesselschlacke	2	3,5	4	66	2	10	0,2	0,005	100	3.810
Teufberge	2	1,5	1	1	2	10	0,2	0,006	10	16
Boden über rotem Schieferton	4	1	2	1	2	10	0,2	0,012	10	42
Boden über grauem Schieferton	9	2	1	1	2	10	0,2	0,005	10	100
Bauschutt	2	10	1	1	2	10	0,2	0,005	10	3
Auesedimente	6	1	1	1	2	10	0,2	0,005	10	49,5
grauer Schieferton	27	1	10	37	10	2	0,2	0,05	20	3.600
rotgebrannter Schieferton	2	2	1	1	25	2	0,2	0,01	10	696
weißgebrannter Schieferton	2	5	1	3	10	2	0,2	0,005	10	615
Kohleschlamm	8	2	1	1	10	2	0,2	0,01	10	83
sandige Waschabfälle	8	1	9	8	10	2	0,2	0,005	10	829
Teufberge	1	1	1	3	10	2	0,2	0,005	10	250
Lehm (Abdeckung)	7	1	1	6	10	2	0,2	0,005	10	1.100
Mutterboden (Abdeckung)	11	5	1	1	10	2	0,2	0,005	10	75
Auelehm	7	2	1	1	10	2	0,2	0,005	10	51
Auesedimente	7	4	1	1	10	2	0,2	0,005	10	100
Prüfwerte nach BBodSchV ¹	-	10	25	5	50	50	1	0,05	50	500

- Maximal-Medianwerte

¹ als Vergleichswert bezogen auf Übergangsbereich Sickerwasser - Grundwasser, Wirkungspfad Grundwasser - Mensch

Das Austragspotenzial an Schwermetallen ist beim ungebrannten grauen Schieferton am höchsten. Signifikant sind die hohen Ni-Konzentrationen bei Halde ZWI 10 und die hohen Zn-Konzentrationen bei Halde ZWI 45. Auch Cd ist in relativ hohen Konzentrationen vertreten. Die Elemente sind jeweils durch vergleichsweise hohe mobile Anteile gekennzeichnet. Kohleschlamm und sandige Waschabfälle zeigen wie der gebrannte Schieferton, mit Ausnahme von Zn, überwiegend Konzentrationen im Bereich der Bestimmungsgrenzen.

Der Boden über grauem Schieferton weist ein deutlich geringeres Austragspotenzial als der graue Schieferton selbst auf. Die vergleichsweise geringen Feststoff- und Eluatkonzentrationen sind als Hinweis auf Elementverlagerungen durch Bodenbildung zu interpretieren.

Im Vergleich mit den quartären Auesedimenten liegen bei den ungebrannten Schiefertonen insgesamt höhere Eluatwerte vor.

Tab. 10 zeigt, dass stark kohleführenden Grobberge durch die im Mittel höchsten Gehalte an Pb, Cd, Ni und Zn im Eluat gekennzeichnet sind. Das sind auch die Elemente, die die höchsten Gehalte in den Haldensickerwässern stellen. Der höchste Medianwert an As wiederum kommt in den Spülbergen vor. Ein hoher mittlerer Zn-Gehalt im Eluat wurde auch für den Hangschutt berechnet.

Tab.10: Spurenelemente, pH-Wert und Leitfähigkeit im Eluat, Halde OEL 10

	N	pH	LF	As	Pb	Cd	Cr	Cu	Ni	Mo	Zn
			[μ S/cm]	[μ g/l]							
		AM	AM	M	M	M	M	M	M	M	M
Grobberge	110	5.8	799	1.0	1.0	15.0	1	5	10.0	2.5	552
Grobberge, K=3	28	5.3	995	3.0	18.0	32.0	1	5	140.0	2.5	2265
Phyllit	4	7.1	101	3.0	0.5	0.5	1	5	5.0	2.5	26
Spülberge	4	6.9	108	4.0	0.5	0.5	1	5	5.0	2.5	50
Asche/Schlacke	15	6.0	470	0.5	1.0	3.0	1	5	10.0	2.5	140
Müll	4	7.1	1590	3.0	1.8	2.5	1	5	30.0	2.5	165
Auensediment	4	6.5	217	0.8	1.3	7.0	1	5	27.5	2.5	513
Hangschutt	3	5.7	296	0.5	0.5	24.0	1	5	70.0	2.5	2890
Rotliegendes	15	6.8	157	0.5	0.5	0.5	1	5	5.0	2.5	68

AM - Arithmetisches Mittel

M - Medianwert

Aschen und Schlacken sowie die Müllproben fallen nicht durch erhöhte Gehalte der Spurenelemente im Eluat auf. Besonders geringe Gehalte führen die Bergeproben mit Phyllit, die Spülberge (außer As) sowie die Liegendsedimente der Halde.

Die Medianwerte von Cr, Cu, Mo und Hg im Eluat stellen Gehalte unter den jeweiligen Bestimmungsgrenzen dar.

Nennenswerte Korrelationen der Mikroelemente im Eluat konnten nur zwischen Zn und Cd (was auf ihre Herkunft aus Zinkblende hindeutet), mittelstarke Korrelationen zwischen Cd, Pb, As, Ni und Zn berechnet werden.

Eluierbare Elementanteile

Um den eluierbaren Anteil der Elemente zu bestimmen, wurden die Eluatgehalte zu den Feststoffgehalten ins Verhältnis gesetzt. Die Ergebnisse sind in Tab. 11 und 12 dargestellt.

Die Anteile eluierbarer Schwermetalle sind bei den grauen Schiefertönen (Grob-/Waschberge) am höchsten und bei den gebrannten Schiefertönen deutlich geringer (Tab. 11). Die Restgehalte sind weitestgehend immobil.

Die Untersuchungen in Halde OEL 10 (Tab. 12) zeigen, dass sich in Bezug auf die Gesamtgehalte die Elemente Cd, Ni und Zn am meisten aus den schwarz-rot-gemischten bzw. schwarzen Grobbergen eluieren lassen.

Dieses Ergebnis steht formell im Einklang mit den bisher allgemein verwendeten qualitativen Aussagen, dass die rotgebrannten Schieferberge durch den Brandprozess „inertisiert“ worden sind und aus diesem Grunde weniger Elementgehalte eluieren würden. In Auswertung der Gesamtergebnisse ist der Grund aber eher im Fehlen der Träger hoher Elementgehalte - der kohligen Bestandteile und mit ihnen der Sulfide - als in einer chemischen bzw. thermischen „Inertisierung“ zu suchen.

Tab. 11: Eluierbare Elementgehalte haldentypischer Schwermetalle und As, Halden ZWI 10 und ZWI 45

Probenmaterial	n	As	Pb	Cd	Ni	Zn	
		[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	
grauer Schieferton	ZWI 10	22	0,01	0,04	9,14	5,49	4,75
rotgebrannter Schieferton		16	0,01	0,01	0,86	0,18	0,73
weißgebrannter Schieferton		1	0,01	0,01	9,47	1,08	3,51
Kohleschlamm		3	0,04	0,02	42,86	0,69	15,29
Kesselschlacke		2	0,01	0,05	8,05	1,39	9,53
Teufberge		2	0,01	0,02	0,54	0,20	0,06
grauer Schieferton	ZWI 45	27	0,01	0,007	1,12	0,57	1,06
rotgebrannter Schieferton		2	0,01	0,002	0,10	0,21	0,41
weißgebrannter Schieferton		2	0,03	0,003	0,23	0,22	0,41
Kohleschlamm		8	0,06	0,002	0,15	0,41	0,08
sandige Waschabfälle		8	0,01	0,005	0,16	0,31	0,14
Teufberge		1	0,05	0,013	0,91	0,17	0,89

- Maximal-Medianwerte

Tab. 12: Eluierte Elementanteile für Cd, Cu, Ni und Zn, Halde OEL 10

	n	Cd		Cu		Ni		Zn	
		[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
		AM	M	AM	M	AM	M	AM	M
Grobberge	110	7.4	2.4	0.5	0.08	4.3	0.3	4.6	0.9
Grobberge, K=3	28	7.9	2.2	1.0	0.08	9.8	3.8	5.9	1.7
schwarz	18	3.4	1.4	0.1	0.08	3.0	0.6	2.2	1.6
rot/schwarz	35	10.2	4.4	1.0	0.08	8.5	0.5	6.6	1.7
rot	55	7.2	2.6	0.3	0.08	2.1	0.1	4.2	0.5
weiß/gelb	1	0.6	0.6	0.1	0.13	0.1	0.1	0.4	0.4

AM - arithm. Mittelwerte

M - Medianwerte

Die an den kohlehaltigen Substraten nachgewiesene Vormacht des Sulfidschwefels über den Sulfatschwefel (s. Kap. 5.1.2) bzw. die Übermacht des Sulfat- über dem Sulfidschwefel für die rotgebrannten Berge lassen die Ergebnisse der Elutionsuntersuchungen plausibel erscheinen, da in den kohleführenden, nicht gebrannten Bergen die Sulfide noch vorhanden sind (Umwandlung in Sulfat lediglich durch Oxydations- und mikrobiologische Vorgänge). Die rotgebrannten Berge hingegen sind durch die Branderscheinungen einer natürlichen „Röstung“ ausgesetzt worden, bei der die Sulfide in Sulfate umgewandelt wurden. Die Metalle der schwerlöslichen Sulfide sind danach verstärkt löslich.

In den einzelnen Aufschlüssen fallen aber immer wieder zusammenhängende mächtigere Bereiche auf, die sehr hohe eluierbare Elementanteile zwischen 10 und 30 % aufweisen. Diese Bereiche beinhalten genau so viele kohlehaltige wie kohlefreie Proben, genau so viele rote wie schwarz-rot-gemischte Proben und bis auf wenige Ausnahmen nur Grobberge.

Die bisherigen Untersuchungen konnten nicht klären, worin der Grund für diese hohen eluierbaren Elementanteile liegt.

5.1.4 Säulenversuche und sequentielle Extraktion

Die intermittierend betriebene Säulenversuche zur abiotischen Elution sowie die Substratuntersuchungen mittels sequenzieller Extraktion ergaben für das rote (durchgebrannte) und das schwarze (nicht gebrannte, deutlich kohlehaltige) Grobbergematerial folgende Ergebnisse:

- **Säulenversuche**

Die eluierbaren Stoffmengenanteile (ESA), bezogen auf die „wasserlöslichen“ Fraktionen 1 (mobil) und 2 (spezifisch adsorbiert) aus der sequenziellen Extraktion, sind für Cd, Zn und Naphthalin in den rotgebrannten Grobbergen deutlich größer als in den schwarzen Substraten (Tab. 16). Dadurch ist für diese Elemente bzw. Stoffe in den roten Grobbergen auch die eluierte Fracht je m² kontaminierte Fläche (Fracht_s) sowie die Elutionsrate je kg Substrat (FE_s) deutlich größer, als in den schwarzen. Weiterhin ist die auf eine GWN von 246 mm bezogene Dauer des Schadstoffaustrages in den roten Substraten deutlich geringer, als in den schwarzen. Die Schadstoffaustragsdauer ist für Cd mit 700 Jahren bzw. Zn mit 436 Jahren für die schwarzen Substrate um 10 bzw. 3mal länger einzuschätzen als für die rotgebrannten Substrate.

Für Cu sind die Verhältnisse gerade umgekehrt.

Der wasserlösliche Anteil von Ni der in den Säulenversuchen untersuchten Substrate ist nach 10 APV vollständig ausgetragen. Die Dauer des Schadstoffaustrages wird mit 16 bzw. 17 Jahren angegeben.

Die organischen Komponenten verhalten sich adäquat zu Zn und Cd. Für sie ist aber im Gegensatz zu den genannten Elementen charakteristisch, dass messbare Elutgehalte jeweils zwischen dem 3. und 6. APV (AOX) bzw. 7. bis 9. APV auftreten, zum Anfang und Ende der Versuche aber jeweils Gehalte an bzw. unter der Nachweisgrenze.

- **sequenzielle Extraktion**

Abb. 6 und 7 zeigen die Ergebnisse der sequenziellen Extraktion am Beispiel der Proben aus dem Revier Lugau/Oelsnitz (Tab. 14).

Tab. 13: Zusammengefasste Ergebnisse der Säulenversuche

	Substrat	Cd	Cu	Ni	Zn	AOX	Naphthalin
ESA Eluierbare Stoffmengenanteile [%]	rot	20	4	100	11	0,11	7
	schwarz	2	32	100	4	0,01	2
Fracht_s eluierte Frachten [mg/(m ² * a)]	rot	138*	7,1	11,6	4994	0	4,9
		44**	6,6	0,0	1397	2,5	12,3
	schwarz	32*	11,8	0	1609	0	0
		12**	8,4	0	494	4,92	0
FE_s Elutionsrate [mg/(kg * a)]	rot	0,059	0,004	0,007	1,962	0,004	0,000005
	schwarz	0,013	0,005	0,0006	0,571	0,0006	0,000003
t_{E, VR} Dauer des Schadstoffaustrages [a]	rot	86	488	17	154	16544	263
	schwarz	700	50	16	436	226948	649

* 1. ausgetauschtes Porenvolumen APV

** 10. ausgetauschtes Porenvolumen APV

Tab. 14: Proben für die sequentielle Extraktion der Halde OEL 10

Nr. Labor	Aufschluss	Probe	von [m]	bis [m]	Kohlgehalt	Farbe	Substratzusammensetzung
I	RKS 10/06	BP 3	1,80	4,80	viel	grau	Grobberge, Schluffstein
III	RKS 10/06	BP 6	8,70	10,00	viel	grau	Grobberge, Schluffstein
IV	GWM 2/06	BP 8	12,00	15,00	viel	grau	Grobberge, Schluffstein
II	RKS 10/06	BP 4/5	4,80	8,70	ohne	rötlich	Grobberge, Schluffstein und Aschen/Schlacken
V	GWM 2/06	BP 12	22,70	24,30	ohne	rötlich	Grobberge, Schluffstein und Sandstein

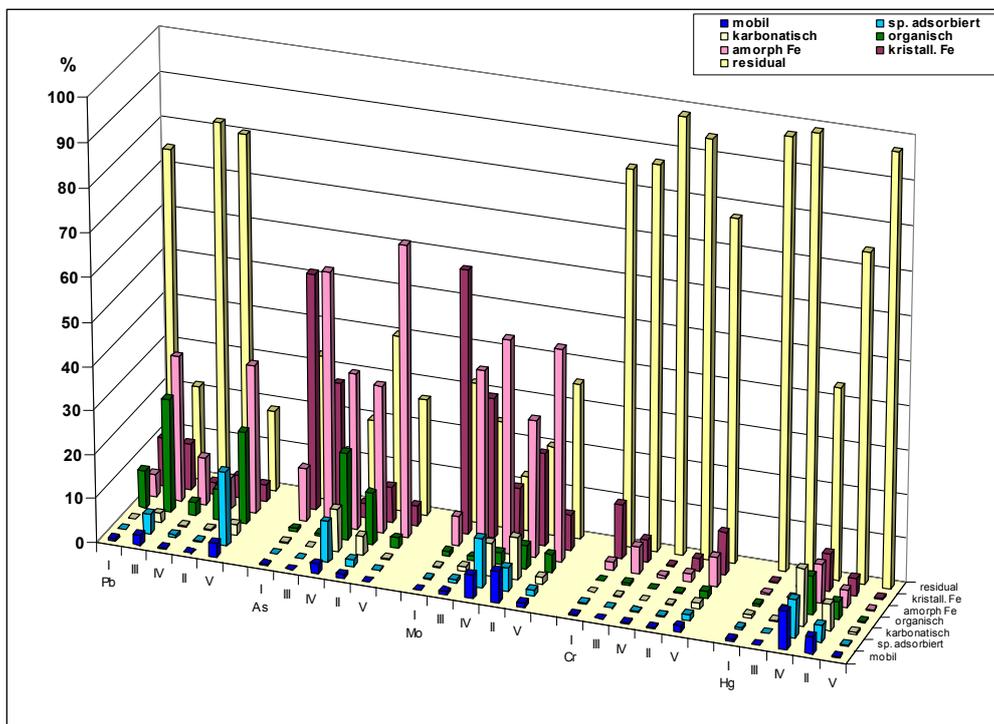


Abb. 6: Element- und probenspezifische Darstellung der sequenziellen Extraktion der Elemente Pb, As, Mo Cr und Hg für die Proben aus der Halde OEL10

Nach den Ergebnissen der sequenziellen Extraktion kann man sich in ihrem Bindungsverhalten deutlich voneinander unterscheidende Elementassoziationen aushalten:

- Cd, Ni und Zn: merkliche bis hohe mobile und spezifisch adsorbierte Anteile, zum Teil auch deutlich an Fe-Oxide adsorbiert; Elemente weisen auch die höchsten Gehalte in den Haldensickerwässern auf.
- As und Mo: sind häufiger an Fe-Oxide gebunden als in der Residualfraktion.
- Cu und Pb: wesentliche Elementanteile sind organisch und an den Fe-Oxiden gebunden.
- Hg und Cr: sind fast ausschließlich in der Residualfraktion gebunden.

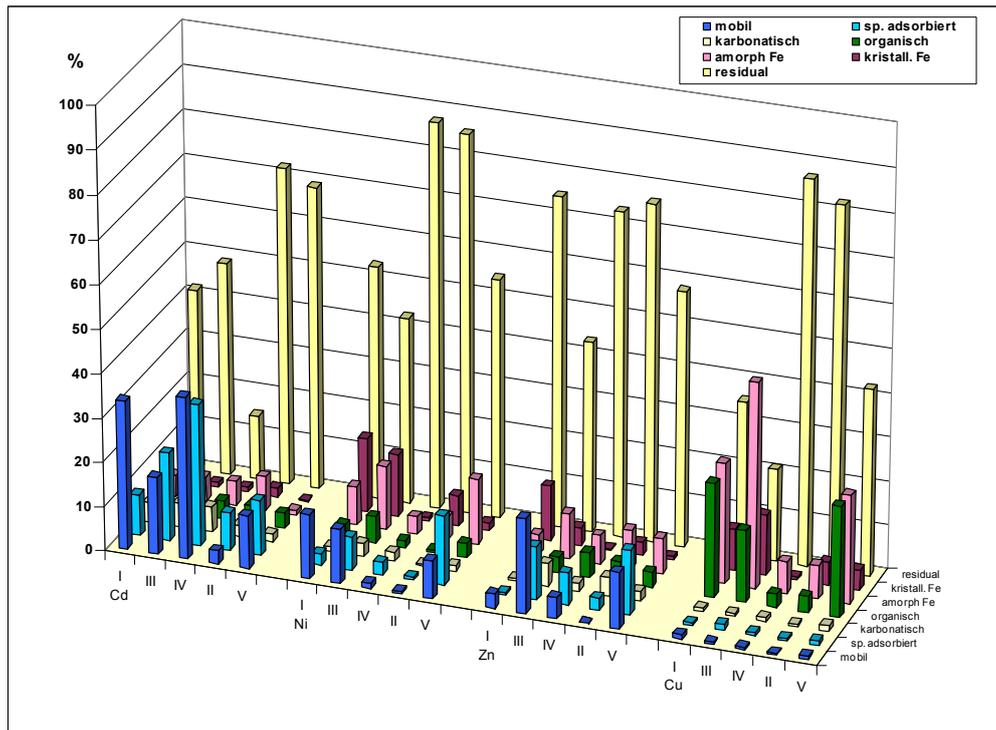


Abb. 7: Element- und probenspezifische Darstellung der sequenziellen Extraktion der Elemente Cd, Ni, Zn und Cu für die Proben aus den Halde OEL 10

Die Bindung des As an die Fe-Oxide ist bekannt, die deutliche Bindung des Mo an die Fe-Oxide eher überraschend.

Elementspezifische und probenspezifische Auswertungen haben in beiden Revieren nicht die erwarteten deutlichen Unterschiede zwischen dem roten und dem grauen Bergematerial gezeigt. Es deutet sich aber die Tendenz an, dass das rote Material höhere mobile Hg-Gehalte aufweist und das graue Material höhere mobile Zn- und Cd-Anteile.

5.1.5 Mikrobiologische Untersuchungen

Thiobacillus denitrificans, ein Bakterium, das sowohl Pyrit als auch andere reduzierte Schwefelverbindungen unter Nitratreduktion oxidieren kann, ist an allen Standorten stark verbreitet. Diese Bakterien kommen v. a. an Standorten mit moderat saurem pH-Wert vor (pH 3-6) und tragen durch ihre Mineraloxidation zur Entstehung und Mobilisierung von Sulfat, zu einer Absenkung des pH-Wertes sowie zur Mobilisierung von Schwermetallen bei.

Es wurde festgestellt, dass die *Thiobacillen* nicht nur in den Haldenkörpern selbst vorkommen, sondern auch in den entsprechenden Wasser- und Sedimentproben. Besonders intensiv kommen sie an Standorten mit Nitratintrag vor, z. B. in Grund- und Sickerwässern und den Bachsedimenten.

Die Quantifizierung der eisen- und sulfatreduzierenden Bakterien hat gezeigt, dass an allen Standorten ein relativ ausgewogenes Verhältnis zwischen *Thiobacillen* und Eisen- und Schwefelreduzierern besteht, so dass die oxidative Pyritverwitterung, Versauerung und Schadstofffreisetzung in nicht so starkem Maße voranschreitet wie an anderen, nicht rekultivierten Haldenstandorten mit offenen Kippenschichten.

Die mikrobiologischen Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Halde OEL 10

Entsprechend dem pH-Wert und Redox-Zustand der Halde kommt es verstärkt zu einer Freisetzung von Salzen und Schwermetallen. Dies spiegelt auch die Zusammensetzung an oxidierenden und reduzierenden Mikroorganismen am Haldenstandort wider. Es überwiegen oxidierende Prozesse. Nur in den Sedimenten stehender Sickerwässer mit stärkerem Detritus überwiegen reduzierende Prozesse. In den Sickerwässern selbst wurde durch den Einfluss des nährstoffreichen Detritus ein Überwiegen reduzierender Prozesse festgestellt (Abb. 8). In den Grundwässern wurde ein zahlreiches Vorkommen an Eisenreduzierern beobachtet, was vermutlich durch einen hinreichenden Gehalt an Eisen(III) und Nährstoffen verursacht wird. Die Dominanz oxidierender Prozesse führt zu einer biogeochemischen Bildung von sauren Wässern, einem Anstieg des Redoxpotentials sowie der Salinität und schließlich zur Mobilisierung von gelösten Schwermetallen. Der Prozess der zunehmenden Versauerung spiegelt sich in den chemisch-physikalischen Kenndaten wider und lässt sich auch im Säulenversuch nachvollziehen.

Da das sulfidhaltige graue Haldenmaterial erst zu 13-58% verwittert ist, können diese Prozesse bei einem weiteren Belassen des derzeitigen Zustandes noch über mehrere Jahrhunderte andauern und die Schadstofffrachten sich bei stärkerem Einsetzen des Versauerungsprozesses noch verstärken.

Halde ZWI 10

Die Halde ist vor allem durch verstärkte thermische Prozesse im Haldenkörper gekennzeichnet. Weiterhin befindet sich auf dem Haldenkörper und vor allem im Bereich des ehemaligen Kohleschlammteiches z. T. eine ehemalige Hausmülldeponie mit organikreichen Sickerwässern. Auf Grund der Deponiesickerwässer mit organischer Fracht kommt es an diesem Standort zu einer starken Erniedrigung der Redoxpotentiale im Haldenbereich selbst sowie der Sicker- und Grundwässer in der Umgebung und zur Erhöhung der pH- Werte bis in den fast neutralen Bereich. Dadurch kommt es zu einer vergleichsweise geringen Freisetzung von Schwermetallen. Der Einfluss nährstoffreicher Deponiesickerwässer führt zur Stimulation eisen- und sulfatreduzierender Prozesse (Abb. 8). Durch die Schaffung reduktiver Zonen im Einflussbereich der Deponie besitzen die Prozesse der biogeochemischen Eisen- und Schwefelmineraloxidation nur eine untergeordnete Bedeutung. In Zonen mit niedrigem Redoxpotential wurde eine Anreicherung von Sulfatreduzierern gefunden (Abb. 8).

Im Bereich mit thermischen Umsetzungen in der Halde sind biologische Prozesse offensichtlich weniger beteiligt und dominieren rein geochemische Prozesse. In den deponieunbeeinflussten Bereichen sowie im Grundwasser außerhalb der Deponiezuläufe ist ein Überwiegen biooxidierender Prozesse durch den Zulauf von Haldensickerwässern zu beobachten.

Die biogeochemischen Prozesse in der Halde zeigen, dass eine Versauerung durch nährstoffhaltige Sickerwässer verursachte reduktive Prozesse zurückgedrängt werden kann.

Halde ZWI 45

Auf der Halde befinden sich Kleingärten, die zu einem Nährstoffeintrag in die Halde führen. Weiterhin kommt es horizontal zu einem Einströmen abwasserhaltiger Grundwässer.

Durch die Abdeckung mit einer Lehmschicht und Mutterboden, den Eintrag von organischen Frachten mit den Wässern der Sickergruben in den Kleingärten bzw. durch das abwasserhaltige Grundwasser liegen mittlere Redoxpotentiale und weitgehend neutrale pH-Werte vor.

Dadurch kommt es nur zu einer geringfügigen Freisetzung von Schwermetallen. Die sulfatreduzierenden Mikroorganismen sind an diesem Standort aktiv (Abb. 8). Das Vorkommen sulfat- und eisenreduzierender Mikroorganismen ist offensichtlich abhängig vom Nährstoffzulauf (Sickergruben, Abwassereinfluss), einer Hemmung der sulfatreduzierenden Bakterien durch Schadstoffe oder einem möglichen Nährstoffmangel (z. B. Fällung von Fe-Ionen). In allen untersuchten Wasserproben wurde eher ein Überwiegen der oxidativen Prozesse beobachtet. Insgesamt wird an diesem Standort ein leichtes Überwiegen mineraloxidierender Prozesse, v. a. in den Grund- und Sickerwässern, beobachtet.

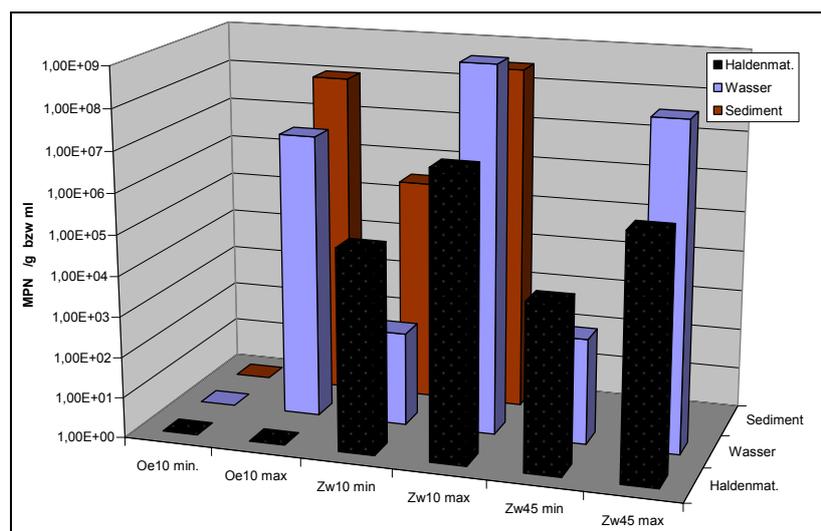


Abb. 8: Übersicht über die Minima und Maxima der Keimzahlen für sulfatreduzierende Mikroorganismen an den Halden OEL 10, ZWI 10 und ZWI 45 (MPN = Most Probable Number)

Zusammenfassend ist festzustellen, dass v. a. bei einem Eintrag organischer Stoffe in den Haldenkörper sowie in die Sicker- und Grundwässer eine Stimulation der Eisen- und Schwefelreduzierer erfolgt und damit eine Verminderung der Verwitterungsprozesse und des Schadstoffaustrages stattfindet.

An allen Haldenstandorten konnte eine gute Korrelation der gefundenen Mikroorganismen-Populationen mit den chemisch-physikalischen Parametern des jeweiligen Standortes festgestellt werden. Die Mikroorganismen können sehr gut zur Charakterisierung der biogeochemischen Vorgänge in den Halden herangezogen werden und stellen geeignete komplexe Indikatoren der unterschiedlichen Stoffströme (saline und saure Wässer, anorganische und organische Nährstoffe) in den einzelnen Halden

dar. Infolge der unterschiedlichen Umweltbedingungen an den verschiedenen Haldenstandorten zeigen die Mikroorganismen eine hohe, standortspezifische Diversität.

Die höchste Gefährdung geht zurzeit von Halde OEL 10 aus, die sich in einem fortschreitenden Versauerungsprozess befindet. Dieser kann noch über Jahrhunderte andauern. Eine Abdeckung der Halde sowie ein stärkerer Eintrag organischer Substanz an diesem Haldenstandort zur Stimulation von biogeochemischen Reduktionsprozessen wäre sinnvoll. Daraus ergibt sich eine Erniedrigung des Redoxpotentials, ein Anstieg des pH-Wertes und damit eine Immobilisierung der Schwermetalle.

Die biologische Mineraloxidation ist mit einer Wärmeentwicklung verbunden, die jedoch bei den relativ niedrigen mineralischen Disulfidgehalten nur gering ist. So ist eine leichte Erwärmung der Halden durch solche Prozesse durchaus möglich (z. B. um 5-6°C in der Halde OEL 10), eine Initiierung von Haldenbränden aber unwahrscheinlich.

5.2 Wasseruntersuchungen

5.2.1 Haldensickerwasser und Oberflächenwasser

Physikochemische Parameter

Die physikochemischen Parameter sind in Tab. 15 und 16 dargestellt.

Die **Sickerwassertemperaturen** von Halde ZWI 10 sind Anzeiger für die Beeinflussung durch den Haldenbrand. So zeigt das Sickerwasser im nördlichen Abstrom einen deutlichen Temperatureinfluss: die Temperaturen erreichen im März 2007, als die niedrigsten Oberflächentemperaturen im Kulturhausbach anstromig gemessen wurden, 12°C.

Die Temperaturen der Sickerwässer von Halde ZWI 45 zeigen vergleichsweise gering erhöhte Werte. Ein aktiver Haldenbrand ist daraus nicht abzuleiten.

Im Lugau/Oelsnitzer Revier erfolgten monatliche Temperaturmessungen der Haldensickerwässer im Laufe eines Jahres. Als Etalon wurde die Halde OEL 17 benutzt, von der bekannt ist, dass sie auch in den Wintermonaten Sickerwassertemperaturen knapp unter 20°C aufweist. Die Temperaturmessungen in den Bohrlöchern der Halden des Zwickauer und Lugau/Oelsnitzer Reviers ergaben deutliche Unterschiede. Im Haldeninneren der Halde ZWI 10 wurden 40 bis 90°C gemessen, währenddessen in Halde OEL 10 lediglich Werte zwischen 12 und 18°C festgestellt wurden.

Tab. 15: Physikochemische Parameter der Halden ZWI 10 und ZWI 45

Parameter	Probenahmedatum		22.12.06	26.03. 07	19.04.07	29.06. 07	17.09. 07
	Einheit	Probenah- mestelle					
Temperatur	[°C]	Halde ZWI 10 OF 15	6,1	2,8	-	12,2	14,1
Leitfähigkeit	[µS/cm]		620	540	-	642	500
pH - Wert	[-]		7,4	7,4	-	7,0	7,4
EH - Wert	[mV]		226	138	-	65	81
O ₂	[mg/l]		9,02	13,1	-	8,8	8,2
Temperatur	[°C]	Halde ZWI 10 OF 8	7,06	12,5	-	17,8	14,2
Leitfähigkeit	[µS/cm]		4.730	1.830	-	5.420	3.510
pH - Wert	[-]		6,6	7,1	-	7,2	7,5
EH - Wert	[mV]		188	216	-	204	219
O ₂	[mg/l]		7,1	3,6	-	7,3	8,2
Temperatur	[°C]	Halde ZWI 10 OF 16	6,7	4,7	-	13,5	11,6
Leitfähigkeit	[µS/cm]		3.260	4.890	-	3.350	3.120
pH - Wert	[-]		4,8	4,7	-	4,8	5,2
EH - Wert	[mV]		286	343	-	298	328
O ₂	[mg/l]		7,04	12,1	-	5,5	7,4
Temperatur	[°C]	Halde ZWI 10 S7	13,1	12	-	16,4	16
Leitfähigkeit	[µS/cm]		10.700	11.000	-	11.000	11.100
pH - Wert	[-]		5,6	5,8	-	5,9	5,8
EH - Wert	[mV]		146	209	-	251	265
O ₂	[mg/l]		2,75	3,6	-	2,2	2,2
Temperatur	[°C]	Halde ZWI 10 RKS 16a/07	-	6,4	-	13,8	13,8
Leitfähigkeit	[µS/cm]		-	6.950	-	7.940	7.440
pH - Wert	[-]		-	4,4	-	4,5	4,5
EH - Wert	[mV]		-	249	-	308	354
O ₂	[mg/l]		-	8,5	-	4,7	5,4
Temperatur	[°C]	Halde ZWI 45 SP 9/07	-	-	11,6	-	-
Leitfähigkeit	[µS/cm]		-	-	2.550	-	-
pH - Wert	[-]		-	-	6,5	-	-
EH - Wert	[mV]		-	-	37	-	-
O ₂	[mg/l]		-	-	0,2	-	-
Temperatur	[°C]	Halde ZWI 45 SP 10/07	-	-	10,7	-	-
Leitfähigkeit	[µS/cm]		-	-	2.580	-	-
pH - Wert	[-]		-	-	7,0	-	-
EH - Wert	[mV]		-	-	-46	-	-
O ₂	[mg/l]		-	-	0	-	-
Temperatur	[°C]	Halde ZWI 45 SP 13/07	-	-	11,5	-	-
Leitfähigkeit	[µS/cm]		-	-	3.350	-	-
pH - Wert	[-]		-	-	6,8	-	-
EH - Wert	[mV]		-	-	80	-	-
O ₂	[mg/l]		-	-	0,2	-	-

- Maximalwerte Vor-Ort-Messungen-EH-Wert unkorrigiert

Der Jahresgang der Sickerwassertemperaturen (Abb. 9) zeigt, dass sich die Sickerwässer der Halden OEL 10 und OEL 16 gleichartig wie in der brennenden Halde OEL 17 verhalten.

Somit ist belegt, dass sowohl Halde OEL 10 als auch Halde OEL 16 ein Wärmepotenzial besitzen, um die Sickerwässer das ganze Jahr über auf einem bestimmten Temperaturniveau zu halten.

Tab. 16: Physikochemische Parameter der Haldensickerwässer im Revier Lugau / Oelsnitz

Bezeichnung	n	SiWa Temp [°C]	pHVO	pH	LFVO [µS/cm]	LF [µS/cm]	O2VO [mg/l]	RedOxVO [mV]
SWH1	12	11.0	6.0	5.9	6270	6699	7.40	477
SWH2	12	10.2	7.3	7.5	1615	1762	3.18	331
SWH3	12	9.1	6.8	7.2	593	493	3.97	346
SWH7	12	11.6	3.8	3.9	3956	4114	3.99	563
SWH10	12	14.8	3.7	3.7	9613	10054	4.07	616
SWH10a	11	11.7	4.8	4.7	4303	4381	2.57	432
SWH14	12	10.4	6.9	7.2	1056	1151	6.43	468
SWH16	12	11.6	5.5	5.4	4694	5052	5.73	509
SWH17	12	19.3	5.8	6.0	12211	12783	5.91	454
SWH19	12	12.7	7.4	7.7	6733	7024	7.63	296

- maximale arithmetische Mittelwerte
 - minimale arithmetische Mittelwerte

Für die anderen Messstellen ist ein deutlicher Jahrgang der Sickerwassertemperaturen ersichtlich, der auf fehlende thermische Vorgänge in den Halden hinweist.

Bei den Bohrungen in der Halde OEL 10 sind keine aktuellen Brandherde angetroffen worden. Der Chemismus der Sickerwässer von Halde OEL 10 lässt aber vermuten, dass in ihr aktuell Oxydationsvorgänge vor sich gehen, deren exotherme Reaktionen eine gewisse konstante Haldentemperatur bedingen. Für solche grobstückige Bergehalden ist es nicht ungewöhnlich, dass starke Konvektionsvorgänge den Luftaustausch zwischen Umgebungsluft und Halde fördern.

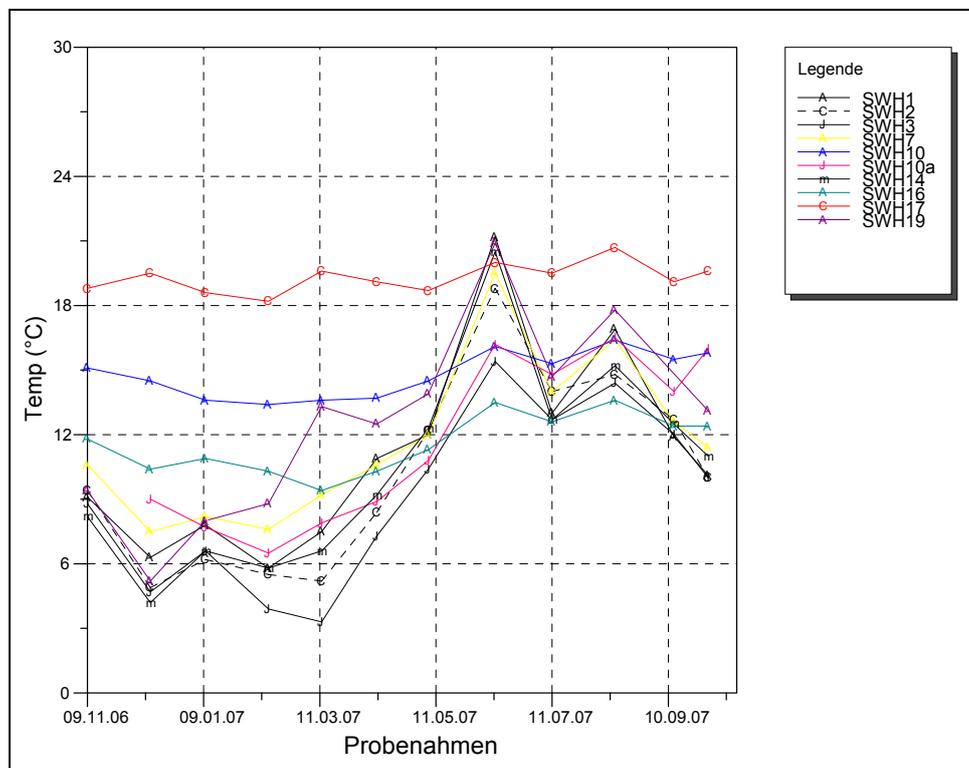


Abb. 9: Temperaturen der Haldensickerwässer im Revier Lugau/Oelsnitz

In Halde ZWI 10 wurden die höchsten **Leitfähigkeiten** in S 7 und RKP 16a/07 gemessen. Die Messstellen repräsentieren den nördlichen Abstrom, wo es zur Aufsalzung des Kulturhausbaches kommt.

Die Leitfähigkeiten der Halde ZWI 45 liegen etwa bei der Hälfte der Werte aus den nicht deponiebeeinflussten Sickerwässern der Halde ZWI 10.

Die höchsten elektrischen Leitfähigkeiten der Haldensickerwässer im Lugau / Oelsnitzer Revier werden mit 12,8 mS/cm an der Halde OEL 17 und 10 mS/cm an der Halde OEL 10 (Tab. 16).

Die **pH-Werte** in Halde ZWI 10 und ZWI 45 liegen im schwach sauren bis neutralen Bereich. An der Halde ZWI 10 zeigt die haldensickerwasserbeeinflusste Entnahmestelle OF 16 pH-Werte um 4,8 im sauren Bereich. In RKP 16 a/07 werden die niedrigsten pH-Werte um 4,5 erreicht.

Die **Sauerstoffgehalte** der Halde ZWI 10 liegen im Kulturhausbach sowie in OF 16 auf relativ hohem Niveau. In S7 dagegen liegt freier Sauerstoff nur noch in geringen Konzentrationen vor. Hier deutet sich eine Beeinflussung durch deponiebürtige Sickerwässer an, die infolge der Umsetzungsprozesse organischer Substanz im Deponekörper kaum noch Sauerstoff beinhalten. Auch in Halde ZWI 45 liegen die Sauerstoffgehalte auf einem sehr niedrigen Niveau. Freier Sauerstoff ist nur in geringen Konzentrationen im Wertebereich bis 0,2 mg/l vorhanden. Durch dieses Milieu werden im Haldenkörper Umsetzungsprozesse organischen Materials (Sickergruben in den Kleingärten) angezeigt.

Die mittleren Sauerstoffgehalte im Revier Lugau/Oelsnitz schwanken zwischen minimal 2,57 mg/l für die Halde OEL 10a und maximal 7,63 mg/l für die Halde OEL 19.

Die niedrigeren **Redoxpotenziale** in Halde ZWI 45 belegen sauerstoffarmes Milieu, das durch das Fehlen von Sauerstoff eine wesentlich schwächere Oxidation der Sulfide zur Folge hat.

Die mittleren Redoxpotenziale im Revier Lugau/Oelsnitz liegen zwischen minimal rd. 300 mV für die Halde OEL 19 und maximal rd. 620 mV für die Halde OEL 10 (Tab. 21). Warum die Halde OEL 19 mit gleichzeitig den höchsten mittleren Sauerstoffgehalten und den minimalen Redoxpotenzialen auffällt, ist gegenwärtig nicht geklärt.

Tab. 17: Makrokomponenten Sicker- und Oberflächenwässer, Revier Zwickau

Parameter	Na	K	Ca	Mg	Cl	SO ₄	NO ₃	Typisierung
Einheit	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[-]	[-]
ZWI 10, OF 15	16	4	70	73	48	110	-	Ca-Mg-Cl-SO ₄
ZWI 10, OF 8	179	47	266	368	628	1.607	-	Ca-Mg-Cl-SO ₄
ZWI 10, OF 16	46	21	244	523	130	2.588	-	Mg-SO ₄
ZWI 10, RKP 16a/07	369	97	504	772	1.097	4.510	-	Mg-SO ₄
ZWI 10, S7	580	167	491	1.051	1.950	4.965	-	Mg-Cl-SO ₄
ZWI 45, SP 9/07	77	16	367	160	160	930	< 1	Ca-Mg-SO ₄
ZWI 45, SP 10/07	14	11	489	126	35	1.140	< 1	Ca-Mg-SO ₄
ZWI 45, SP 13/07	25	9	601	219	78	1.840	< 1	Ca-Mg-SO ₄

- Arithmetische Maximalwerte

Makrokomponenten

Die Unterschiede der physikochemischen Parameter spiegeln sich auch in den Makrokomponenten der Sicker- und Oberflächenwässer wider.

Die höchste Konzentration an Makrokomponenten zeigt sich für Halde ZWI 10 in S 7 und RKP 16a/07 am nördlichen Abstrom. Die Aufsalzung im Kulturhausbach wird durch ein Ansteigen der Konzentrationen um das 3 bis zu 14-fache deutlich.

Im nördlichen Abstrom kommt es zu einer Verschiebung zugunsten der Konzentrationen von Na, Cl und K. Damit wird der Deponieeinfluss deutlich.

Am Probennahmepunkt OF 16, der hauptsächlich Haldensickerwasser repräsentiert, liegt ein im Verhältnis wesentlich höherer Sulfatgehalt vor. Das Haldensickerwasser ist nach der hydrochemischen Beschaffenheit als Mg-SO₄-Wasser zu typisieren. Die Typisierung erfolgt mit der Einschränkung, dass nicht alle Makroelemente untersucht wurden. Es fehlen NO₃ und HCO₃.

Die Sickerwässer im Abstrom (RKP 16a/07, S 7 und OF 16) sind nach DIN 40 30 aufgrund des Sulfatgehaltes als sehr stark betonangreifend zu bewerten.

In Halde ZWI 45 treten die höchsten Gehalte an Makrokomponenten in SP 13/07 im Zentrum der Halde auf. Alle Sickerwässer sind als Ca-Mg-SO₄ Wässer zu typisieren. Die Typisierung im Sickerwasser als auch im Grundwasser (Kapitel 5.2.2) gilt mit der Einschränkung, dass Hydrogenkarbonat nicht untersucht wurde. In SP 9/07 wird eine Verschiebung zugunsten von Na und Cl deutlich. Vermutlich ist das auf den Zustrom anthropogen belasteter Wässer zurückzuführen.

Die Betonaggressivität ist aufgrund der Sulfatgehalte als stark zu beurteilen.

Der Vergleich des Makrochemismus der Sickerwässer der Zwickauer Halden zeigt, dass in Halde ZWI 10 Mg-Ca-SO₄-Wässer und in Halde ZWI 45 Ca-Mg-SO₄-Wässer vorliegen. Diese Verschiebung wird in den Eluatgehalten der grauen Schiefertone nicht deutlich.

Die mittleren Gehalte der Makroelemente für das Revier Lugau/Oelsnitz sind in der Tab. 18 zusammengestellt.

Tab. 18: Makroelemente in den Haldensickerwässern im Revier Lugau/Oelsnitz

Bezeichnung	n	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Na	K	Ca	Mg	Mineralisation	Charakteristik
		[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mmol/l]	
SWH1	12	291	4668	129.8	108.8	339.6	1059.2	118.4	Mg-SO ₄
SWH2	12	120	613	75.2	49.4	280.9	75.8	24.4	Ca-Mg-SO ₄
SWH3	12	24	107	12.6	11.9	54.6	49.7	6.1	Mg-Ca-SO ₄
SWH7	12	108	3089	56.2	28.3	407.6	474.6	69.3	Mg-Ca-SO ₄
SWH10	12	326	8538	118.1	39.9	389.4	1709.8	189.6	Mg-SO ₄
SWH10a	11	159	2845	85.0	60.2	179.3	663.6	71.8	Mg-SO ₄
SWH14	12	44	516	26.0	22.9	139.8	94.0	15.8	Mg-Ca-SO ₄
SWH16	12	200	3060	133.6	93.9	208.5	774.7	83.0	Mg-SO ₄
SWH17	12	1325	8270	694.9	360.1	511.8	1800.8	249.9	Mg-SO ₄
SWH19	12	577	4293	391.8	63.2	559.6	774.4	123.2	Mg-Ca-SO ₄

Während Halde OEL 17 für alle Elemente bzw. Komponenten die höchsten Mittelwerte aufweist, treten die minimalen Mittelwerte immer in der Halde OEL 3 auf. Die drei Halden mit den niedrigsten mittleren pH-Werten sind nur durch die maximalen Sulfat- und Magnesiumgehalte der Halde OEL 10 auffällig. Die zweitstärkste Mineralisation ist für die Halde OEL 10 charakteristisch.

Die hydrochemische Charakteristik der Haldensickerwässer (Tab. 18) weist im Wesentlichen Mg-SO₄- bzw. Mg-Ca-SO₄-Wässer nach. Nur für die Halde OEL 2 sind Ca-Mg-SO₄-Wässer charakteristisch.

Aus den meist nicht ausgeglichenen Ionenbilanzen lässt sich ableiten, dass das Analysenspektrum für die als Haldensickerwässer nicht ausreichend ist.

Der Fall, dass der Anteil der K-Ionen an der Summe von K- und Na-Ionen 20 % nicht überschreitet, kann nur in den Proben der Halden OEL 10 und OEL 19 konstatiert werden. In den meisten Proben weisen die K-Ionen deutlich höhere Anteile an der o. g. Summe von K- und Na-Ionen auf, was als Spezifikum dieser Wässer zu werten ist. (Normalerweise sind die Gehalte der Na-Ionen deutlich größer als die der K-Ionen.)

Wenn der Anteil der Ca-Ionen an der Summe der Ca- und SO₄-Ionen im Verbund mit den pH-Werten der Sickerwässer als Hinweis auf die Herkunft dieser Ionen in der Lösung herangezogen wird (PHREEQC-Berechnungen), dann stammen diese Ionen

- nur in den Halden OEL 2 und OEL 3 aus der Lösung von Gips,
- nur in den Halden OEL 7, OEL 10 und OEL 10a aus der Pyritoxidation bzw.
- weisen für die Halden OEL 14 und OEL 19 auf Calcit ausfällung bzw. Ionenaustauschvorgänge hin.

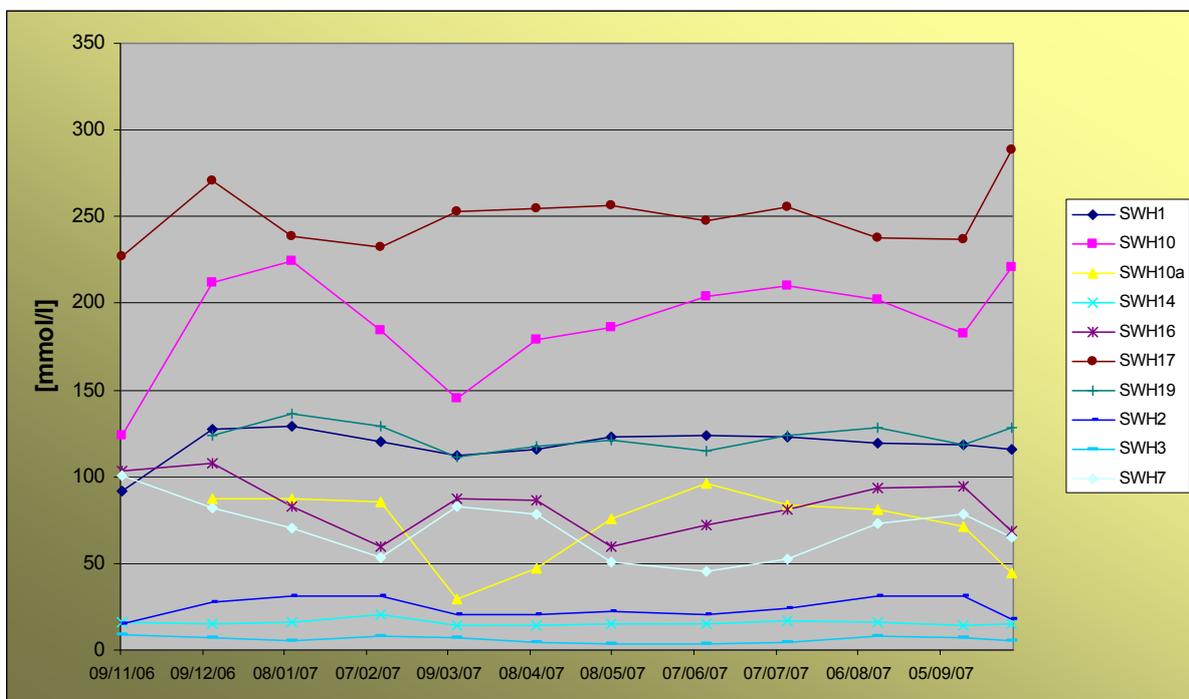


Abb. 10: Summe der Kat- und Anionen im Haldensickerwasser des Reviers Lugau/Oelsnitz, Jahrgang

Für die Halde OEL 17 trifft für keine einzige Probe einer der o. g. „natürlichen“ Lösungsschemismen zu.

Die Gesamtmineralisation der Haldensickerwässer (Abb. 9) ist nicht vom Jahresgang der Sickerwassertemperaturen (Abb. 10) abhängig.

Die binären linearen Korrelationskoeffizienten zeigen eine mittelstarke Abhängigkeit des pH-Wertes von den Mg- und Sulfatgehalten. Die anderen Ionen haben keinen wesentlichen pH-Wert-Einfluss. Sehr starke Korrelationen weisen dagegen die Ionenpaare Na-Cl-K sowie Mg-SO₄ mit dem pH-Wert auf.

Spurenelemente und Organik

Die Spurenelementgehalte der Sickerwässer für beide Reviere sind in Tab. 19 und 20 dargestellt.

Der Parameter AOX in Halde ZWI 10 zeigt, dass der nördliche Abstrom durch Depo-niesickerwasser beeinflusst ist. Der AOX-Gehalt liegt bei S7 ca. 6-fach höher als beim Haldensickerwasser OF 16. Damit lässt sich das Haldensickerwasser der Halde ZWI 10 folgendermaßen charakterisieren:

Tab. 19: Spurenelemente und Organik Sicker- und Oberflächenwässer im Revier Zwickau

Parameter	pH	As	Cd	Cr _{ge-samt}	Cu	Hg	Mo	Ni	Pb	Zn	AOX
Einheit	[-]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]
ZWI 10, OF 15	7,3	1,0	0,2	2,0	13,0	0,5	1,0	3,2	2,0	58,8	14,3
ZWI 10, OF 8	7,1	1,0	7	2,6	28,5	0,5	1,0	98,5	2,35	2.355	46,2
ZWI 10, OF 16	4,9	1,0	242,5	2,0	47,5	0,7	1,2	640,0	4,5	16.250	22,8
ZWI 10, S 7	5,7	1,4	147,5	3,9	19,8	0,5	2,7	465,0	3,3	9.600	130,0
ZWI 10, RKS 16a/07	4,46	1,0	62,3	4,7	75,0	0,5	3,5	436,7	15,0	3.066	80,7
ZWI 45, SP 9/07	6,5	<1,0	20	2	55	<0,5	<1,0	110	<2,0	16.000	18
ZWI 45, SP 10/07	7	86	1,3	7,4	<10	<0,5	<1,0	160	210	3.400	22
ZWI 45, SP 13/07	6,8	73	0,6	5,4	26	<0,5	<1,0	210	580	8.800	15
Prüfwerte BBodSchV*	-	10	5	50	50	1	50	50	25	-	-

- Arithmetische Maximalwerte

* als Vergleichswert Schutzgut Grundwasser, Wirkungspfad Grundwasser - Mensch

Gegenüber dem deponiebeeinflussten Sickerwasser ist dieses durch deutlich höhere Zn-, Ni-, und Cd-Gehalte charakterisiert. As, Cr, Hg und Mo sind kaum löslich. Die Gehalte liegen im Bereich der Bestimmungsgrenze. Pb und Cu sind insgesamt in niedrigen Konzentrationen vertreten. Die Dominanz von Cd, Ni und Zn stimmt gut mit den Eluatgehalten überein.

Auch die Sickerwässer der Halde ZWI 45 werden durch Zn dominiert. Sowohl in der SP 9/07, die nicht ausschließlich durch die Halde ZWI 45 beeinflusst ist als auch in der SP 13/07 liegen die Zn-Gehalte im hohen Wertebereich von 8.000 µg/l bis 16.000 µg/l. Die Wässer der Halde ZWI 45 sind weiterhin durch einen teilweise hohen Cd- und hohen Ni-Gehalt gekennzeichnet. Der As-Gehalt liegt ebenfalls im hohen Wertebereich und verhält sich direkt proportional zum steigenden pH-Wert. Umgekehrt proportional korrelieren pH-Wert und Zn-Konzentration.

Tab. 20: Arithmetrische Mittelwerte der Spurenelemente in den Haldensickerwässern, Revier Lugau/Oelsnitz

Bezeichnung	n	As	Pb	Cd	Cr	Cu	Mo	Ni	Zn	AOX
		[µg/l]								
SWH1	12	0.5	1.3	365.0	4.4	34	1.0	615.0	69750	51
SWH2	12	2.4	9.6	3.8	3.3	27	1.4	8.0	221	31
SWH3	12	3.1	12.7	3.8	1.4	24	0.7	12.4	454	38
SWH7	12	0.5	5.5	194.2	2.4	51	0.7	1800.0	73833	24
SWH10	12	0.6	1.0	1950.0	5.9	118	0.8	7358.3	336667	29
SWH10a	11	7.5	19.0	80.8	2.5	49	1.4	1614.5	40727	51
SWH14	12	0.5	1.4	21.4	1.0	18	0.5	69.3	3908	17
SWH16	12	1.1	1.1	143.7	3.9	35	0.8	520.0	15583	28
SWH17	12	0.5	1.0	82.0	6.6	19	0.8	225.8	6683	115
SWH19	12	6.7	1.0	10.3	3.8	23	1.1	193.3	992	49
PW SiWa		10	25	5	50	50	50	50	500	
G		10	7	0,5	7	14	35	14	580	
B OW		1	3,4	0,07	10	4		4,4	14	
B GW		10	10	5	50	50	35	20	500	
D GW		60	50	20	250	250	350	100	3500	

Für die Proben aus dem Lugau/Oelsnitzer Revier lagen die Hg-Gehalte unterhalb der Bestimmungsgrenze von 0.5 µg/l, so dass dieses Element nicht mit in die Tab. 20 aufgenommen wurde.

Ebenfalls lagen die meisten As-, Mo- und der Großteil der Pb-Gehalte unterhalb bzw. an der (Cr) der jeweiligen Bestimmungsgrenzen von je 1 µg/l (As, Mo) bzw. 2 µg/l (Pb, Cr).

Überschreitungen der Dringlichkeitswerte für Grundwasser weisen die Elemente Cd, Zn und Ni auf (in 7 von 10 Messstellen).

Die Haldensickerwässer stellen am Ort ihres Zutagetretens Oberflächenwässer dar, in die bestimmte Kleinlebewesen (Frösche usw.) gelangen können. Somit ist der Vergleich der Elementgehalte mit diesem Referenzwert möglich. Dabei überschreiten alle mittleren Gehalte an Cd, Ni, Cu und Zn die entsprechenden Besorgniswerte.

Die höchsten mittleren Gehalte der Elemente Cd, Cu, Ni und Zn werden in der Halde OEL 10 angetroffen, die geringsten Cd-, Ni- und Zn-Gehalte in den Halden OEL 2 und OEL 3, die geringsten Cu-Gehalte in den Halden OEL 14 und OEL 17. In Halde OEL 17 sind die höchsten mittleren AOX-Gehalte in den Sickerwässern bestimmt worden.

Abhängigkeiten der Spurenelementgehalte in den Haldensickerwässern von den Haldentemperaturen konnten bei dem kurzen Monitoringzeitraum nicht nachgewiesen werden.

5.2.2 Grundwasser

Physikochemische Parameter

Die physikochemischen Parameter der Grundwässer für beide Reviere sind in Tab. 21 und 22 dargestellt.

Tab. 21: Physikochemische Parameter des Grundwassers im Revier Zwickau

Probenahmestelle	Parameter				
	Temperatur (°C)	Leitfähigkeit (µS/cm)	pH-Wert	EH-Wert (mV)	O ₂ * (mg/l)
ZWI 10 Hy 19/2004	9,7	4.188	5,0	329,5	0,2
ZWI 10 Hy 18/2004	10,4	4.550	4,4	404	0,2
ZWI 10 GWM B 3/96	9,4	4.887,5	5,2	321,8	6,4
ZWI 10 GWM B 15/99	10,7	3.700	5,6	299	6,0
ZWI 10 GWM B 11/92	10,2	916	7,2	157,3	1,7
ZWI 10 GWM B 12/92	10,4	988	6,6	226,0	6,9
ZWI 10 GWM B 10/92	15,2	2.810	6,4	35,0	3,0
ZWI 10 Hy 17/2004	20,2	2.563	6,9	205,0	3,2
ZWI 45 GWM 1/06	11,3	915	6,6	-120	
ZWI 45 GWM 11/07	10,7	1.060	6,5	-73	
ZWI 45 GWM 14/07	9,7	620	6,9	-52	
ZWI 45 GWM 12/07	11,7	2.070	6,01	160	

	Tertiär - GWL		Rotliegend - GWL
	Holozän - GWL		Pleistozän - GWL

* Feldmessungen - EH-Wert unkorrigiert

Tab. 22: Physikochemische Parameter des Grundwassers in Halde OEL 10

Bezeichnung	N	Wasser-Temp [°C]	pHVO	pH	LFVO [µS/cm]	LF [µS/cm]	O2VO [mg/l]	RedOxVO [mV]	Lage zur Halde
GWM4	1	9.3	5.7	5.8	293	299	5.5	477	oberstromig
GWM5	1	8.0	6.3	6.2	239	295	8.3	458	oberstromig
GWM2	2	15.3	4.5	4.7	843	930	4.7	519	in der Halde
GWM7	1	17.7	4.0	4.0	3960	4060	1.7	631	in der Halde
GWM3	2	12.6	5.1	5.1	4415	4590	4.3	542	unterstromig
SWH10	12	14.8	3.7	3.7	9613	10054	4.07	616	Westfuß
SWH10a	11	11.7	4.8	4.7	4303	4381	2.57	432	Südwestfuß
GWM6	1	8.3	4.3	4.3	5090	5320	7.4	609	westlich seitlich
OW10a	1	13.9	6.1	6.2	319	343	5.9	569	Zustrom von W

blau umrandet – Sickerwassermessstellen zum Vergleich

Die **Temperaturen** liegen in Halde ZWI 10 (Tab. 21) überwiegend im normalen Bereich. Eine deutliche Temperaturbeeinflussung besteht im Rotliegend-GWL. Direkt am westlichen Haldenrand zeigen die Messstellen GWM B 10/92 und GWM Hy 17/2004 stark erhöhte Temperaturen im Wertebereich von 15 °C bis 20 °C. GWM B 10/92 liegt dabei ca. 400 m vom eigentlichen Brandherd entfernt. Die Temperaturausbreitung erfolgt im seitlichen Abstrom. Die Werte schwanken bei beiden Messstellen im Jahresgang kaum, so dass von einer konstanten Beeinflussung durch den Haldenbrand ausgegangen werden kann. Zu vermuten ist die Beeinflussung über Störungs- und/oder Klüftzonen mit direkter Anbindung an das temperierte Haldensickerwasser.

Die Temperaturen in Halde ZWI 45 zeigen im Quartär-GWL eine leicht erhöhte Temperatur, die auf die anthropogene Grundlast und nicht auf die Beeinflussung durch Haldenbrand zurückzuführen ist.

Die Temperaturen im Grundwasser unterhalb Halde OEL 10 (Tab. 22) sind von den erhöhten Temperaturen im Haldenkörper beeinflusst.

Die **Leitfähigkeiten** liegen in Halde ZWI 10 (Tab. 21) im Bereich zwischen 620 $\mu\text{S}/\text{cm}$ und 4.887 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Außer bei GWM B3/96 lässt sich ein fallender Trend im Monitoringzeitraum beobachten. Anstromig weist das Grundwasser im Rotliegend-GWL Leitfähigkeiten von 900 $\mu\text{S}/\text{cm}$ bis 1.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ auf. Abstromig zeigt sich eine Beeinflussung durch die Halde ZWI 10 mit deutlich erhöhten Leitfähigkeiten im Wertebereich zwischen 2.500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ und 2.800 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Auch hier ist eine direkte hydraulische Verbindung über Störungen bzw. Klüftzonen zu vermuten.

Die Leitfähigkeiten in Halde ZWI 45 zeigen im Holozän-GWL schwankende Werte auf niedrigem Niveau. Die GWM 12/07 ist anstromig im Pleistozän platziert und stark durch Sickerwässer beeinflusst.

Die Leitfähigkeiten im Grundwasser im Bereich der Halde OEL 10 (Tab. 22) sind eindeutig vom Sickerwasser beeinflusst. Während oberstromig Werte zwischen 240 und 290 $\mu\text{S}/\text{cm}$ gemessen wurden, erreichen die Werte in der GWM 7/07 (ca. 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ Fließstrecke unterhalb der Halde) Leitfähigkeiten von ca. 4000 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Die **pH-Werte** zeigen in Halde ZWI 10 (Tab. 21) im Tertiär-GWL ein saures Milieu im Wertebereich zwischen 4,4 und 5,5 an. Von einer Beeinflussung durch Deponie- / Haldensickerwasser ist hier auszugehen. Im Rotliegend- GWL liegen die pH-Werte im schwach sauren bis neutralen Wertebereich.

Die pH-Werte in Halde ZWI 45 liegen im schwach sauren bis neutralen Wertebereich.

Oberstromig der Halde OEL 10 (Tab. 22) weist das Grundwasser einen schwach sauren pH-Wert auf. Bewegt sich das Grundwasser im Hangschutt unterhalb der Halde hangabwärts, wird es durch die Haldensickerwässer beeinflusst. Dies hat die Verringerung der pH-Werte im Grundwasser bis auf 4.0 bis 4.7 zur Folge.

Die Parameter **Redoxpotenzial** und **Sauerstoffgehalt** zeigen in Halde ZWI 10 (Tab. 21) keine einheitlichen Trends. In GWM Hy 18/2004 und Hy 19/2004 ist kaum freier Sauerstoff enthalten.

Die Sauerstoffgehalte und die Redoxpotentiale in Halde ZWI 45 belegen ein sauerstoffarmes Milieu im Holozän-GWL. Im Pleistozän-GWL sind abweichend davon deutlich oxidierende Verhältnisse vorhanden.

Makrokomponenten

Die Makrokomponenten für die Grundwässer sind in Tab. 23 und 24 dargestellt.

Die Grundwässer im Bereich der Halde ZWI 10 (Tab. 23) im Tertiär-GWL sind (Ca-) Mg-Cl-SO₄-Wässer. In GWM B 3/96 ist eine Verschiebung zugunsten von Mg, in Hy 18/2004 zugunsten von Cl vorhanden. Die Zusammensetzung weicht dabei von den charakteristischen Mg-SO₄-Haldensickerwässern ab. Das Grundwasser ist damit in allen GWM sowohl halden- als auch deponiebeeinflusst. Die Gesamtmineralisation ist, bedingt durch Verdünnungseffekte, geringer als bei den Sickerwässern.

Tab. 23: Makrokomponenten des Grundwassers im Revier Zwickau

Parameter	Na	K	Ca	Mg	Cl	SO ₄	NO ₃	Typisierung
Einheit	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[-]
ZWI 10, Hy 19/2004	220	36	255	384	635	1.658	-	Mg-Cl-SO ₄
ZWI 10, Hy 18/2004	212	14	426	280	1.150	886	-	Ca-Mg-Cl-SO ₄
ZWI 10, GWM B 3/96	170	42	194	408	540	1.473	-	Mg-Cl-SO ₄
ZWI 10, GWM B 15/99	220	32	269	564	678	2.325	-	Mg-Cl-SO ₄
ZWI 10, GWM B 11/92	56	4	90	48	68	166	-	Ca-Mg-Cl-SO ₄
ZWI 10, GWM B 12/92	14	1,69	121	63	72	230	-	Ca-Mg-Cl-SO ₄
ZWI 10, GWM B 10/92	183	3,50	379	72	585	494	-	Ca-Cl-SO ₄
ZWI 10, Hy 17/2004	70,1	7,23	230	229	605	373	-	Ca-Mg-Cl-SO ₄
ZWI 45, GWM 1/06	46	4	76	43	80	246	< 1	Ca-Mg-Cl-SO ₄
ZWI 45, GWM 11/07	30	2	128	49	78	188	< 1	Ca-Mg-Cl-SO ₄
ZWI 45, GWM 12/07	73	12	208	199	150	876	16	Ca-Mg-SO ₄
ZWI 45, GWM 14/07	14	2	76	41	53	62	29	Ca-Mg-Cl-SO ₄
TrinkwV	200	12	400	50	400	240	50	-

* zum Vergleich Grenzwerte nach TrinkwV

Auch im Rotliegend-GWL ist eine Verschiebung der Anteile der Hauptkomponenten gegenüber den Haldensickerwässern zu beobachten. Die abstromigen Grundwässer sind als Ca-Mg-Cl-SO₄-Wässer zu bezeichnen. In GWM B10/92 ist außerdem eine Verschiebung zugunsten von Na vorhanden. Damit ist das Grundwasser im Rotliegenden (Abstrom) neben der Beeinflussung durch die Halde ZWI 10 auch weitgehend als deponiebeeinflusst zu bezeichnen.

Tab. 24: Makrokomponenten des Grundwassers im Bereich der Halde OEL 10

Bezeichnung	N	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Na	K	Ca	Mg	Mineralisation	Charakteristik
		[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mmol/l]	
GWM4	1	4	62	4.4	7.6	28.1	21.9	2.8	Mg-Ca-SO ₄
GWM5	1	4	71	7.3	7.6	28.1	12.1	2.6	Ca-Mg-SO ₄
GWM2	2	19	493	9.7	8.1	90.1	70.4	11.8	Mg-Ca-SO ₄
GWM7	1	53	3240	87.0	72.1	321.0	474.0	71.1	Mg-Ca-SO ₄
GWM3	2	108	3195	63.5	31.5	350.5	631.5	79.9	Mg-Ca-SO ₄
SWH10	12	326	8538	118.1	39.9	389.4	1709.8	189.6	Mg-SO ₄
SWH10a	11	159	2845	85.0	60.2	179.3	663.6	71.8	Mg-SO ₄
GWM6	1	200	3040	219.0	118.0	200.0	742.0	86.0	Mg-SO ₄
OW10a	1	11	72	8.6	4.3	40.0	21.0	3.4	Ca-Mg-SO ₄

blau umrandet – Sickerwassermessstellen zum Vergleich

Das Grundwasser im Bereich der Halde ZWI 45 weist im Holozän - GWL eine geringe Gesamtmineralisation auf. Die sickerwasserbeeinflusste Pleistozän - Messstelle GWM 12/07 zeigt die Mineralisation der Haldensickerwässer und ist als Ca-Mg-SO₄-Wasser zu typisieren. Die Abstrommessstellen zeigen eine eindeutige Verschiebung zugunsten SO₄.

Teilweise sind die Wässer der Zwickauer Halden aufgrund der Sulfatgehalte als schwach bis stark betonangreifend zu kennzeichnen.

Tab. 24 zeigt für den Bereich der Halde OEL 10, dass die anströmenden oberflächennahen Grundwässer einen fast identischen Makroelementchemismus aufweisen (in Tab. 24 helltürkis hinterlegt) und Hintergrundwerte für unbeeinflusste oberflächennahe Grundwässer darstellen.

Die auf die Anstromverhältnisse normierten Gehalte in den Haldensickerwässern bzw. den oberflächennahen Grundwässern ergeben in den Haldensickerwässern eine im Schnitt 70 mal größere Mineralisation als im anströmenden oberflächennahen Grundwasser.

Die Berechnung der Frachten anhand der ermittelten Sickerwasserkonzentrationen und den ermittelten Grundwasserneubildungsraten ergibt bezüglich der Makroelemente für die Zwickauer Halden die in Tab. 25 dargestellten Ergebnisse.

Für die nicht abgedeckte Haldenfläche von Halde ZWI 10 wurden die arithmetisch gemittelten Konzentrationen der OF 16 als Grundlage für die Abschätzung genommen.

Im Sickerwasser der Halde ZWI 10 werden vorwiegend Ca, Mg und SO₄ ausgetragen. Die Sulfatfracht über den Wasserpfad beträgt erhebliche 73 t pro Jahr. Der Austrag erfolgt sowohl in die Vorflut, als auch in die Grundwasserleiter des Tertiärs und des Rotliegenden.

Die Frachtabschätzung für die Halde ZWI 45 erfolgte auf Basis der Werte in der SP 13/07. Aufgrund der vollflächigen Lehm- bzw. Mutterbodenabdeckung ist die Sickerwasserneubildung geringer als bei Halde ZWI 10.

Tab. 25: Frachtabschätzung Sickerwasseraustrag Makroelemente der Halden ZWI 10 und ZWI 45

Halde	Parameter	Na	K	Ca	Mg	Cl	SO ₄
ZWI 10	OF 16 [mg/l]	46	21	244	523	130	2.588
	jährliche Fracht						
	Menge [kg/a]	1.306	596	6.925	14.844	3.690	73.453
ZWI 45	SP 13/07 [mg/l]	25	9	601	219	78	1.840
	jährliche Fracht						
	Menge [kg/a]	71	26	1.706	622	221	5.222

Die Hauptausträge über den Sickerwasserpfad sind bei den Parametern SO₄ und Ca festzustellen. Jährlich werden rund 1,7 t Ca und 5,2 t SO₄ ausgetragen. Die gelöste Fracht gelangt über den Sickerwasserabstrom in den Planitzbach.

Spurenelemente und Organik

Die Spurenelementgehalte für die Grundwässer sind in Tab. 26 und 27 zusammengefasst.

Die Dominanz der Spurenelemente Cd, Ni, Zn aus dem Haldensickerwasser der Halde ZWI 10 ist in GWM 3/96 wiederzufinden (Tab. 26). Bemerkenswert sind die hohen Cd- und Ni-Konzentrationen im Tertiär - GWL. Die Prüfwerte nach BBodSchV werden bei diesen Parametern teilweise um mehr als das 10-fache überschritten.

Der Rotliegend-GWL ist im Anstrom durch niedrige Spurenelementgehalte, stets unter den Prüfwerten gekennzeichnet. Im Abstrom zeigt nur GWM 17/2004 die hydrochemische Signatur der Haldensickerwässer mit erhöhten Cd, Ni und Zn-Gehalten. Diese Konzentrationen in der GWM 17/2004 bestätigen den Input von Sickerwasser in den Rotliegend – GWL über Klüfte und Störungen.

Tab. 26: Spurenelemente und Organik im Grundwasser Revier Zwickau

Parameter	As	Cd	Cr _{gesamt}	Cu	Hg	Mo	Ni	Pb	Zn	AOX
Einheit	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]
Hy 19/2004	1,0	9,9	2,5	45,3	0,5	1,0	283	2,0	1.400	66,5
Hy 18/2004	1,0	12,2	3,1	38,0	0,5	2,1	328	2,0	465	60,0
GWM B 3/96	1,0	63,8	13,9	40,3	0,5	1,0	433	2,0	2.925	64,3
GWM B 15/99	1,0	3,1	2,6	30,3	0,5	1,3	54	2,8	758	90,5
GWM B 11/92	1,0	0,2	2,0	19,5	0,5	1,0	3	2,0	39	11,0
GWM B 12/92	1,0	0,2	2,2	27,3	0,5	1,0	7	5,3	45	11,0
GWM B 10/92	1,0	0,7	4,9	15,5	0,5	1,6	12	2,8	89	59,0
Hy 17/2004	1,0	31,6	2,5	16,8	0,6	1,0	97	2,3	1.946	61,3
GWM 1/06	22,5	<0,2	4,5	26	<0,5	<1,0	5	<2,0	<20	15
GWM 11/07	12	<0,2	<2,0	16	<0,5	<1,0	4,9	<2,0	<20	11
GWM 12/07	<1,0	29	6,6	58	<0,5	<1,0	2.400	9,2	17.000	23
GWM 14/07	12	0,7	7	24	<0,5	<1,0	15	6,1	<20	16
Prüfwerte BBodSchV*	10	5	50	50	1	50	50	25	-	-

* als Vergleichswert Schutzgut Grundwasser, Wirkungspfad Grundwasser - Mensch

Tab. 27: Spurenelemente und Organik im Grundwasser im Bereich der Halde OEL 10

Bezeichnung	N	As	Pb	Cd	Cr	Cu	Mo	Ni	Zn	AOX
		[µg/l]								
GWM4	1	1.5	1.0	1.7	1.0	15	0.5	88.0	250	16
GWM5	1	0.5	1.0	0.6	1.0	23	0.5	19.0	88	24
GWM2	2	11.1	18.4	124.5	22.0	52	0.5	390.0	20500	11
GWM7	1	1.6	1.0	1100.0	13.0	190	0.5	3200.0	170000	11
GWM3	2	3.6	5.1	490.0	5.2	68	0.5	1700.0	84000	33
SWH10	12	0.6	1.0	1950.0	5.9	118	0.8	7358.3	336667	29
SWH10a	11	7.5	19.0	80.8	2.5	49	1.4	1614.5	40727	51
GWM6	1	0.5	1.0	260.0	3.1	63	0.5	1700.0	37000	33
OW10a	1	0.5	3.0	0.5	1.0	24	0.5	7.0	57	22

blau umrandet – Sickerwassermessstellen zum Vergleich

PW SiWa	10	25	5	50	50	50	50	50	500
G	10	7	0,5	7	14	35	14	580	
B OW	1	3,4	0,07	10	4	35	4,4	14	
B GW	10	10	5	50	50	35	20	500	
D GW	60	50	20	250	250	350	100	3500	

Alle Messstellen weisen durch den erhöhten AOX-Gehalt eine Deponiebeeinflussung auf.

Anhand der Untersuchungen ist ein Übertritt von Sickerwasser in den Tertiär- und auch in den Rotliegend-GWL belegt. Der Abstrom von Sickerwässern der Halde findet im Tertiär vor allem Richtung W statt. Dabei tritt eine Verdünnung auf.

Im direkten westlichen Abstrom der Halde wird auch das tiefere Rotliegendgrundwasserstockwerk durch die Halde beeinflusst. Das abstromige Wasser erfährt nochmals eine Verdünnung und ist durch einen starken Temperaturinput charakterisiert.

Im Bereich der Halde ZWI 45 liegen anstromig die Schwermetallgehalte des Holozän-GWL, mit Ausnahme von Cu, im Bereich der Bestimmungsgrenzen. Beim Parameter As liegt eine Aufkonzentration im niedrigen Wertebereich auf rund 23 µg/l vor. Nur bei diesem Parameter werden die Prüfwerte der BBodSchV für den Wirkungspfad Grundwasser -Mensch überschritten.

Die hydrochemische Sickerwassersignatur mit hohen As, Ni und Zn-Werten tritt im quartären GWL im Bereich der Halde ZWI 45 nicht auf. Im Pleistozän sind erhöhte Cd-, Ni- und Zn-Werte vorhanden. Die Vorbelastung des Anstroms zeigt damit die hydrochemische Signatur von Haldensickerwasser. Die Vorbelastung ist auf die südöstlich des Standortes gelegene Halde ZWI 26 zurückzuführen.

Der holozäne Grundwasserleiter wird durch das Haldensickerwasser nicht wesentlich beeinträchtigt. Außer beim Parameter As liegen keine Erhöhungen der Konzentrationen vor. Durch den überlagernden Auelehm ist der lokal ausgebildete holozäne GWL relativ gut geschützt. Sickerwässer treten nicht vom Haldenkörper in den GWL über, sondern stauen sich auf dem Auelehm und fließen zusammen mit dem vorbelasteten Grundwasser aus dem Pleistozän-GWL direkt in den Planitzbach ab.

Die Gehalte der Spurenelemente in den Grundwässern der Halde OEL 10 (Tab. 27) zeigen Überschreitungen der Dringlichkeitswerte (braun hinterlegt). Die oberflächennahen Grundwässer unterhalb bzw. im unmittelbaren Abstrom der Halde sind eindeutig haldenbürtig mit Cd, Ni und Zn kontaminiert.

Wie für die Makroelemente sind die Gehalte der Mikroelemente in den Messstellen GWM 4 und 5 als von der Halde unbeeinflussten Gehalte anzusehen.

Die Berechnung der Frachten anhand der ermittelten Sickerwasserkonzentrationen und den ermittelten Grundwasserneubildungsraten ergibt für die Zwickauer Halden bezüglich der Spurenelemente die in Tab. 28 dargestellten Ergebnisse.

Tab. 28: Frachtaberschätzung Sickerwasseraustrag Spurenelemente der Halden ZWI 10 und ZWI 45

Halde	Parameter	As	Cd	Cr _{gesamt}	Cu	Hg	Mo	Ni	Pb	Zn
ZWI 10	OF 16 [µg/l]	1	243	2,0	47,5	0,7	1,2	640	4,5	16.250
	jährliche Fracht									
	Menge [kg/a]	0,028	6,897	0,056	1,344	0,020	0,034	18,164	0,128	461,21
ZWI 45	SP 13/07 [µg/l]	73	0,6	5,4	26	0,5	1	210	580	8.800
	jährliche Fracht									
	Menge [kg/a]	0,207	0,002	0,015	0,074	0,001	0,003	0,596	1,646	24,977

Für die Halde ZWI 10 liegen die Austräge an Schwermetallen im kg-Bereich. Die größten Mengen mit 461 kg liefert Zn.

Die Schwermetallfracht für Halde ZWI 45 konzentriert sich hauptsächlich auf den Parameter Zink mit Mengen von 25 kg/a.

5.3 Hydrogeologische und geochemische Modellierung

5.3.1 Sickerwassermodellierung (BOWAHALD)

Das verwendete Modell *BOWAHALD* wurde speziell zur Abbildung der wesentlichen hydrologischen Prozesse innerhalb von wasserungesättigten Halden bzw. Deponien einschließlich von Sicherungssystemen entwickelt. Die der Modellierung den einzelnen Schichten zugrunde gelegten Parameter fasst Tab. 29 zusammen. Diese basieren bis auf den K_f -Wert auf modellinternen Werten.

Tab. 29: Parametrisierung der einzelnen Schichten für die Berechnungen mit BOWAHALD

Schicht	Bodenart	K _f -Wert [m/s]	Θ _s [Vol-%]	Θ _{FC} [Vol-%]	Θ _{WP} [Vol-%]
Mutterboden (Ah)	Us	9,5*10 ⁻⁶	40,5	36,5	10
Haldenaufschüttung (jC)	Su2	1,69*10 ⁻⁴	35	21,5	5,5

Tab. 30 gibt einen Überblick über die Bewertung der Parameter zur Modellquantifizierung (Minimale Punktzahl: 1; Maximale Punktzahl: 4). Dabei ist festzustellen, dass der Kenntnisstand und die Genauigkeit bezüglich der meteorologischen, geographischen und morphologischen Daten hinreichend gut ist, wohingegen über die pedologischen Parameter nur wenige Informationen verfügbar bzw. diese mit Unsicherheiten behaftet sind.

Tab. 30: Bewertung der Eingangsparameter zur Modellquantifizierung (Minimale Punktzahl: 1; Maximale Punktzahl: 4)

Eingangsparameter	Bewertung	Punktzahl
meteorologische Daten	Messwerte der Messstation Stollberg	2
geographische / morphologische Parameter	Topographische Karte, Geländemodell, Vermessungsdaten	3-4
Bodenart	Geländeaufnahme, Bohrdaten	2-3
gesättigte hydraulische Leitfähigkeit	Kombination aus Labor (Siebanalysen) und umfassenden Feldtests (Infiltrationsmessung)	3
Feldkapazität	interne BOWAHALD-Werte anhand Bodenart	3
Welkepunkt	interne BOWAHALD-Werte anhand Bodenart	3
Kapillarität	interne BOWAHALD-Werte anhand Bodenart	3
Schichtenabfolge	Durch Bohrlochaufschlüsse schnelle Sprünge zwischen Schichten unterschiedlicher Eigenschaften	3
Nutzungsparameter	Topographische Karte, Luftbild, Geländeaufnahme	3-4
Bewuchsparameter	Luftbild, Geländeaufnahme, modellinterne Werte	2

Die Ergebnisse der *BOWAHALD*-Modellierung sind in Tab. 31 dargestellt. Die berechnete Sickerwasserrate durch die Haldenaufstandsfläche der Halde OEL 10 beträgt 52,5 m³/d.

Tab. 31: Mittels BOWAHALD berechnete Wasserhaushaltskenngrößen für den Zeitraum 1960-2004

	Niederschlag (mm/a)	Oberflächenabfluss (mm/a)	Evapotranspiration (mm/a)	Interzeption (mm/a)	Sickerwasserinfiltration (mm/a)	Grundwasserneubildung (mm/a)
Halde 10	707	24	446	99	580	237

Von den im Durchschnitt 707 mm Jahresniederschlag im Zeitraum 1960 - 2004 verdunsten im Mittel ca. 15 % von den Pflanzenoberflächen. Fast die gesamte restliche Differenzwassermenge infiltriert (SW), nur ein kleiner Teil geht in Oberflächenabfluss über. Aus dem Anteil der Infiltration geht ein großer Teil in die Verdunstung durch die Pflanzen und den Boden sowie in die Auffüllung des Porenraumes in der Halde. Letztendlich tragen rd. 33 % des Niederschlags zur eigentlichen Grundwasserneubildung im Untergrund der Halden bei.

5.3.2 Strömungsmodellierung (FEFLOW)

Abgeleitet vom Kenntnisstand des Aufbaus der Halde OEL 10 entstand zuerst ein konzeptionelles geologisches Modell, welches die verschiedenen geologischen Horizonte bezogen auf die hydraulische Durchlässigkeit und das Wasserspeichervermögen beinhaltet.

Zur eigentlichen Modellierung des Wasserhaushaltes und der Grundwasserströmung wurden den einzelnen Layern des 3D-Modells in FEFLOW die verschiedenen benötigten Parameter zugewiesen.

Tab. 32 gibt einen Überblick über die Bewertung der hydrogeologischen Parameter zur Modellquantifizierung. Dabei konnte der Kenntnisstand bezüglich der Modellparameter unter gesättigten Bedingungen (gesättigte hydraulische Leitfähigkeit) als hinreichend bekannt eingestuft werden. Die Modellparameter für die ungesättigten Bedingungen (van-Genuchten) wurden im Gegensatz dazu teilweise nur entsprechend der Bodenart berechnet bzw. geschätzt.

Tab. 32: Bewertung der hydrogeologischen Eingangsparameter zur Modellquantifizierung

Hydrogeologischer Eingangsparameter	Bewertung	Punktzahl*
Spezifischer Speicherkoeffizient	Labor (Siebanalysen) Geschätzt anhand Bodenart	2
Gesättigte hydraulische Leitfähigkeit	Kombination aus Labor (Siebanalysen) und umfassenden Feldtests (Infiltrationsmessung) Berechnung anhand Bodenart durch ROSETTA	3
Nutzbares Porenvolumen / nutzbare Porosität	Labor (Siebanalysen) Geschätzt anhand Bodenart	2
Residualer Wassergehalt	Feldtests (Infiltrationsmessung) Berechnung anhand Bodenart durch ROSETTA	2
Gesättigter Wassergehalt	Feldtests (Infiltrationsmessung) Berechnung anhand Bodenart durch ROSETTA	2
Formparameter van-Genuchten-Kurve α	Berechnung anhand Bodenart durch ROSETTA	1
Formparameter van-Genuchten-Kurve n	Berechnung anhand Bodenart durch ROSETTA	1

* minimale Punktzahl 1; maximale Punktzahl: 4

Zur Validierung des Modells wurden diese Parameter anhand der gemessenen Grundwasserstände in den vorhandenen Grundwassermessstellen kalibriert.

Tab. 33 gibt einen Überblick über die Bewertung der hydrogeologischen Größen zur Modellstrukturierung/-aufbau (Minimale Punktzahl: 1; Maximale Punktzahl: 4). Dabei ist festzustellen, dass der grundlegende Modellaufbau als hinreichend genau einzuschätzen ist. Schwierigkeiten im Modellaufbau bestehen jedoch in den hohen Geländeunterschieden und schnellen Sprüngen zwischen Zonen unterschiedlicher hydraulischer Leitfähigkeit. Weitere grundlegende Schwierigkeiten in der Modellparametrisierung bestehen vor allem im Untergrund des Haldenkörpers für das Festgestein. Information zu den Gesteinseigenschaften fehlen hier komplett. Aufgrund der fehlenden Informationen wurde im Modell zur Vereinfachung nur der Grundwasserstand im Hangenden des Festgesteins berücksichtigt. Im Modellergebnis ist daher das Festgestein als wassergesättigt angenommen worden.

Tab. 33: Bewertung der hydrogeologischen Größen zur Modellstrukturierung

Größe zur Modellstrukturierung	Bewertung	Punktzahl*
Strömungstyp	Porengrundwasserleiter	3
Gebietsabgrenzung	Geometrische Angrenzung anhand des oberirdischen Einzugsgebietes	2
Randbedingungen 1. Art	Flussläufe, Sickerwasseraustritte und Seen aus Feldbegehungen und TK	4
Randbedingungen 2. Art	Grundwasserneubildung mit BOWAHALD berechnet	2
Mächtigkeiten	Durch Interpolation der Bohrlochaufschlüsse	3
Schichtung	Durch Bohrlochaufschlüsse Schnelle Sprünge zwischen Schichten unterschiedlicher Eigenschaften	2
Morphologie	Digitales Geländemodell Hohe Geländeunterschiede	3
Untergrund	Offene Grubenbaue, Störungszonen, Festgestein	1

* minimale Punktzahl 1; maximale Punktzahl 4

Prinzipielle Schwierigkeiten in der Modellierung unter ungesättigten Bedingungen sind die hohen Geländeunterschiede und die starken Sprünge zwischen Schichten unterschiedlicher hydraulischer Eigenschaften.

Tab. 34 gibt einen Überblick über die kalibrierten Parameter für das Layer-Modell Oelsnitz.

Tab. 34: Kalibrierte Modell-Parameter der einzelnen Layer des Modellgebietes Oelsnitz

Layer	Beschreibung	k_s [m/s]	S_s []	θ_s []	θ_R []	α [1/m]	n []	n_{eff} []
1	Mutterboden	$9,50 \cdot 10^{-6}$	0,20	1,00	0,0836	0,4965	1,7022	0,45
2	Haldenaufschüttung	$1,69 \cdot 10^{-4}$	0,20	1,00	0,0863	4,5667	1,6823	0,40
3	Mutterboden + Hangschutt + Zersatz	$9,50 \cdot 10^{-6}$	0,20	1,00	0,836	0,4965	1,7022	0,45
4	Festgestein	$8,25 \cdot 10^{-5}$	0,05	1,00	0,113	14,5	2,68	0,40

Die Ergebnisse der Grundwasserströmungsmodellierung sind in Abb. 11 dargestellt. Die Abbildung zeigt die berechneten Druckhöhen im Liegenden der Halde (Aufstandsfläche) für den Ist-Zustand. Abb. 12 zeigt die Wassersättigung der Halde OEL 10 und des Untersuchungsgebietes für den Ist-Zustand.

Die mittels FEFLOW berechnete Sickerwasserrate durch die Haldenaufstandsfläche der Halde OEL 10 von 71.437 m² beträgt 32,1 m³/d.

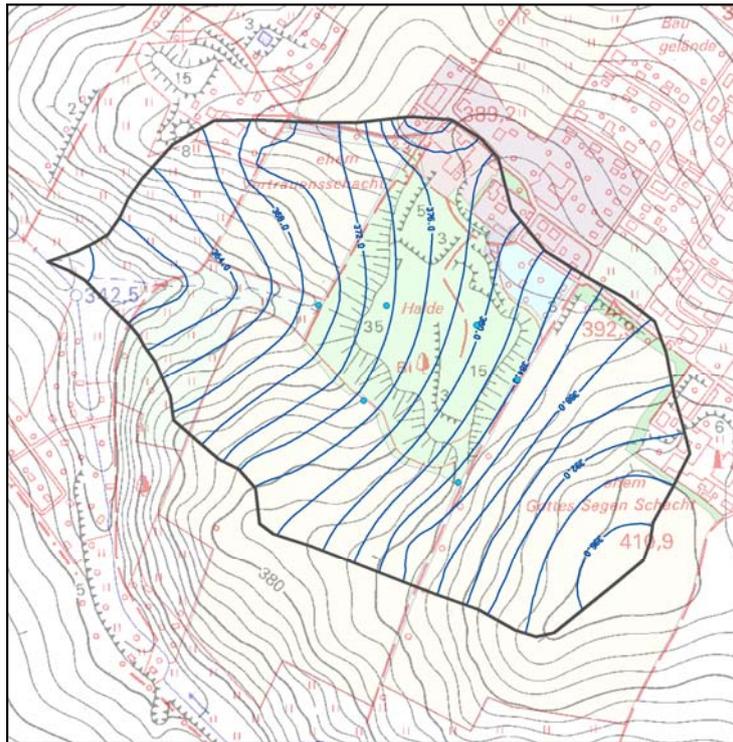


Abb. 11: Mittels FEFLOW berechnete Druckhöhen im Layer Mutterboden + Hangschutt + Zersetzung [m ü HN] (blau) im Modellierungsgebiet.

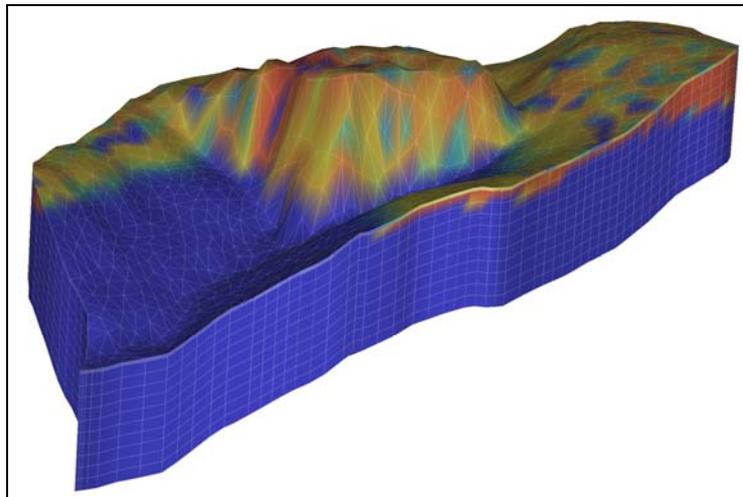


Abb. 12: Mittels FEFLOW berechnete Wassersättigung im Modellierungsgebiet (blau - 100 % gesättigt; gelb - nicht gesättigt [0%])

5.3.3 Stofftransportmodellierung (PHREEQC)

Im ersten Modellierungsschritt wurden zunächst die Gleichgewichtreaktionen im kontaminierten Haldensickerwasser (Solution 0) am Beispiel der Sickerwassermesssstelle SWH10 und im unkontaminierten Grundwasser (Solution 1) im Hangschutt im Anstrom der Halde OEL 10 am Beispiel der GWM 4 für den Stichtag 10./12.04.2007 modelliert. Zudem wurden die Gleichgewichtsreaktionen des Mischwassers aus Solution 0 und Solution 1 modelliert (Solution 2), welche das durch Haldensickerwasser kontaminierte Grundwasser im Hangschutt im Abstrom der Halde OEL 10 repräsentiert. Dazu wurden verschiedene Mischungsverhältnisse zwischen beiden Wässern

angesetzt und mittels Trial-and-Error vorwärts bis zu einer hinreichenden Übereinstimmung mit den real gemessenen Gehalten im Grundwasser im Hangschutt im Abstrom der Halde OEL 10 an den Beispielen der GWM 2/06 und GWM 7/07 modelliert.

Speziesverteilung der Hauptkomponenten der Haldensickerwässer (Halde OEL 10)

Schwefel:

Schwefel liegt in den Lösungen überwiegend in der Form des 2-fach negativen SO_4^{2-} -Komplexes vor. In Abhängigkeit vom Angebot der Erdalkalien werden aber auch bis zu 38 % MgSO_4^0 - und bis zu 21 % CaSO_4^0 -Komplexe angetroffen; die Haldensickerwässer der Halde OEL 10 führen aber auch 2 bis 3 % des nullwertigen ZnSO_4^0 -Komplexes (Abb. 13 und Tab. 35).

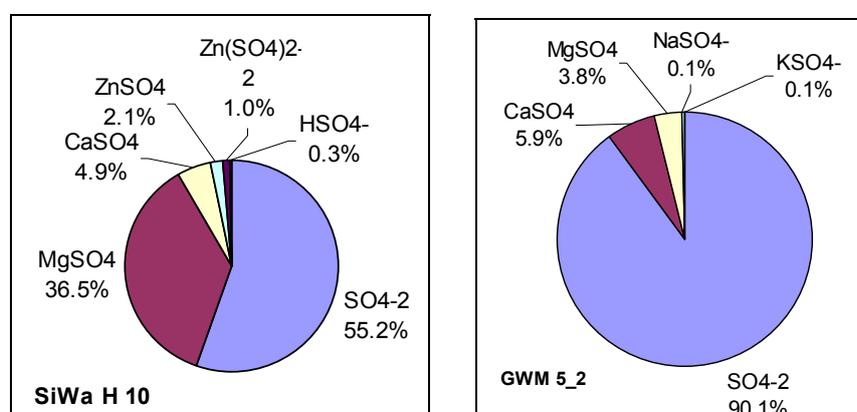


Abb. 13: Speziation des Schwefels im Haldensicker- und unkontaminierten Grundwasser Halde OEL 10

Tab. 35: Speziation von S und Cl im Haldensicker- und Grundwasser, Anteile in %

Probe-Nr.	S						Cl		
	SO_4^{2-}	MgSO_4	CaSO_4	ZnSO_4	NaSO_4^-	KSO_4^-	Cl-	ZnCl+	CdCl+
SWH1	56.4	34.4	7.2	0.8	0.5	0.3	99.97	0.03	
SWH2	71.4	7.0	20.8		0.6	0.3	100.0		
SWH3	84.9	8.7	6.2	0.0	0.1	0.1	100.0		
SWH7	64.0	19.3	14.3	1.2	0.2	0.1	99.96	0.03	0.01
SW10	54.4	36.0	4.8	2.1	0.3		99.88	0.10	0.01
SW10a	57.0	37.2	4.0	0.9	0.4	0.2	99.98	0.02	
SWH14	71.2	16.7	11.5	0.3	0.2	0.1	100.0		
SWH16	60.7	33.5	4.8	0.2	0.5	0.2	100.0		
SWH17	52.8	37.4	7.1		1.9	0.7	100.0		
SWH19	59.2	27.9	11.3		1.4	0.2	100.0		
GWM 2_1	73.6	13.9	10.3	1.8	0.1		99.96	0.03	
GWM 2_2	81.9	9.2	7.7	0.9	0.1		99.99	0.01	
GWM 3_1	59.9	28.2	8.9	1.7	0.3	0.1	99.94	0.06	0.01
GWM 3_2	60.7	27.3	10.0	1.1	0.3	0.1	99.96	0.03	0.01
GWM 4_2	87.4	6.6	5.7		0.1	0.1	100.0		
GWM 5_2	90.1	3.8	5.9		0.1	0.1	100.0		
GWM 6_2	62.0	30.4	5.3	0.6	1.0	0.4	99.98	0.02	
GWM 7_2	61.9	23.6	9.3	3.0	0.4	0.3	99.87	0.11	0.02

Chlorid:

Sowohl in den Haldensickerwässern des gesamten Lugau/Oelsnitzer Reviers als auch in den Grundwässern der Halde OEL 10 wird das Chlor zu über 99 % in der Form des Cl^- angetroffen (Tab. 35).

Magnesium und Kalzium:

Magnesium und Kalzium liegen in allen untersuchten Wässern überwiegend als freie Ionen in der Form Mg^{2+} und Ca^{2+} vor. Je nach Vorhandensein von Sulfat in der Lösung werden aber auch zwischen 5 % (sauberes Grundwasser GWM 4/07 im Anstrom der Halde OEL 10) und 48 % (SiWa Halde OEL 10) der nullwertigen MgSO_4^0 - und CaSO_4^0 -Komplexe angetroffen (Abb. 14 und Tab. 36).

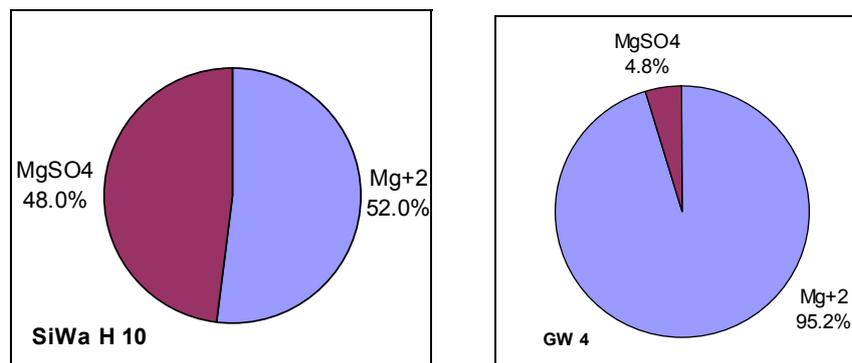


Abb. 14: Speziation des Magnesiums im Haldensicker- und unkontaminierten Grundwasser Halde OEL 10

Tab. 36: Speziation von Mg, Ca, Na und K im Haldensicker- und Grundwasser, Anteile in %

Probe-Nr.	Mg		Ca		Na		K	
	Mg+2	MgSO ₄	Ca+2	CaSO ₄	Na+	NaSO ₄ -	K+	KSO ₄ -
SWH1	64.0	36.0	63.2	36.8	95.9	4.1	95.2	4.7
SWH2	83.8	16.1	82.3	17.7	99.0	1.0	98.8	1.2
SWH3	94.1	5.9	93.2	6.8	99.7	0.3	99.7	0.3
SWH7	68.7	31.3	67.4	32.5	97.2	2.8	96.7	3.3
SW10	52.0	48.0	52.9	47.0	93.0	7.0	91.8	8.2
SW10a	72.0	28.0	70.4	29.6	97.2	2.8	96.9	3.1
SWH14	85.1	14.9	83.7	16.3	99.1	0.9	99.0	1.0
SWH16	67.3	32.7	66.1	33.9	96.7	3.3	96.2	3.8
SWH17	53.2	46.8	56.5	43.5	93.8	6.2	92.4	7.6
SWH19	63.3	36.7	63.2	36.8	95.9	4.1	95.2	4.7
GWM 2_1	76.7	23.3	77.0	22.9	98.7	1.3	98.4	1.6
GWM 2_2	81.7	18.3	81.6	18.4	99.1	0.9	98.9	1.1
GWM 3_1	61.0	39.0	61.5	38.5	96.0	4.0	95.2	4.8
GWM 3_2	68.2	31.8	67.0	33.0	96.9	3.0	96.5	3.5
GWM 4_2	95.2	4.8	94.7	5.3	99.8	0.2	99.7	0.2
GWM 5_2	94.5	5.5	93.7	6.3	99.7	0.2	99.7	0.3
GWM 6_2	68.5	31.5	66.5	33.5	96.7	3.3	96.3	3.7
GWM 7_2	59.2	40.8	60.8	39.1	96.1	3.9	95.1	4.8

Natrium und Kalium:

Wie die Erdalkalien, sind Natrium und Kalium in allen untersuchten Wässern überwiegend als freie Ionen in der Form Na^+ und K^+ anzutreffen. Als weitere Ionen kommen nur noch die einwertigen Komplexe NaSO_4^- und KSO_4^- in Anteilen zwischen 0.2 % (unbeeinflusstes Grundwasser GWM 4/07 im Anstrom der Halde OEL 10) und 7-8 % vor (SiWa Halde OEL 10) (Tab. 36).

Zink:

Zink liegt in allen untersuchten Wässern überwiegend als freies Ion in der Form Zn^{2+} vor. Je nach Vorhandensein von Sulfat in der Lösung werden aber auch zwischen 6-7 % (unbeeinflusstes Grundwasser GWM 4/07 im Anstrom der Halde OEL 10) und 41 % (SiWa Halde OEL 10) des nullwertigen ZnSO_4^0 -Komplexes angetroffen sowie bis zu 16 % (hochmineralisierte Sickerwässer der Halde OEL 17) und 20 % (SiWa Halde OEL 10) des $\text{Zn}(\text{SO}_4)_2^{2-}$ -Komplexes (Tab. 37).

Die Verbindungen ZnCl^+ , ZnOH^+ , $\text{Zn}(\text{OH})_2^0$ und ZnOHCl^0 liegen in Anteilen von 0.1 bis maximal 1.0 % in den Wässern vor.

Nickel:

Wie bei Mg, Ca und Zn liegt auch Nickel in allen untersuchten Wässern überwiegend als freies Ion in der Form Ni^{2+} vor. Je nach Vorhandensein von Sulfat in der Lösung werden aber auch zwischen 5-6 % (unbeeinflusstes Grundwasser GWM 4/07 im Anstrom der Halde OEL 10) und 46 % (SiWa Halde OEL 10) des nullwertigen NiSO_4^0 -Komplexes angetroffen (Tab. 37).

So wie für Zink treten auch bei Nickel weitere Spezies in Anteilen zwischen 0.1 % und 1.5 % (hochmineralisierte Sickerwässer der Halde OEL 17) auf: NiCl_2^0 , $\text{Ni}(\text{SO}_4)_2^{2-}$ und NiCl^+ .

Tab. 37: Speziation von Zn und Ni im Haldensicker- und Grundwasser, Anteile in %

Probe-Nr.	Zn							Ni		
	Zn^{+2}	ZnSO_4	$\text{Zn}(\text{SO}_4)_2^-$	ZnCl^+	ZnOH^+	$\text{Zn}(\text{OH})_2^0$	ZnOHCl^0	Ni^{+2}	NiSO_4	NiCl^+
SWH1	54.2	36.3	9.2	0.2				64.2	35.3	0.5
SWH2	78.3	19.9	0.8	0.2	0.4	0.3	0.1	82.4	17.1	0.4
SWH3	91.4	8.0			0.3	0.2		93.2	6.6	0.1
SWH7	61.2	34.1	4.7	0.1				68.5	31.3	0.2
SW10	39.2	40.6	20.0	0.2				53.7	45.8	0.3
SW10a	63.9	31.0	4.9	0.2				71.3	28.4	0.3
SWH14	80.7	18.5	0.6	0.1	0.1			84.1	15.8	0.1
SWH16	58.8	34.7	6.3	0.2				67.1	32.5	0.4
SWH17	43.9	39.2	15.9	1.0				56.6	41.7	1.5
SWH19	54.2	36.2	8.7	0.5	0.2	0.1	0.1	63.9	35.1	0.9
GWM 2_1	73.4	25.5	1.1	0.1				77.7	22.2	0.1
GWM 2_2	78.5	20.9	0.5					82.0	18.0	
GWM 3_1	53.6	38.3	8.1	0.1				62.8	36.9	0.2
GWM 3_2	60.3	34.2	5.4	0.1				68.1	31.7	0.2
GWM 4_2	93.7	6.3						94.8	5.2	
GWM 5_2	92.5	7.4						93.8	6.2	
GWM 6_2	59.0	34.4	6.4	0.2				67.4	32.1	0.4

Probe-Nr.	Zn							Ni		
	Zn ⁺²	ZnSO ₄	Zn(SO ₄) ₂ ⁻	ZnCl ⁺	ZnOH ⁺	Zn(OH) ²	ZnOHCl	Ni ⁺²	NiSO ₄	NiCl ⁺
GWM 7_2	53.5	39.2	7.3	0.1				62.2	37.6	0.1

Kadmium:

Bei Kadmium überschreiten die Anteile der Kadmiumsulfatspezies CdSO₄⁰⁻ und Cd(SO₄)₂²⁻ in einigen Proben sogar die des freien Ions Cd²⁺: in den Sickerwässern der Halde OEL 17, der Halde OEL10, der Halde OEL 19, der Halde OEL 16 und in den Grundwässern der Halde OEL 10 in den GWM 3, 7 und 6 (Tab. 38).

In den andern Wässern überwiegt das freie Cd²⁺-Ion, das in den unbeeinflussten Anstromgrundwässern der Halde OEL 10 (GWM 4 und 5) rd. 90 % des Cd ausmacht. Nennenswerte Anteile zwischen 0.7 % (unbeeinflusstes Grundwasser GWM 4 und 5) und 26.5 % (Halde OEL 17) bildet der CdCl⁺-Komplex.

Als weitere Spezies treten mit Anteilen zwischen 0.1 und 2.0 % CdCl₂⁰ und CdOHCl⁰ auf.

Kupfer:

Kupfer tritt überwiegend in der oxidierten 2-wertigen Form auf. Ausnahmen bilden nur die Haldensickerwässer der Halden OEL 2 und OEL 19, in denen die reduzierte einwertige Form des Kupfers in der Speziation als CuCl₂⁻ zu 19 % bzw. 29 % und als Cu⁺ zu 5.8 und 0.6 % auftreten (Tab. 39).

Tab. 38: Speziation von Cd im Haldensicker- und Grundwasser, Anteile in %

Probe-Nr.	Cd			
	Cd+2	CdSO ₄	Cd(SO ₄) ₂ ⁻	CdCl ⁺
SWH1	41.6	35.1	11.8	11.3
SWH2	65.9	21.1	1.1	11.6
SWH3	86.4	9.5	0.1	3.9
SWH7	51.9	36.5	6.6	5.0
SW10	29.6	38.4	25.0	6.9
SW10a	52.2	32.1	6.7	8.9
SWH14	73.3	21.2	0.9	4.5
SWH16	47.2	35.1	8.4	9.2
SWH17	26.4	29.2	15.9	26.5
SWH19	37.9	31.9	10.1	19.3
GWM 2_1	66.6	28.9	1.7	2.8
GWM 2_2	73.5	24.5	0.9	1.2
GWM 3_1	44.2	39.6	11.0	5.2
GWM 3_2	51.0	36.4	7.6	5.0
GWM 4_2	91.5	7.7	0.1	0.7
GWM 5_2	90.0	9.2	0.1	0.7
GWM 6_2	47.3	34.9	8.6	9.1
GWM 7_2	45.6	41.6	10.3	2.5

Überwiegend in der Form als Cu(OH)₂⁰ tritt das 2-wertige Kupfer in den Haldensickerwässern der Halde OEL 3 mit rd. 76 %, der Halde OEL 2 mit 63 % und der Halde OEL 19 mit rd. 44 % auf.

Meist ist aber das Kupfer in der Form als freies Ion Cu^{2+} und als nullwertiger CuSO_4^0 -Komplex in Anteilen bis zu rd. 94 % (unbeeinflusstes Grundwasser GWM 4) bzw. rd. 48 % (SWHalde OEL 10) anzutreffen.

Tab. 39: Speziation von Cu und As im Haldensicker- und Grundwasser, Anteile in %

Probe-Nr.	Cu(2)					Cu(1)			As(5)		
	Cu ⁺²	CuSO ₄	CuCl ⁺	CuOH ⁺	Cu(OH) ₂	CuCl ²⁻	CuCl ³⁻²	Cu ⁺	H ₂ AsO ₄ ⁴⁻	H ₃ AsO ₄ ⁴	HAsO ₄ ⁴⁻²
SWH1	62.5	36.9	0.2	0.2	0.2				91.7		8.3
SWH2	9.0	2.0		1.4	63.0	18.6		5.8	28.0		72.0
SWH3	20.3	1.6		2.5	75.7				43.4		56.6
SWH7	67.0	32.9	0.1						97.3	2.7	
SW10	52.2	47.6	0.2						97.5	2.5	0.1
SW10a	69.9	30.0	0.2						99.0	0.8	0.2
SWH14	58.6	11.8		2.4	27.2				61.5		38.5
SWH16	65.4	34.0	0.2	0.2	0.2				92.3		7.7
SWH17	55.3	43.1	1.2	0.2	0.2				88.5		11.5
SWH19	15.3	9.0	0.1	1.4	43.6	28.8	1.1	0.6	26.0		73.9
GWM 2 1	76.6	23.3	0.1						99.1	0.2	0.6
GWM 2 2	81.0	18.9							99.2	0.4	0.4
GWM 3 1	61.3	38.5	0.1						99.1	0.3	0.5
GWM 3 2	66.5	33.2	0.1	0.1	0.1				95.1		4.9
GWM 4 2	93.7	5.5		0.4	0.4				96.2		3.8
GWM 5 2	86.9	6.2		1.4	5.5				86.5		13.5
GWM 6 2	65.9	33.9	0.2						99.1	0.6	0.3
GWM 7 2	60.9	39.0	0.1						98.5	1.4	0.1

Arsen:

Arsen liegt nur in der oxidierten Form As(5) vor und bis auf wenige Ausnahmen als Spezies H_2AsO_4^- in Anteilen zwischen rd. 90 und 99 % (Tab. 39).

Überwiegend als HAsO_4^{2-} -Spezies kommt As in den Haldensickerwässern der Halde OEL 19 mit rd. 74 %, der Halde OEL 2 mit 72 % und der Halde OEL 3 mit rd. 57 % vor.

Sättigungsindizes

Die Gleichgewichtsberechnungen ergaben, dass sich nur in einigen Wässern Gips im Gleichgewicht ($\text{SI} \pm 0.2$) mit der Lösung befinden könnte, wobei meist eine leichte Untersättigung festzustellen ist (grün hinterlegte Felder in Tab. 40). Eine nur leichte Übersättigung ist in den Proben SWH17 mit $\text{SI} = +0.15$ (Halde OEL 17) und SWH10 (Halde OEL 10) und SWH19 (Halde OEL 19) mit $\text{SI} = +0.05$ festgestellt worden. In diesen drei genannten Halden befindet sich auch der Sättigungsindex für Anhydrit im Bereich von $\text{SI} \pm 0.2$, so dass ebenso von Gleichgewichtsbedingungen gesprochen werden kann.

Die Dokumentation der Bohrungen und Rammkernsondierungen auf der Halde OEL 10 ergab keine Hinweise auf Gipsausblühungen, was den Berechnungen, die keine wesentlichen Übersättigungen an Gips und Anhydrit ergaben, entsprechen würde.

Für die Sickerwasserprobe (6. Beprobung) an der Halde OEL 2 wurde für Cuprit Cu_2O ein Sättigungsindex von $\text{SI} = +1.16$ berechnet. Bei entsprechenden kinetischen Bedingungen könnte also Cuprit ausfallen.

Tab. 40: Sättigungsindizes für Gips, Anhydrit und Cuprit

Probe-Nr.	Gips	Anhydrit	Cuprit
	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	CaSO_4	Cu_2O
SWH1	-0.09	-0.34	
SWH2	-0.54	-0.79	1.16
SWH3	-1.84	-2.1	
SWH7	-0.13	-0.38	
SW10	0.05	-0.20	
SW10a	-0.55	-0.81	
SWH14	-0.88	-1.14	
SWH16	-0.45	-0.71	
SWH17	0.15	-0.09	
SWH19	0.05	-0.20	-1.23
GWM 2_1	-0.84	-1.09	
GWM 2_2	-1.23	-1.48	
GWM 3_1	-0.12	-0.37	
GWM 3_2	-0.19	-0.45	
GWM 4_2	-2.07	-2.33	
GWM 5_2	-1.99	-2.25	
GWM 6_2	-0.40	-0.66	
GWM 7_2	-0.18	-0.42	

Im Schnitt der 12 Beprobungen weisen die meist schwach gelblich gefärbten, neutralen Sickerwässer dieser Halde das zweitgeringste Redoxpotenzial (331 mV) und den zweitgeringsten Sauerstoffgehalt auf (3.18 mg/l). Der Kupfergehalt ist mit 27 $\mu\text{g/l}$ gering.

Mischungsmodellierung zwischen kontaminiertem Sickerwasser und unkontaminiertem Grundwasser:

Die im Grundwasser unter der Halde OEL 10 gemessenen Gehalte und Parameter kommen durch die Zumischung der Haldensickerwässer (SWH10) zum anströmenden unbeeinflussten Grundwasser (z. B. GWM 4/07) zustande. Das in der GWM 2/06 anzutreffende oberflächennahe Grundwasser repräsentiert einen Fließweg unter der Halde OEL 10 von rd. 80 Metern Länge, das in der GWM 7/07 - einen von rd. 200 Metern.

Durch die Zumischung von 5 % Haldensickerwässer zu 95 % anströmendem unbeeinflussten Grundwasser lassen sich unter Gleichgewichtsbedingungen sehr gut die Verhältnisse in der **GWM 2/06** nachvollziehen (hellgrün hinterlegte Felder in Tab. 41). Die Verhältnisse in den GWM 7/07 und 3/06 sind aber nicht mehr durch Mischungsreaktionen zwischen den SWH10 und der GWM 4/07 zu erreichen.

Um die Verhältnisse in der GWM 7/07 zu simulieren, werden die Wässer aus der GWM 2 mit den Haldensickerwässern verschnitten, für die GWM 3/06 - die Wässer aus der GWM 7/07 mit den Haldensickerwässern (Tab. 41).

Tab. 41: Ergebnisse der Mischungsrechnungen

Probe-Nr.		pH	Cl-	SO42-	Na	K	Ca	Mg	Cd	Cu	Ni	Zn
	[%]		[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]
sauberes, oberflächennahes Grundwasser, Anstrom:												
GWM 4		5.7	4	62	4.43	7.58	28.1	21.9	1.7	15	88	250
Haldensickerwasser:												
SWH 10		3.7	300	9900	106	36.9	421	1880	1900	110	7200	340000
kontaminiertes oberflächennahes Grundwasser:												
GWM 2		4.5	19	493	9.725	8.07	90.05	70.4	124.5	52	390	20500
GWM 7		4.0	53	3240	87.0	72.1	321	474	1100	190	3200	170000
GWM 3		5.1	108	3195	63.45	31.5	350.5	631.5	490	68	1700	84000
Ergebnisse der Mischungsrechnungen:												
SWH 10	5											
GWM 4	95	4.6	19	560	10	9	48	116	98	20	448	17462
SWH10	40											
GWM 2	60	3.9	133	4276	49	20	225	804	845	76	3152	150096
SWH10	5											
GWM7	40	4.2	39	1837	43	35	166	298	539	90	1699	85661
GWM4	55											

Der pH-Wert in der GWM 2/06 wird ziemlich genau erreicht, und die Gehalte an Chlorid- und Sulfat- sowie der Alkaliionen gut wiedergespiegelt. Die Erdalkalien hingegen lassen sich nicht so gut abbilden. Die Schwermetallgehalte der GWM 2/06 wiederum sind, bis auf Cu, durch die Mischungsrechnungen relativ gut erreicht worden.

Die Gehalte in der **GWM 7/07** lassen sich durch Mischung von Haldensickerwasser mit dem in der GWM 2/06 aufgefundenem Grundwasser simulieren; die Ergebnisse sind allerdings unterschiedlich für die verschiedenen Elemente bzw. Ionen (blau hinterlegte Felder in Tab. 41). pH-Wert, Zn- und Ni-Gehalte werden durch ein Mischungsverhältnis von 40 % Haldensickerwasser SWH10 und 60 % Grundwasser aus der GWM 2/06 sehr genau berechnet, nur ungefähr stimmen die Sulfat-, Ca- und Cd-Gehalte überein. Im Mischungsergebnis deutlich zu geringe Gehalte wurden für Na, K und Cu berechnet, deutlich zu hohe - für Chlorid und Mg.

Die Gehalte in der Abstrommessstelle **GWM 3/06** sind durch die Mischung von Haldensickerwasser SWH10, dem anströmenden Grundwasser aus der GWM 7/07 und dem seitlich zusitzendem unbeeinflussten oberflächennahen Grundwasser (entsprechend GWM 4/07) simuliert worden. Auch durch die Simulation mit den unterschiedlichsten Mischungsverhältnissen kann kein befriedigendes Ergebnis erhalten werden. Der pH-Wert des Grundwassers in der GWM 3/06 ist mit 5.1 rel. hoch, so dass man die Mengen an SWH10 (pH-Wert 3.7) und GWM 7/07 (pH-Wert 4.0) nicht so hoch veranschlagen kann und die des unbeeinflussten Grundwassers in GWM 4/07 (pH-Wert 5.7) relativ groß zu veranschlagen sind (gelb hinterlegt in Tab. 41.) Im Berechnungsergebnis (Mischung von 5 % SWH10, 40 % GWM 7/07 und 55 % GWM 4/07) erhält man eine gute Übereinstimmung der wesentlichen Schadstoffgehalte Ni, Cd und Zn sowie der K-Gehalte. Der pH-Wert wurde deutlich zu niedrig berechnet, auch die Gehalte an Chlorid, Sulfat, Na, Ca und Mg. Lediglich Cd und Cu wurden etwas zu hoch berechnet.

Zur Modellierung des eigentlichen Transportvorgangs wurde die gedachte 300 m lange Stromlinienbahn vom Anstrom zum Abstrom der Halde OEL 10 in 60 Zellen zu je 5 m Länge unterteilt. Als Durchlässigkeit im Hangschutt wurde $9.5 \cdot 10^{-6}$ m/s, als Diffusionskoeffizient $1.315 \cdot 10^{-7}$ m²/s und als Dispersivität 1.0 m angesetzt. Abb. 14 und 15 zeigen den Verlauf einiger Elemente bzw. der pH-Werte im Ergebnis des Mischvorgangs von kontaminiertem Sickerwasser mit unkontaminiertem Grundwasser über den Zeitraum von 5 Jahren im Abstrom der Halde OEL 10.

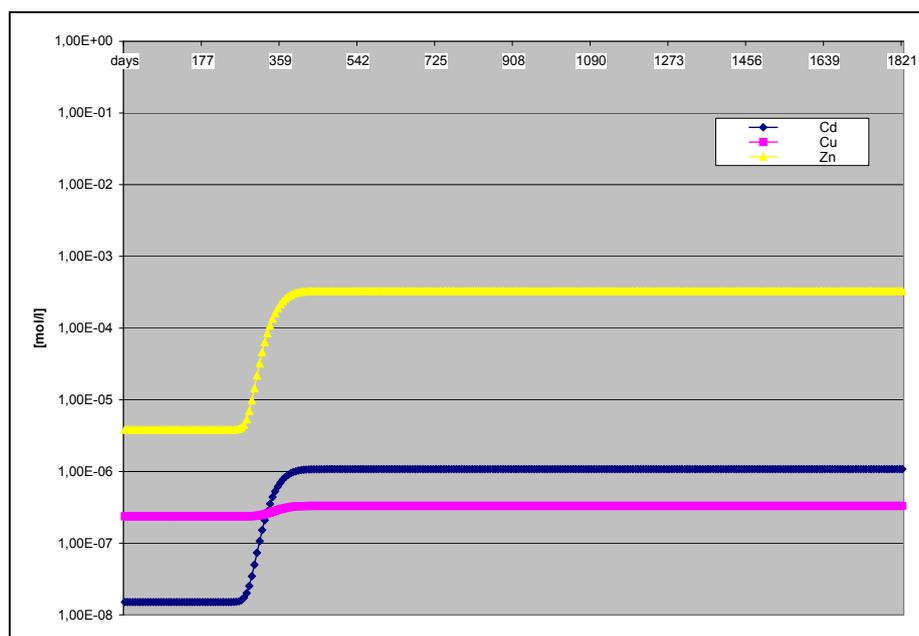


Abb. 15: Verlauf der Cd-, Cu- und Zn-Gehalte im oberflächennahen Grundwasser am Ende des Transportweges von 300 m

Der Durchbruch der Haldensickerwässer in der Abstrommessstelle GWM 3/06 erfolgt nach 270 bis 430 Tagen nach der ersten Zumischung des Haldensickerwassers. Der Verlauf der gelben Linie (pH-Werte bei Disp = 1) in Abb. 15 ist unter der magentafarbenen Linie verborgen (Disp = 1, Diff.-Koeffizient = 2,315E-8)

Die berechneten Grundwasserneubildungsraten im Untergrund der Halden liegen zwischen 134 mm/a und 246 mm/a.

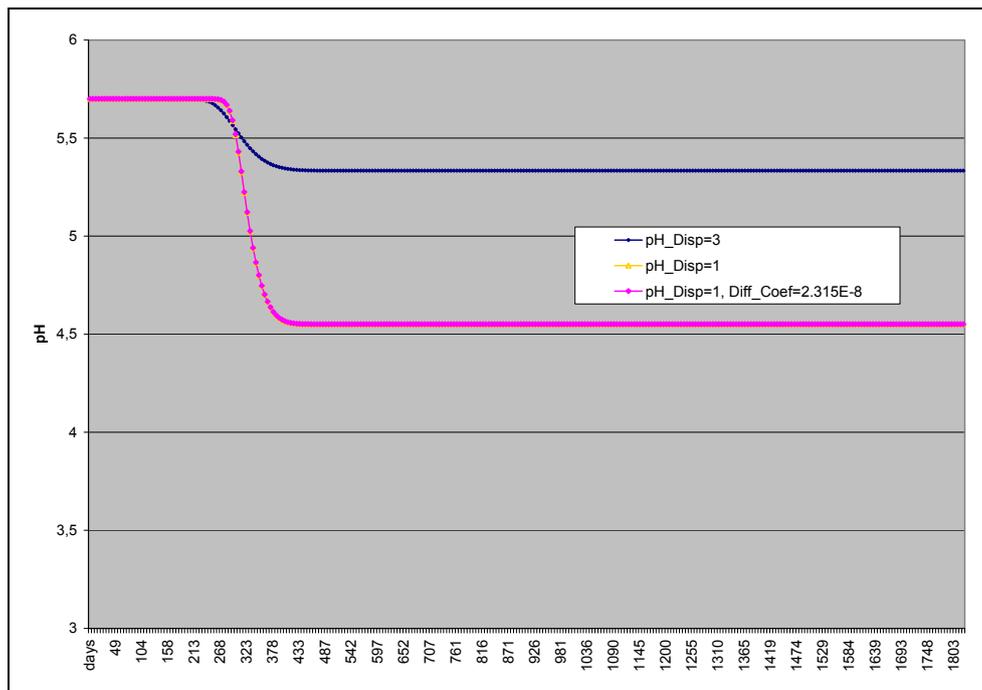


Abb. 16: Verlauf der pH-Werte im oberflächennahen Grundwasser am Ende des Transportweges von 300 m

5.4 Bodenluft

Die Untersuchungen in Halde ZWI 10 haben keine messbaren Konzentrationen an organischen Bestandteilen in der Bodenluft nachgewiesen. Die Werte lagen durchweg unter den Bestimmungsgrenzen. Anhand der sehr geringen Konzentrationen von organischen Schadstoffen in der Bodenluft ist zu schlussfolgern, dass keine Besorgniswerte in der Außenluft überschritten werden. Formell ist damit kein Gefährdungspotenzial für den Wirkungspfad Bodenluft - atmosphärische Luft - Mensch abzuleiten.

Im Bereich der Entgasungsstellen kommt es durch den Austritt der Brandgase zur relativen Abreicherung von Luftsauerstoff und zur Anreicherung von CO₂ und SO₂. Vergleicht man die Konzentrationen in der Bodenluft mit den MAK-Werten, ergeben sich bei einem angenommenen Verdünnungsfaktor von 1:100 keine Überschreitungen der MAK-Werte.

Somit ist eine Gefährdung durch den Aufenthalt in der Außenluft im Entgasungsbereich auszuschließen. Der angesetzte Verdünnungsfaktor von mindestens 1 : 100 ist durch die starke Exponiertheit des Standortes als realistisch einzuschätzen. Ein Aufenthalt in bodennahen Luftschichten ist dennoch zu vermeiden, da dort durch geringere Verdünnungsfaktoren Sauerstoffknappheit bzw. Vergiftungsgefahr durch zu hohe SO₂- und CO₂-Konzentrationen auftreten können. Aus der Literatur ist bekannt, dass Konzentrationen von 8 Vol-% CO₂ bereits bei einer Aufenthaltsdauer von 30 bis 60 min letal wirken.

6 FORSTLICHE STANDORTAUSWERTUNG

Floristische Ergebnisse

Die Anzahl der vorkommenden Pflanzenarten auf den untersuchten Halden zeigt Tab. 42.

Tab. 42: Anzahl der Pflanzenarten auf den Halden OEL 10 und OEL 17

	Anzahl auf Halde OEL 10	Anzahl auf Halde ZWI 17
Baumarten	22	19
Straucharten	13	7
Kräuter	88	74
Moosarten	7	13
Gesamtanzahl	130	113

Ein Haldenvergleich ergab, dass in den beiden Halden 57 gemeinsame und 81 unterschiedliche Pflanzenarten vorhanden sind. Der Unterschied im Arteninventar ist somit signifikant.

Naturschutzfachliche Auswertung der Florenliste

Die Florenlisten wurden nach Vorkommen von Arten mit einem Schutzstatus geprüft.

Auf der Halde OEL 17 kommen keine Pflanzenarten mit einem Schutzstatus vor. Auf Halde OEL 10 konnte die Breitblättrige Stendelwurz (*Epipactis helleborine*, Schutzkategorie 3 Rote Liste Sachsen) als eine heimische Orchideenart nachgewiesen werden.

Vegetationskundliche Auswertung

Auf der Halde OEL 17 kommen Pflanzenarten aus der Klasse der Nadelwälder vor, die auf der Halde OEL 10 fehlen (Abb. 17). Hingegen treten dort verstärkt Arten aus dem Verband der Eichen-Hainbuchenwälder auf.

Die Schlussfolgerung für die weitere waldbauliche Behandlung ist, dass auf Halde OEL 17 u. a. die Weißtanne gute Wuchsbedingungen vorfindet. Auf der Halde OEL 10 sollten die zukünftigen Waldbestände aus Eichenarten und Edellaubbaumarten bestehen.

Im Bereich der mineralischen Nassstandorte kommen auf der Halde OEL 17 kleinflächig Pflanzengesellschaften vor, die dem Verband der Auenwälder zuzuordnen sind. Dies sind vor allem Standorte in Entwässerungsrinnalen, in denen das erodierte Haldenmaterial auenartig angeschwemmt wurde. Hier ist auch zukünftig die Schwarzerle als Hauptbaumart zu betrachten.

Die schwelenden Bereiche auf der Halde OEL 17 haben ein eigenes Arteninventar. Im Straußgras-Magerrasen kommen übergreifend Arten aus der Klasse der Ackerwildkrautfluren vor. Das Baumwachstum ist begrenzt, so dass forstwirtschaftliche Zielstellungen in diesen Bereichen nicht sinnvoll sind.

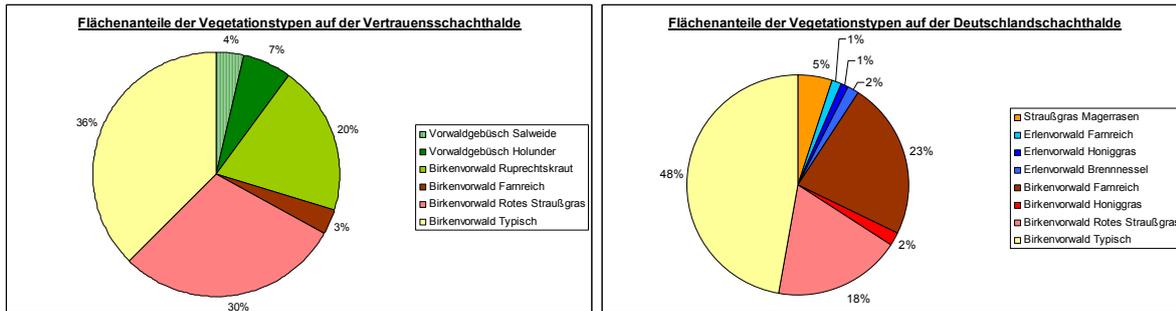


Abb. 17: Übersicht der Flächenanteile der Vegetationstypen auf der Halden OEL 10 und OEL 17

Waldwachstumskundliche Ergebnisse

Es wurde ein mittlerer Holzvorrat auf der Halde OEL 17 von 116 Vfm/ha und auf Halde OEL 10 von 220 Vfm/ha errechnet. Die Ursache für diese Schwankungen sind unterschiedliche Standortsbedingungen und Sukzessionsstadien der Waldbestände beider Halden.

Abb. 18 zeigt, dass die Waldbestände auf der Halde OEL 10 einen größeren Anteil an Gewöhnlicher Birke aufweisen. Auf der Halde OEL 17 sind vor allem auch Schwarzerle und Zitterpappel am Bestandaufbau beteiligt. Die Robinie und Nadelbaumarten kommen nur auf der Deutschland-Schacht-Halde vor.

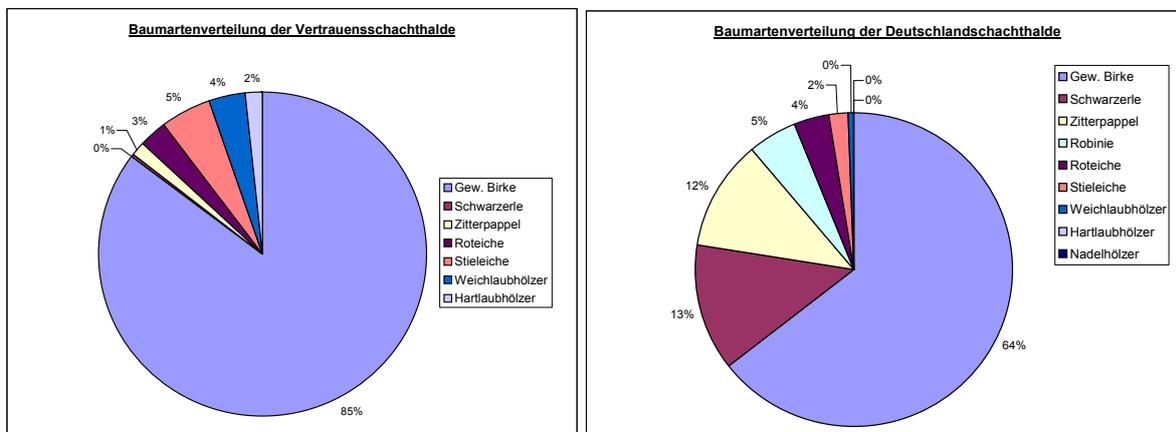


Abb. 18: Aktuelle Baumartenanteile im Oberstand der Waldbestände auf den Halden OEL 10 und OEL 17

Ergebnisse aus den Erhebungen der natürlich verjüngten Gehölzarten

Abb. 19 zeigt, dass in der Naturverjüngung der Halde OEL 10 anspruchsvolle Edellaubbaumarten (Bergahorn, Gewöhnliche Esche, Vogelkirsche) dominieren, wogegen auf Halde OEL 17 vor allem Rotbuche und Stieleiche vorherrschen.

Außerdem kommen auf der Halde OEL 17 Nadelbaumarten (Gewöhnliche Waldkiefer, Gewöhnliche Fichte, Weymouthskiefer) vor. Auf der Halde OEL 17 zeigt die Naturverjüngung die Tendenz zu einem Rotbuchen-Eichenwald mit montanen Nadelbaumarten wie der Fichte. Die Naturverjüngung der Halde OEL 10 zeigt eine Entwicklung zu Eichen-Hainbuchenwäldern mit hohem Edellaubbaumanteil.

Es wurden folgende Verjüngungsdichten errechnet: Halde OEL 10 2420 Bäumchen/ha; Halde OEL 17 562 Bäumchen/ha.

Der Wert der Halde OEL 17 ist zu gering, um ohne gezielte Maßnahmen ökologisch stabile Waldbestände aufbauen zu können.

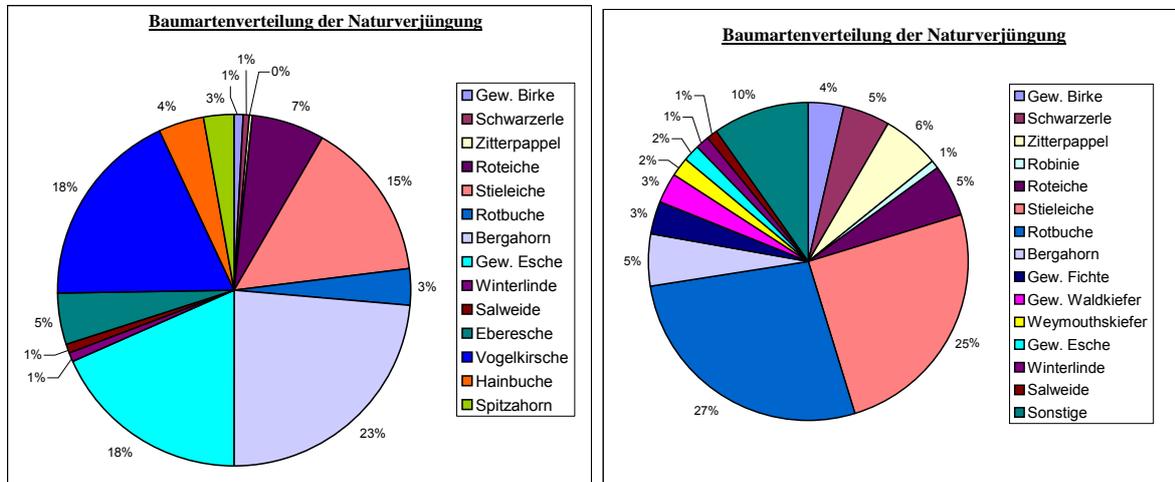


Abb. 19: Übersicht der aktuellen Baumartenanteile der Naturverjüngung der Halden OEL 10 und OEL 17

Forstliche Standortskartierung

Beide Halden bestehen etwa zur Hälfte aus mäßig nährstoffhaltigen Böden mit mittelfrischem Wasserhaushalt. Ebenso ist der Anteil von 28 % der mäßig nährstoffhaltigen, frischeren Böden gleich. Der Anteil der trockeneren Böden mit mäßiger Nährstoffversorgung ist auf der Halde OEL 10 prozentual höher. Auf der Halde OEL 17 kommen auch Böden mit ziemlich armer Nährstoffausstattung und trockenem Wasserhaushalt sowie mineralische Nassstandorte vor. Letztere Standorte müssen waldbaulich eine besondere Beachtung erhalten. Vor allem auf den Böden mit armer Nährstoffausstattung ist das Baumwachstum begrenzt, so dass über eine alternative Nachnutzung nachgedacht werden sollte.

Baumartenökogramme

Die unterschiedlichen Standortbedingungen verursachen eine spezifische Auswahl an Baumarten, die für den zukünftigen Aufbau ökologisch stabiler Waldbestände auf den Halden geeignet sind. Abb. 20 und 21 zeigen die Zuordnung möglicher Baumarten zu den Standortformen. Diese sollte bei zukünftigen Anpflanzungen oder der Förderung von Naturverjüngung beachtet werden.

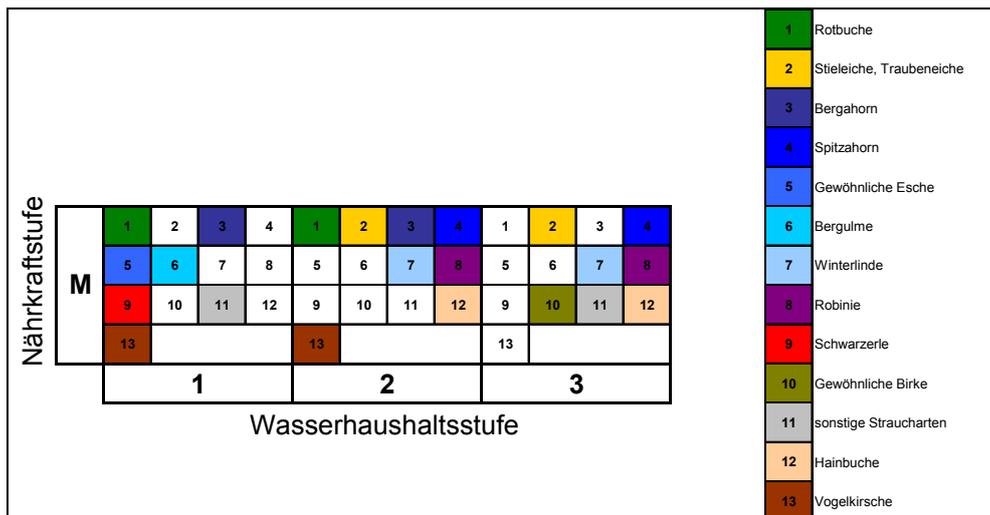


Abb. 20: Baumartenökogramm der Halde OEL 10

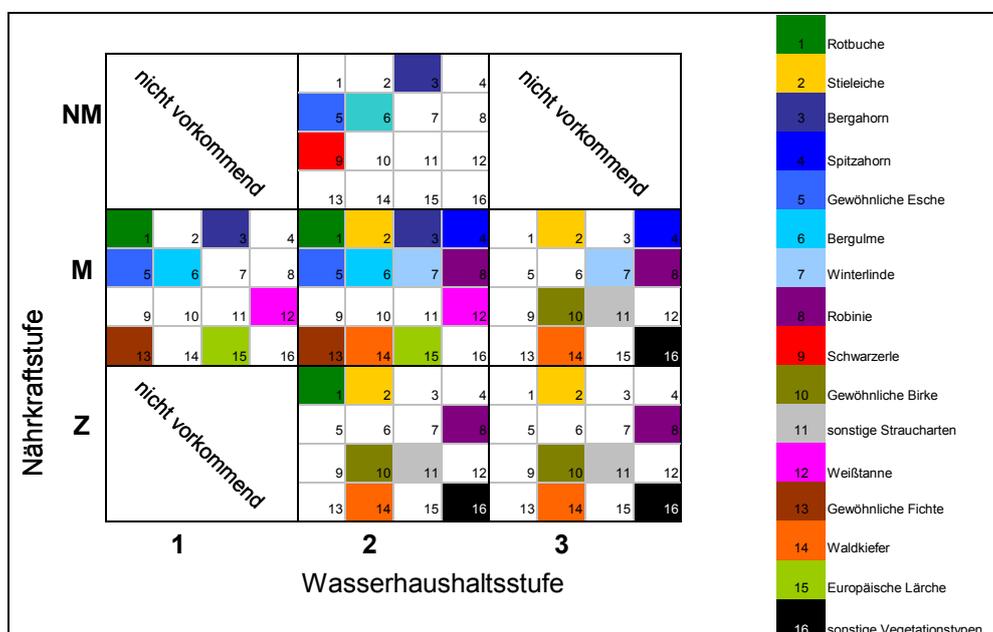


Abb. 21: Baumartenökogramm der Halde OEL 17

Forstliche Nutzbarkeitszonen

Abb. 22 zeigt die Flächenanteile der Nutzbarkeitszonen. Auf Halde OEL 17 ist ein Drittel der Flächen bedingt durch starke Hangneigungen erschwert nutzbar. Die schwelenden Bereiche wurden mit 6 % als nicht nutzbar klassifiziert. Die restlichen Bereiche dieser Halde sind forstwirtschaftlich nutzbar, es ist jedoch nicht genügend Naturverjüngung vorhanden, um eine Selbstentwicklung garantieren zu können.

Die Halde OEL 10 ist insgesamt besser forstlich nutzbar. Die erschwert nutzbaren Bereiche weisen dennoch eine gute Naturverjüngungsschicht auf. Über die Hälfte der Flächen sind forstwirtschaftlich gut nutzbar, da ebene Plateaulagen mit günstigen Standortsbedingungen vorhanden sind. Auf 3 % der Flächen muss bei der zukünftigen Nutzung das Vorkommen einer geschützten Pflanzenart beachtet werden.

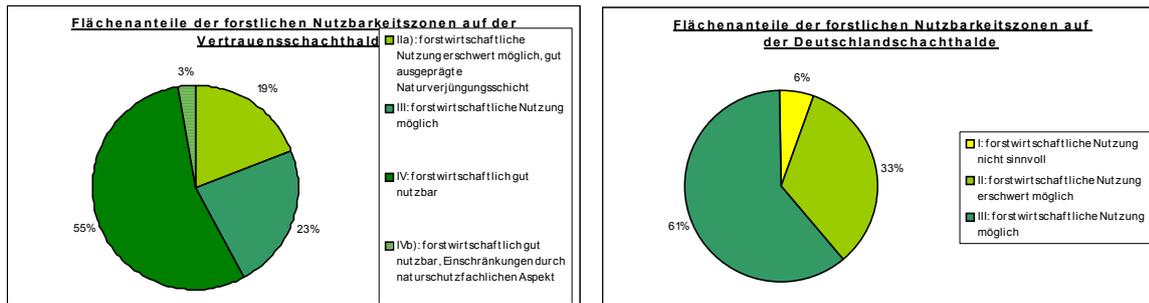


Abb. 22: Übersicht der Flächenanteile forstlicher Nutzbarkeitszonen der Halden OEL 10 und OEL 17

Zusammenfassend kann für die beiden Halden im Lugau/Oelsnitzer Revier gesagt werden, dass sie unterschiedliche Standortbedingungen und örtliche Besonderheiten aufweisen, die unterschiedliche Bedingungen für das Pflanzen- und Baumwachstum bewirken. Im Gegensatz zur Halde OEL 17 ist der Waldbestand auf der Halde OEL 10 insgesamt forstwirtschaftlich besser nutzbar.

Eine allgemeingültige Aussage, wie aus forstlicher Sicht generell mit den Halden in beiden Steinkohlerevierern zukünftig verfahren werden sollte, ist aus den bisherigen Untersuchungen allein nicht möglich. Dazu sind noch Haldenuntersuchungen im klimatisch wärmebegünstigteren Bereich Zwickau notwendig.

7 VERALLGEMEINERBARE ERGEBNISSE

7.1 Formalisiertes Bewertungsschema für Steinkohlenhalden

Mit dem steinkohlenhaldenspezifischen GEFAHALD wurden alle Konventionen aus der GEFA-Methodik übernommen.

Zusätzlich gelten in Ergänzung von GEFA:

- neue Stoffgefährlichkeiten r_0 -Werte mit Berücksichtigung geochemischer Anomalien,
- neue Δm -Werte als Korrekturfaktoren für die Parameter:
 - thermische Umwandlungen/Brandpotenzial,
 - Branderscheinungen,
 - Mineralneubildungen,
 - Bewuchs,
 - Hangneigung,
 - Standsicherheit.

r_0 - Stoffgefährlichkeit

Es werden **spezifische Abfallarten** eingeführt. Im Vergleich zu bereits vorhandenen Stoffgefährlichkeiten für ähnliche Abfallarten sowie analytischer Untersuchungen an haldenspezifischen Ablagerungen werden Stoffgefährlichkeiten abgeleitet. Es werden folgende r_0 -Werte für die **Schutzgüter Boden, Grund- und Oberflächenwasser** vergeben:

kungspfad Boden kann das Austragsverhalten bezüglich der thermischen Umwandlung des Haldenmaterials nicht statistisch gesichert beschrieben werden.

Aus den zahlreichen Eluatuntersuchungen und der sequentiellen Extraktion können aber für den Sickerwasserpfad folgende Korrekturwerte für m_1 abgeleitet werden:

Schutzgut Grund-/Oberflächenwasser

- Vergleichslage: Umwandlung durch Haldenbrand gering, geringer Anteil an gebrannten Schiefertonen $\Delta m = \pm 0,0$.
- Korrekturlagen:

Anteil umgewandelter Haldenmassen	nicht vorhanden:	$\Delta m = - 0,1$,
	mittel:	$\Delta m = + 0,1$,
	hoch:	$\Delta m = + 0,2$.

Die Vergleichslage entspricht dem „Normalfall“ der Halden mit vergleichsweise geringem Anteil an gebrannten Schiefertonen. Nach der statistischen Verteilung des Anteiles gebrannten Haldenmaterials am Gesamthaldenkörper in den Zwickauer Halden werden folgende Grenzen für die Einteilung festgelegt:

Anteil nicht vorhanden:	≤ 2 Vol %,
Anteil gering:	< 2 Vol % bis ≤ 9 Vol % (Vergleichslage),
Anteil mittel:	< 9 Vol % bis ≤ 33 Vol %,
Anteil hoch:	> 33 Vol %.

Diese Anteile beziehen sich ausschließlich auf den eigentlichen Haldenkörper und nicht auf assoziierte Ablagerungen, wie Mülldeponien u. a., die später auf den Haldenkörper aufgebracht worden.

Schutzgut Luft

Das Austragspotenzial zur Entstehung von Brandgasen wird durch die thermische Umwandlung über den gesamten Haldenkörper berücksichtigt. Das Austragsverhalten berücksichtigt dabei nicht die Schwermetallgehalte, sondern vielmehr den Restkohleanteil im Haldenkörper. Dabei wird das **Brandpotenzial** und nicht der aktuell vorhandene Haldenbrand bewertet. Es werden folgende Δm -Werte vergeben:

- Vergleichslage: Brandpotenzial sehr niedrig (sehr hoher Anteil an thermisch umgewandelten Material bzw. potenziell thermisch inaktiven Material) $\Delta m = \pm 0,0$
- Korrekturlagen:

Brandpotenzial niedrig (hoher Anteil potenziell thermisch inaktiven Materials):	$\Delta m = + 0,1$,
Brandpotenzial mittel (mittlerer Anteil potenziell thermisch inaktiven Materials):	$\Delta m = + 0,2$,
Brandpotenzial hoch (geringer Anteil potenziell thermisch inaktiven Materials):	$\Delta m = + 0,3$.

Die Korrekturlagen berücksichtigen den Restkohleanteil in der Gesamthalde. So treten Unterschiede durch den Anteil an gebrannten, d. h. restkohlefreien Schiefertonen bzw. auch durch das Alter der Halde auf.

Nach der statistischen Verteilung des potenziell thermisch inaktiven Anteiles am Gesamthaldenkörper werden folgende Grenzen für die Einteilung festgelegt:

Anteil gering:	≤ 2 Vol %,
Anteil mittel:	< 2 Vol % bis ≤ 20 Vol %,
Anteil hoch:	< 20 Vol % bis ≤ 55 Vol %,
Anteil sehr hoch:	> 55 Vol % (Vergleichslage).

Mineralneubildung

Die Mineralneubildung im Haldenvolumen gilt als Parameter nur für das Schutzgut Boden, Grund-/Oberflächenwasser. Vorzugsweise entstehen die Neubildungen als Resultat der Branderscheinungen/Haldenbrände aber auch als Oxidationsprodukt bei der Verwitterung.

Schutzgut Boden

Aus Untersuchungen der Halde ZWI 23 sind krustenartige Mineralneubildungen an den Ausgasungsbereichen infolge aktiven Haldenbrandes bekannt. Es wurden Methylphenolverbindungen und PAK-Gehalte in Größenordnung festgestellt. Des Weiteren sind von Steinkohlenhalden Neubildungen von Schwefel bekannt. Derartige Mineralneubildungen führen zur Erhöhung des Gefährdungspotenzials für den Direkt-pfad Boden - Mensch, da diese direkt an der Oberfläche auftreten und toxisch wirken. Daher wird für derartige Mineralneubildungen ein Zuschlag von + 0,1 erteilt.

Schutzgut Grund-/Oberflächenwasser

Wenn bei der OE Mineralneubildungen festgestellt werden, ist davon auszugehen, dass ein erhöhtes Lösungspotenzial vorhanden ist. Bei den festgestellten Mineralneubildungen handelt es sich größtenteils um leicht lösliche Sulfate, wie z.B. Gips, die zur Frachterhöhung führen und teilweise an der Sulfatsignatur der Sickerwässer beteiligt sind. Es liegt daher ein erhöhtes Austragspotenzial vor. Als Vergleichslage werden Halden ohne Mineralneubildungen betrachtet.

- Vergleichslage: Mineralneubildungen nicht vorhanden
- Korrekturlage: lösliche Mineralneubildungen vorhanden $\Delta m = + 0,1$

Aktuelle Branderscheinungen

Aktuelle Branderscheinungen gelten als das Gefährdungspotenzial beeinflussender Parameter ausschließlich für das **Schutzgut Luft**.

- Vergleichslage: aktuelle Branderscheinungen nicht vorhanden
- Korrekturlage: aktuelle Branderscheinungen vorhanden $\Delta m = + 0,1$

Anhand der durchgeführten Untersuchungen der Brandgase in Halde ZWI 10 ergibt sich kein deutlich erhöhtes Gefährdungspotenzial durch organische Brandgase. Es kommt hauptsächlich zu Sauerstoffentzug und Anreicherung von CO_2 , SO_2 und NO_x in der Außenluft. Durch die Abreicherung des Atemgases O_2 wird ein leicht erhöhtes Gefährdungspotenzial, z. B. durch Aufenthalt in den bodennahen Emissionsbereichen, verursacht.

Des Weiteren wird das Vorhandensein von Brandgasen mit organischer Schadstofffracht mit geringen Konzentrationen vor allem in Halden mit Kokereiabfällen durch die Halde ZWI 23 bestätigt.

Bewuchs/Infiltration

Der Bewuchs der Haldenoberfläche wirkt über die Beeinflussung der Verdunstung wesentlich auf die Menge des in die Halde infiltrierenden Niederschlagswassers und ist demzufolge für die Schutzgüter **Grund- und Oberflächenwasser** relevant. Die einzelnen Faktoren, die auf die Verdunstungsleistung bzw. die Infiltrationshöhe wirken, sind:

- Nutzungsart (Wald, Grünland, Kleingarten; andere Nutzungen (Versiegelungsgrad)),
- Intensität des Bewuchses (schwach, mittel, üppig),
- Stockwerksbau, Bestandsalter und -schädigung bei Waldnutzung.

Für die quantitative Beschreibung der Verdunstungsleistung der o. g. Sachverhalte sind mehrere skalierbare Parameter anzusetzen, wie:

- Vegetationsbedeckungsgrad,
- Blattflächenindices,
- max. Durchwurzelungstiefe, Bereich der max. Wurzeldichte und Durchwurzelungsform,
- Bestandshöhe,
- Bewuchsentwicklung (Üppigkeit),
- Waldaufbau (ein- oder mehrschichtig),
- Schädigung der Vegetation durch äußere Einflüsse.

Die Menge der Sickerwasserneubildung wird neben Evaporation und Interzeption auch durch das Abflussverhältnis kontrolliert. Unter diesem Aspekt gehen vor allem die Nutzungsart durch die Parameter Versiegelung, Verdichtungsgrad und aufgebrauchte Fremdböden (Lehmabdeckung) sowie eventuell Bewässerung und Bodenbearbeitung ein. Damit wird in Anlehnung an das CN-Verfahren des US Soil Conservation Service das Verhältnis Oberflächenabfluss zu infiltrierender Wassermenge berücksichtigt.

Trotz der Komplexität der wasserhaushaltlichen Situation der Halden wird ein einfaches Punktebewertungssystem eingeführt. Damit wird der Wasserhaushalt der Halden empirisch, ohne eine Modellierung durchzuführen, bewertet.

Es werden demzufolge zwischenzeitlich als Konkretisierung des bisherigen Merkmals Abdeckung/Bewuchs sog. **Bewuchs-/Infiltrationskategorien** eingeführt, die wie folgt eingeteilt werden:

- Vergleichslage: Halde komplett bewachsen, Nutzung Waldfläche $\Delta m = \pm 0,0$,
- Sickerwasserbildung gering: $\Delta m = - 0,2$,
- hoch: $\Delta m = + 0,2$.

Die Kategorien werden dabei mit folgenden Merkmalen des Bewuchses/der Infiltration belegt:

Tab. 43: Bewuchs-/Infiltrationskategorie

Kategorie	Kategorie I $\Delta m = + 0,2$	Kategorie II $\Delta m = \pm 0,0$ Vergleichslage	Kategorie III $\Delta m = - 0,2$
Eigenschaft	Sickerwasserbildung hoch - Infiltration hoch - Interzeption mäßig bis gering	Sickerwasserbildung mäßig - Infiltration hoch - Interzeption hoch	Sickerwasserbildung gering - Infiltration gering - Interzeption gering - Oberflächenabfluss hoch
Merkmale (als Beispiel)	- Waldflächen » einstöckiger Aufbau » Dichtung und Jungwuchs » mittlere bis spärliche Bewuchsintensität - Kleingärten - Dauergrünland - Ödland unversiegelt	- Waldflächen » mehrstöckiger bis einstöckiger Aufbau » Alt- und Stangenholz » starke und mittlere Bewuchsintensität - Sport- und Spielplätze	- Versiegelte Flächen » Parkplätze » Industrie- und Gewerbeflächen » Wohngebiete - Decklehme aufgebracht

Durch die Kartierung der Vegetation auf den Halden wird die Vergleichslage der Kategorie II bestätigt. Die flächenmäßige Wichtung der Nutzungs- und Bewuchsanteile führt zur Bewuchskategorie. Flächennutzung und Bewuchs können, wenn keine Kartierung vorliegt, auch anhand von Luftbildern ermittelt werden.

Hangneigung

Die Hangneigung bzw. die Morphologie der Halden wirkt über die Beeinflussung der Menge des oberflächennah abfließenden bzw. des in die Halde infiltrierenden Niederschlagswassers auf die Sickerwassermenge und ist demzufolge für die Schutzgüter **Grund- und Oberflächenwasser** relevant. Bei einer Plateauhalde ist von einer höheren spezifischen Sickerwassermenge als bei einer reinen Kegelhalde auszugehen.

Folgende zwei Haldentypen sind zu unterscheiden:

- Vergleichslage: Kegelhalde,
- Korrekturlage: Plateauhalde $\Delta m = + 0,1$.

Die zwei Haldentypen stellen Grenzfälle dar. Zwischen Kegel- und Plateauform existieren alle Mischformen. Ab einer Plateaufläche von mehr als 30 % der Aufstandsfläche ist von einer Plateauhalde auszugehen.

Des Weiteren wirkt sich die Morphometrie auch auf die Verdunstungsleistung aus. Je nach Ausrichtung der Haldenflächen kommt es durch verstärkte Sonneneinstrahlung auch zu stärkeren Entzugsleistungen durch Verdunstung.

m_{III} - Transport/Wirkung

Standssicherheit

Auf die Möglichkeiten des Schadstofftransports bzw. der Wirkung der Schadstoffe hat die Standssicherheit der Halden einen entscheidenden Einfluss. Einerseits führen Risse im Haldenkörper zu gute Belüftungsmöglichkeiten des Haldeninneren und in der Folge zu besseren Bedingungen für Haldenbrände, andererseits verursachen sie bessere Eindringmöglichkeiten für Oberflächenwasser in das Haldeninnere und demzufolge bessere Möglichkeiten, aus dem Haldeninneren Schadstoffe auszutragen. Zum Teil kann es auch zur Freilegung von Haldenmaterial durch lokal begrenzte

Rutschungen kommen. Die Steilheit bedingt weiterhin eine oberflächennahe hangabwärtige Bewegung von Haldenmaterial und organischer Substanz. Somit wird die Ansiedlung von Pflanzen und damit die Bodenbildung behindert. Ein Direktkontakt über den Pfad Boden - Mensch ist durch fehlende Barrierewirkung einer Pflanzendecke an den exponierten Böschungen möglich. Damit ist ein Einfluss der Standsicherheit auf alle vier Schutzgüter möglich.

- Vergleichslage: Standsicherheit negativ beeinflussende Indikatoren nicht vorhanden
 $\Delta m = \pm 0,0$
- Korrekturlage: Standsicherheit negativ beeinflussende Indikatoren vorhanden:
 $\Delta m = + 0,1$

Anmerkung:

Die Bewertung der **Stoffgefährlichkeit** geschieht bei GEFAHALD in Anlehnung an die Verfahrensweise in GEFA. Bei der Festlegung der Stoffgefährlichkeit r_0 wird prinzipiell der Stoff mit der maximalen Stoffgefährlichkeit auf die ganze Halde angewendet. Die Mengenrelevanz spielt aufgrund von Kenntnisdefiziten hier noch kaum eine Rolle.

Im Stadium der DU sollte nicht die Abfallart mit der maximalen Stoffgefährlichkeit das Gefährdungspotenzial vorgeben, sondern aus den bekannten Volumenanteilen der Inhaltsstoffe ein gewogenes Mittel gebildet werden. Mit GEFAHALD werden die sonst in GEFA berücksichtigten Parameter nicht abgefragt und bewertet. Somit stellt das GEFAHALD-Ergebnis-R nur **einen Teil der relevanten Merkmale** dar und kann nicht ohne die GEFA-Werte zur Priorisierung mit "seinen" Werten herangezogen werden.

Wenn allgemeine Akzeptanz zu den in GEFAHALD bewerteten Parametern besteht (Grund-m-Werte und Delta-m-Werte), sind diese zwingend in das GEFA zu integrieren. Erst dann kann eine vollständige Gefährdungsbewertung durchgeführt werden.

Auf Grundlage der in 7.1 genannten Merkmale und Wichtungen wurde die Bewertung der Halden wie folgt durchgeführt.

Halden, für die bisher noch keine HE vorliegt, weisen auch keine r- und m-Werte aus GEFA auf, da mit den Informationen aus der FEB keine GEFA-Bewertung durchgeführt werden kann. Diese Halden wurden ausschließlich mit GEFAHALD bewertet. Die Informationen wurden dabei aus dem verfügbaren Karten- und Luftbildmaterial entnommen sowie aus der lokalen Kenntnis hergeleitet. Da die Merkmale aus GEFAHALD nur einen Teil des Gefährdungspotenzials widerspiegeln, wurde ein einfaches Punktebewertungsschema entwickelt und angewendet.

Darüber hinaus sind für die Halden mit Erkundungsstand auf der Stufe der HE und höher die vorhandenen Daten aus GEFA und GEFAHALD zur Bewertung herangezogen worden. Die Bewertung zur Gefährdungsabschätzung erfolgte dabei als Kombination von GEFA mit GEFAHALD entsprechend Anl. 12. Ziel der Bewertung war die Priorisierung der Halden auf Grundlage ihres Gefährdungspotenzials.

Zur praktischen Bewertung der Halden wurde zum vorläufigen Gebrauch folgender Rechenweg in einer EXCEL-Tabelle erstellt. Im Einzelnen sind für die Bewertung mittels GEFAHALD die in Tab. 44 dargestellten Ausgangsparameter notwendig:

Tab. 44: Ausgangsparameter Bewertung mit GEFA/GEFAHALD

GEFA		GEFAHALD	
r ₀	Stoffgefährlichkeit	r ₀	Boden, Grund-/Oberflächenwasser
			Stoffgefährlichkeit
			Luft
			abweichende Stoffgefährlichkeit
Δr ₀			<i>als Korrekturwert</i>
			Boden, Grund-/Oberflächenwasser
			geochemische Anomalie
m _I	Austrag	Δm _I	<i>als Korrekturwert</i>
			Boden
			Mineralneubildung
			Grund-/Oberflächenwasser
			thermische Umwandlung, Mineralneubildung, Bewuchs-/Infiltrationskategorie, Hangneigung
			Luft
m _{II}	Eintrag	-	-
m _{III}	Transport/Wirkung	Δm _{III}	<i>als Korrekturwert</i>
			Boden/Grund-/Oberflächenwasser/Luft
m _{IV}	Nutzung	-	-

Danach erfolgt die Bewertung in nachfolgenden Arbeitsschritten:

- Abgleich der Stoffgefährlichkeit r₀
der größte Wert aus GEFA bzw. GEFAHALD wird übernommen,
- Korrektur m_I
Addition der Korrekturwerte Δm_I GEFAHALD mit m_I GEFA → Multiplikation mit r₀,
- Übernahme m_{II}
korrekturlose Übernahme Δm_{II} GEFA → Multiplikation mit m_I,
- Korrektur m_{III}
Addition der Korrekturwerte Δm_{III} GEFAHALD mit m_{III} GEFA → Multiplikation mit m_{II},
- Übernahme m_{IV}
korrekturlose Übernahme Δm_{IV} GEFA → Multiplikation mit m_{III},
- Ergebnis R-Wert.

Die Bewertungsmatrix bezieht sich auf die Schutzgüter Boden, Grund- und Oberflächenwasser sowie Luft. Über eine manuelle Korrekturmöglichkeit kann der resultierende R-Wert subjektiv abgeändert werden. Dies erfolgt, wenn der aus der Bewertung resultierende R-Wert aufgrund subjektiver Einflussfaktoren zur Darstellung eines realitätsnahen Gefährdungspotenzials verändert werden muss.

7.2 Haldenpriorisierung mit Einschätzung des Gefährdungspotenzials

Die Priorisierung der Halden erfolgte nach ihrem Gefährdungspotenzial auf die Schutzgüter. Dazu wurden alle Halden, bei denen sich die Erkundung auf dem Stand einer HE oder höher befindet, mit der Kombination aus GEFA/GEFAHALD bewertet. Zum Vergleich wurden die GEFA-Werte gegenübergestellt. Halden, bei denen der Erkundungsstand nicht über eine FEB hinausgeht, wurden mit einem Punktbewertungsschema bewertet.

7.2.1 Revier Zwickau

Im Revier existieren 55 Haldenkörper. Davon befinden sich 36 Halden mindestens auf dem Erkundungsstand der HE. Von den restlichen 19 Halden wurde eine Halde (Halde ZWI 1) saniert. Die anderen 13 Halden wurden mit dem Punktebewertungsschema bewertet. Für 5 Halden liegen keine Daten vor. Das Ergebnis der Priorisierung der Haldenkörper nach ihrem Gefährdungspotenzial für die Halden mit den höchsten Bewertungszahlen ist in Tab. 45 dargestellt.

Tab. 45: Revier Zwickau, Ergebnisse der Priorisierung der Haldenkörper nach ihrem Gefährdungspotenzial

Gefährdungspotenzial	GEFA		GEFA/GEFAHALD	
	Größtes Risiko ¹ aus Schutzgut Boden, GW/OW, Luft Lfd. Halden-Nr. (AKZ ²)	Punktzahl	R _{max} aus Schutzgut Boden, GW/OW, Luft Lfd. Halden-Nr. (AKZ ²)	Punktzahl
1	ZWI 23 (67000008)	13,2	ZWI 23 (67000008)	17,4
2	ZWI 26 (67000064)	11,3	ZWI 24(67000005)	11,0
3	ZWI 45 (67000284)	9,6	ZWI 20 (67000025)	10,0
4	ZWI 24 (67000005)	8,5	ZWI 10 (67000011)	9,9
5	ZWI 10 (67000011)	8,5	ZWI 15 (67000052)	9,9
6	ZWI 15 (67000052)	8,0	ZWI 17 (93100160)	8,7
7	ZWI 44 (67000283)	8,0	ZWI 16 (67000137)	8,6
8	ZWI 9 (93100155)	7,3	ZWI 45 (67000284)	8,5
9	ZWI 22 (67000067)	6,5	ZWI 26 (67000064)	8,0
10	ZWI 20 (67000025)	6,4	ZWI 9 (93100155)	7,9
11	ZWI 16 (67000137)	6,4	ZWI 30 (67000136)	7,9
12	ZWI 17 (93100160)	6,3	ZWI 22 (67000067)	6,5
13	ZWI 13 (93100157)	6,2	ZWI 13 (93100157)	6,2
14	ZWI 30 (67000136)	5,8	ZWI 39 (67000267)	5,8
15	ZWI 39 (67000267)	5,8	ZWI 8 (93100159)	5,5

¹größtes Risiko ausgehend von den jeweils mittleren Risiken der Schutzgüter, ² Altlastenkennziffer

In Auswertung der Priorisierung ist festzustellen, dass bevorzugt Halden auf einer höheren Erkundungsstufe in der Reihung nach vorn rücken. So treten acht Halden auf den Plätzen 1 bis 10 auf, für die eine OU vorliegt.

Halden mit vergleichsweise hohem Gefährdungspotenzial und Untersuchungsbedarf (Plätze 4 bis 11) sind zum Teil kombinierte, aber auch einfache Standorte mit überwiegend großen Haldenvolumina von über 1 Mio. m³. Im Sickerwasser wurden meist deutlich erhöhte Schwermetall- bzw. As- sowie Salzkonzentrationen festgestellt. Das Sickerwasser kann zum Teil begünstigt durch die hydrogeologische Positionen direkt ins Grundwasser übertreten. Die Infiltrationsbedingungen für die Neubildung von Sickerwasser sind mäßig bis gut. An einigen Standorten fließt belastetes Sickerwasser dem Oberflächenwasser direkt zu. Dort reichern sich Schwermetalle in den Sedimenten der Vorfluter an. Das Sickerwasser wird zum Teil sensibel als Gießwasser für Kleingärten bzw. zum Tränken von Vieh genutzt. Die Plateauhalden werden häufig kleingärtnerisch genutzt. Durch die Bioverfügbarkeit einiger Schwermetalle im Haldenmaterial sind Gefährdungen über den Wirkungspfad Boden - Nutzpflanze - Mensch durch den Anbau von Gemüse möglich. Zum Teil treten Branderscheinungen und Standsicherheitsprobleme auf. Meist ergeben sich aus der Kombination von Gefährdungen über die verschiedenen Wirkungspfade Risikowerte nach GEFA/GEFAHALD von 6,5 bis 10.

7.2.2 Revier Lugau/Oelsnitz

Im Revier unterlagen 21 Halden der Bewertung. Davon befinden sich 15 Halden mindestens auf dem Erkundungsstand der HE. Von den weiteren 6 Halden weisen 5 ein Beweisniveau der FEB auf (Halden OEL 4, 6, 12 und 15), eine Halde erhielt noch keine amtliche Altlastbewertung.

Das Ergebnis der Priorisierung der Haldenkörper nach ihrem Gefährdungspotenzial für die Halden mit den jeweils höchsten Bewertungszahlen ist in Tab. 46 dargestellt.

Tab. 46: Revier Lugau/Oelsnitz, Ergebnisse der Priorisierung der Haldenkörper nach ihrem Gefährdungspotenzial

Gefährdungspotenzial	GEFA		GEFA/GEFAHALD	
	Größtes Risiko ¹ aus Schutzgut Boden, GW/OW, Luft		R _{max} aus Schutzgut Boden, GW/OW, Luft	
	Lfd. Halden-Nr. (AKZ ²)	Punktzahl	Lfd. Halden-Nr. (AKZ ²)	Punktzahl
1	OEL 17 (88100230)	6,0	OEL 17 (88100230)	5,9
2	OEL 11 (88100121)	5,4	OEL 5 (88100236)	5,9
3	OEL 1 (88100243)	4,7	OEL 10 (88100241)	5,8
4	OEL 8 (88100235)	4,7	OEL 7 (88100237)	5,7
5	OEL 19 (88100238)	4,5	OEL 11 (88100121)	5,7
6	OEL 10 (88100241)	4,3	OEL 16 (88100231)	5,3
7	OEL 5 (88100236)	4,3	OEL 19 (88100238)	5,1
8	OEL 7 (88100237)	4,1	OEL 1 (88100243)	3,7
9	OEL 21 (88100234)	3,9	OEL 8 (88100235)	3,5
10	OEL 16 (88100231)	3,4	OEL 2 (73100174)	3,4

¹größtes Risiko ausgehend von den jeweils mittleren Risiken der Schutzgüter, ² Altlastenkennziffer

Die Reihung der Halden nach dem maßgeblichen Risiko aus GEFA kennzeichnet zum großen Teil nur den geringen Kenntnisstand zu den Halden zum Zeitpunkt der HE. Würden die Bewertungen auf ein neues Beweisniveau gehoben, würden in die neuen Bewertungen auch die erweiterten Kenntnisse über die Sickerwassergehalte usw. mit einfließen und sicherlich eine Reihung ergeben, die der nach der Bewertung des Sickerwassermonitorings entspricht.

Die Halde OEL 17 ist die mit aktuellen Branderscheinungen und der höchsten Mineralisation und Temperatur der Sickerwässer, die Halde OEL 10 die mit den sauersten und am stärksten mit Zn, Cd und Ni belasteten Sickerwässern.

Für beide Reviere bringt die Bewertung mit der kombinierten Methode nach GEFA/GEFA-HALD höhere Risikowerte als die mit GEFA. Mit GEFAHALD werden wesentliche haldentypische Merkmale in die Bewertung mit einbezogen. Damit erfolgt eine realitätsnähere Bewertung des Gefährdungspotenzials als mit GEFA.

7.3 BRANCHENBLATT STEINKOHLBERGEGHALDEN

In Auswertung der Ergebnisse des Forschungsthemas wurde das Branchenblatt Nr. 18 "Steinkohlenbergbauhalden" zur Altlastenbehandlung entwickelt. Das Ergebnis ist in Anl. 13 dargestellt. Bei einer weiteren Einzelfallbearbeitung der Steinkohleberggehalden sind die Erkenntnisse und Hinweise aus dem Branchenblatt zu beachten.

8 DATENBANK STEINKOHLHALDEN SACHSEN

Im Rahmen der Bearbeitung des Projektes fielen umfangreiche Daten an, die nur teilweise über die SALKA-Softwarelösung erfassbar waren. Für eine effektive Verwaltung der Daten, die für die Einschätzung des Gefährdungspotenziales notwendig sind, wurde deshalb durch die G.E.O.S. Freiberg Ingenieurgesellschaft mbH eine gesonderte ACCESS-Datenbanklösung mit ArcView-Anbindung (Abb. 23) entwickelt. Diese gestattet einerseits die Erfassung aller wesentlichen Haldendaten und verhindert gleichzeitig eine doppelte Datenhaltung in Datenbanken des LfULG bzw. nachgeordneter Behörden.

Die ACCESS-Datenbank bildet die Basis für eine effektive Arbeit aller beteiligten Behörden und der in ihrem Auftrag arbeitenden Firmen. Deshalb sollten auch in Zukunft alle Ergebnisse aus weiteren Untersuchungen, Sanierungen etc. weiter in die Datenbank eingepflegt werden. Dazu sollte eine WEB-Umstellung der Datenbanklösung erfolgen.

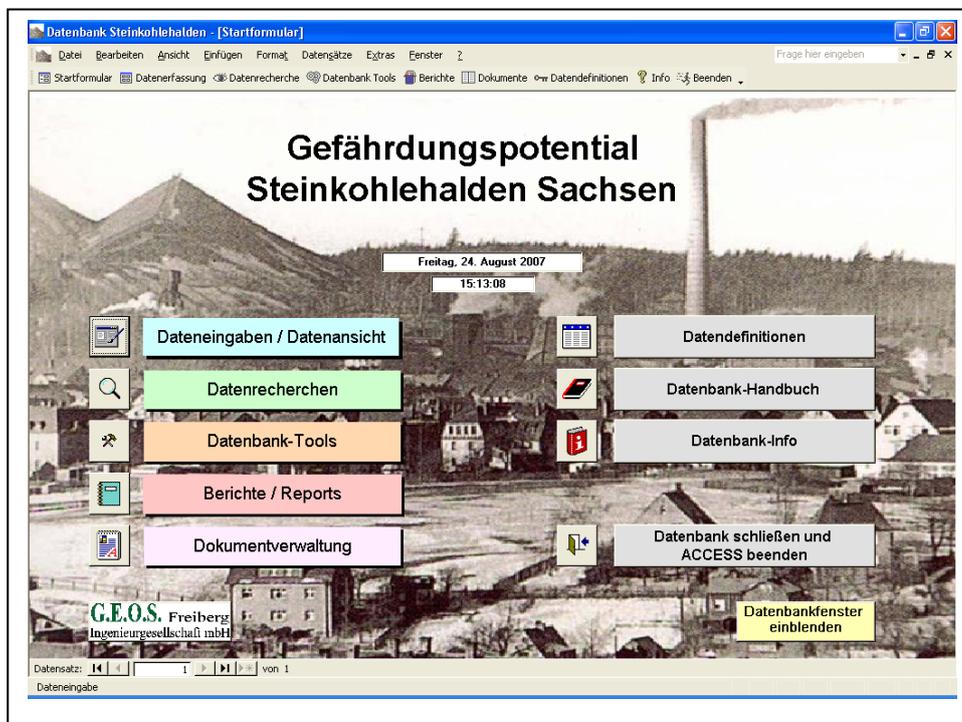


Abb. 23: Startmaske aus der ACCESS-Datenbank „Gefährdungspotential Steinkohlehalde Sachsen“ (aus SCHERER, 2007)

9 EINZULEITENDE/WEITERZUFÜHRENDE MAßNAHMEN

9.1 Weiterer Forschungsbedarf

Der Forschungsbedarf ergibt sich aus den bei der Bearbeitung neu aufgeworfenen bzw. nicht vollständig beantworteten Fragen:

- hydrogeologische 3D-Modellierung: Vervollkommnung durch die Einbeziehung gesicherterer Eingangsdaten für Infiltration, gesättigte und ungesättigte Leitfähigkeiten
- Gewinnung und Analytik von Haldensickerwässern aus dem Haldeninneren als Grundlage für die Entwicklung des Prozessverständnisses, der Mischungsrechnungen für die Gleichgewichtsbetrachtungen, als Eingangswert für die hydrogeologische 3D-Modellierung, sowie für die analytische und mikrobiologische Charakterisierung
- Erweiterung des Analysenprogramms um Fe, Mn, NO_3^- , NO_2^- und NH_4^+ , Co, As (in Oxidationsstufen), U (in aktiven Zentren) zum besseren Verständnis der in den Halden und Sickerwässern ablaufenden Prozesse sowie eine bessere Prognose der Migrationsfähigkeit der Schadstoffe
- Anpassung der Gleichgewichtsberechnungen durch die Einführung neuer Mischungsglieder, durch die Lösung und das Ausfällen fester Stoffe, die Einführung, Parametrisierung und Bewertung der Sorption auf dem Weg der Sickerwasserbewegung innerhalb der Halde
- Durchführung von parallelen Säulenversuchen mit identischen Substraten und unterschiedlichem Versuchsaufbau (gesättigt, ungesättigt und ungesättigt inokuliert) sowie verschiedenen Elutionsmitteln (synthetisches Regenwasser, Sickerwasser, Abwasser) und unterschiedlichen Abdeckungen zur Ermittlung der Verminderung der Schadstoff-Elution unter verschiedenen Bedingungen; sequentielle Extraktion der Substrate aus den Säulen zur Untersuchung der Migration und der Bindung der Schadstoffe
- Untersuchung des Sorptionsverhaltens von Haldenmaterialien (rot, schwarz) für Schwermetalle zur Klärung des tiefenabhängigen Rückhaltevermögens von Schadstoffen in Abhängigkeit von rotem und kohligem Material, pH, Redoxbedingungen (Eisenoxide)
- Untersuchung des Transportverhaltens der Metall(oid)e in Abhängigkeit vom Sorptionsverhalten und Untersuchung des Vorkommens von amorphen Eisenoxiden im kohligen Material
- Versuche der mikrobiellen Oxidation des Haldenmaterials mit *Thiobacillus Denitrificans* in Mikrokosmen zur Quantifizierung der Schadstofffreisetzung durch diese Mikroorganismen; Ermittlung der Umsatzraten
- Untersuchung des thermischen Umsetzungsverhaltens des kohligen Materials in kalorimetrischen Versuchen zur Klärung der Wirkung der Pyritoxidation als Initialzündler sowie der Rolle der mikrobiellen Pyritoxidation
- Untersuchung von Mineralphasen mit dem Mikroskop, mittels Röntgenphasenanalyse und Mikrosonde mit dem Ziel der
 - Untersuchung der Sekundärminerale, die sich während der Verwitterung der Haldensubstrate und während der Haldenbrandvorgänge bilden,
 - Identifikation von Sulfiden zur Klärung der Herkunft der hohen Zn- und Ni-Gehalte in den Haldensickerwässern.
 - Untersuchung der Sideritkonkretionen im Haldenmaterial zur Ermittlung eines möglichen Neutralisationspotenziales der Halden

- Untersuchung der Fließwege im Grundwasserabstrom der Halde ZWI 10 zur Abgrenzung der weitläufigen Grundwasserkontamination in diesem Gebiet.
- Überwachung des langfristigen Versauerungspotenzials der Halden durch Einrichtung eines repräsentativen Sickerwassermessnetzes in den Revieren Zwickau und Lugau/Oelsnitz zur zeitnahen Feststellung möglicher negativer Entwicklungen in den Halden: Untersuchung der verschiedenen Sickerwasseraustritte auf ihr Versauerungspotenzial (T, pH, LF, Redox, nachfolgende chemische Analytik, Bestimmung der Sulfidgehalte im Feststoff)
- Untersuchungen der Schwefelmodifikationen zur Klärung der Bindungsformen; Abschätzung der Höhe des Versauerungspotenziales sowie des potenziellen Sulfataustrages
- Untersuchung geochemischer Anomalien, Klärung, ob die Vermutung, dass die höhere Schwermetallkonzentrationen an die tiefere Flözgruppe der Zwickau Schichten gebunden sind; Ermittlung des Versauerungs- bzw. Austragspotenzials.

9.2 Behördlicher und sonstiger Handlungsbedarf

9.2.1 Kurzfristige Maßnahmen

- **Untersuchung der Kleingartenanlagen** (Boden-Nutzpflanze-Mensch, Boden-Mensch)

Mit der positiven geochemischen Elementanomalie ergab sich ein Gefährdungspotenzial für die sensible kleingärtnerische Nutzung der Halde ZWI 45. In Nutzgärten wurden Prüfwertüberschreitungen bei Pb und Tl sowie mehrfache Maßnahmewertüberschreitungen für Cd festgestellt. Die übrigen Flächen wiesen Prüfwertüberschreitungen bei As, Pb und Cd für die angesetzte Nutzung als Wohngebiet auf. In einer Detailuntersuchung ist zu prüfen, wie hoch das tatsächliche Risiko ist (Expositionsabschätzung) und ob sich daraus eine Gefährdung für den Wirkungspfad Boden-Mensch bzw. Boden-Nutzpflanze-Mensch ableitet.

Falls sich diese Gefährdung bestätigt, sind Untersuchungen an exemplarischen kleingärtnerisch genutzten Einzelhalden, mit und ohne positive geochemische Elementanomalie, durchzuführen. Im Revier Zwickau ist die kleingärtnerische Nutzung von Plateauhalden weit verbreitet. Bei Bestätigung dieses Gefahrenverdachts ergeben sich verschiedene Möglichkeiten, um eine Weiternutzung der Nutzgärten zu gewährleisten:

- Anlage von Hochbeeten bzw. Neuanlage der Beetflächen mit nicht kontaminiertem Substrat sowie gleichzeitige Unterbindung der Vermischung von Haldenmaterial und Boden, z. B. durch Verlegung von Geotextil bzw. Grabsperre,
 - Herausgabe einer Handlungsempfehlung an die Kleingartenvereine mit Maßnahmen zur Bodenverbesserung, Anlage von Beeten zur Vermeidung einer Gefährdung über den Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze-Mensch.
- **Anhebung des Kenntnisstandes aller Halden auf das Beweinsniveau HE**
 - **Nutzungsanalyse des Grundwasser- bzw. Oberflächenwasserabstromes schwermetallbelasteter Wässer aus den Halden**

Die Ergebnisse des Projektes zeigen z. B. an den Halden OEL 10 und ZWI 10 eine starke Kontamination des Grund- und Oberflächenwasserabstromes durch schwermetallbelastete Haldensickerwässer. Durch die haldenbürtige Stofffracht werden die Prüfwerte für eine Nutzung als Trinkwasser deutlich überschritten. Es

ist zu prüfen, ob im Haldenabstrom eine Nutzung des Grundwassers bzw. Oberflächenwassers für Trink- bzw. Tränk- und Bewässerungszwecke stattfindet. Wenn diese Nutzungen vorliegen, sind der Ausbauhorizont der Brunnen zu prüfen bzw. eine Beprobung der Entnahmestellen und eine anschließende Untersuchung auf die kritischen Parameter zu veranlassen. Um eine Gefährdung für den Menschen auszuschließen, sind diese Nutzungen bei Überschreitung der Prüfwerte und gegebenen Expositionsszenario vorerst zu unterbinden. Die Nutzung ist erst nach entsprechender Grundwassersanierung bzw. Wasseraufbereitung wieder aufzunehmen.

- **Untersuchung Expositionsszenario Direktpfad-Boden-Mensch**

Auf Grundlage mehrerer orientierender Untersuchungen von Halden in Zwickau waren über repräsentative Beprobungen der Haldenoberflächen flächenhafte Prüfwertüberschreitungen für den Direktpfad Boden-Mensch festzustellen. Ausschlaggebender Parameter war meist As. In einer Expositionsabschätzung ist zu prüfen, ob sich der Gefahrenverdacht für die Nutzung als Park- und Freizeitfläche durch die reale Nutzung der gelegentlichen Begehung bzw. des Pilzsammelns bestätigt.

- **Sickerwassermonitoring**

Überwachung des langfristigen Versauerungspotenzials der Halden durch Einrichtung eines repräsentativen Sickerwassermessnetzes in den Revieren Zwickau und Lugau/Oelsnitz zur zeitnahen Feststellung möglicher Veränderungen in den Halden. Dazu sind vor allem die verschiedenen Sickerwasseraustritte auf ihr Versauerungspotenzial (T, pH, LF, Redox, chemische Analytik, Bestimmung der Sulfidgehalte im Feststoff) zu untersuchen.

- **Grundwassermonitoring**

Überwachung der Schadstofffrachten aus den Halden in das Grundwasser

9.2.2 Mittel- bis langfristige Maßnahmen

- **Untersuchung Expositionsszenario Oberflächenwasser-Aquatische Lebensgemeinschaft**

Es sollte eine Untersuchung des Expositionsszenarios für den Wirkungspfad Oberflächenwasser-Aquatische Lebensgemeinschaft erfolgen, da durch die Untersuchungen z. B. mehr als 100-fache Besorgniswertüberschreitungen durch die Konzentration von Schwermetallen festgestellt wurden.

- Eine Minimierung des Schadstoffaustrages ist insbesondere in folgenden Fällen notwendig:
 - Gefährdung von Schutzgütern (Altlasten)
 - Einordnung der Wasserkörper in den schlechten Zustand (nach EU-WRRL)

Nach BBodSchV sind alle nach Abschluss der Detailuntersuchung als Altlast eingestuft Halden zu sanieren. Die Sanierung muss eine Minimierung der Schadstofffrachten bewirken. Insbesondere an den „intakten“, meist bewaldeten Berge-

halden ist aus folgenden Gründen ein Eingriff in den Haldenkörper nicht zu empfehlen:

- erhöhter Energieeintrag → langfristig erhöhte Infiltration, erhöhte geotechnische Instabilität,
- Zerstörung der vorhandenen Bodenbildung und Vegetation → langfristig erhöhte Infiltration und Verringerung der Verdunstung,
- Eingriff in den Haldenkörper → Gefahr der Selbstentzündung bzw. Haldenbrand,
- deutlich zu hoher finanzieller Aufwand.

Zur Minimierung sollte die vorhandene Vegetation „ertüchtigt“ werden, ihre nachhaltige infiltrationshemmende Wirkung dauerhaft und zielführend zu entfalten. Eine gesunde, dichte und vitale Vegetation (Kraut-, Strauch- und Baumschicht) ist der beste Garant dafür, die Interzeptionsverdunstung und Evapotranspiration zu maximieren und demzufolge die Infiltration der Niederschläge und die Bildung von Haldensickerwässern zu minimieren. Des Weiteren wird dadurch die initiierte Bodenbildung auf den Halden unterstützt. Besonders an den steilen Haldenböschungen, die wasserhaushaltlich ungünstig exponiert sind, zeigen sich schlechte Wachstums- und Bodenbildungsbedingungen. Mit der Pflanzung geeigneter Gehölze kann dem entgegengewirkt werden und damit eine intakte Vegetation geschaffen werden. Diese wirkt sich günstig auf die Anreicherung von Humussubstanz aus und führt zur Intensivierung der Bodenbildung. Mit der verbesserten Bodenbedeckung und stärkerer Beschattung wird vor allem in den durch ein Niederschlagsdefizit gekennzeichneten Sommermonaten ein verbessertes Pflanzenwachstum ermöglicht. Der Wasserhaushalt der Halde verlagert sich mehr in diese Bodenschicht. Die Bodendecke erweitert sich sukzessive und erhält die Funktion einer Wasserhaushaltsschicht. Die Bildung von Sickerwässern wird verringert. Es ist eine entschleunigende Wirkung auf den Versauerungsprozess und den Austrag von Schwermetallen über das Sickerwasser zu erwarten. Dieser Prozess ist durch folgende Maßnahmen zu unterstützen:

- Förderung der vorhandenen Vegetation durch Pflege- und gezielte Verjüngungsarbeiten mit geeigneten trockenresistenten Pflanzenarten,
- Aufbringen von Pflanzennährstoffen und Kalkung zur Abpufferung des Versauerungsprozesses.

Die Maßnahmen zur Verringerung des Austrages sind in einer ersten Stufe im Labormaßstab nachzubilden:

- Durchführung von Säulenversuchen zum Nährstoffeintrag durch Wasser aus Sickergruben zur Ermittlung des Potenziales derartiger Maßnahmen an den Haldenstandorten (Förderung reduzierender / immobilisierender Maßnahmen),
- Säulenversuche mit Kalkzugabe (Kalkmilch),
- Säulenversuche mit Abdeckung durch naturnahe Bodenschichten.

Als weiterer Schritt ist eine Modellhalde je Revier auszuwählen und diese Versuche auf die Pilotobjekte auszuweiten. Die Versuche sind mittels eines langfristigen Sicker-, Grund- und Oberflächenwassermonitorings zu überwachen. Die gewonnenen Erkenntnisse sind auf weitere Halden anzuwenden.

Im Endergebnis kann über eine Förderung der Vegetation der Sickerwasseraus-
trag verringert, der Direktkontakt zum Haldenmaterial unterbunden bzw. minimiert
und der Haldenkörper in die besiedelten städtischen Räume besser integriert wer-
den.

- Pflege der Haldendatenbank

Die ACCESS-Datenbank ist als Basis für eine effektive Arbeit aller beteiligten Be-
hörden und der in ihrem Auftrag arbeitenden Firmen ständig zu aktualisieren. Um
einen aktuellen schnellen Datenzugriff für alle Beteiligten zu ermöglichen, ist eine
WEB-Lösung anzustreben.

10 LITERATUR

An dieser Stelle werden nur die Literaturhinweise aufgeführt, die für die Nachvoll-
ziehbarkeit des Textes notwendig sind. Weitere Literatur ist den drei Berichten zum
Themenkomplex zu entnehmen.

Bewertungshilfen bei der Gefahrenverdachtsermittlung in der Altlastenbehandlung,
Freistaat Sachsen, Landesamt für Umwelt und Geologie, Dresden, 20.06.2002.

HERTWIG, TH. HAMPERL, A., SITTNER, H., FRENZEL, M. (2006): Forschungs- und Ent-
wicklungsvorhaben „Gefährdungspotential Steinkohlehalden Zwickau/Oelsnitz, Ar-
beitspaket 1“. - Unveröff. Bericht Beak GmbH und GUB-IGmbH, Freiberg/Zwickau.

HERTWIG, TH. et al. (2006): Forschungs- und Entwicklungsvorhaben „Gefährdungspo-
tential Steinkohlehalden Zwickau/Oelsnitz, Arbeitspakete 2 und 3“. - Unveröff. Zwi-
schenbericht Beak GmbH, GUB-IGmbH und TU Dresden, Freiberg / Zwickau /
Dresden.

HERTWIG, TH. et al. (2007): Forschungs- und Entwicklungsvorhaben „Gefährdungspo-
tential Steinkohlehalden Zwickau/Oelsnitz, Arbeitspakete 2 und 3“. - Unveröff.
Abschlußbericht Beak GmbH, GUB-Ingenieur AG und TU Dresden, Freiberg / Zwi-
ckau / Dresden.

LfUG (2004): Laborative Untersuchungen zur Sickerwasserprognose im Rahmen der
Detailuntersuchung. Musterleistungsbeschreibung

SCHERER, V. (2007): Dokumentation Datenbank „Steinkohlehalden Sachsen“. - Unve-
röff. Bericht, G.E.O.S. Freiberg Ingenieurgesellschaft mbH, Halsbrücke.

Die vollständigen Literaturdaten für beide Reviere liegen in Form einer ACCESS-
Datenbank vor und können bei Bedarf zur Verfügung gestellt werden.

11 TABELLENVERZEICHNIS

Tab. 1: Übersicht zu den Halden im Bergbaurevier Zwickau

Tab. 2: Übersicht zu den Halden im Bergbaurevier Lugau/Oelsnitz

Tab. 3: Mittelwerte der Glühverluste haldenspezifischer Ablagerungen

Tab. 4: Ergebnisse der Substratuntersuchungen Halden ZWI 10 und ZWI 45

Tab. 5: Ergebnisse der Substratuntersuchungen Halde OEL 10

Tab. 6: Korrelationsmatrix Spurenelemente im Feststoff (Halde OEL 10, n=160)

Tab. 7: Physikochemische Parameter und Makrokomponenten im Eluat, Halden
ZWI 10 und ZWI 45

Tab. 8: Physikochemische Parameter und Makrokomponenten im Eluat, Halde
OEL 10

Tab. 9: Schwermetallgehalte und der Gehalte an As im Eluat, Halden ZWI 10 und

- ZWI 45
- Tab. 10: Spurenelemente, pH-Wert und Leitfähigkeit im Eluat, Halde OEL 10
 - Tab. 11: Eluierbare Elementgehalte haldentypischer Schwermetalle und As, Halden ZWI 10 und ZWI 45
 - Tab. 12: Eluierte Elementanteile für Cd, Cu, Ni und Zn, Halde OEL 10
 - Tab. 13: Zusammengefasste Ergebnisse der Säulenversuche
 - Tab. 14: Proben für die sequentielle Extraktion der Halde OEL 10
 - Tab. 15: Physikochemische Parameter der Halden ZWI 10 und ZWI 45
 - Tab. 16: Physikochemische Parameter der Haldensickerwässer im Revier Lugau/Oelsnitz
 - Tab. 17: Makrokomponenten Sicker- und Oberflächenwässer, Revier Zwickau
 - Tab. 18: Makroelemente in den Haldensickerwässern im Revier Lugau/Oelsnitz
 - Tab. 19: Spurenelemente und Organik Sicker-50 und Oberflächenwässer im Revier Zwickau
 - Tab. 20: Arithmetrische Mittelwerte der Spurenelemente in den Haldensickerwässern, Revier Lugau/Oelsnitz
 - Tab. 21: Physikochemische Parameter des Grundwassers im Revier Zwickau
 - Tab. 22: Physikochemische Parameter des Grundwassers im Bereich der Halde OEL 10
 - Tab. 23: Makrokomponenten des Grundwassers im Revier Zwickau
 - Tab. 24: Makrokomponenten des Grundwassers im Bereich der Halde OEL 10
 - Tab. 25: Frachtabschätzung Sickerwasseraustrag Makroelemente der Halden ZWI 10 und ZWI 45
 - Tab. 26: Spurenelemente und Organik im Grundwasser Revier Zwickau
 - Tab. 27: Spurenelemente und Organik im Grundwasser im Bereich der Halde OEL 10
 - Tab. 28: Frachtabschätzung Sickerwasseraustrag Spurenelemente der Halden ZWI 10 und ZWI 45
 - Tab. 29: Parametrisierung der einzelnen Schichten für die Berechnungen mit BOWAHALD
 - Tab. 30: Bewertung der Eingangsparameter zur Modellquantifizierung (Minimale Punktzahl: 1; Maximale Punktzahl: 4)
 - Tab. 31: Mittels BOWAHALD berechnete Wasserhaushaltskenngrößen für den Zeitraum 1960-2004
 - Tab. 32: Bewertung der hydrogeologischen Eingangsparameter zur Modellquantifizierung
 - Tab. 33: Bewertung der hydrogeologischen Größen zur Modellstrukturierung
 - Tab. 34: Kalibrierte Modell-Parameter der einzelnen Layer des Modellgebietes Oelsnitz
 - Tab. 35: Speziation von S und Cl im Haldensicker- und Grundwasser, Anteile in %
 - Tab. 36: Speziation von Mg, Ca, Na und K im Haldensicker- und Grundwasser, Anteile in %
 - Tab. 37: Speziation von Zn und Ni im Haldensicker- und Grundwasser, Anteile in %
 - Tab. 38: Speziation von Cd im Haldensicker- und Grundwasser, Anteile in %
 - Tab. 39: Speziation von Cu und As im Haldensicker- und Grundwasser, Anteile in %
 - Tab. 40: Sättigungsindizes für Gips, Anhydrit und Cuprit
 - Tab. 41: Ergebnisse der Mischungsrechnungen
 - Tab. 42: Anzahl der Pflanzenarten auf den Halden OEL 10 und OEL 17
 - Tab. 43: Bewuchs-/Infiltrationskategorie
 - Tab. 44: Ausgangsparameter Bewertung mit GEFA/GEFAHALD
 - Tab. 45: Revier Zwickau, Ergebnisse der Priorisierung der Haldenkörper nach ihrem

- Gefährdungspotenzial
- Tab. 46: Revier Lugau/Oelsnitz, Ergebnisse der Priorisierung der Haldenkörper nach ihrem Gefährdungspotenzial
- Tab. 47: Geschätzter Finanzbedarf zur Umsetzung des Forschungsbedarfes bezügl. des Gefährdungspotenzials der Steinkohlenbergehalde
- Tab. 48: Geschätzter Finanzbedarf zur Umsetzung der notwendigen Maßnahmen bezügl. der Reduzierung der Umweltgefährdung durch die Steinkohlenbergehalde

12 ABBILDUNGSVERZEICHNIS

- Abb. 1: Nachweis von *Thiobacillus denitrificans* auf Mikrotiterplatten mittels MPN-Methode (gefärbten Areale zeigen eine positive Reaktion an)
- Abb. 2: Beziehung zwischen Farbe der Grobberge und Glühverlust (Halde OEL 10)
- Abb. 3: Ergebnisse der Gesamt-Schwefelbestimmung in Proben der Halde OEL 10
- Abb. 4: Ergebnisse der Disulfidschwefel-Bestimmung in Proben der Halde OEL 10
- Abb. 5: Berechneter Oxidations- bzw. Verwitterungsgrad des Disulfidschwefels in den Proben der Halde OEL 10
- Abb. 6: Element- und probenspezifische Darstellung der sequenziellen Extraktion der Elemente Pb, As, Mo Cr und Hg für die Proben aus der Halde OEL 10
- Abb. 7: Element- und probenspezifische Darstellung der sequenziellen Extraktion der Elemente Cd, Ni, Zn und Cu für die Proben aus den Halde OEL 10
- Abb. 8: Übersicht über die Minima und Maxima der Keimzahlen für sulfatreduzierende Mikroorganismen an den Halden OEL 10, ZWI 10 und ZWI 45 (MPN = Most Probable Number)
- Abb. 9: Temperaturen der Haldensickerwässer im Revier Lugau/Oelsnitz
- Abb. 10: Summe der Kat- und Anionen im Haldensickerwasser des Revieres Lugau/Oelsnitz, Jahrgang
- Abb. 11: Mittels FEFLOW berechnete Druckhöhen im Layer Mutterboden+ Hangschutt+ Zersatz [m ü HN] (blau) im Modellierungsgebiet.
- Abb. 12: Mittels FEFLOW berechnete Wassersättigung im Modellierungsgebiet
- Abb. 13: Speziation des Schwefels im Haldensicker- und unkontaminierten Grundwasser Halde OEL 10
- Abb. 14: Speziation des Magnesiums im Haldensicker- und unkontaminierten Grundwasser Halde OEL 10
- Abb. 15: Verlauf der Cd-, Cu- und Zn-Gehalte im oberflächennahen Grundwasser am Ende des Transportweges von 300 m
- Abb. 16: Verlauf der pH-Werte im oberflächennahen Grundwasser am Ende des Transportweges von 300 m
- Abb. 17: Übersicht der Flächenanteile der Vegetationstypen auf der Halden OEL 10 und OEL 17
- Abb. 18: Aktuelle Baumartenanteile im Oberstand der Waldbestände auf den Halden OEL 10 und OEL 17
- Abb. 19: Übersicht der aktuellen Baumartenanteile der Naturverjüngung der Halden OEL 10 und OEL 17
- Abb. 20: Baumartenökogramm der Halde OEL 10
- Abb. 21: Baumartenökogramm der Halde OEL 17
- Abb. 22: Übersicht der Flächenanteile forstlicher Nutzbarkeitszonen der Halden OEL 10 und OEL 17
- Abb. 23: Startmaske aus der ACCESS-Datenbank „Gefährdungspotential Steinkohlenhalde Sachsen“ (aus SCHERER, 2007)

13 ANLAGENVERZEICHNIS

- Anl. 1: Übersichtskarte Revier Zwickau
- Anl. 2: Aufschlusslageplan Halde 10 , Revier Zwickau
- Anl. 3: Verteilung Haldenmaterial Halde 10, Revier Zwickau
- Anl. 4: Geologisch-hydrogeologischer NNW-SSO-Schnitt, Halde 10, Revier Zwickau,
- Anl. 5: Aufschlusslageplan Halde 45, Revier Zwickau
- Anl. 6: Verteilung Haldenmaterial, Halde 45, Revier Zwickau
- Anl. 7: Geologisch-hydrogeologischer SW-NO-Schnitt, Halde 45, Revier Zwickau
- Anl. 8: Übersichtskarte und Probenahmepunkte Haldensickerwässer, Revier Lugau/Oelsnitz
- Anl. 9: Flächennutzung und Aufschlusspunkte, Halde 10, Revier Lugau/Oelsnitz
- Anl. 10: Geologischer W-E-Schnitt, Halde 10, Revier Lugau/Oelsnitz
- Anl. 11: Karte der Vegetationstypen, Halde 17, Revier Lugau/Oelsnitz
- Anl. 12: Bewertungsschema
- Anl. 13: Branchenblatt 18: Steinkohlenbergehalden