

Výkopová zemina jako alternativní krycí materiál pro těžební haldy na příkladu Freibergu-Hammerbergu

Baggergut als alternatives Abdeckmaterial für Bergbauhalden am Beispiel des Hammerbergs Freiberg

Tobias Arnstadt¹; Patrick Oettel²; Sabine Meißner³; Jürgen I. Schoenherr⁴

Abstrakt

Likvidace sedimentů z údolních nádrží a jejich předhrázek představuje závažný problém. Z provedeného průzkumu vyplynulo, že zhruba 2/3 provozovatelů údolní nádrží pro tento materiál nemá využití. Aby bylo možno rozšířit možnosti jeho zhodnocování, je v rámci projektu VODAMIN II ověřováno, zda je tento materiál vhodný k použití jako alternativní materiál pro zakrývání.

Zkušební lokalitou je usazovací nádrž Hammerberg, která představuje relikt po těžbě rud u města Freibergu. Těleso haldy vykazuje vysoký obsah těžkých kovů, jako jsou arzén, kadmium a olovo. S cílem snížení imisí těžkých kovů do Freiberské muldy (Freiberger Mulde) je prováděna sanace podle Spolkového zákona na ochranu půd. Firma Saxonia buduje toto zakrytí přijímáním těchto zemin.

V rámci pokusů je ověřováno, zda se vlastnosti izolační vrstvy, snižující infiltraci,lepší v případě přimísení vytěžené hlusiny. Pro tyto účely byla vytvořeny testovací pole, jedno bez příměsí vytěžené hlusiny a dvě pole s příměsí vytěžené hlusiny různého původu.

V přednášce budou představeny vlastnosti, kterými se vytěžená hlusina vyznačuje a jaké má v kombinaci s výkopovou zeminou vlastnosti. Dále bude představen celý pokus a první poznatky.

Kurzfassung

Die Verwertung von Sedimenten aus Talsperren und deren Vorbecken stellt eine große Schwierigkeit dar. Nach einer Befragung im Jahr 2014 hatten ca. 66 % der Talsperrenbetreiber keine Verwendung dafür. Um die Möglichkeiten zur Verwertung zu erweitern, wird im Rahmen des Projektes VODAMIN II geprüft, ob sich Baggergut als alternatives Abdeckmaterial eignet.

Als Versuchsstandort dient die Spülhalde Hammerberg. Sie stellt eine Altlast und Bergbauhinterlassenschaft bei Freiberg dar. Im Haldenkörper sind hohe Gehalte an Schwermetallen wie Arsen, Cadmium, Blei und Zink vorzufinden. Um den Eintrag dieser Schwermetalle in die Freiberger Mulde zu reduzieren, erfolgt eine Sanierung im Sinne des Bundesbodenschutzgesetzes. Durch den Betrieb einer Erdstoffannahme baut die Firma SAXONIA eine definierte Abdeckung auf.

Im Versuch wird geprüft, ob sich die Eigenschaften der sickwasserreduzierenden Dämmschicht verbessern, wenn Baggergut eingearbeitet wird. Dazu wurden drei Testfelder angelegt, eines ohne Baggergut und zwei mit Baggergut unterschiedlicher Herkunft.

Im Vortrag wird gezeigt, durch welche Eigenschaften sich das untersuchte Baggergut auszeichnet und wie es sich in Kombination mit Bodenaushub verhält. Weiter werden der Versuchsaufbau und erste Erkenntnisse präsentiert.

¹ Hochschule Zittau/Görlitz, Institut für Verfahrensentwicklung, Torf- und Naturstoff-Forschung (iTN); Theodor-Körner-Allee 16, D-02763 Zittau; E-mail: tobias.arnstadt@hszg.de

² SAXONIA Standortentwicklungs- und -verwaltungsgesellschaft mbH, Halsbrücker Straße 34, D-09599 Freiberg; E-mail: patrick.oettel@saxonia-freiberg.de

³ SAXONIA Standortentwicklungs- und -verwaltungsgesellschaft mbH, Halsbrücker Straße 34, D-09599 Freiberg; E-mail: sabine.meissner@saxonia-freiberg.de

⁴ Hochschule Zittau/Görlitz, Institut für Verfahrensentwicklung, Torf- und Naturstoff-Forschung (iTN); Theodor-Körner-Allee 16, D-02763 Zittau; E-mail: j.schoenherr@hszg.de

1 Einleitung

Die Verwertung von Sedimenten aus Talsperren und deren Vorbecken stellt eine große Schwierigkeit dar. In einer Befragung der Deutschen Rohstoffagentur aus dem Jahr 2014 gaben beispielsweise rund 66 % der deutschen Talsperrenbetreiber an, dass sie keine Verwendung für die anfallenden Sedimente haben [1]. Um die Möglichkeiten zur Verwertung zu erweitern, wird im Rahmen des Projektes VODAMIN II geprüft, ob sich Baggergut als alternatives Abdeckmaterial eignet.

Der vorliegende Text stellt in gekürzter Form Inhalte der im April 2018 im Rahmen des Projektes VODAMIN II angefertigten Studie¹ „Alternative Abdecksysteme mit Versuchsplanung“ vor und ergänzt diese um aktuelle Werte aus dem Prozess des Versuchsaufbaus.

2 Problemstellung

Die in Gewässern transportierten Feststoffe sedimentieren in Bereichen mit verringerter Strömung wie Häfen oder Talsperren, die dadurch mit der Zeit verlanden [3]. Häufig kann dem nur durch Ausbaggern Abhilfe geschafft werden. Das dabei anfallende Baggergut stellt die unterhaltungsverpflichtete Stelle oft vor die Frage der Verwertungsmöglichkeit.

Nach einer Statistik von 2004 gehen lediglich 2,2 % des Baggergutsaufkommens in Deutschland mit der ASN 170506 auf die Beräumung von Talsperren zurück [4]. Mit ca. 1 Million Tonnen stellt dieses Aufkommen die Betreiber dennoch vor ein ernstzunehmendes Problem. So ergab eine Befragung von Talsperrenbetreibern im Jahr 2014, die etwa 50 % der deutschen Talsperren repräsentiert, dass zwei Drittel keine Verwertungsmöglichkeiten für beräumte Sedimente hatten [1].

Baggergut ist hinsichtlich seiner Materialeigenschaften zumeist durch einen hohen Anteil an Feinkorn und Organik gekennzeichnet. Typische Gesamtgehalte organischen Kohlenstoffs (TOC) bewegen sich zwischen 3 und 10 M.-%, seltener darüber [5], was durch den biologischen Abbau zu einer erhöhten Setzungsneigung führen kann [6]. In Baggergut können mitunter erhöhte Schadstoffgehalte auftreten, weil entsprechende Stoffe vorrangig an die feineren Körner gebunden sind [7]. Durch den hohen Feinkornanteil sind k_f -Werte im Bereich um $1 \cdot 10^{-9} \text{ m s}^{-1}$ durchaus typisch und es können mitunter sogar die Anforderungen der DepV mit k_f -Werten $< 5 \cdot 10^{-10} \text{ m s}^{-1}$ erreicht werden [6]. Im Zusammenhang mit dem hohen Anteil an Feinkorn ist Baggergut anfällig für Schrumpfungen bei Wasserentzug [6, 8], was zu Rissen und Undichtigkeiten führen kann.

Diese Kombination an Eigenschaften macht die Verwertung von Baggergut z.T. schwierig und ist im Einzelfall zu prüfen. Es sind Anwendungen zur Verbesserung von Oberböden [6] und als dichtende Komponente im Deichbau bekannt [8]. Weiter gibt es Beispiele aus dem Deponiebau und der Altlastensanierung, wo Baggergut als Ausgleichs-, Dichtungs- oder Rekultivierungsschicht verwendet wurde [9, 10, 11].

3 Definition und Rechtsgrundlagen

Die genaue Definition des Begriffs „Baggergut“ im rechtlichen Kontext gestaltet sich durchaus schwierig, wonach sich schließlich die konkrete Anwendung von Gesetzen richtet. Als Gewässersedimente werden laut DIN 38414 Teil 11 [12] ungelöste, im oberirdischen Wasser befindliche Stoffe unterschiedlichen Ursprungs bezeichnet, die abgelagert wurden. In der Bodenkunde werden Gewässersedimente als subhydrische Böden bzw. Unterwasserböden aufgefasst. Nach §2 des Bundesbodenschutzgesetzes (BBodSchG) [13] sind Sedimente jedoch eindeutig aus dessen Anwendungsbereich ausgeschlossen. Boden im Sinne der Materialbezeichnung bezieht sich im Bodenschutzrecht ausdrücklich auf terrestrische Böden. Hinsichtlich

¹Die Studie wurde durch die SAXONIA Standortentwicklungs- und -verwaltungsgesellschaft mbH erstellt und ist auf Nachfrage in den Sprachen Deutsch und Tschechisch für Interessenten verfügbar [2].

des Begriffes „Baggergut“ wird in § 12 Abs 1. BBodSchV [14] der Bezug zur [15] hergestellt. Diese kennzeichnet Bodenmaterial, welches im Rahmen von Neubau-, Ausbau- und Unterhaltungsmaßnahmen aus Gewässern entnommen wird, als Baggergut. Folglich kann Baggergut Sedimente und subhyrische Böden, Böden und deren Ausgangssubstrat im unmittelbaren Umfeld des Gewässerbettes sowie Oberböden im Ufer- bzw. Überschwemmungsbereich des Gewässers umfassen.

Auf Baggergut lassen sich je nach Anfall und der Art der Ablagerung bzw. Verwertung unterschiedliche Gesetze anwenden. Hier sollen nur kurz die rechtlichen Eckpunkte benannt werden. Eine ausführlichere Darstellung kann dem Gutachten „Alternative Abdecksysteme mit Versuchsplanung“ entnommen werden [2].

Für mineralische Abfälle ist in erster Linie das Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG)[16] zu nennen. Jedoch findet es nach § 2 Abs. 12 keine Anwendung für Sedimente, die innerhalb von Oberflächengewässern umgelagert werden und erwiesenermaßen nicht gefährlich sind (§ 2 Abs. 12). Stößt man jedoch bei der Wieder- bzw. Weiterverarbeitung an Grenzen, so wird dem Stoff ein Abfallcharakter zugesprochen und entsprechend der Abfallverzeichnisverordnung (AVV) eine Abfallschlüsselnummer vergeben.

Wird Baggergut zur Sicherung von Altlasten eingesetzt, ist nach § 2 Abs. 5 BBodSchG der nachsorgende Bodenschutz anzuwenden, welcher schwerpunktmäßig aus dem Bundesbodenschutzgesetz (BBodSchG) [13] und der daraus abgeleiteten Bundesbodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) [14] hervorgeht. Ziele sind dabei die Gefahrenabwehr, die Wiederherstellung von Bodenfunktionen und die Sanierung verursachter, schädlicher Bodenveränderungen sowie dadurch hervorgerufene Gewässerbeeinträchtigungen. Die Untersuchung und Bewertung altlastenverdächtiger Flächen und Verdachtsflächen sowie Anforderungen an die Sanierung sind darin ebenfalls geregelt. Anhand dieses Rahmens erfordert eine Sanierung von Altlasten nach Bodenschutzrecht immer eine Festlegung von einzelfallbezogenen Sanierungszielen. Häufig wird das Handbuch zur Altlastenbearbeitung [17] hinzugezogen, welches vom Sächsischen Landesamt für Umwelt und Geologie auf den gesetzlichen Grundlagen im BBodSchG/BBodSchV veröffentlicht wurde.

Als eine der wichtigen Richtlinien zur stofflichen Verwertung von Bodenmaterialien ist allen voran die LAGA TR Boden [18] zu nennen. Die darin aufgeführten Regelungen beziehen sich auf die Verwertung außerhalb der durchwurzelbaren Bodenschicht. Die Bestimmungen für eine Verwertung innerhalb der durchwurzelbaren Bodenschicht sind dagegen im BBodSchG und der BBodSchV enthalten. Für diesen Fall wurde durch die Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Boden (LABO), Abfall (LAGA), Wasser (LAWA) sowie dem Länderausschuss Bergbau (LAB) zusätzlich eine Vollzugshilfe zum § 12 BBodSchV [19] herausgegeben.

Die BBodSchV und die Vollzugshilfe zum § 12 verweisen auf die DIN 19731 [15]. Neben der Definition von Baggergut enthält die DIN 19731 Hinweise zur Eignung der Verwertung von Bodenaushub und Baggergut.

4 Fallstudie

Ausgehend von der geringen Durchlässigkeit der Sedimente aus Talsperren und des Bedarfs an Verwertungswegen liegt der Gedanke nahe, Baggergut in der Altlastensanierung einzusetzen. Dadurch könnte das Baggergut einer sinnvollen Verwertung zugeführt und gleichzeitig könnten die Eigenschaften einer herzustellenden Abdeckung verbessert werden. Dies soll in einem Versuch, der im Rahmen der laufenden Sanierung der Spülhalde Hammerberg in Freiberg durchgeführt wird, getestet werden. Dabei soll geprüft werden, ob die Durchlässigkeit des bisher eingesetzten Freiburger Bodenaushubs als Dämmschicht zur Reduzierung des Sickerwassers durch die Kombination mit Baggergut verbessert werden kann. Hierfür wurden regional verfügbare Sedimente aus Hochwasserschadensbeseitigungsmaßnahmen sowie der herkömmliche Freiburger Erdaushub als Referenzmaterial ausgewählt. Nach eingehender Un-

tersuchung und Charakterisierung der zu verwendenden Materialien wurden Testfelder konzipiert und angelegt.

4.1 Charakterisierung des Baggergutes im Vergleich zum Freiburger Erdaushub

Die Landestalsperrenverwaltung Sachsen konnte zum gegebenen Zeitpunkt drei Arten von Baggergut bereitstellen. Sie entstammen drei Standorten im Erzgebirge, zwei Vorbecken und einer Trinkwassertalsperre. Zur Prüfung deren Eignung als Abdeckmaterial wurden diese beprobt und chemisch sowie bodenmechanisch charakterisiert. Von allen drei Standorten wurden bis zu vier Proben des Sedimentes genommen, welches potentiell für die geplanten in-situ Testflächen infrage kam.

Das Baggergut 1 (BG 1) war zum Probenahmezeitpunkt auf einer Bereitstellungsfläche abgelagert und entstammt einem Vorbecken, welches bereits Ende 2015 beräumt worden ist. Aufgrund der längeren Liegezeit zeichnete es sich durch einen vergleichsweise niedrigen Wassergehalt von 47 M.-% aus. Die Proben des Baggerguts 2 (BG 2) wurden direkt aus dem Vorbecken entnommen, das bis auf einen Mindestabfluss des durchquerenden Baches entleert war. Die Talsperre, aus der Baggergut 3 (BG 3) entnommen wurde, war zur Probenahme seit vier Wochen abgestaut und das Wasser fast vollständig abgelassen. Da es sich bei BG 2 und BG 3 um „frisches“ Material handelte, wiesen sie einen deutlich höheren Wassergehalt von 169 M.-% bzw. 276 M.-% auf.

Tabelle 1: Bodenmechanische Kennwerte und der TOC-Gehalt der Sedimente und des Freiburger Erdaushubs sowie der Gemische. Die angegebenen Mischungsverhältnisse beziehen sich auf das Volumen.

Material	Masseanteil [%]					U	Cc	ρ_{Pr} [g cm ⁻³]	w_{Pr} [M.-%]
	Ton	Schluff	Sand	Kies	TOC				
Erdaushub	3	13	47	38	0,2	82	1,9	1,83	13,9
Sediment BG 1	3	34	39	25	3,3	52	0,5	1,37	19,7
Sediment BG 2	6	77	14	4	4,3	2	1,1	1,00	23,1
Sediment BG 3	7	82	9	2	6,8	4	1,2	0,66	64,3
Erdaushub + BG 1, 1:1	3	21	44	31	-	103	1,4	1,69	18,5
Erdaushub + BG 1, 2:1	4	18	50	29	-	83	1,9	1,77	16,7
Erdaushub + BG 2, 1:1	4	22	46	28	-	87	1,3	1,44	25,4
Erdaushub + BG 2, 2:1	3	21	45	31	-	79	1,3	1,67	17,2
Erdaushub + BG 3, 1:1	4	22	41	33	-	155	1,1	1,34	30,9
Erdaushub + BG 3, 2:1	2	21	48	30	-	78	1,5	1,52	22,6

ρ_{Pr} ... Proctordichte; w_{Pr} ... Wassergehalt bei Proctordichte

Hinsichtlich der Korngrößen konnte ein erwartungsgemäß hoher Anteil an Feinkorn festgestellt werden, wobei der Großteil davon der Schlufffraktion zuzuordnen ist und der Anteil von Ton unterhalb 10 % liegt (Tabelle 1). Das BG 1 weist fast gleiche Anteile Schluff und Sand und etwas weniger Kies auf und ist somit weit gestuft. Es ist nach KA5 als mittel kiesiger stark schluffiger Sand und nach DIN 18196 als Sand-Schluff-Gemisch (SU*) einzuordnen. BG 2 und BG 3 besitzen eine eng gestufte Körnungslinie und weisen einen Schluffanteil um die 80 % auf. Demnach sind sie als schwach bzw. sehr schwach kiesige reine Schluffe nach der KA5 zu benennen und nach der DIN 18196 aufgrund ihres Plastizitätsverhaltens als ausgeprägt plastische Schluffe (UA) zu klassifizieren. Ein weiteres charakteristisches Merkmal aller drei Sedimente ist der erhöhte TOC-Gehalt zwischen 3 und 7 %. In Zusammenhang mit dem hohen Feinkornanteil sind Schrumpfungen nicht vollständig auszuschließen. Außerdem besitzen BG

2 und BG 3 ein hohes Wasseraufnahmevermögen und zeigen vergleichsweise geringe Proctordichten zwischen $0,66$ und $1,00 \text{ g cm}^{-3}$ bei Wassergehalten über 20% (Tabelle 1). Für das BG 1, mit seiner weitgestuften Körnung und dem geringsten TOC-Gehalt, wird eine Proctordichte von $1,37 \text{ g cm}^{-3}$ bei einem Wassergehalt von 20% erzielt.

Durch den hohen Feinkornanteil weisen die Sedimente k_f -Werte zwischen $3 \cdot 10^{-9}$ bis $6 \cdot 10^{-9} \text{ m s}^{-1}$ auf und sind nach DIN 18130 als sehr schwach durchlässig einzuordnen (Tabelle 2). Die gemessenen Durchlässigkeiten reichen sogar in den Bereich von $5 \cdot 10^{-9} \text{ m s}^{-1}$, wie sie für Dichtschichten der Deponieklasse I-II gefordert werden. Bei der Sanierung von Altlasten können die Anforderungen an die Durchlässigkeit der Abdeckung in Abhängigkeit vom konkreten Sanierungsziel geringer sein. Demzufolge sind die Materialien aufgrund ihrer niedrigen k_f -Werte auch hierfür geeignet, um die Sickerwassermenge zu reduzieren. Jedoch stellen ihre bedingte Verdichtungsfähigkeit, ihre Neigung zum Schrumpfen und der erhöhte TOC-Gehalt Herausforderungen für den Einbau dar, wodurch es möglicherweise verstärkt zu Setzungen kommen kann.

Tabelle 2: Wasserdurchlässigkeitsbeiwerte (k_f -Werte) des Erdaushubs und der Sedimente sowie der jeweiligen Mischungen. Die Mischungsverhältnisse sind massebezogen.

	k_f -Wert m s^{-1}			
	Erdaushub (EA)	BG 1	BG 2	BG 3
Material rein	$1,4 \cdot 10^{-7}$	$3,3 \cdot 10^{-9}$	$6,0 \cdot 10^{-9}$	$3,3 \cdot 10^{-9}$
Mischung EA:BG 1:1		$2,0 \cdot 10^{-9}$	$4,9 \cdot 10^{-8}$	$3,7 \cdot 10^{-9}$
Mischung EA:BG 3:1		$2,0 \cdot 10^{-8}$	$1,1 \cdot 10^{-8}$	$3,0 \cdot 10^{-8}$

Vor diesem Hintergrund erscheint der alleinige Einsatz von Baggergut problematisch. Daher wurde die Idee entwickelt, die Durchlässigkeit des herkömmlich eingesetzten Bodenaushubs durch die Kombination mit Baggergut zu verringern. Bisher erfolgte die Sanierung der Spülhalde Hammerberg mittels Erdaushub, der aus Baumaßnahmen der Region stammt. Als Referenzmaterial wurde ein typischer Erdaushub ausgewählt. Es kann als mittel kiesiger schwach schluffiger Sand nach KA5 bzw. SU* nach DIN 18196 charakterisiert werden (Tabelle 1). Bei einem Feinkornanteil $< 0,063 \text{ mm}$ von 16% beträgt der k_f -Wert $1,4 \cdot 10^{-7} \text{ m s}^{-1}$, was nach DIN 18130 als schwach durchlässig bezeichnet wird (Tabelle 2). Der untersuchte Bodenaushub lässt sich gut verdichten und erreicht eine Proctordichte von $1,83 \text{ g cm}^{-3}$ bei einem Wassergehalt von 14% (Tabelle 1).

Durch die Kombination des Bodenaushubs mit den Sedimenten konnte jeweils eine Verringerung der Durchlässigkeit um ein bis zwei Größenordnungen erzielt werden. Es ergaben sich k_f -Werte zwischen $2,0 \cdot 10^{-9}$ bis $4,9 \cdot 10^{-8} \text{ m s}^{-1}$ (Tabelle 2). Dabei wurde deutlich, dass sich bei einem größeren Anteil an Sediment geringere k_f -Wert einstellten. Die Untersuchung bezog sich dabei auf Mischungsverhältnisse von 1:1 und 1:2 hinsichtlich des Volumens (Sediment : Erdaushub) (Tabelle 1). Durch die Kombination der Materialien ergibt sich ein höherer Feinkornanteil als im Bodenaushub, wobei die Sand- und Kiesfraktion prägend bleibt, sodass alle Gemische als mittel kiesiger mittel schluffiger Sand nach KA5 und als SU* nach DIN 18196 zu klassifizieren sind. Außerdem wurden höhere Proctordichten im Vergleich zum reinen Sediment erzielt. Sie liegen zwischen $1,3$ und $1,8 \text{ g cm}^{-3}$ bei Wassergehalten zwischen 17 und 31% . Jedoch wiesen beide Gemische mit BG 3 und das Gemisch 1:1 mit BG 2 eine besonders auffällige untypische Proctorkurve mit mehreren Maxima auf, was auf die Schwierigkeiten bei dem Umgang mit Baggergut hindeutet [2].

Generell kann jedoch gesagt werden, dass sich Baggergut zur Verringerung der Durchlässigkeit eignet und in einem Gemisch höhere Proctordichten im Vergleich zum reinen Sediment erreicht werden. Prinzipiell erscheint der Einsatz von gereiftem Material, in dem der TOC-Gehalt bereits reduziert ist und eine Entwässerung stattgefunden hat, sinnvoll, da die untypischen Proctorkurven lediglich bei den Gemischen mit „ungereiften“ Materialien auftraten.

Für die Eignung der Materialien sind jedoch nicht nur die bodenmechanischen Parameter entscheidend, sondern auch die Chemie des Bodenmaterials. Da es sich bei den untersuchten Standorten um Trinkwassertalsperren oder deren Vorsperren im Erzgebirge handelt, sind in den Sedimenten die geogen vorkommenden Metallgehalte zu erwarten. Hinsichtlich besonderer organischer Kontaminationen liegt kein Verdacht vor, sodass eine Untersuchung der Sedimente entsprechend der Kriterien bei unspezifischen Verdacht nach LAGA TR Boden [18] ausreichend ist. Für die meisten Parameter halten die Sedimente die Zuordnungswerte Z0 bzw. Z1 ein, was einen eingeschränkten offenen Einbau zulassen würde[2]. Jedoch weisen alle Sedimente einen erhöhten TOC-Gehalt im Feststoff (Tabelle 1) und eine höhere Sulfatkonzentration im Eluat auf, was zu einer Zuordnung Z2 führt und für den Einbau bestimmte technische Sicherungsmaßnahmen erfordern würde. BG 3 weist jedoch TOC- und Cadmium-Gehalte oberhalb der Z2-Zuordnungswerte auf. Es kann somit nicht im Rahmen der Sanierung der Spülhalde Hammerberg verwertet werden, da der Anfallort außerhalb des Bodenplanungsgebietes liegt. Daher kam es für den großtechnischen Versuch nicht in Frage. Der Bodenaus-hub hält die meisten Parameter der Klasse Z0 ein, lediglich für die Freiberg typischen geogenen Hintergrundwerte von Arsen, Blei, Cadmium und Zink werden die Vorgaben von Z0 im Feststoff überschritten, weshalb insgesamt ein Zuordnung zu Z1 erfolgen muss.

Für den großtechnischen Versuch wurden das BG 1 und BG 2 ausgewählt. Da die vorgefundenen erhöhten TOC- und Sulfat-Gehalte als solches kein Gefährdungspotential für das Grundwasser darstellen, erschien es im Rahmen des Versuches zulässig, die beiden Sedimente auch ohne spezielle technische Sicherungsmaßnahme zu verbauen. Es ist jedoch während des gesamten Versuchs auf deren Entwicklung ein besonderes Augenmerk zu richten.

4.2 Feldversuche auf der Spülhalde Hammerberg in Freiberg

Aufbauend auf den Erkenntnissen aus den Vorversuchen wurde eine in-situ Erprobung anhand von Testfeldern auf der Spülhalde Hammerberg in Freiberg erarbeitet und erbaut, welche mittels üblichen Einbauverfahren hergestellt wurden. Auf diese Weise konnte die Handhabbarkeit unter bautechnischen Bedingungen getestet werden und es kann über einen längeren Zeitraum geprüft werden, wie sich die Durchlässigkeit im Gelände verhält.

Als Versuchsstandort dient die Spülhalde Hammerberg, die sich im Nordosten der Stadt Freiberg befindet. Sie gehört zu einem größeren Komplex an Bergbahnhinterlassenschaften, dem Davidschachtkomplex. Von 1964 bis 1969 wurden auf dieser Halde insgesamt 330.000 m³ Spülgut auf ca. 5 ha abgelagert. Es besteht zum Großteil aus fein gemahlenem Freiburger Gneis und dessen Gangminerale, enthält daneben auch die sulfidischen Minerale Galenit (PbS), Sphalerit (ZnS) und Pyrit (FeS₂) in konzentrierter Form sowie Flotationsreagenzien [20, 21].

Die Sanierung dieser Altlast wird durch die SAXONIA Standortentwicklungs- und -verwaltungsgesellschaft mbH mittels einer Erdstoffannahme realisiert. Die Sanierungsarbeiten haben im Jahr 2012 begonnen und enden voraussichtlich nach 2021 [20]. Das Sanierungskonzept und die zu erreichenden Sanierungsziele sind in der Ausführungsplanung festgeschrieben. Auf der Spülhalde Hammerberg wird eine Abdeckung nach dem Modell der „Modifizierten Abdeckgruppe A“ hergestellt, die in Anlehnung an das von 1993 bis 2013 umgesetzte Altlastenprojekt der SAXONIA entstand. Nach der Profilierung des Geländes ist eine Dämmschicht von 1 m Mächtigkeit in Lagen zu max. 0,5 m aufzubringen (Abbildung 1). Diese sogenannte Dämmschicht muss einen k_f -Wert $< 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$ aufweisen. Über der Dämmschicht wird eine ein Meter mächtige Abdeckschicht in drei Lagen aufgebaut. Sie besteht aus einer zweilagig angelegten 0,8 m mächtigen Speicherschicht (Abdeckschicht II) und dem 0,2 m mächtigen Oberboden (Abdeckschicht I). Ziel der gesamten Abdeckung ist es, die Durchsickerung um mindestens 50 % zu reduzieren.

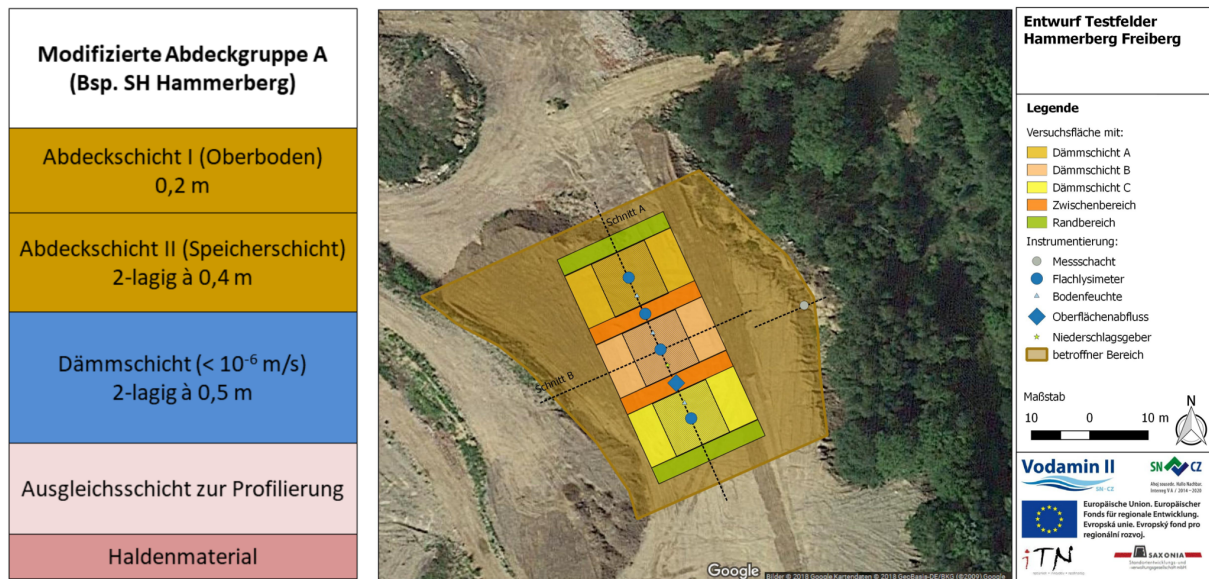


Abbildung 1: Links: vorgeschriebene Schichtfolge für die Abdeckung. Rechts: Anordnung der Testfelder.

Die Testfelder wurden ebenfalls entsprechend der „modifizierten Abdeckgruppe A“ aufgebaut. Jedoch wurde das Material, welches für die Dämmschicht verwendet wurde, gezielt variiert. Da die Dämmschicht für die Sickerwasserminimierung konzipiert ist, erschien es sinnvoll, hier Baggergut für eine weitere Reduzierung der Durchlässigkeit einzusetzen. Konkret wurden drei Testfelder geplant und aufgebaut. Ein Feld enthält als Referenz eine Dämmschicht, die aus dem reinen Freiburger Erdaushub aufgebaut wurde. Die Dämmschichten der beiden anderen Felder enthalten ein Materialgemisch aus je einem Volumenanteil Erdaushub und Baggergut (BG 1 bzw. BG 2) (Abbildung 1). Die Mischungen wurden im großtechnischen Maßstab durch das mehrmalige Umsetzen von Haufwerken hergestellt. Der Einbau erfolgte mittels einer Raupe in mehreren Lagen, die anschließend durch mehrmaliges Überfahren mit dieser verdichtet wurden. Die Größe der Testflächen beträgt 10 m x 10 m, wobei sich in Längsrichtung davor und danach jeweils 2,5 Meter des gleichen Aufbaus anschließen, um Randerscheinungen zu vermeiden. Zwischen den Testfeldern wurden Zwischenbereiche von 4 bzw. 2 m Breite angelegt, die Raum für zusätzliche Messungen bieten, die sich nicht auf die Dämmschicht beziehen. Die Testfelder wurden mit einer Hangneigung von 5 % in nordöstlicher Richtung hergestellt.

Um die Wirkungsweise der Testfelder zu beschreiben, ist deren Wasserhaushalt zu untersuchen. Für die gesamte Abdeckung ist die Restdurchsickerung die entscheidende Größe. Zu deren Erfassung wurden spezielle Betonflächlysimeter mit einer Auffangfläche von 3 m² und einem Durchmesser von 2 m angefertigt (Abbildung 2). Im Vergleich zu herkömmlichen Lysimetern bieten sie den Vorteil, dass seitliche Abflüsse, wie sie in einer Abdeckschicht mit Neigung stattfinden, erhalten bleiben und somit ein annähernd realistisches Bild der Durchsickerung abgeben. Das gefasste Sickerwasser wird in einem Messschacht am Rand der Versuchsfelder mittels Kippzähler quantifiziert und kann für chemische Analysen beprobt werden. Je Testfeld wurde ein Betonflächlysimeter zentral unterhalb der Dämmschicht angeordnet. Zusätzlich wurde ein Lysimeter unterhalb der Abdeckschicht II aufgestellt (Abbildung 1 und Abbildung 3). Der Niederschlag auf der Halde wird mit einem elektronischen Messwertgeber und einer Kippwaage ermittelt. Der Oberflächenabfluss wird mit Hilfe eines rechteckigen Metallrahmens (3 m²; Abbildung 2) gefasst und im Messschacht mittels eines Kippzählers registriert.

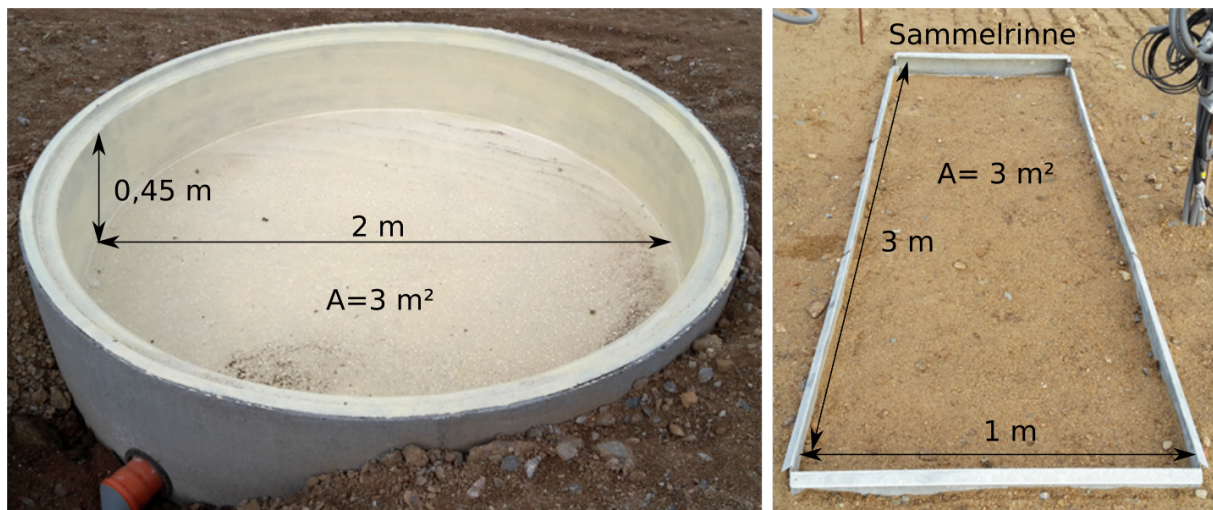


Abbildung 2: Links: verwendetes Betonflachlysimeter, Rechts: Vorrichtung zur Oberflächenabflusserfassung.

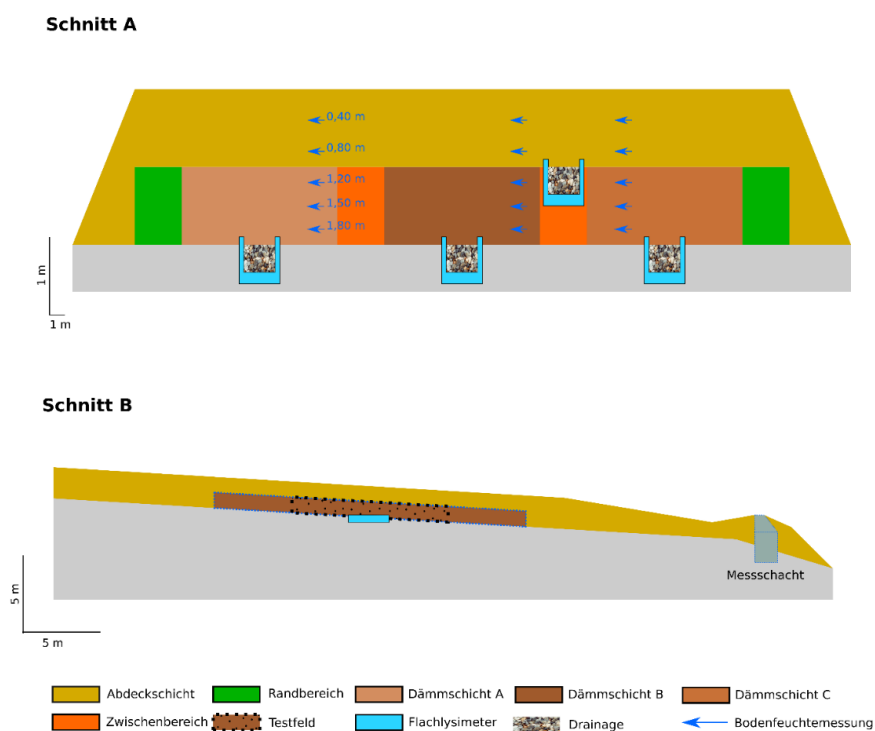


Abbildung 3: Querschnittsdarstellungen der Testfelder, Schnitt A durch die Ebene der Lysimeter von Nordosten nach Südwesten, Schnitt B durch das mittlere Lysimeter und den Messschacht von Südwesten nach Nordosten.

Um die Speicheränderung in den Bodenschichten messtechnisch abzubilden, wird in verschiedenen Tiefen (Abbildung 3) eines jeden Testfeldes der volumetrische Wassergehalt mittels TDR-Sonden gemessen. Dadurch ist es möglich, nach stärkeren Niederschlagsereignissen die Versickerung zeitlich nachzuverfolgen und in-situ k_f -Werte zu berechnen. Um die Saugspannung in den Dämmschichten zu ermitteln, wurde in jedem Testfeld in der Tiefe von 1,50 m ein Tensiometer installiert. Oberflächennah wird die Saugspannung in der Tiefe von 0,40 m mit Hilfe eines Tensiometer-Sensors ermittelt. Da in den gleichen Tiefen der Bodenwasserge-

halt gemessen wird, kann nach einem längeren Messzeitraum eine in-situ Saugspannungs-Sättigungsbeziehung erstellt werden.

Die geplante messtechnische Ausstattung und die damit ermittelbaren Parameter bieten außerdem die Möglichkeit, um den Wasserhaushalt mit einer Modellierung zu quantifizieren und somit die Abdecksysteme bewerten zu können.

4.2.1 Kennwerte des Einbaus

Die für den großtechnischen Aufbau angelieferten Sedimente hatten einen etwas höheren Kies- und niedrigeren Schluffanteil, als die im Labor untersuchten Proben. Ebenfalls zeigte sich für den tatsächlich eingesetzten Erdaushub eine leichte Verschiebung um 4 % der Zusammensetzung vom Sand hin zum Kies. Somit ergaben sich für die hergestellten Gemische ebenfalls etwa 8 % höhere Kiesgehalte und eine entsprechend Reduzierung in der Schluff- und Sandfraktion (Tabelle 3, vergleiche dazu Tabelle 1). Weiterhin war der TOC-Gehalt im angelieferten Sediment niedriger als im ursprünglich beprobten Baggergut, was sich in deutlich niedrigeren Gehalten in den Gemischen widerspiegelt. Dies zeigt auf, wie schwierig die vorherige Beprobung der Sedimente ist. Die geringeren Werte nach der Anlieferung sind unter Umständen auf zwei Prozesse zurückzuführen: 1) Bis zur Anlieferung hat generell eine „Reifung“ des Materials stattgefunden. Insbesondere ist anzunehmen, dass diese bei BG 2 durch den Ausbaggerungsprozess beschleunigt wurde, da durch die resultierende Durchlüftung der mikrobielle TOC-Abbau angekurbelt wird. 2.) Das mehrmalige Umlagern der Sedimente bis zum tatsächlichen Einsatz hat zu einer Homogenisierung geführt und somit zu einer durchschnittlichen Absenkung der Werte.

Für die aufgebauten Dämmschichten wurden beim Einbau mittlere Verdichtungsgrade zwischen 93 und 96 % der Proctordichte erzielt (Tabelle 4). Es zeigt sich, dass der reine Erdaushub, mit seinem geringeren Feinkornanteil, einen im Vergleich zu den Gemischen höhere Durchlässigkeit aufweist. Die k_f -Werte der Gemische sind mit $2,7 \cdot 10^{-8}$ und $8 \cdot 10^{-8} \text{ m s}^{-1}$ eine Größenordnung kleiner (Tabelle 4). Somit spiegeln sich die Tendenzen der k_f -Werte aus den Vorversuchen wider. Die ermittelten k_f -Werte erfüllen die für die Sanierung der Spülhalde Hammerberg vorgegebenen Anforderungen der Dämmschicht von einem k_f -Wert $< 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$. Ebenfalls wird erkennbar, dass in der nur auf 84 % Proctordichte verdichteten Abdeckschicht die Wasserleitfähigkeit ansteigt.

Tabelle 3: Bodenmechanische Kennwerte und der TOC-Gehalt des verbauten Freiburger Erdaushubs sowie der Gemische mit dem Baggergut. Die angegebenen Mischungsverhältnisse beziehen sich auf das Volumen.

Material	Masseanteil [%]					U	Cc	ρ_{Pr} [g cm ⁻³]	w_{Pr} [%]
	Ton	Schluff	Sand	Kies	TOC				
Einbau Erdaushub	2	13	43	42	< 0,05	91	2	1,955	10,5
Einbau Erdaushub + BG 1, 1:1	3	16	41	40	1,2	144	2	1,770	15,2
Einbau Erdaushub + BG 2, 1:1	2	14	44	40	0,8	102	2	1,884	13,1

ρ_{Pr} ... Proctordichte; w_{Pr} ... Wassergehalt bei Proctordichte

Tabelle 4: Mittlere Verdichtungsgrade und k_f -Werte der aufgebauten Schichten.

	w [%]	D_{Pr} [%]	k_f [m s ⁻¹]
Abdeckschicht			
Erdaushub	10	84	$3,6 \cdot 10^{-7}$
Dämmschicht			
Erdaushub	8	96	$1,1 \cdot 10^{-7}$
Erdaushub + BG 1, 1:1	16	94	$2,7 \cdot 10^{-8}$
Erdaushub + BG 2, 1:1	11	93	$8,0 \cdot 10^{-8}$

5 Fazit

Die Voruntersuchungen haben gezeigt, dass sich Baggergut für den Einsatz in dichtenden bzw. sickerwasserreduzierenden Schichten eignen kann, was entsprechend niedrige k_f -Werte belegen. Jedoch sind bei hohen TOC-Gehalten in Kombination mit einem hohen Ton- bzw. Schluffanteil Probleme im Bereich der Verdichtung, Setzung und Schrumpfung zu erwarten. Deshalb erscheint es sinnvoll Baggergut zur Verbesserung von herkömmlichen Erdaushub einzusetzen und es mit diesem zu kombinieren. Bei einer Mischung von 1:1 (Volumenanteilen) kann die Durchlässigkeit des Erdaushubs reduziert werden und dennoch bleiben die bodenmechanischen Eigenschaften des Bodenaushubs weitestgehend erhalten. Die großtechnische Machbarkeit konnte bei dem Aufbau der Testfelder auf dem Hammerberg in Freiberg gezeigt werden.

Inwiefern sich die ermittelten k_f -Werte in der tatsächlichen Durchsickerung widerspiegeln, soll anhand der Messungen der wasserhaushaltlichen Größen über die restliche Projektlaufzeit von VODAMIN II untersucht werden. In diesem Zuge soll die Qualität des anfallenden Sickerwassers betrachtet werden.

Literaturverzeichnis

- [1] HENKEL, S. ; PUMMER, E. ; SCHÜTTRUMPF, H. ; SCHMITZ, M. ; SCHULZ, S.-U.: *Nutzungsmöglichkeiten und wirtschaftliches Potenzial deutscher Talsperrensedimente*. 2014. – Deutsche Rohstoffagentur (DERA) in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Berlin
- [2] Gutachten „Alternative Abdecksysteme mit Versuchsplanung“, Freiberg
- [3] GÖLZ, E.: *Sediment und Baggergut*. – in Untersuchung und Bewertung von Sediment - ökotoxikologische und chemische Testmethoden, W. Calmano, Hrsg., Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 2001, pp. 269-272
- [4] BMVBW: *Wirtschaftlich und umweltverträglich - Nassbaggerstrategien in Deutschland*. 2004. – Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen
- [5] GRÄBE, G.: *Physikalisch-chemische und biologische Methoden zur Charakterisierung des Sedimentmatrix - Wassergehalt, Glühverlust und TOC*. – in Untersuchung und Bewertung von Sedimenten - ökotoxikologische und chemische Testmethoden, W. Calmano, Hrsg., Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 2001, pp. 96-100
- [6] HTG: *Verwertung von feinkörnigem Baggergut im Bereich der deutschen Küste*. 2006. – Hafentechnische Gesellschaft Fachausschuss Baggergut, Hamburg
- [7] PETERSEN, W.: *Sedimente als Lebensraum - chemisch-physikalische Aspekte*. – in Untersuchung und Bewertung von Sedimenten - ökotoxikologische und chemische Testmethoden, W. Calmano, Hrsg., Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 2001, pp. 27-50
- [8] GRÖNGRÖFT, A. ; GEBERT, J. ; BERGER, K. ; MAASS, B.: *Verwendung von Baggergut als Material für die Dichtung von Deponien, den Deichbau, zur Verfüllung und zur Bodenverbesserung*. – in Hamburger bodenkundliche Arbeiten - Abfallverwertung bei der Rekultivierung von Deponien, Altlasten und Bergbaufolgelandschaften, Bd. 56, S. Melchior und K. Berger, Hrsg., Verein zur Förderung der Bodenkunde, 2005, pp. 209-224
- [9] HENNEBERG, M. ; KIBBEL, E.-M. ; NEUMANN, R. M. G.: *Einsatz von Baggergut zur Deponierekultivierung*. – in Hamburger bodenkundliche Arbeiten - Abfallverwertung bei der Rekultivierung von Deponien, Altlasten und Bergbaufolgelandschaften, Hamburg, Verein zur Förderung der Bodenkunde, 2005, pp. 287-290
- [10] MORSCHEK, G. ; LEMKE, A. ; HENNEBERG, M.: *Matured dredged material as restoration substrate in landfill surface sealing systems*. – in Proceedings of the South Baltic Conference on Dredged Materials in Dike Construction , Rostock, 2014
- [11] DEUTSCHE VEREINIGUNG FÜR WASSERWIRTSCHAFT, ABWASSER UND ABFALL: *Merkblatt DWA-M 362,2 Umgang mit Baggergut, Teil 2: Fallbeispiele*. – Hennes, 2003
- [12] DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG: *DIN 38414 Teil 11: Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung; Schlamm und Sedimente (Gruppe S); Probenahme von Sedimenten (S 11)*. 1987. – Beuth Verlag, Berlin

- [13] *BBodSchG*, „Bundes-Bodenschutzgesetz - Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten vom 17. März 1998 (BGBl. I S. 502)“. – das zuletzt durch das Gesetz
- [14] *BBodSchV*, „Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung vom 12. Juli 1999 (BGBl. I S. 1554)“. – die zuletzt durch Artikel 5, Absatz 31 des Gesetzes vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212) geändert worden ist
- [15] DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG: *DIN 19731: Verwertung von Bodenmaterial*. 1998. – Beuth Verlag, Berlin
- [16] *KrWG*, „Kreislaufwirtschaftsgesetz - Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212)“. – das zuletzt durch §44 Absatz 4 des Gesetzes vom 22. Mai 2013 (BGBl. I S. 1324) geändert worden ist
- [17] SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE: *Handbuch zur Altlastenbehandlung Teil 1*. 2003. – Dresden
- [18] LAGA: „Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Abfällen: Teil II: Technische Regel für die Verwertung 1.2 Bodenmaterial (TR Boden)“. 2004. – Frankfurt/Main
- [19] *Vollzugshilfe zu § 12 BBodSchV*, „Vollzugshilfe zu den Anforderungen an das Aufbringen und Einbringen von Materialien auf oder in den Boden (§ 12 Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung)“. 2002. – LABO in Zusammenarbeit mit LAGA, LAWA und LAB
- [20] MOLLÉE, R.: *Altlastenprojekt SAXONIA 1993 - 2013 - eine Retrospektive*. 2013. – Freiberg: SAXONIA Standortentwicklungs- und -verwaltungsgesellschaft
- [21] FRITZ, E. ; JAHNS, C.: *Fritz und Jahns, „Die Spülhalde Davidschacht in Freiberg–Geschichte, Umweltproblematik und geplante Sanierung*. 2017. – Freiberg Ecology online, pp. 4-17