

GUTACHTEN ZUR PRÜFUNG MÖGLICHER UMWELTAUSWIRKUNGEN DES EINSATZES VON ABFALL- UND RESTSTOFFEN ZUR BRUCH-HOHLRAUMVERFÜLLUNG IN STEINKOHLENBERGWERKEN IN NORDRHEIN-WESTFALEN, TEIL 1

Detailbericht 3:

Hydrogeochemische Systemanalyse

Lehr- und Forschungsgebiet Hydrogeologie, RWTH Aachen University

Univ.-Prof. Dr. Thomas R. [REDACTED]

Dipl.-Geol. [REDACTED]

[REDACTED] M. Sc.

[REDACTED] M. Sc.

[REDACTED] B. Sc.

Abgabe April 2017

Dieser Bericht ist Teil des Gutachtens:

Gutachten zur Prüfung möglicher Umweltauswirkungen des Einsatzes von Abfall- und Reststoffen zur Bruch-Hohlraumverfüllung in Steinkohlenbergwerken in Nordrhein-Westfalen, Teil 1

Auftraggeber:

Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz
des Landes Nordrhein-Westfalen

Ministerium für Wirtschaft, Energie, Industrie, Mittelstand und Handwerk des Landes Nordrhein-Westfalen

Auftragnehmer:

ahu AG Wasser · Boden · Geomatik, Aachen (Dr. ██████████)

in Zusammenarbeit mit:

Prof. Dr. ██████████ (TU Clausthal, Abtlig. Hydrogeologie)

delta h Ingenieurgesellschaft mbH, Witten (Prof. ██████████)

LEK Lehrstuhl für Geologie, Geochemie und Lagerstätten des Erdöls und der Kohle,
RWTH Aachen University (Prof. Dr. ██████████)

LFH Lehr- und Forschungsgebiet Hydrogeologie, RWTH Aachen University (Prof. Dr. ██████████)

IFM Lehrstuhl und Institut für Markscheidewesen, Bergschadenkunde und Geophysik im Bergbau,
RWTH Aachen University (Prof. Dr. ██████████)

Auftragsdatum: 16.07.2015

INHALTSVERZEICHNIS

0	Vorbemerkung	1
0.1	Aufbau des Gutachtens und der Detailberichte	1
0.2	Untersuchungsraum	2
1	Einleitung und Aufgabenstellung	4
2	Grundwasser in der Kreide	5
3	Tiefengrundwasser	7
3.1	Datenerfassung und Literaturrecherche	7
3.2	Auswahl von Tiefengrundwässern	10
3.3	Teufenabhängigkeit der Parameter	11
3.3.1	Abdampfdruckstand	11
3.3.2	pH-Wert	13
3.3.3	Temperatur	14
3.3.4	Gehalt an NaCl	15
3.3.5	Spezifische elektrische Leitfähigkeit	16
3.3.6	Dichte	16
3.4	Chemische Zusammensetzung des Tiefengrundwassers im Bereich der BHV	17
3.5	Bewertung und Diskussion der Ergebnisse	20
4	Grubenwasser	22
4.1	Datenerfassung	22
4.2	Auswertung der Analysen	23
4.2.1	Untertägige Grubenwasserproben aus der Zeit der Bruchhohlraumverfüllungen	23
4.2.2	Übertägige Proben aus der Grubenwasserhebung Haus Aden 2008-2015	29
4.2.3	Aktuelle untertägige Probenahme	32
4.3	Bewertung und Diskussion der Ergebnisse	34
5	Versatzmaterialien	36
5.1	Datenerfassung und Literaturrecherche	36
5.2	Metallinventar der bergbaufremden Versatzmaterialien	37
5.2.1	Machbarkeitsstudie	37
5.2.2	Abschlussberichte	37
5.2.3	RAA-Schlämme	41

5.3	Hausmüllverbrennungsaschen (HMVA)-Zusammensetzung und Mineralphasen in den Aschen	44
5.4	Zustand der Bruchhohlraumverfüllung	50
5.4.1	Forschungsberichte, Laborversuche und Überprüfung der Erhärtung	56
5.4.2	Überprüfung der Erhärtung in der BHV	58
5.5	Überschusswasser	60
5.6	Störfälle während des Betriebs	60
5.7	Auswertung nationaler und internationaler Literatur zum Thema BHV, insbesondere dem Aggregatzustand	62
5.8	Zusammenfassende Bewertung und Diskussion der Ergebnisse	67
6	Nebengesteine	69
6.1	Datenerfassung und Literaturrecherche	69
6.2	Art der Nebengesteine	69
6.3	Zusammensetzung der Nebengesteine	70
7	Literatur	72
	ANHANG 1	82
	ANHANG 2	87
	ANHANG 3	93
	ANHANG 4	99
	ANHANG 5	100
	ANHANG 6	105
	ANHANG 7	114
	ANHANG 8	115

ABBILDUNGEN:

Abb. 1:	Aufbau und Inhalt des Gutachtens	1
Abb. 2:	Überblick über den Untersuchungsraum, die wichtigsten Lokalitäten und Lage des Profils in Detailbericht 1	3
Abb. 3:	Tiefenabhängige Verteilung der Abdampfdruckstände für das BW Haus Aden / Monopol (Wedewardt 1995) im Vergleich mit den mittleren Abdampfdruckständen für die Grubenwasseranalysen von Gb1 (RAG), des Grundwassers von Consolidation (Schacht 4, 11. Sohle; 1.210 mNHN; Jäger et al. 1990) und dem berechneten Abdampfdruckstand des RAG-Wassers (s.o.)	12

Abb. 4:	Tiefenabhängige Verteilung des pH-Wertes, BW Haus Aden / Monopol	13
Abb. 5:	Tiefenabhängige Verteilung der Temperatur, Haus Aden / Monopol	14
Abb. 6:	Teufenabhängige Verteilung der NaCl-Konzentration, Haus Aden / Monopol	15
Abb. 7:	Tiefenabhängige Verteilung der spezifischen elektrischen Leitfähigkeit (bezogen auf 25 °C), Haus Aden / Monopol	16
Abb. 8:	Teufenabhängige Verteilung der Dichte, Haus Aden / Monopol	17
Abb. 9:	Lage der Bauhöhen, Bereiche mit Bruchhohlraumverfüllung und Grubenwasserentnahmestellen im Flöz Grimberg 2/3, Baufelder E1 bis E3 des BW Haus Aden / Monopol	23
Abb. 10:	Zeitlicher Verlauf des Abdampfdruckstandes an der Entnahmestelle Gb 1/3	25
Abb. 11:	Zeitlicher Verlauf des Abdampfdruckstandes an der Entnahmestelle Gb 16/1, (Datengrundlage: Abschlussberichte RAG); Lage in Abb. 7 als 17/1 markiert	26
Abb.12:	Teilprovinzen des Einzugsgebiet Victoriadam, Einzugsgebiet Ost und Grubenwasserstände	30
Abb. 13:	Zeitlicher Verlauf des Abdampfdruckstandes in Proben der Wasserhebung im Bergwerk Haus Aden von 2008 bis 2015	32
Abb. 14:	Lage der drei Wasserbeprobungsstellen (18/1, 18/3 und 18/6) der Beprobungsmaßnahme 18.02.2016 im Schachtbereich Grimberg 2	33
Abb. 15:	Entstehung von RAA-Schlämme im Kraftwerk	42
Abb. 16:	Röntgendiffraktometrie Analyse gewonnener Kerne in die verbrachten Reststoffe	49
Abb. 17:	Technische CSH-Phasen	50
Abb. 18:	Aufnahme von Bruchhaufwerk	51
Abb. 19:	Kristallwachstum beim Abbinden von Zement	53
Abb. 20:	Schematische Darstellung des Verbundes zwischen Abbaubetrieb und BHV	54
Abb. 21:	Typisches Versatzgut mit den geforderten thixotropen Eigenschaften und hohem Feststoffgehalt	57
Abb. 22:	Herausdrückvorgang mit Rohrreinigungsgerät	57
Abb. 24:	Nahaufnahme einer Ortsbrust im Bergwerk Walsum. Gefüge aus Bruchbergen und Füllstoff nach Einbau über Schlepprohr	59
Abb. 25:	Lage der Reststoffe in einem Steinkohlenbergwerk in Ohio, USA	64
Abb. 26:	ESEM-Aufnahme (Environmental Scanning Electron Microscope) von Zementstein nach 3 Stunden Hydratation (Erstarren)	65
Abb. 27:	ESEM-Aufnahme (Environmental Scanning Electron Microscope) von Zementstein nach 28 Tagen Hydratation (Erhärten)	65
Abb. 28:	Mikroskopische Aufnahmen des Porenraumes mit CSH-Phasen, die den Porenraum verschließen	66

TABELLEN:

Tab. 1:	Grundwassermessstellen in der Kreide (Daten aus Beprobungen 2014/2015 der RAG); nach Detailbericht 1	6
Tab. 2:	Mittlere Tiefengrundwasserzusammensetzung im BW Haus Aden / Monopol in den Teufen der Bruchhohlraumverfüllungen mit bergbaufremden Reststoffen	18
Tab. 3:	Mögliche geogene Hintergrundzusammensetzungen des Tiefengrundwassers zur Modellierung	20
Tab. 4:	Verhältnis Betriebswasser zu gehobenem Grubenwasser	22
Tab. 5:	Bezeichnung der Beprobungsstellen zu den Bauhöhen nach den Abschlussberichten des Bergbautreibenden an die Aufsichtsbehörden	24
Tab. 6:	Abdampffrückstände in den Grubenwasserproben in Haus Aden	27
Tab. 7:	Grubenwässer von BW Haus Aden / Monopol von Gb1	28
Tab. 8:	Bandbreiten der Konzentrationen im Grubenwasser von Chlorid und ausgewählten Schwermetallen über den gesamten Verbringungszeitraum	29
Tab. 9:	Gehobene Grubenwässer von BW Haus Aden von 2008 bis 2015	31
Tab. 10:	Grubenwasseranalysen von der Beprobung im Bergwerk Haus Aden / Monopol vom 18.02.2016	33
Tab. 11:	Chemische Stoffanalysen der untersuchten Reststoffe (Auswahl von Proben der Abfallgruppen I bis VII aus Band 3 der Machbarkeitsstudie). Analyse im Königswasseraufschluss	37
Tab. 12:	Verbrachte Reststoffe und RAA-Schlämme in den einzelnen Bauhöhen	38
Tab. 13:	Massenbilanzierung RAA-Schlamm, andere Materialien	38
Tab. 14:	Bandbreiten der Belastungen der verbrachten Reststoffe mit Schwermetallen und Chlorid	39
Tab. 15:	Verbrachtes Reststoffinventar des HMVA-Filterstaubs im BW Haus Aden / Monopol	39
Tab. 16:	Mittlere Metallgehalte der in Gb 2 verbrachten Filterstäube	41
Tab. 17:	Erzeuger von den im Bergwerk Haus Aden / Monopol verbrachten RAA-Schlämmen	43
Tab. 18:	Spannbreiten der chemischen Zusammensetzung der Trockensubstanz von RAA-Schlämme	44
Tab. 19:	Zusammenstellungen von HMVA-Zusammensetzungen im internationalen und zeitlichen Vergleich	46
Tab. 20:	Verschiedene Untersuchungen zu den Mineralphasen in Filteraschen	48
Tab. 21:	Zusammenfassung der Daten zu den Störfallberichten	62
Tab. 22:	Abschätzung der Mineralzusammensetzung nach Klinger (1994) auf Basis der chemischen Zusammensetzung und der röntgenographischen Untersuchung	71

0 Vorbemerkung

0.1 Aufbau des Gutachtens und der Detailberichte

Die Bearbeitung des „Gutachtens zur Prüfung möglicher Umweltauswirkungen des Einsatzes von Abfall- und Reststoffen zur Bruch-Hohlraumverfüllung in Steinkohlenbergwerken in Nordrhein-Westfalen, Teil 1“ erfolgt durch sechs Projektpartner, deren fachliche Schwerpunkte in der Abb. 1 dargestellt sind. Die Federführung hat die ahu AG.

Die einzelnen Projektpartner haben inhaltliche Schwerpunkte die in der Abb. 1 im Überblick und in der folgenden Tabelle 1 genauer dargestellt sind, da diese z. T. über die in der Abb. 1 beschriebenen Inhalte hinausgehen.

Die Beschreibung und Erläuterung dieser Arbeitsergebnisse erfolgt in den sechs Detailberichten. Die für die integrierte System- und Risikoanalyse relevanten Grundlagen und Ergebnisse aus den Detailberichten werden – teilweise auch in verkürzter Form – in das Gutachten aufgenommen.

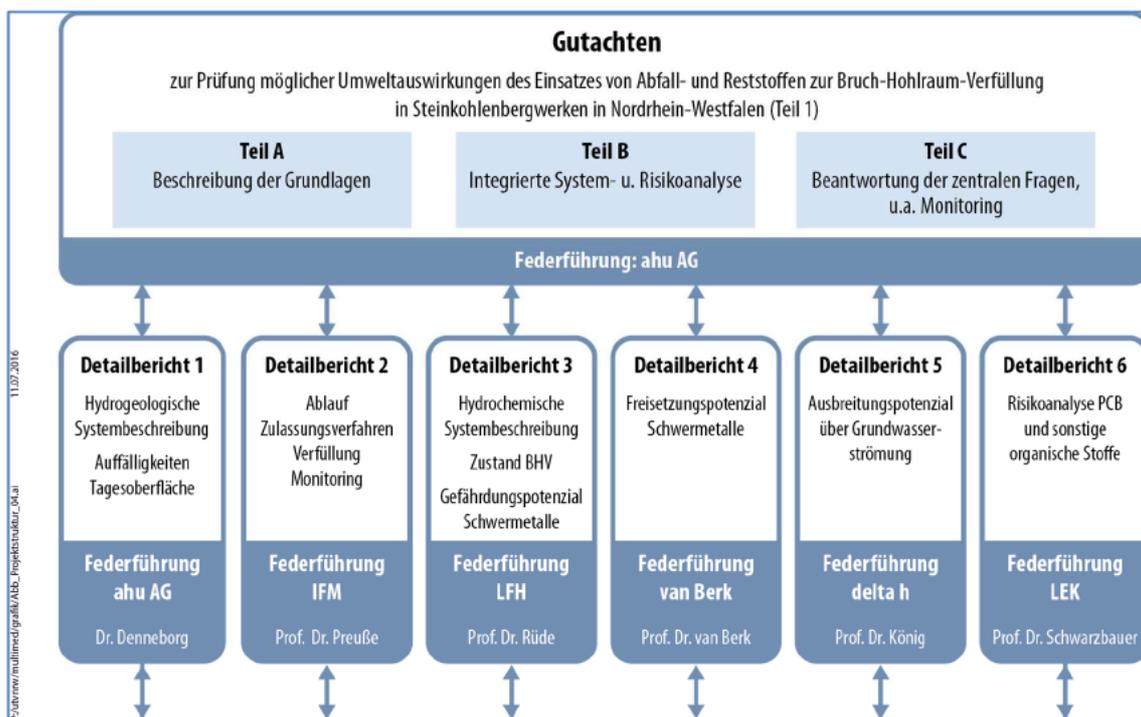


Abb. 1: Aufbau und Inhalt des Gutachtens

Die Detailberichte wurden in enger Abstimmung der Gutachter erstellt, u.a. erfolgten auch Zuarbeiten untereinander.

Inhaltliche Schwerpunkte der Bearbeitung durch das Konsortium in den Detailberichten:

Nr	Detailbericht	Verantwortlicher Bearbeiter / Projektleiter	Inhalte
1	Hydrogeologische Systembeschreibung und Auffälligkeiten an der Tagesoberfläche	Dr. ████████ (ahu AG)	<ol style="list-style-type: none"> Hydrogeologische Systembeschreibung Auffälligkeiten an der Tagesoberfläche Datenerfassung und Dokumentation
2	Ablauf des Zulassungsverfahrens, der Bruchhohlraumverfüllung und des Monitorings	Prof. ████████ (IFM)	<ol style="list-style-type: none"> Ablauf des Zulassungsverfahrens und des Monitorings Dokumentation der Bruchhohlraumverfüllung Bewertung
3	Hydrogeochemische Systemanalyse	Prof. ████████ (LFH)	<ol style="list-style-type: none"> Tiefengrundwasser Grubenwasser Inventar des anorganischen Gefährdungspotential Zustand der Bruchhohlraumverfüllung Nebengesteine
4	Freisetzungspotential	Prof. ████████	<ol style="list-style-type: none"> Freisetzungspotential Bewertung der damaligen Grundannahmen
5	Ausbreitungspotential	Prof. ████████ (delta h)	<ol style="list-style-type: none"> Ausbreitungspotential (Fernfeldmodell und Nahfeldmodelle) Bewertung der damaligen Grundannahmen
6	Risikoanalyse organische Stoffe	Prof. ████████ (LEK)	<ol style="list-style-type: none"> Risikoanalyse PCB und Substituenten Risikoanalyse andere organische Stoffe

Der vorliegende Bericht ist der Detailbericht 3.

0.2 Untersuchungsraum

Für die Bearbeitung des Gutachtens wurden verschiedene Untersuchungsräume betrachtet, die nicht scharf abgegrenzt werden können. Für die Fragestellungen der hydrogeologischen Systembeschreibung, der Bewertung der Auffälligkeiten an der Tagesoberfläche (am Gösslinghof) und die Bruchhohlraumverfüllung ist dies der in Abb. 2 dargestellte Untersuchungsraum.

In den Baufeldern Monopol E1, E2 und E3 erfolgt in einer Tiefe zwischen -800 m NHN und -920 m NHN die BHV.

Der Schacht Grillo 4, an dem die Mischanlage für die BHV stand und über den die aufbereiteten Versatzstoffe unter Tage gebracht wurden, wurde mittlerweile verfüllt. Die Schächte Grimberg 2 und der Schacht Haus Aden 2, der Standort der Zentralen Wasserhaltung Haus Aden 2 (ZWH), sowie eine untertägige Verbindungstrecke sind noch

zugänglich. Für die Grundwassermodellierungen wurden ein Fernfeldmodell und drei Nahfeldmodelle abgegrenzt (Detailbericht 5).

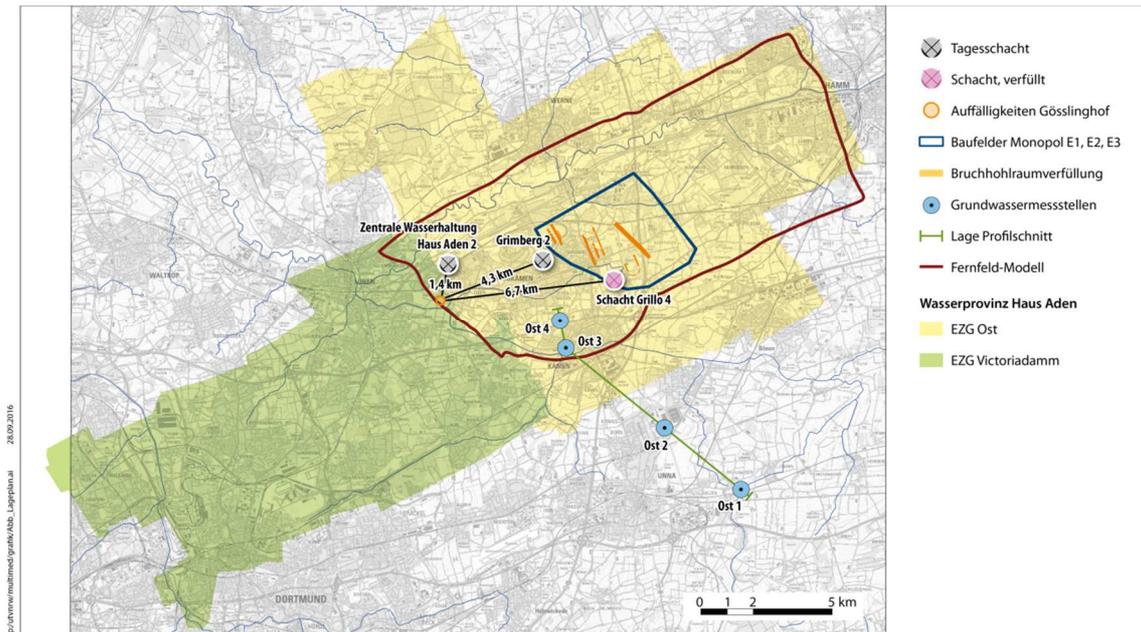


Abb. 2: Überblick über den Untersuchungsraum, die wichtigsten Lokalitäten und Lage des Profils in Detailbericht 1 (ahu AG)

1 Einleitung und Aufgabenstellung

Das Lehr- und Forschungsgebiet Hydrogeologie (LFH) der RWTH Aachen bearbeitet vorrangig den Teilbereich „Hydrochemische Systemanalyse“ zum Einsatz von Abfall- und Reststoffen zur Bruch-Hohlraumverfüllung im Bergwerk Haus Aden / Monopol. Hinsichtlich der anorganisch-chemischen Aspekte werden die hydrogeochemischen Wechselwirkungen zwischen (i) eingebrachten bergbaufremden Reststoffen, (ii) Konditionierungsmaterialien, (iii) vorhandenen wässrigen Lösungen und (iv) Gesteinen im Kontakt zu den übrigen Phasen unter den In-situ-Bedingungen (Temperatur, Druck, Ionenstärke der wässrigen Lösung) dargelegt. In diese Darstellung wird auch die Stabilität der in den Versatzbereichen eingebrachten Komponenten und der dort natürlicherweise vorhandenen Stoffe unter den In-situ-Bedingungen (Temperatur, Druck, Ionenstärke der wässrigen Lösung) einbezogen. Stabilität bezieht sich dabei auf das Abbindeverhalten der Reststoffe in der Bruchhohlraumverfüllung (BHV), mechanische Fragen hingegen werden durch das IFM (Prof. ████████) und hydrogeochemische Fragen durch thermodynamische Berechnungen von Prof. ████████ bearbeitet.

Die hydrogeochemischen Prozesse sind räumlich und zeitlich zu betrachten. Für den unmittelbaren Bereich der Bruchhohlraumverfüllung wird das Stoffinventar aus den Abschlussberichten des Versatzbetriebs ermittelt. Schwerpunkt des LFH ist die Hydrogeochemie des Nahfeldes, also das durch bergmännisches Auffahren der Grube aufgelockerte und durch Grubenwetter und Betriebswasser unmittelbar beeinflusste Gebirge und insbesondere die aufgelockerten Schichten im unmittelbaren Hangenden und Liegenden der Bruchhohlraumverfüllung mit den umgebenden Schichten von ca. 50 bis 100 m um die Bruchhohlraumverfüllung. Federführend werden vom LFH die hydrogeochemischen Wechselwirkungen zwischen (i) den aus der Zone mit Wässern austretenden Stoffen, (ii) den mineralischen Feststoffen der im Nahfeld anstehenden Gesteine und (iii) den dort vorhandenen Wässern (entweder Haftwässer in noch nicht vollständig gefluteten Bereichen oder freies, mobiles Tiefengrundwasser) mit ihren hydrogeochemischen Milieus unter In-situ-Bedingungen zusammengestellt und in einem zweiten Schritt bewertet.

Hier ist eine sekundäre Fixierung und/oder potenzielle Demobilisation von Stoffen (Umverteilung von Stoffen, die in den aus der ersten Zone austretenden Wässern gelöst sind, an die im Nahfeld anstehenden Gesteine) zu berücksichtigen. Andererseits ist aber auch eine Mobilisation von Stoffen aus den im Nahfeld anstehenden Gesteinen heraus in diejenigen mobilen Tiefengrundwässer möglich, die mit aus der ersten Zone austretenden Wässern kontaminiert sind. Dadurch könnten sich die hydrogeochemischen In-situ-Milieus ändern (betrifft u.a. Ionenstärke, pH-Wert, Redoxverhältnisse), welche die Mobilität der Stoffe kontrollieren.

In zeitlicher Entwicklung werden Prozesse in der Flutungsphase der BHV, einer Übergangsphase mit bereichsweise wechselnden Richtungen des hydraulischen Gradienten – also auch einem möglichen Stofftransport in das Fernfeld – und einer Dauerphase mit Haus Aden / Monopol als hydraulischem Zwangspunkt durch dauerhafte Grubenwasserhebung betrachtet.

Ferner werden hydrogeochemische Informationen für die hydrogeologische Systemanalyse (ahu AG) und die Modellierung des Fernfeldes, dem unverritzten Gebirge, durch Δh (Prof. ████████) sowie daraus abgeleitete Vorschläge für die Bewertung und für ein zukünftiges Monitoring bereitgestellt.

2 Grundwasser in der Kreide

Im zu betrachtenden Bereich wird das gefaltete Grundgebirge von Deckgebirge des Münsterländer Kreidebeckens und auflagernden quartären Gesteine bedeckt. Das Grundwasser im Deckgebirge ist in zwei Stockwerke einzuteilen, die durch Tonmergel- und Mergelsteine des Coniac bis unteren Mittelsanton, die traditionell als „Emscher Mergel“ zusammengefasst werden, getrennt sind. Die Gesteinsdurchlässigkeit der „Emscher Mergel“ ist in diesem Gebiet als sehr gering bis äußerst gering einzustufen, ihre Mächtigkeit beträgt im Betrachtungsgebiet ca. 200 m.

Die Auflockerungszone der „Emscher Mergel“ und die quartären Ablagerungen bilden das erste, von meteorischem Grundwasser erfüllte, Grundwasserstockwerk. Das zweite Grundwasserstockwerk, unter den Gesteinen des „Emscher Mergels“, umfasst Kalksteine, Kalkmergelsteine, Kalksandsteine und Mergelsteine des Cenoman und Turons. Die Basis bildet ein geringmächtiges Transgressionskonglomerat, hier Essener Grünsand.

Bereits im Teufenbereich der „Emscher Mergel“ steigt der Stoffinhalt der Grundwässer stark an. Die Wässer im Turon-Cenoman-Grundwasserleiter sind Salzwässer mit Stoffgehalten deutlich über 1.000 mg/L (z.B. Michel 1983). Erst entlang des Südrandes des Münsterländer Kreidebeckens erfüllen junge, meteorische Süßwässer dieses Grundwasserstockwerk (z.B. Michel 1997).

Wedewardt (1995) hat im Rahmen seiner Untersuchungen im Betrachtungsgebiet je eine Probe aus Bergwerk Monopol, Schacht Werne 3 (bei ca. -370 m NHN) und Bergwerk Haus Aden, Schacht 2 (bei ca. -330 m NHN), die beide dem Turon entstammen, analysiert und für diese Proben Stoffgehalte von 52.000 mg/L und 18.000 mg/L bestimmt.

Neuere Daten wurden von der RAG an Grundwassermessstellen erhoben, die im Jahr 2002 errichtet wurden und im „Emscher Mergel“ und im Turon verfiltert sind. Näheres ist im Detailbericht 1 (ahu AG) ausgeführt. Es sei hier noch einmal festgehalten, dass entsprechend den RAG-Analysen im „Emscher Mergel“ bereits bei geringen Teufen von 45 m hohe Stoffgehalte über 10.000 mg/L (siehe Grundwassermessstelle Ost 2.2, Tab. 1) auftreten. Auch im Turon werden sehr hohe Gehalte bis 23.000 mg/L (siehe Grundwassermessstelle Ost 4.2, Tab. 1) bestimmt. Die Messstelle Ost 1.1 weist sehr geringe Stoffgehalte auf, weil sie bereits in der südlichen Süßwasserzone des Turon-Grundwasserleiters, in der dieser ohne überdeckende Gesteine zu Tage tritt, verfiltert ist.

Die Analysen der RAG und die zwei Proben von Wedewardt bestätigen die wissenschaftliche Kenntnis zum Auftreten von salinarem Grundwasser im Deckgebirge und zeigen an, dass der Betrachtungsraum auch aktuell in der salinaren Zone des zweiten Grundwasserstockwerkes liegt (siehe auch Detailbericht 1).

Tab. 1: Grundwassermessstellen in der Kreide (Daten aus Beprobungen 2014/2015 der RAG); nach Detailbericht 1 (ahu AG)

Messtelle	Teufe [m]	Verfiltertes Gestein	Chloridgehalt [mg/L]
Ost 2.2	45	Emscher Mergel	10.000 - 12.000
Ost 3.1	200	Emscher Mergel	13.000 - 15.000
Ost 4.1	180	Emscher Mergel	13.000 - 15.000
Ost 1.1	70	Turon	30 - 55
Ost 2.1	165	Turon	11.000 - 13.000
Ost 4.2	335	Turon	23.000

3 Tiefengrundwasser

Tiefengrundwasser ist das Grundwasser, das bereits vor dem Auffahren der Bergwerke (BW) in den Klüften und Poren des Steinkohlengebirges vorhanden war und aufgrund der weiträumigen Überdeckung durch gering durchlässige Schichten nicht unmittelbar durch Zusickerung aus der Grundwasserneubildung ergänzt wird. Es sickert auch heute noch dem BW zu und wird nach einer Flutung langfristig das Wasser sein, das mit der Bruchhohlraumverfüllung (BHV) in Kontakt kommt. Dieses Tiefengrundwasser ist immer hoch mineralisiert und die Mineralisation nimmt mit der Teufe zu.

Um die Wechselwirkungen der eingebrachten bergbaufremden Versatzstoffe mit dem Tiefengrundwasser prognostizieren und beurteilen zu können, ist es notwendig die hydrochemischen Eigenschaften des Tiefengrundwassers spezifisch für das Bergwerk und die Teufe zu ermitteln. Der so bestimmte Chemismus der Tiefengrundwässer ergibt zudem eine Anfangsbedingung für die hydrochemischen Modellierungen (Detailbericht 4).

Die Daten des seit dem Jahr 2008 auf Initiative des Landesamtes für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz durchgeführten Grubenwassermonitorings können für diese Aufgabenstellung nicht verwendet werden, da sie aufgrund der anderen Zielsetzung die Zusammensetzung des gehobenen Grubenwassers beschreiben (s. Kap. 4.3.2).

3.1 Datenerfassung und Literaturrecherche

Generell wurde folgende Arbeitsweise zur Ermittlung des Tiefengrundwassers in Form der hydrogeochemischen Hintergrundwerte angewendet:

In einem ersten Schritt wurden alle bei der BR Arnsberg verfügbaren und durch das Ministerium und die RAG zur Verfügung gestellten Unterlagen, DMT Berichte, veröffentlichte wissenschaftliche Arbeiten etc. gesichtet und in Form von Photographien, Scans, Kopien etc. als digitale Bildelemente oder im portable document format (PDF) erfasst.

Die Unterlagen wurden hinsichtlich ihrer Verwertbarkeit im Hinblick auf die hydrogeochemische Systembeschreibung spezifisch für den Bereich des Bergwerkes Haus Aden / Monopol und teufenspezifisch geprüft. Die für die Beurteilung der hydrochemischen Fragestellungen relevanten, vorhandenen Analysen wurden händisch in ein Excel-Format überführt, so dass diese nun für weitere Auswertungen digital zur Verfügung stehen.

Parallel dazu wurde eine Literaturrecherche mit dem Ziel unabhängige, ergänzende Daten zu ermitteln, durchgeführt. Es wurden die Originaldaten, soweit verfügbar nochmals einer eigenen Auswertung unterzogen. Es wurden besonders die folgenden Arbeiten berücksichtigt:

Michel (1964)

Auf Anregung von H. Karrenberg wurde Anfang der 1960er Jahre die Hydrogeologie und Hydrochemie des Tiefengrundwassers in Nordrhein-Westfalen großräumig untersucht. Ergebnisse dieser Untersuchungen insbesondere zum Ruhrgebiet wurden in einem Sonderband der Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft im Jahr

1964 publiziert. Darin dokumentierte Michel (1964) tabellarisch die Hauptbestandteile der Wässer und legt eine regionale Typisierung fest. Im Tiefengrundwasser betragen die Konzentrationen des dominierenden Anions Chlorid zwischen 1.000 mg/L und 200.000 mg/L und nehmen mit der Teufe zu. Neben den Hauptkationen Natrium, Calcium und Magnesium und Natrium enthält die Veröffentlichung auch Angaben zum Auftreten von Barium in sulfatarmen Grundwässern und dem, zum Teil mit diesem vergesellschafteten, Strontium.

Puchelt (1964)

Die Arbeit von Puchelt (1964) im selben Sonderband (s.o.) enthält Analysedaten, die im Rahmen der Untersuchung „Zur Geochemie des Grubenwassers im Ruhrgebiet“ erhoben wurden. Es handelt sich dabei um 98 Grubenwasserproben, die in Zechen im gesamten Ruhrgebiet entnommen wurden.

„Die Probenahme erstreckte sich nach Möglichkeit auf alle in den einzelnen Gruben anfallenden Wässer, wobei auf die Erfassung der Zuflüsse auf den einzelnen Sohlen und damit aus verschiedenen stratigraphischen Horizonten besonderer Wert gelegt wurde.“ (S. 168)

Analysiert wurden neben physiko-chemischen Parametern (Temperatur, pH-Wert, spez. el. Leitfähigkeit, Abdampfdichte, Dichte) Alkali- und Erdalkalitionen und auf der anionischen Seite Halogene, Alkalinität und Sulfat.

Machbarkeitsstudie (Jäger et al. 1990)

Eine umfangreichere hydrochemische Datenaufnahme zum Tiefengrundwasser erfolgte erst wieder im Rahmen der Untersuchungen zur Bruchhohlraumverfüllung mit bergbaufremden Versatzmaterialien. Quellen, der in der Machbarkeitsstudie ausgewerteten Daten, sind (Zitat 1):

- Archive der Westfälischen Berggewerkschaftskasse (heute DMT)
- Analysematerial aus veröffentlichter Literatur
- Eigene Untersuchungen an Grubenwässern (durch HIG und DMT analysiert)

Diese Analysedaten wurden in der Machbarkeitsstudie nach Lage und Teufe der Probenahme eingeordnet. Eine Archivierung der Daten erfolgte mit dem Programmcode Chemdat. Es handelt sich dabei um 2600 Analysen im Karbon und 1500 im Deckgebirge. Diese digitalen Daten standen für eine erneute Auswertung in dem hier vorliegenden Gutachten nicht zur Verfügung.

Die Datenauswahl (Machbarkeitsstudie) gestaltet sich schwierig, da bei der Probenahme nicht immer nachvollziehbar ist, ob es sich um Grundwässer, Betriebswässer oder Mischwässer handelt. Zudem bestehen zum Teil keine genauen Informationen zur Teufenlage der jeweiligen Probe. Die ausgewerteten Proben wurden außerdem nach vorher bestimmten Konzentrationsgrenzen in Grundwässer und Betriebswässer eingeteilt. In der Folge wurden nur noch Wässer in diesen Konzentrationsbereichen betrachtet (Zitat 2).

Textzitat:

(1) „Für die Bearbeitung der hydrochemischen Fragestellung wurden die Archive der Westfälischen Berggewerkschaftskasse (jetzt DMT-Gesellschaft für Forschung und Prüfung mbH) ausgewertet. Außerdem wurde umfangreiches Analysenmaterial der verschiedenen Bergwerke und aus der veröffentlichten Literatur erfasst. Zusätzlich wurden im Rahmen dieser Studie eigene Untersuchungen an Grubenwässern bei der DMT und im Hygieneinstitut des Ruhrgebietes (Gelsenkirchen) durchgeführt.“

(2) „Die Auswertung des Datenmaterials wurde durch die erheblichen Qualitätsunterschiede der einzelnen Analysedaten erschwert. (...) Häufig war nicht ersichtlich, ob es sich bei den Proben um Grundwässer, um Betriebswässer oder um Mischwässer aus beiden handelt. (...) Nach der EDV-Eingabe der Analysedaten wurden Datenlisten ausgedruckt, aufgrund derer eine Vorauswahl zwischen echten Grundwässern und wahrscheinlichen Betriebswässern getroffen wurde, indem für Chlorid und Sulfat für bestimmte Tiefen-Intervalle Unter- und Obergrenzen der Konzentrationen entsprechend der für diese Tiefen zu erwartende Werte festgelegt wurden. Für die weitere Betrachtung wurden nur Analysen herangezogen, die innerhalb dieses Konzentrationsbereiches lagen.“

Die Informationen, die in der Machbarkeitsstudie enthalten sind, wurden in Form von Tabellen zusammengestellt und durch Angaben aus der Literatur ergänzt (Anhang 1).

Klinger (1994)

Im DMT Bericht 23 zum „Mobilisationsverhalten von anorganischen Schadstoffen in der Umgebung von untertägigen Versatzbereichen am Beispiel von Reststoffen aus Müllverbrennungsanlagen im Steinkohlengebirge des Ruhrkarbons“ von Klinger (1994) werden teufenabhängige Konzentrationswerte der Hauptbestandteile der Grubenwässer des Ruhrkarbons aus Archivdaten der DMT angegeben. Weiterhin zitiert Klinger (1994) die entsprechenden Werte aus der Machbarkeitsstudie „Studie zur Eignung von Steinkohlenbergwerken im rechtrheinischen Ruhrkohlenbezirk zur Untertageverbringung von Abfall- und Reststoffen“ von Jäger et al. (1990). Es wurden keine Angaben über die zu Grunde liegende Analytik gemacht.

Wedewardt (1995)

Bei den Analysedaten handelt es sich um Daten, die von Wedewardt (1995) im Rahmen seiner Untersuchung mithilfe eigener Grundwasserbeprobungen erhoben wurden. Die Ausarbeitung wurde als Dissertationsschrift an der Universität Bonn einem wissenschaftlichen Prüfungsverfahren unterzogen und danach als DMT-Bericht veröffentlicht. Zur Gewinnung der Proben sind auf den Seiten 32-34 des DMT-Berichtes von Wedewardt folgende Angaben gemacht:

„Die Proben stammen aus sämtlichen betriebenen Bergwerken aus Tiefen bis -1470 m NN (14 Bergwerke bzw. Verbundbergwerke, Stand 1994) und den Anlagen der Zentralen Wasserhaltung (14 beprobte Anlagen) der Ruhrkohle Bergbau AG.“ (S. 32)

„Aus Bohrungen in das tiefere Deckgebirge (Tiefen von ca. -70 m NN bis -570 m NN) und ehemaligen oberflächennahen Bergwerksstollen wurden ebenfalls Wasserproben entnommen. Bei den Bohrungen wurden die Wasserproben durch Schöpfen mit einer Schöpfbüchse und durch Pumpen gewonnen. Um an das reine Formationswasser zu

gelangen, mußte zunächst die Bohrspülung aus dem Bohrloch entfernt werden.“ (S. 32)

„„Oberstes Ziel bei der Beprobung untertage war es, eine möglichst sichere Einstufung der Zuflußstellen als reine geogene Tiefenwässer vornehmen zu können. Dabei wurde zusätzlich auf eine möglichst weitgestreute regionale und stratigraphische Verteilung der Probenpunkte geachtet.“ (S. 33)

„Bevorzugte Zuflußstellen waren Wasseraustritte direkt aus dem Gebirge ohne langen Kontakt mit der Grubenluft, während z.B. Proben aus einer Wassersaige bereits einen veränderten Chemismus aufweisen können.“ (S. 33)

Es stehen insgesamt 190 Vollanalysen von den verschiedenen Beprobungslokalitäten, die den oben genannten Kriterien entsprechen, zur Verfügung (Wedewardt 1995).

3.2 Auswahl von Tiefengrundwässern

Die vorliegenden Wasseranalysen und deren Nachvollziehbarkeit im Hinblick auf die Probenahme wurden hinsichtlich ihres Informationsgehaltes bezüglich des geogenen Ursprungs und damit auf die Verwertbarkeit zur Beschreibung des Tiefengrundwassers, das dem Grubengebäude zufließt, geprüft.

Als primäre Datenquellen für Aussagen über die Hydrochemie der Tiefengrundwässer wurden Puchelt (1964) und Wedewardt (1995) identifiziert. Puchelt (1964) enthält keine Angaben zum Bergwerk Haus Aden / Monopol, für die weitere Auswertung werden daher die Daten von Wedewardt (1995) verwendet. Sie werden als geogene Hintergrundwerte für die weiteren Betrachtungen herangezogen.

Von Wedewardt (1995) liegen gut dokumentierte Analysen von zutretendem, weitgehend unbeeinflusstem Tiefengrundwasser vor. Der untersuchte Parameterumfang bei Wedewardt (1995) ist deutlich größer als in anderen Studien.

Für die weiteren Betrachtungen kann deshalb ein Mittelwert der validierten Analysen für Betrachtungen des Fernfeldes verwendet werden („Wedewardt Mittelwert“).

Für die Modellierung in der BHV und im Nahfeld kann auch eine für typisch erachtete Analyse verwendet werden. Die hydrochemischen Modellierungen (Detailbericht 4, Prof. ██████████) erfolgte für Haus Aden / Monopol mit einem realen Tiefengrundwasser („Wedewardt Z2“). Zusätzlich wurde mit einem „verdünnten“ Z2- Wasser modelliert, um den Einfluss der Tiefengrundwasserbeschaffenheit einzuschätzen.

Die verschiedenen Analyseverfahren, sind, sofern die für die Analyse genutzten Geräte genannt wurden, in Anhang 2 aufgeführt. Aufgrund der damals verfügbaren bzw. ausgewählten Analyseverfahren sind die hohen Nachweisgrenzen für alle Schwermetalle und Metalloide entstanden, die der Ermittlung von Hintergrundwerten für die Spurenstoffe aus diesem Datensatz entgegenstehen (Anhang 2).

Exkurs „RAG-Wasser“

In der Machbarkeitsstudie und vielen Studien aus der Zeit vor der Verbringung der Reststoffe wurden Elutionsversuche durchgeführt. Aus Gründen der Vergleichbarkeit wurde für weitere Studien ein standardisiertes, sog. RAG-Wasser, entwickelt. Die Ruhrkohle AG hat dieses Standard-Grubenwasser in Zusammenarbeit mit dem Landesumweltamt und der Ruhr-Universität Bochum definiert (Paas 1997). Wilke und Dartsch (1995) verweisen darauf, dass dessen Zusammensetzung *zwischen den beteiligten Stellen Mitte 1992 vereinbart wurde*. Dieses Wasser sollte den Hauptbestandteilen eines Tiefenwassers in der Tiefe der Bruchhohlraumverfüllungen (Teufe - 800 m) entsprechen. Allerdings enthält dieses RAG-Wasser nur eine Auswahl von Stoffen, u.a. keine Schwermetalle.

Detailbericht 4 (Prof. ████████) führt in den Vorstudien Ergebnisse hydrochemischer Modellierungen mit „RAG-Wasser“ aus, um den Einfluss dieser Wasserzusammensetzung nachzuvollziehen.

3.3 Teufenabhängigkeit der Parameter

Es wurde die Teufenabhängigkeit einzelner physiko-chemischer Messgrößen und Stoffe ausgewertet: Abdampfdruckstand, pH-Wert, Temperatur, Gehalt an NaCl, spezifische elektrische Leitfähigkeit und Dichte. Bis auf den pH-Wert nehmen alle Parameter mit der Teufe zu. Die Daten beziehen sich nur auf das Bergwerk Haus Aden. Zur Orientierung sind in den Diagrammen neben der Geländeoberkante, die Grenze Deckgebirge - Grundgebirge entsprechend dem Bohrprofil Grillo 4, der Teufenbereich BHV – die sich überwiegend im Teufenbereich -800 m NHN bis -920 m NHN befindet - und das Flutungsziel – 600 m NHN in der Wasserprovinz Haus Aden sowie – 670 m NHN in der Zentrale Wasserhaltung Haus Aden gemäß des Grubenwasserkonzeptes der RAG eingetragen.

3.3.1 Abdampfdruckstand

Die Zusammensetzung der tiefen Grundwässer wird in der Mehrzahl der Untersuchungen durch das in seiner Zusammensetzung festgelegte RAG-Wasser repräsentiert. Zur Orientierung ist in der Darstellung des Teufenverlaufs des Abdampfdruckstandes das RAG-Wasser durch eine Linie markiert (Abb. 3). Gleichfalls wurde der als Stoffmassenkonzentration bestimmte Abdampfdruckstand der in Haus Aden beprobten Grundwässer als Anteil oder Vielfaches des Abdampfdruckstandes des RAG-Wassers dargestellt.

Wenige Proben haben einen mit Bezug auf die Beprobungsteufe zu geringen Abdampfdruckstand. Sie sind nachstehend durch gelbe Rauten markiert. Hierfür gibt es drei mögliche Ursachen:

- Die Beziehung Abdampfdruckstand zur Teufe hat eine sehr große Streuung.
- An den konkreten Probenahmestellen ist eine Beprobung von dem Bergwerk zusetzendem Tiefengrundwasser ohne Vermischung mit Betriebswasser nicht gelungen.

3.3.2 pH-Wert

Die pH-Werte (Abb. 4) liegen bis zu einer Teufe von - 600 m NHN zwischen 7,24 und 7,69 (alkalische Grundwässer). Mit zunehmender Teufe sinken die Werte in den leicht sauren Bereich bis ca. pH 6.0 ab. Einige Proben weisen deutlich niedrigere Werte auf. (Minimalwert von 4,78 (- 931 mNHN)). Diese sauren pH-Werte sind die Folge der Belüftung des Gesteins durch das Grubengebäude. Natürlich im Gestein enthaltene Sulfidminerale werden oxidiert und setzen Säure, Sulfat, Eisen und weitere Spurenstoffe (Ammonium, Mangan, Kupfer, Zink) frei (Nahfeld). Im unverritzten Gebirge (Fernfeld) fehlt die Belüftung als antreibendes Moment für die Sulfidoxidation. Den Bedingungen im Fernfeld entsprechen die Proben mit pH-Werten zwischen 6,0 und 7,6.

Wenige Proben weisen pH-Werte auf, die nicht den in den jeweiligen Beprobungsteufen zu erwartenden Werten entsprechen. Sie sind nachstehend durch gelbe Rauten markiert und werden in diesem Gutachten als Proben eingestuft, die entsprechend obiger Argumentation nicht repräsentativ für die Stoffkonzentrationen der Grundwässer im unverritzten Gebirge (Fernfeld) sind.

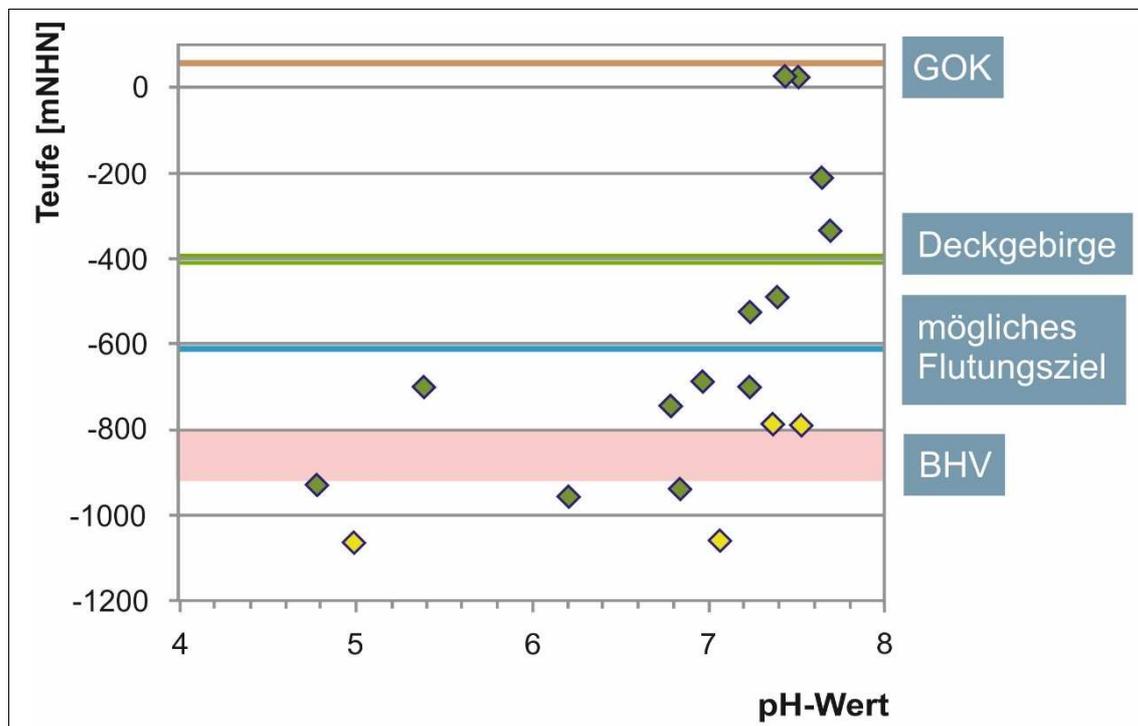


Abb. 4: Tiefenabhängige Verteilung des pH-Wertes, BW Haus Aden / Monopol (gelb = nicht repräsentative Proben) (erstellt aus den Analyseergebnissen von Wedewardt 1995)

3.3.3 Temperatur

Der Temperaturverlauf mit zunehmender Teufe zeigt – dem natürlichen geothermischen Gradienten entsprechend - einen Temperaturanstieg (Abb. 5). Auch Proben, die in vorangegangenen Abschnitten als nicht repräsentativ für die Beprobungsteufe eingestuft wurden, passen mehrheitlich in den Verlauf. Anders als die in der Herkunftsteufe ererbten chemischen Eigenschaften, passt sich die Temperatur schnell den Bedingungen in der Beprobungsteufe an. Im Teufenabschnitt der BHV herrschen Temperaturen zwischen 35 und 45 °C.

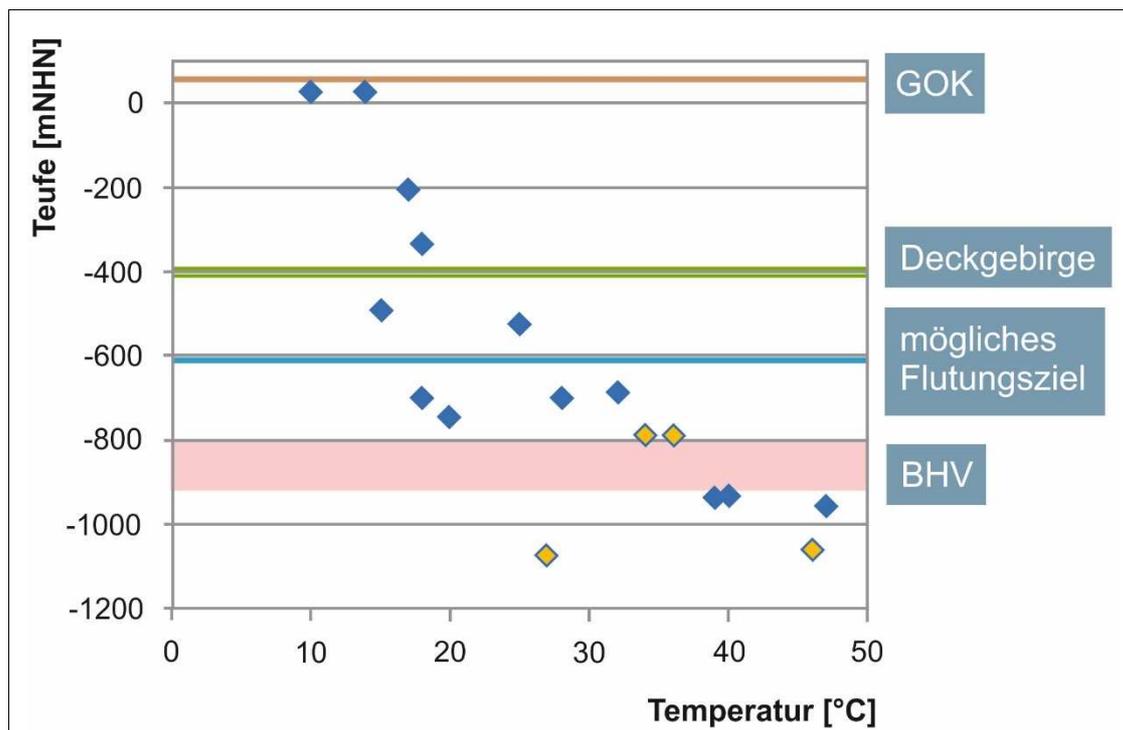


Abb. 5: Tiefenabhängige Verteilung der Temperatur, Haus Aden / Monopol (gelb = nicht repräsentative Proben) (erstellt aus den Analyseergebnissen von Wedewardt 1995)

3.3.4 Gehalt an NaCl

Der NaCl-Verlauf zeigt mit zunehmender Teufe einen deutlichen Anstieg (Abb. 6). Da es sich um die Hauptverbindung in den Wässern handelt wiederholt dies den Teufenverlauf des Abdampfdruckstandes.

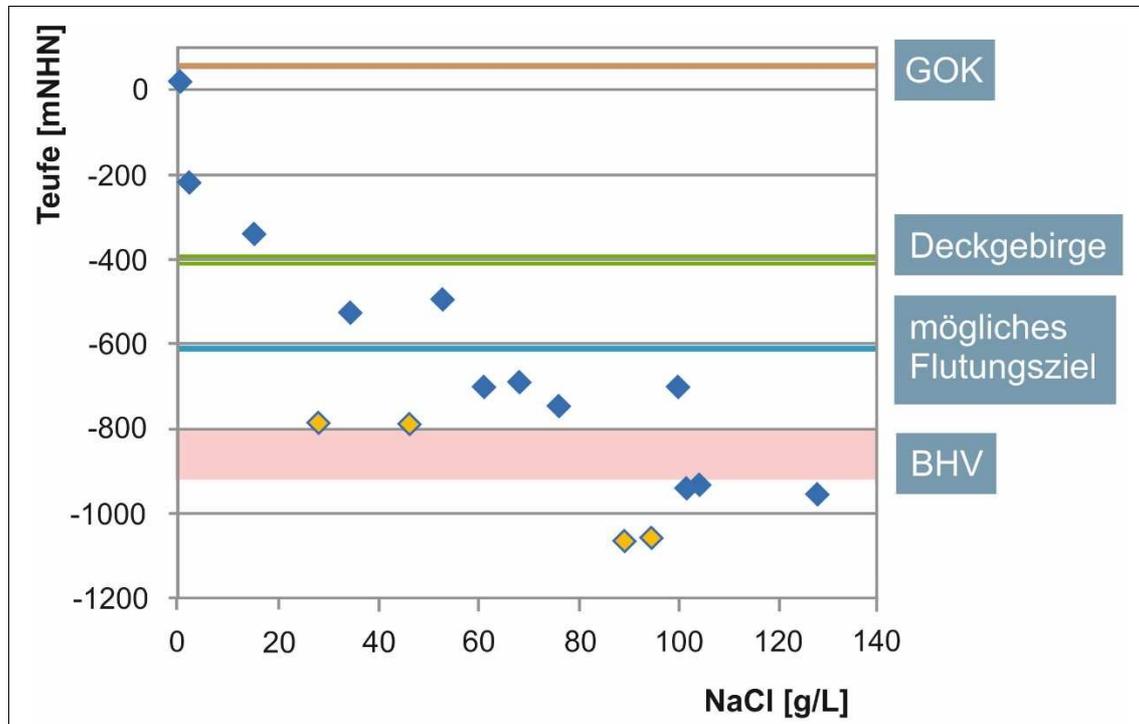


Abb. 6: Teufenabhängige Verteilung der NaCl-Konzentration, Haus Aden / Monopol (gelb = nicht repräsentative Proben) (erstellt aus den Analyseergebnissen von Wedewardt 1995)

3.3.5 Spezifische elektrische Leitfähigkeit

Der Verlauf der spezifischen elektrischen Leitfähigkeit zeigt, entsprechend des Abdampfdruckstands- und NaCl-Verlaufs, mit zunehmender Teufe einen Anstieg (Abb. 7).

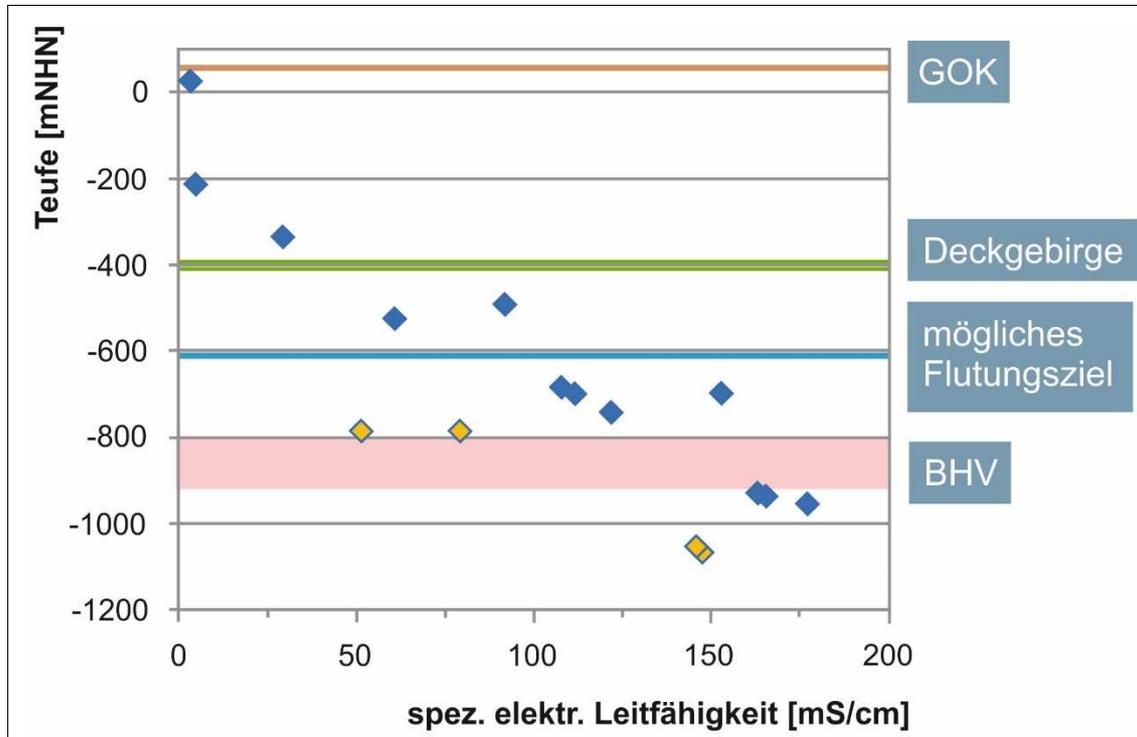


Abb. 7: Tiefenabhängige Verteilung der spezifischen elektrischen Leitfähigkeit (bezogen auf 25 °C), Haus Aden / Monopol (gelb = nicht repräsentative Proben) (erstellt aus den Analyseergebnissen von Wedewardt 1995)

3.3.6 Dichte

Die teufenabhängige Verteilung der Dichte und der spezifischen elektrischen Leitfähigkeit sind gekoppelt an die teufenabhängige Verteilung des Abdampfdruckstandes sowie der dominierenden Ionen Chlorid und Natrium (in Abb. 6 als Steinsalz (NaCl) angegeben), die andere Wasserinhaltsstoffe in der Regel um mehr als zehnfach in der Konzentration übersteigen.

Auffällig ist der Dichtesprung zum Deckgebirge. Vor Allem im Bereich der BHV sind die Dichten relativ hoch (Abb. 8):

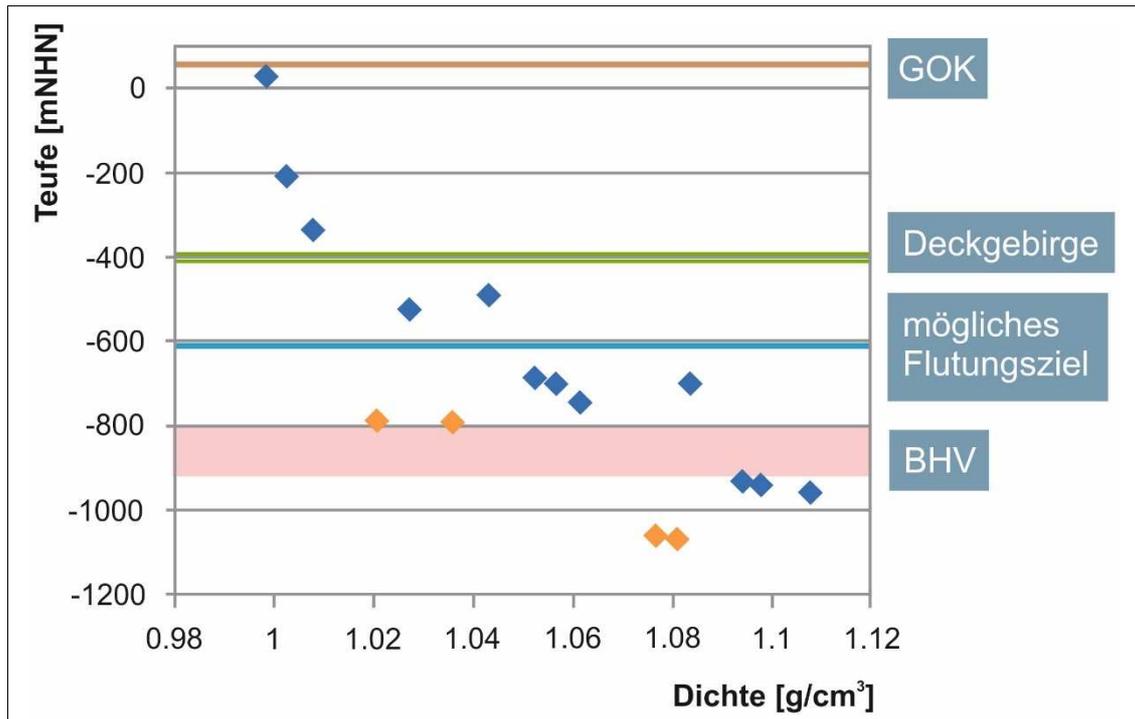


Abb. 8: Teufenabhängige Verteilung der Dichte, Haus Aden / Monopol (gelb = nicht repräsentative Proben) (erstellt aus den Analyseergebnissen von Wedewardt 1995)

3.4 Chemische Zusammensetzung des Tiefengrundwassers im Bereich der BHV

Zur Ermittlung der mittleren Zusammensetzung des Tiefengrundwassers im BW Haus Aden / Monopol wurden die vorhandenen untertägigen Analysen im Bereich der Teufe der Bruchhohlraumverfüllung hinsichtlich Min/Max-Werten und als Durchschnitt tabellarisch (Tab. 2) zusammengestellt. Für Spurenstoffe können nur die damaligen sehr hohen Nachweisgrenzen aufgrund des gewählten Analyseverfahrens angegeben werden.

Hierbei wurden vor allem solche Proben ausgewählt, die möglichst repräsentativ für die Teufe -700 bis -900 mNHN sind. Einzelne Proben scheinen bei Zugrundelegung des Stoffinhalts in einer Beprobungsteufe entnommen zu sein, die nicht der Herkunftsteufe entspricht. Sie haben z.B. einen zu geringen Abdampfdruckstand. Im Nahfeld des Grubenbauwerkes kann Tiefenwasser unter vadosen Bedingungen im verritzten Gebirge in größere Teufen fließen. Obwohl die Beprobungsstelle „ordentlich“ aussieht, setzt der Grube dann ein Wasser zu, das genetisch einem anderen Niveau zuzurechnen wäre (siehe auch Diskussion eingangs Kap. 3.3)

Tab. 2: Mittlere Tiefengrundwasserzusammensetzung im BW Haus Aden/Monopol in den Teufen der Bruchhohlraumverfüllungen mit bergbaufremden Reststoffen (Der Mittelwert der einzelnen Parameter wurde aus 7 Proben aus Teufen von -689 bis -957 mNHN nach Wedewardt, 1995 berechnet.)

		Mittelwerte	Minimum	Maximum
Temperatur (in situ)	°C	32	18	47
pH-Wert		6,3	4,8	7,2
spez. elektr. Leitfähigkeit	µS/cm	142.957	108.100	177.400
Abdampfrückstand	mg/L	130.529	82.800	174.300
Dichte	g/cm ³	1,079	1,053	1,108
freies CO ₂	mg/L	28	18	35
aggressives CO ₂	mg/L	12	10	14
Chlorid	mg/L	70.614	47.100	95.500
Iodid	mg/L	19	8	50
Bromid	mg/L	93	44	147
Sulfat	mg/L	63	63	63
Hydrogencarbonat	mg/L	87	2	269
Nitrat	mg/L	76	22	170
Ammonium	mg/L	29	2	46
Bor	mg/L	3	0	6
Silizium	mg/L	4	3	8
Lithium	mg/L	16,5	5,2	26
Natrium	mg/L	35.929	24.000	50.300
Kalium	mg/L	450	265	762
Magnesium	mg/L	3.136	648	13.808
Calcium	mg/L	5.581	2.150	9.090
Strontium	mg/L	566	414	883
Barium	mg/L	1.041	24	2.460
Aluminium	mg/L	0,7	< 0,5	1
Arsen	mg/L	< 0,005	< 0,005	< 0,005
Blei	mg/L	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Cadmium	mg/L	< 0,05	< 0,05	< 0,05
Chrom	mg/L	< 0,05	< 0,05	< 0,05
Eisen	mg/L	22,8	< 0,005	53,0
Kupfer	mg/L	0,15	0,10	0,27
Mangan	mg/L	1,4	< 0,05	3,1
Molybdän	mg/L	< 0,05	< 0,05	< 0,05
Nickel	mg/L	< 0,05	< 0,05	< 0,05
Quecksilber	mg/L	< 0,001	< 0,001	< 0,001

		Mittelwerte	Minimum	Maximum
Selen	mg/L	< 0,005	< 0,005	< 0,005
Vanadium	mg/L	< 0,05	< 0,05	< 0,05
Zink	mg/L	0,5	< 0,05	1,9

Exkurs „Stickstoff im Tiefengrundwasser“

Nitratkonzentrationen bis 170 mg/L erscheinen zunächst für ein von anthropogenen Einflüssen freies Tiefengrundwasser sehr hoch. Hierbei muss auch Ammonium berücksichtigt werden, das im Redoxgleichgewicht mit Nitrat „ersatzweise“ die Stickstoffspezies sein kann. Das bedeutet ausgedrückt als Stickstoffkonzentrationen bis zu 40 bis 50 mg/L. Solche Konzentrationen sind in Tiefengrundwässern global festgestellt worden (z.B. Manning & Hutcheon 2004, und darin angeführte Literatur). Quellen für Stickstoff in Tiefengrundwässern sind zum einen organische Materialien wie Kohlen, die 1-3 % Stickstoff enthalten können (z.B. Gurba & Ward 2000), und der Einbau von Ammonium in Tonmineralen, insbesondere Illit (Manning & Hutcheon 2004). Die für das Tiefenwasser Haus Aden ermittelten Nitratkonzentrationen sind völlig im Einklang mit diesen Studien und kein Indiz für anthropogene Einflüsse.

Die Modellierung von Prof. Dr. [REDACTED] zur Stofffreisetzung (Detailbericht 4) wird mit dem Z2-Wasser aus Wedewardt (1995) durchgeführt (siehe Tab. 3 und Anhang 3). Somit wird für die Modellierung eine konkrete, interpretationsfrei vorliegende Analyse verwendet. Die oben gezeigte mittlere Zusammensetzung aus den Analysen von Wedewardt (1995) enthält die beschriebene Auswahl der Grubenwasseranalysen für die Berechnung des Mittelungsmaßes. Zwischen beiden Ansätzen sind die Unterschiede nicht so groß, dass grundsätzlich andere Ergebnisse bei einer Modellierung entstehen würden.

Das RAG-Wasser entspricht nur bedingt dem geogen in dieser Tiefe vorkommenden Wasser, wie die Auswertung der Daten (Wedewardt 1995) zeigt.

Tab. 3: Mögliche geogene Hintergrundzusammensetzungen des Tiefengrundwassers zur Modellierung (zusammengestellt nach Daten Wedewardt 1995 und Paas 1997)

Parameter	Einheit	Probe (Wedewardt 1995)	RAG-Wasser		Mittelwerte (Wedewardt 1995)		
		Z2	RAG	prozentuale Abweichung RAG bezogen auf Z2	MW	prozentuale Abweichung MW bezogen auf RAG	prozentuale Abweichung MW bezogen auf Z2
pH		6,84	7,10		6,45		
spez. elektr. Leitfähigkeit	µS/cm	165.200	141.000	15	131.488	-7	20
Abdampfrückstand	mg/L	166.200	127.920	23	119.183	-7	28
Chlorid	mg/L	86.200	78.000	10	64.613	-17	25
Hydrogencarbonat	mg/L	62	60	3	107	78	-72
Natrium	mg/L	40.000	46.000	-15	32.863	-29	18
Kalium	mg/L	426	390	8	394	1	8
Magnesium	mg/L	2.200	1.020	54	2.772	172	-26
Calcium	mg/L	9.090	2.000	78	5.305	165	42
Strontium	mg/L	475	175	63	337	92	29
Barium	mg/L	2.460	275	89	796	190	68

3.5 Bewertung und Diskussion der Ergebnisse

Ziel dieses Kapitels ist es eine quantitative, für die Modellierung verwendbare Aussage zur Tiefengrundwasserzusammensetzung im Bereich der BHV in Haus Aden / Monopol zu treffen. Auch wenn viele Literaturstellen richtig von einem hochsalinaren Tiefengrundwasser ausgehen, ermöglichen nur wenige Arbeiten eine in der Retrospektive nachvollziehbare Bewertung der Probenahme.

Die Wahl der Beprobungsstelle ist naheliegender Weise schwierig, da vom Grubengebäude aus repräsentative Proben für das unverritzte Gebirge gewonnen werden sollen. Nicht mehr nachvollziehbar ist, warum nicht versucht wurde, an ausgewählten Lokalitäten Bohrungen mit den in Gruben verfügbaren Geräten in das Unverritzte abzusetzen, um Wasserproben mit einem sicheren Teufenbezug zu gewinnen.

Die systematischste Bearbeitung, die zum größten Primärdatensatz führte, wurde von Wedewardt (1995) geleistet. Aus dieser läßt sich eine vernünftige Teilkohorte für Haus Aden / Monopol extrahieren.

Bei genauer Auswertung ergibt sich eine systematische Teufenabhängigkeit der durch den Salzgehalt gesteuerten Parameter (Abdampfrückstand, Dichte, etc.) für Haus Aden / Monopol. Dies weicht von den von Wedewardt (1995) für den Gesamtdatensatz getroffenen Aussagen ab. Wedewardt enthält die umfänglichste Analyse von Halb- und

Schwermetallen. Aus heutiger Sicht sind die Nachweisgrenzen in den analytisch schwierigen, hochsalinaren Wässern zu hoch. Der Ansatz aus dieser Auswertung Hintergrundwerte für ein Monitoring der Metalle zu erhalten, ist für einige Metalle, insbesondere Blei und Cadmium aufgrund dieser hohen Nachweisgrenzen aus dem Datensatz von Wedewardt (1995) nicht umsetzbar.

4 Grubenwasser

Grubenwasser ist das Wasser, das untertägig gefasst wird und eine Mischung aus Tiefengrundwasser und Betriebswasser ist.

Exkurs Betriebswasser

Die Hauptursache für die geringen Leitfähigkeiten mancher Grubenwässer ist die Vermischung der den Bergwerken zusetzenden Tiefengrundwässer mit dem Betriebswasser. Als Betriebswasser (z.B. zur Staubbekämpfung) wurden große Mengen von v.a. Trinkwasser eingesetzt, das sich dann mit den hoch mineralisierten, zusetzenden Tiefengrundwässern vermischt und wieder an die Tagesoberfläche gepumpt wurde. Gerade sehr geringe Leitfähigkeiten von Grubenwasserproben zeigen deshalb, dass es sich eben nicht um eine Zusickerung aus dem Deckgebirge handelt, sondern um eine Vermischung vor Ort mit dem eingesetzten Betriebswasser. Der Anteil des Betriebswassers ist dabei erheblich, wie zwei Beispiele zeigen (s. Tab. 4).

In Kap. 2 wurde bereits ausgeführt, dass im Betrachtungsgebiet die Grundwässer des für eine Zusickerung relevanten, zweiten Grundwasserstockwerkes schon in geringen Teufen salinar sind. Sie haben daher keinen verdünnenden Einfluss auf das Tiefengrundwasser.

Tab. 4: Verhältnis Betriebswasser zu gehobenem Grubenwasser (Daten RAG, e-mail 09.03.2016)

	Wasserbrauch (Mittelwert letzte 5 a)	Gehobenes Grubenwasser	Anteil Betriebswasser am Grubenwasser
Prosper-Haniel	3 Mio. m ³ /a	4 Mio. m ³ /a	75 %
Ibbenbüren	1,9 Mio.m ³ /a	2,6 Mio. m ³ /a	73 %

4.1 Datenerfassung

Aus dem BW Haus Aden / Monopol liegen aus der Zeit der Bruchhohlraumverfüllung Analysen von Grubenwässern vor. Analog verfügbare Daten wurden händisch in Excel-Tabellen digitalisiert.

Seitens der RAG wurden aktuelle Grubenwasseranalysen durch die RAG vom gehobenen Grubenwasser vor der Einleitung digital zur Verfügung gestellt. Da es sich hierbei um Mischwässer handelt, sind diese Analysen von untergeordneter Bedeutung.

2016 wurde eine untertägige Probennahme durch das LANUV im BW Haus Aden / Monopol vorgenommen. Davon stammte eine Probe von einem Wasserzutritt aus der Deckenfirste und die beiden anderen aus kleinen Pumpensümpfen. Weitere Wasserzutritte wurden bei dieser einen Maßnahme nicht beobachtet.

4.2 Auswertung der Analysen

4.2.1 Untertägige Grubenwasserproben aus der Zeit der Bruchhohlraumverfüllungen

Entsprechend den Nebenbestimmungen der Sonderbetriebspläne wurden vom Bergbautreibenden an drei Stellen je Bauhöhe, die mit bergbaufremden Material versetzt wurde, mehrfach Wasserproben genommen und die Analysewerte den Aufsichtsbehörden mit den Abschlussplänen mitgeteilt.

Aus den vorliegenden Unterlagen konnte die Lage der Entnahmestellen mit Ausnahme von 1/3, 2/3, 16/3, 17/3, 31/1 und 31/2 bestimmt werden. Gb 16/1 und Gb 17/1 sind identisch. Eine Übersichtsdarstellung der ermittelten Grubenwasserentnahmestellen und deren Position im Bezug zur Bruchhohlraumverfüllung im BW Haus Aden / Monopol zeigt die Abbildung. 9.

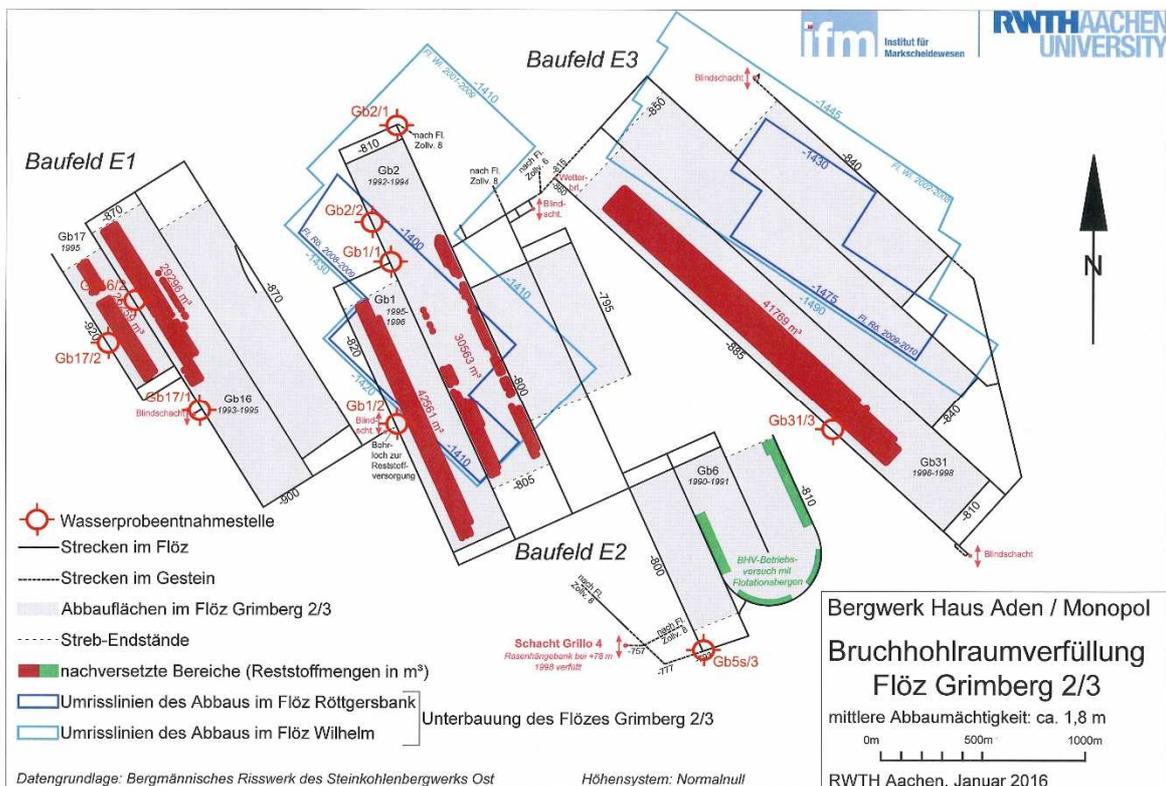


Abb. 9: Lage der Bauhöhen, Bereiche mit Bruchhohlraumverfüllung und Grubenwasserentnahmestellen im Flöz Grimberg 2/3, Baufelder E1 bis E3 des BW Haus Aden / Monopol (Probeentnahmepunkte hinzugefügt)

Aus den Abschlussberichten sind in nachfolgender Tabelle (Tab. 5) die Bezeichnungen der drei Wasserbeprobungsstellen je Bauhöhe zusammengestellt: Für Gb 2 sind wechselnde Bezeichnungen gegeben, aus denen nicht nachvollzogen werden kann, ob stets die gleiche Probenahmestelle verwendet worden ist.

Über den Aufbau der Entnahmestellen im Abbaubetrieb Gb 16 gibt ein Schreiben der RAG an das Bergamt Kamen (zitiert nach Gutachten Friedrich (2013), Anlage 9) Auskunft. Dort wird beschrieben, dass die Beprobung des Grubenwassers an den Entnahmestellen 16/1 und 16/2 aus den Steigleitungen heraus erfolgt. Entnahmestelle 16/1 erfasst dabei das gesamte Grubenwasser aus dem Bereich Gb 16, Entnahmestelle 16/2 das Grubenwasser aus der Bandstrecke. Aussagen über die Art der Entnahmestellen in den übrigen Abbaubetrieben liegen nicht vor.

Die Beprobungshäufigkeit war an Gb 2 mit nur vier Beprobungen und einem sehr großen zeitlichen Abstand zwischen 3. und 4. Beprobung aus gutachterlicher Sicht zu gering. Für die weiteren Beprobungen in den anderen Bauhöhen ist eine ca. monatliche Beprobung gewählt

Tab. 5: Bezeichnung der Beprobungsstellen zu den Bauhöhen nach den Abschlussberichten des Bergbautreibenden an die Aufsichtsbehörden

Bauhöhe	Entnahmestelle 1	Entnahmestelle 2	Entnahmestelle 3
Gb 1 (07/1995 - 05/1996)	Kopfstrecke - Eingang, nördliche Basis	Bandstrecke - ca. 20 m hinter Bohrloch	Abzweig südliche Basis Kopfstrecke Grimberg 3 Abzweig südliche Basis Kopfstrecke GB3 – Dieselraum
Gb 2 (06/1993 - 03/1994)	Kopfstr. Gb/2 Pumpenloch bei Station 460 m Damm Kopfstrecke 632 Damm Nr. 93/201 (60/278 alt) m. Basis Gb/Kopfstrecke Gb2	Kopfstr. Gb/2 Pumpenloch bei Station 1215,1 m Bandstrecke 632 Bandstrecke Grimberg 2, 2. Station	Kopfstr. Bandstr. Gb/2 Wassersammelbeh. 19.60 m nördlich von TP 9606 Pumpenbecken an C5 (vor Dieselraum) (05.07.1993) Abzweig südliche Basis Dieselraum Kopfstrecke Grimberg 3
Gb 16 (04/1994 - 12/1994)	Verbundstr. Blindsch. 40 zur Bandstr. Grimberg 16, 18 m östl. Mitte Blindschacht 40	Bandstr. Grimberg 16	Abzweig südl. Basis Dieselraum Kopfstrecke Grimberg 3
Gb 17 (01/1995 - 07/1995)	Gb. 17 Verb.-str. Blindschacht 40 zur Bandstr. Gb 16, 18 m östl. Mitte Blindschacht 40	Bandstr. Grimberg 17,7 m nördl. von TP 97009 bei Station 380m Bandstr. - ca. 20 m hinter Bohrloch	Abzweig südliche Basis Dieselraum Kopfstr. Grimberg 3
Gb 31 (12/1996 - 01/1998)	BLS 41 auf der 960 m Sohle, Aufschiebeseite	BLS 43 in der Haspelkammer	Kopfstr. am Pumpenbecken

Die Grubenwasserproben unterscheiden sich – je nach Probenahmeort – erheblich im Salzgehalt, was auf die unterschiedlichen Anteile an Betriebswasser und über das Grubengebäude zusickerndes Tiefengrundwasser hinweist.

Aus den Abschlussberichten sind für alle Beprobungsstellen die Ganglinien der Abdampfrückstände in Anhang 6 zusammengestellt. Exemplarisch werden nachstehend die Ganglinien für Gb 1/3 und Gb 16/1 (Entnahmestelle identisch mit Gb 17/1) gezeigt.

Die Ganglinie Gb 1/3 (Abb. 8) zeigt zunächst geringe Werte von 5 – 10 g/L, die in späterer Zeit auf Werte um 150 g/L ansteigen. Die Entnahmestelle ist zunächst überwiegend von Betriebswasser und mit Fortschreiten des Abbaus und Versatzes von dem Bergwerk zusetzendem Tiefengrundwasser gekennzeichnet. Ihre Lage konnte für die Darstellung in Abbildung 9 nicht ermittelt werden. Sie steht für weitere Entnahmestellen die teilweise bis überwiegend Tiefengrundwasser erfassen.

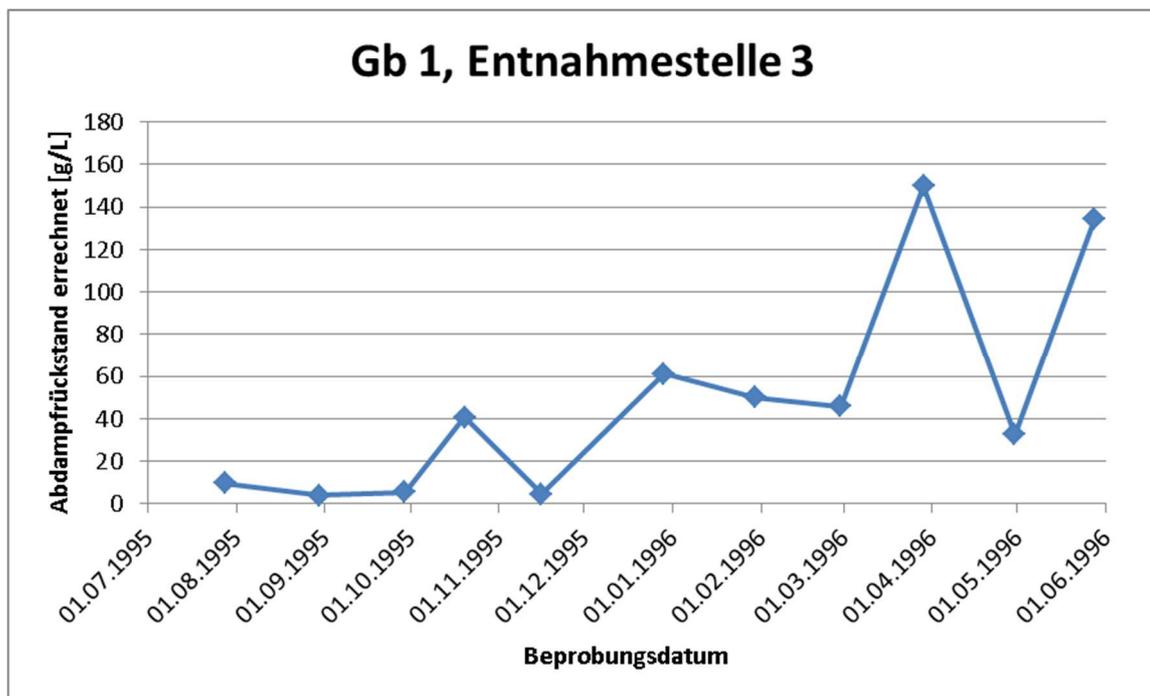


Abb. 10: Zeitlicher Verlauf des Abdampfrückstandes an der Entnahmestelle Gb 1/3 (Datengrundlage: Abschlussberichte RAG); in Abb. 7 nicht gezeigt, da exakte Lage nicht dokumentiert

Die Ganglinie Gb 16/1 (Abb. 11) zeigt Werte von wenigen bis 40 g/L Abdampfrückstand. Sie steht für die Mehrheit der von Betriebswasser bestimmten Entnahmestellen. Für dies ist belegt, dass die Beprobung aus einer Steigleitung als Mischprobe erfolgte. Beschreibung und Ganglinien lassen aus sicht des Gutachters vermuten, dass dies für die Mehrzahl der Entnahmestellen gilt.

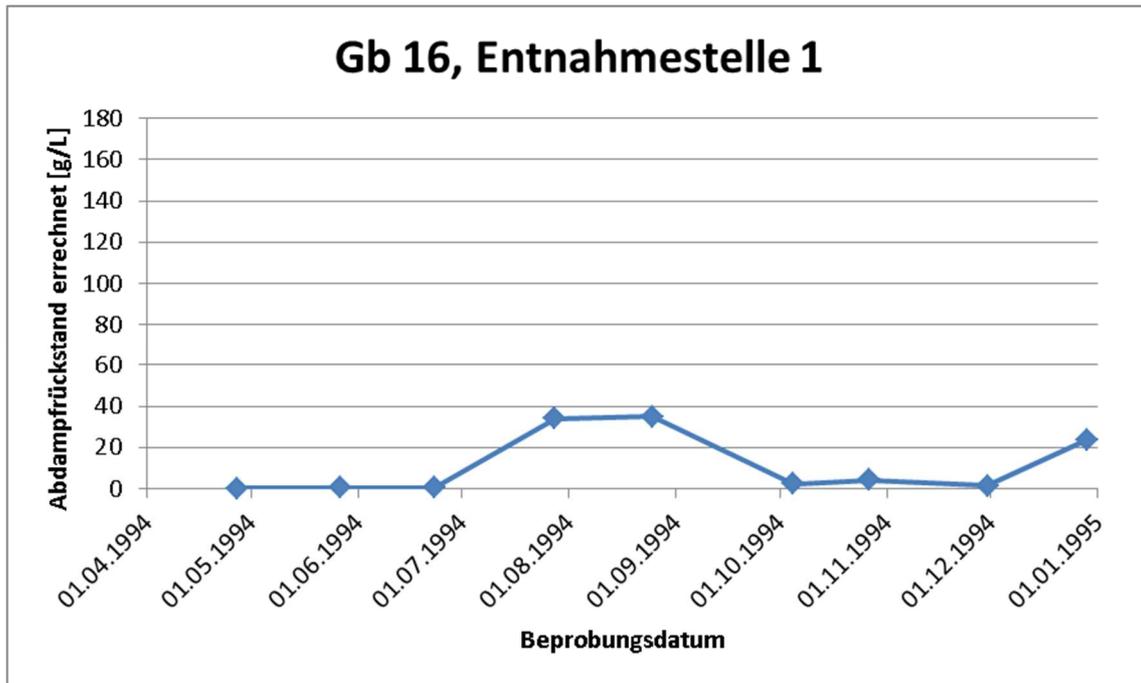


Abb. 11: Zeitlicher Verlauf des Abdampfrückstandes an der Entnahmestelle Gb 16/1, (Datengrundlage: Abschlussberichte RAG); Lage in Abb. 7 als 17/1 markiert

Tabelle 6 gibt eine Zusammenfassung der Wertespanne der Abdampfrückstände für alle Bauhöhen mit bergbaufremden Versatzmaterial (in der Einheit der Abschlussberichte), die die große Spannweite der Werte deutlich macht. Die Maximalwerte sind die in dieser Teufe nach Wedewardt (1995) zu erwartenden Abdampfrückstände für Tiefengrundwasser.

Die geringen Medianwerte unterstreichen noch einmal, dass die Mehrzahl der entnommenen Wasserproben Betriebswasser sind, das mit Minimalwerten von 0,15 g/L teilweise ohne jede Veränderung z.B. durch Kontakt mit Firste, Sohle oder Stroß wieder gehoben wird.

Vergleichbar zum Abdampfrückstand zeigen auch die weiteren hydrochemischen Parameter eine große Spannweite, wie es exemplarisch für Gb 1 summarisch für die drei Entnahmestellen in Tabelle 6 gezeigt ist. Neben Minimal- und Maximalwert und dem arithmetischen Mittelwert ist auch der Medianwert angegeben, der als robustes Mittelungsmaß aufgrund der Datenstruktur das geeignete Maß ist.

Tab. 6: Abdampfrückstände in den Grubenwasserproben in Haus Aden
(Datenquelle: Abschlussberichte RAG)

Abdampfrückstand	Median [mg/L]	Mittelwert [mg/L]	Min [mg/L]	Max [mg/L]	Probenanzahl	Beprobungszeitraum
Gb 1: gesamt	1.711	20.956	191	149.923	33	07/1995 - 05/1996
Entnahmestelle 1	344	779	204	1.711	11	07/1995 - 05/1996
Entnahmestelle 2	1.583	13.139	191	50.242	11	07/1995 - 05/1996
Entnahmestelle 3	40.611	48.949	4.092	149.923	11	07/1995 - 05/1996
Gb 2: gesamt	12.280	23.322	484	89.857	12	06/1993 - 03/1994
Entnahmestelle 1	14.835	30.490	2.432	89.857	4	06/1993 - 03/1994
Entnahmestelle 2	17.964	17.388	8.603	25021	4	06/1993 - 03/1994
Entnahmestelle 3	5.175	22.087	484	77514	4	06/1993 - 03/1994
Gb 16: gesamt	1.775	20.234	189	161.491	25	04/1994 - 12/1994
Entnahmestelle 1	2.214	11.315	237	35.028	9	04/1994 - 12/1994
Entnahmestelle 2	4.365	11.838	192	33.979	7	06/1994 - 12/1994
Entnahmestelle 3	881	35.683	189	161.491	9	04/1994 - 12/1994
Gb 17: gesamt	9.206	29.154	157	120.195	21	01/1995 - 07/1995
Entnahmestelle 1	3.364	40.89	936	9.206	7	01/1995 - 07/1995
Entnahmestelle 2	2.844	12.787	157	33.403	7	01/1995 - 07/1995
Entnahmestelle 3	65.944	70.588	9.609	120.195	7	01/1995 - 07/1995
Gb 31: gesamt	44.399	57.585	292	154.884	42	12/1996 - 01/1998
Entnahmestelle 1	3.271	23.734	292	152.014	14	12/1996 - 01/1998
Entnahmestelle 2	109.129	103.171	23.036	154.884	14	12/1996 - 01/1998
Entnahmestelle 3	42.906	45.850	300	88.576	14	12/1996 - 01/1998

Die bergbaufremden Versatzmaterialien enthalten insbesondere hohe Konzentrationen der Schwermetalle Blei, Cadmium und Zink. In Tabelle 8 sind daher die Konzentrationsspannen für die 5 Bauhöhen für diese drei Schwermetalle und ergänzend Nickel dargestellt. Tabelle 7 zeigt eine große Bandbreite für diese vier Schwermetalle. Die weiteren untersuchten Schwer- und Halbmetalle (Arsen, Chrom (VI und gesamt), Kupfer und Quecksilber sind nicht nachgewiesen bzw. mit niedrigen, unauffälligen 10er Mikrogramm je Liter bestimmt worden.

Die Medianwerte der vier Schwermetalle sind gering. Die detaillierte Auswertung der Abschlussberichte zeigt diesen geringen Konzentrationsniveaus aufsitzende einzelne Extremwerte, die bei Cadmium bis 4,2 mg/L, bei Blei bis 0,53 mg/L und bei Zink bis 118 mg/L betragen können. Diese Einzelwerte treten isoliert auf und korrelieren nicht miteinander und auch nicht mit dem Salzgehalt respektive Abdampfrückstand oder weiteren hydrochemischen Parametern.

Tab. 7: Grubenwässer von BW Haus Aden / Monopol von Gb1 (1995 bis 1996, Datengrundlage: RAG)

Für die Berechnung des Mittelwertes wurde in den Fällen, bei denen der gemessene Wert "< Nachweisgrenze" ist, der Wert der Nachweisgrenze verwendet. Die Mittelwerte haben daher eine Tendenz zu zu großen Werten.

Parameter	Einheit	Mittelwert	Median	Max	Min
Abdampfdruckstand	mg/L	20.956	1.711	149.923	191
spez. elektr. Leitfähigkeit	µS/cm	27.363	3.400	> 150.000	365
Dichte	g/mL	1,013	1,001	1,103	1,000
pH-Wert	-	7,6	7,6	8,3	6,9
Natriumchlorid	mg/L	15.865	1.141	121.242	23
Chlorid	mg/L	12.508	936	92.000	27
Bromid	mg/L	45	3,6	205	< 0,3
Sulfat	mg/L	341	50	1.990	9,4
Hydrogencarbonat	mg/L	128	125	240	63
Ammonium	mg/L	9,3	0,8	49	< 0,02
Natrium	mg/L	6.243	449	47.696	9
Kalium	mg/L	214	11	1.065	3
Magnesium	mg/L	268	22	1.923	5,3
Calcium	mg/L	1.234	154	7.116	41
Strontium	mg/L	41	6,9	442	< 1
Barium	mg/L	33	< 5	741	< 1
Arsen	mg/L	0,004	0,005	0,01	< 0,001
Blei	mg/L	0,052	0,022	0,529	< 0,001
Cadmium	mg/L	0,005	< 0,001	0,031	< 0,001
Chrom (gesamt)	mg/L	0,015	0,002	0,05	< 0,001
Chrom VI	mg/L	< 0,010	< 0,010	< 0,010	< 0,010
Kupfer	mg/L	0,043	0,012	0,42	< 0,001
Nickel	mg/L	0,037	0,013	0,355	< 0,001
Quecksilber	mg/L	0,001	< 0,001	0,002	< 0,001
Zink	mg/L	2,9	1,2	32	< 0,02

Zur Zeit der Bruchhohlraumverfüllung mit bergbaufremden Versatzmaterialien wurde den Ursachen dieser vereinzelt Extremwerte nicht nachgegangen. Zumindest nicht in einer in den vorliegenden Akten dokumentierten Weise.

In der Retrospektive kann aus dem ausgewerteten Datensatz „BW Haus Aden / Monopol“ keine Ursache für diese vereinzelt Extremwerte ermittelt werden. Möglicherweise gelingt dies an einer größeren Datenkohorte.

Die Abschlussberichte des Bergbautreibenden zu den Bauhöhen stellen fest, dass „zu keinem Zeitpunkt ein Austritt von Sickerwasser festgestellt“ wurde. Aufgrund der Eigenschaften des Versatzmaterials (s. Kap. 5), insbesondere den Abbinde- und Erhärtungseigenschaften, ist ein Wasseraustritt aus dem Versatzmaterial auch nicht zu erwarten. Die vereinzelt Schwermetall extremwerte sind aufgrund der Struktur des Datensatzes Haus Aden / Monopol keine Indikation für eine Schwermetallfreisetzung aus dem bergbaufremden Versatzmaterial.

Tab. 8: Bandbreiten der Konzentrationen im Grubenwasser von Chlorid und ausgewählten Schwermetallen über den gesamten Verbringungszeitraum (Datenquelle: Quartals- und Abschlussberichte der RAG)

	Nickel [mg/L]		Blei [mg/L]		Cadmium [mg/L]		Zink [mg/L]	
	Bereich	Median	Bereich	Median	Bereich	Median	Bereich	Median
Gb1	0,001 bis 0,355	0,013	< 0,001 bis 0,529	0,002	< 0,001 bis 0,031	< 0,001	< 0,02 bis 32	1,2
Gb2	0,002 bis 0,122	0,004	0,003 bis 0,094	0,011	< 0,001 bis 0,011	< 0,001	0,31 bis 20	2,2
Gb16	< 0,001 bis 0,340	0,010	< 0,001 bis 0,100	0,010	< 0,001 bis 0,020	< 0,001	0,13 bis 22	1,2
Gb17	< 0,001 bis 0,520	0,024	< 0,001 bis 0,529	0,040	< 0,001 bis 0,03	0,003	< 0,02 bis 32	2,8
Gb31	0,004 bis 0,638	0,031	0,005 bis 0,520	0,058	< 0,001 bis 4,20	0,013	< 0,02 bis 118	1,7
Bandbreite gesamt	< 0,001 bis 0,638	0,020	< 0,001 bis 0,529	0,028	< 0,001 bis 4,20	0,0015	< 0,02 bis 118	1,5

4.2.2 Übertägige Proben aus der Grubenwasserhebung Haus Aden 2008-2015

Im Folgenden werden die übertägigen Proben aus der Grubenwasserhebung vom Bergwerk Haus Aden von 2008 bis 2015 beschrieben. Es wurde bereits eingangs Kap. 3 angeführt, dass Daten dieses seit dem Jahr 2008 auf Initiative des Landesamtes für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz durchgeführten Grubenwassermonitorings nicht das Tiefengrundwasser charakterisieren.

Bei den am Schacht Haus Aden 2 geförderten Grubenwässern von derzeit im Mittel ca. 22 m³/min handelt es sich im Wesentlichen um geringer mineralisierte Überleitungswässer aus dem Einzugsgebiet Victoriadamm (Abb. 12). Hierbei handelt es sich um die ehemaligen Bergwerke Hansa, Gneisenau, Scharnhorst, Kurl und Kurl 1 (westlicher Bereich der Wasserprovinz Haus Aden). Der Abbau reichte hier sehr nahe an den Grundwasserleiter des Cenoman / Turon heran (Detailbericht 1).

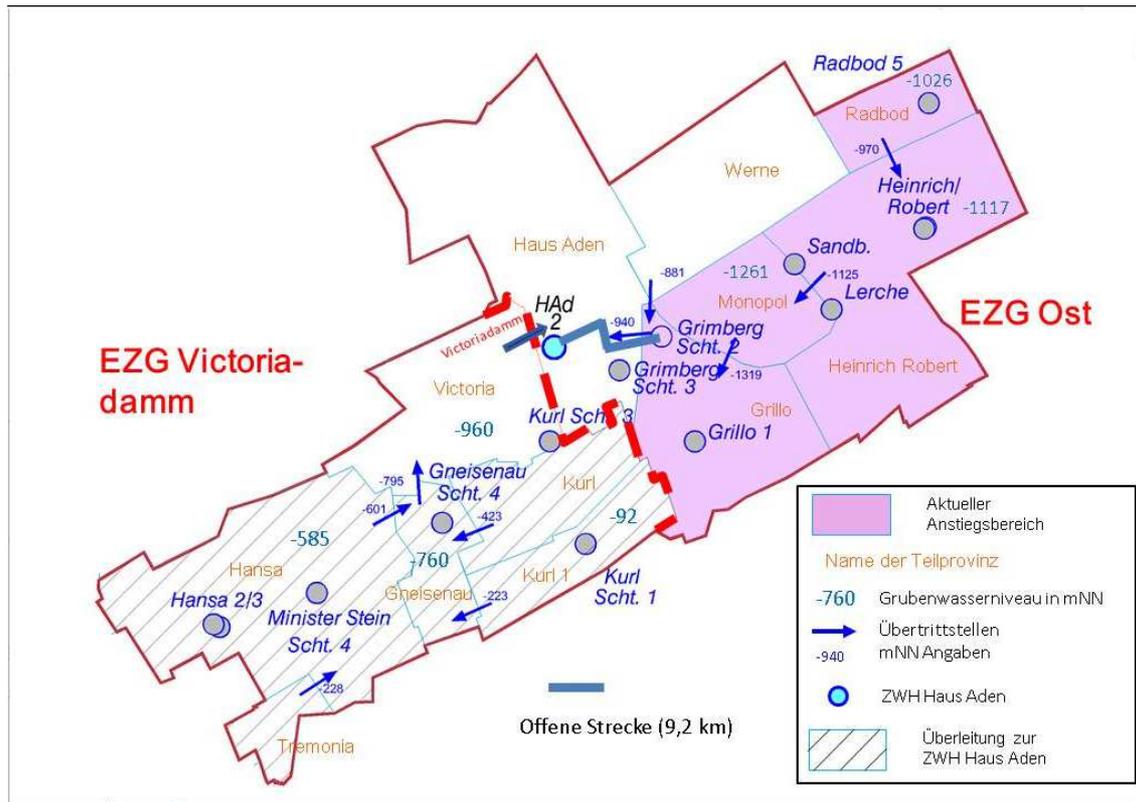


Abb.12: Teilprovinzen des Einzugsgebiet Victoriadamm, Einzugsgebiet Ost und Grubenwasserstände (Stand 2015, Abbildung RAG)

Im Bereich dieser Bergwerke sind die zum Deckgebirge hydraulisch trennenden Schichten des Essener Grünsand nicht vorhanden und/oder zu geringmächtig und/oder zu durchlässig. In der Folge strömen bis heute große Wassermengen aus dem hier auch sehr geringmächtigen Deckgebirge in das BW Scharnhorst.

Grubenwässer aus diesem Bereich sind daher sehr gering mineralisiert. Dementsprechend sind die mit dem Grubenwassermonitoring erfassten, gehobenen Grubenwässer von 2008 bis 2015 nicht repräsentativ für die Grubenwässer aus der Zeit der Verbringung bergbaufremder Versatzmaterialien im BW Haus Aden / Monopol.

Aus den vorliegenden Daten zu insgesamt 44 Proben wurden statistischen Kennwerte berechnet, die in Tabelle 9 abgebildet sind. Abbildung 13 zeigt zusätzlich die Ganglinie des Abdampfdruckstandes, der sich bei 8 g/L eingestellt hat.

Tab. 9: Gehobene Grubenwässer von BW Haus Aden von 2008 bis 2015 (Daten: RAG)
Für die Berechnung des Mittelwertes wurde in den Fällen, bei denen der gemessene Wert "< Nachweisgrenze" ist, der Wert der Nachweisgrenze verwendet.

Parameter	Einheit	Mittelwert	Median	Max	Min
Wassertemperatur	°C	27,1	27,4	28,7	23,5
Abdampfdruckstand	mg/L	9.162	8.965	13.133	5.121
spez. elektr. Leitfähigkeit	µS/cm	19.339	15.100	181.000	12.400
Dichte	g/cm ³	1,005	1,005	1,008	0,994
pH-Wert	-	7,5	7,5	8,1	6,9
Natriumchlorid	mg/L	7.693	7.378	10.998	5.992
Chlorid	mg/L	5.133	5.045	7.570	2.320
Bromid	mg/L	14	9	228	4
Sulfat	mg/L	158	151	334	16
Hydrogencarbonat	mg/L	590	585	929	348
Nitrit-Stickstoff	mg/L	0,062	0,04	0,33	< 0,01
Nitrat-Stickstoff	mg/L	0,4	0,3	2,3	< 0,3
Ammonium	mg/L	2,2	1,9	7,8	0,35
Bor	mg/L	1,1	1,1	1,7	0,49
Parameter	Einheit	Mittelwert	Median	Max	Min
Natrium	mg/L	2.991	2.901	4.327	1.453
Kalium	mg/L	33	31	75	22
Magnesium	mg/L	111	108	158	64
Calcium	mg/L	342	346	507	3,4
Strontium	mg/L	26	25	37	15
Barium	mg/L	2,2	2,0	3,9	0,5
Blei	mg/L	0,01	0,01	0,02	< 0,01
Cadmium	mg/L	0,001	0,001	0,02	< 0,001
Chrom (gesamt)	mg/L	0,01	0,01	0,02	< 0,01
Eisen	mg/L	0,57	0,55	1,1	< 0,1
Kupfer	mg/L	0,01	0,01	0,02	< 0,01
Mangan	mg/L	0,3	0,2	3,6	0,1
Nickel	mg/L	0,01	0,01	0,03	< 0,01
Zink	mg/L	0,057	0,03	0,2	< 0,01
TOC	mg/L	2	2	5	< 1
DOC	mg/L	2	2	4	< 1

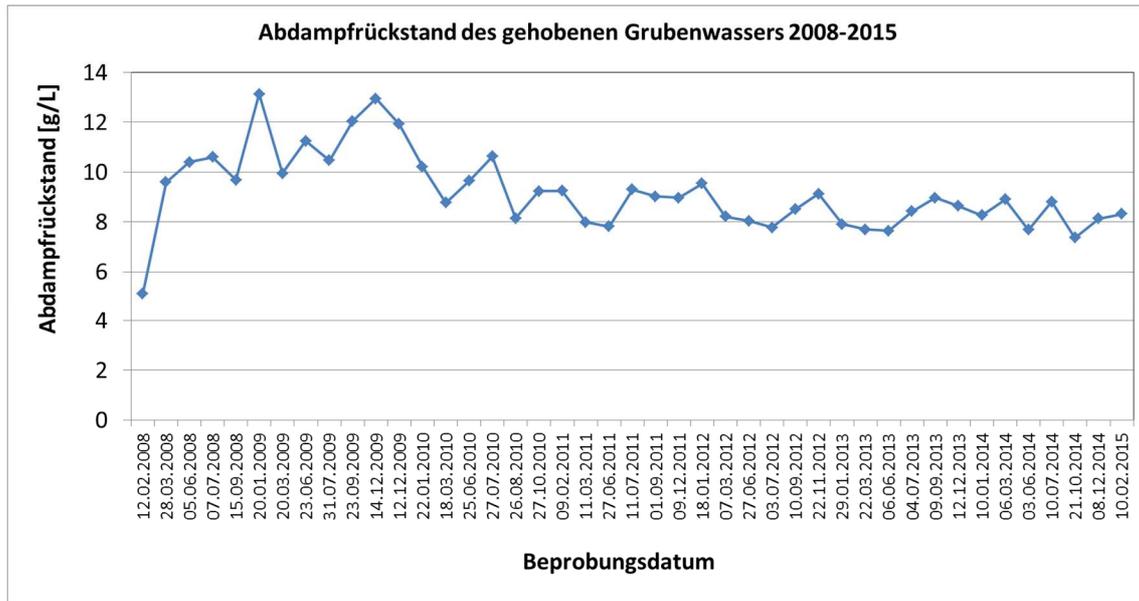


Abb. 13: Zeitlicher Verlauf des Abdampfrückstandes in Proben der Wasserhebung im Bergwerk Haus Aden von 2008 bis 2015

4.2.3 Aktuelle untertägige Probenahme

Am 18.02.2016 erfolgte eine Befahrung des Bergwerks Haus Aden / Monopol u.a. mit einer Beprobung von drei Wasserstellen durch das LANUV. Die drei Beprobungsstellen werden vom LANUV wie folgt beschrieben:

- 18/1: Nebenwasserhaltung Bunkersohle bei -960 m, ca. 1,5 m Überstau hinter dem Damm, viel Wasser
- 18/3: zusetzendes Grundwasser aus der Firste, ca. -920 m
- 18/6: wenig Wasser aus Becken am Damm 2657, Einzugsgebiet hinter dem Damm, ca. -900 m

Die Beprobungspunkte sind in Abb. 12 zur Dokumentation dargestellt.

Die drei Proben haben eine sehr ähnliche Zusammensetzung (Tab. 10) mit etwa hälftigem Salzgehalt im Vergleich zum erwarteten Tiefengrundwasser (s. Kap. 3) und sehr geringen (Schwer-)Metallkonzentrationen. Probe 18/3 kennzeichnet ein dem Bergwerk aus dem im Zuge des früheren Bergwerksbetriebes (teil-)entwässertes Gebirge zusetzendes Wasser, das mit Stilllegung des Bergwerkes auch die Zusammensetzung der Wässer in den Wassersammelstellen (18/1 und 18/6) bestimmt.

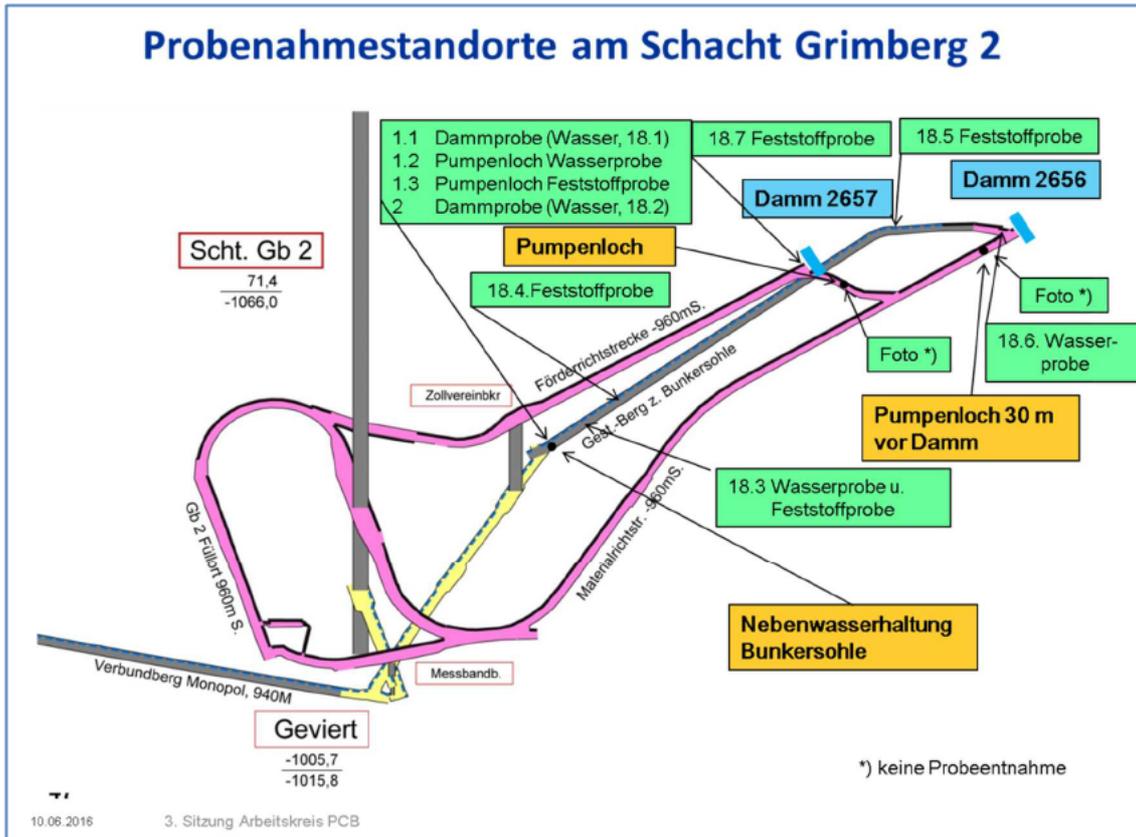


Abb. 14: Lage der drei Wasserbeprobungsstellen (18/1, 18/3 und 18/6) der Beprobungsmaßnahme 18.02.2016 im Schachtbereich Grimberg 2 (Quelle LANUV)

Tab. 10: Grubenwasseranalysen von der Beprobung im Bergwerk Haus Aden / Monopol vom 18.02.2016

		16-04454-01	16-04455-01	16-04456-01
		Haus Aden / Schacht Grimberg (Probe 18/1)	Haus Aden / Schacht Grimberg (Probe 18/3)	Haus Aden / Schacht Grimberg (Probe 18/6)
		18.02.2016	18.02.2016	18.02.2016
pH-Wert	-	6,6	7,1	6,8
spez. elektr. Leitfähigkeit	µS/cm	96.600	90.800	76.500
Chlorid	mg/L	46.000	44.000	34.000
Sulfat	mg/L	13	420	310
Stickstoff, gesamt	mg/L	20	19	22
Ammonium-Stickstoff	mg/L	19	14	16
Nitrit-Stickstoff	mg/L	0,18	0,5	< 0.02
Nitrat-Stickstoff	mg/L	n.b.	n.b.	n.b.
Bor	mg/L	1,1	1,3	1,1
Natrium	mg/L	26.000	23.000	18.000

		16-04454-01	16-04455-01	16-04456-01
		Haus Aden / Schacht Grim- berg (Probe 18/1)	Haus Aden / Schacht Grim- berg (Probe 18/3)	Haus Aden / Schacht Grim- berg (Probe 18/6)
		18.02.2016	18.02.2016	18.02.2016
Kalium	mg/L	380	530	450
Magnesium	mg/L	830	970	790
Calcium	mg/L	3.300	3.600	2.900
Strontium	mg/L	150	160	130
Barium	mg/L	99,0	0,86	0,77
Aluminium	mg/L	< 0,1	0,11	< 0,1
Arsen	mg/L	< 0,02	< 0,02	< 0,02
Blei	mg/L	< 0,02	< 0,02	< 0,02
Cadmium	mg/L	< 0,005	< 0,005	< 0,005
Chrom (gesamt)	mg/L	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Eisen	mg/L	1,10	0,37	8,60
Kobalt	mg/L	0,007	< 0,005	< 0,005
Kupfer	mg/L	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Mangan	mg/L	1,30	2,40	3,40
Molybdän	mg/L	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Nickel	mg/L	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Vanadium	mg/L	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Zink	mg/L	0,42	0,75	0,89

4.3 Bewertung und Diskussion der Ergebnisse

Da der Ansatz aus dem Datensatz von Wedewardt (1995) Hintergrundwerte für ein Monitoring der (Schwer-)Metalle zu erhalten, aufgrund der damals sehr hohen Nachweisgrenzen insbesondere Blei und Cadmium nicht umsetzbar ist, wurden weitere Datensätze, die zur Chemie der Grubenwässer erhoben wurden bzw. werden, ausgewertet.

Entsprechend den Nebenbestimmungen der Sonderbetriebspläne wurden vom Bergbautreibenden an drei Stellen je Bauhöhe, die mit bergbaufremden Material versetzt wurde, mehrfach Wasserproben genommen.

Die Mehrzahl der entnommenen Wasserproben sind Betriebswasser, das mit Minimalwerten von 0,15 g/L teilweise ohne jede Veränderung z.B. durch Kontakt mit Firste, Sohle oder Stroß wieder gehoben wird.

Die Medianwerte der vier Schwermetalle Blei, Cadmium, Zink und Nickel sind gering. Weitere untersuchte Schwer- und Halbmetalle (Arsen, Chrom (VI und gesamt), Kupfer und Quecksilber) sind nicht nachgewiesen bzw. mit niedrigen, unauffälligen 10er Mikrogramm je Liter bestimmt worden.

Die detaillierte Auswertung der Abschlussberichte zeigt diesen geringen Konzentrationen von Blei, Cadmium, Zink und Nickel aufsitzende, einzelne Extremwerte, die bei Cadmium bis 4,2 mg/L, bei Blei bis 0,53 mg/L und bei Zink bis 118 mg/L betragen können. Diese Einzelwerte treten isoliert auf und korrelieren nicht miteinander und auch nicht mit dem Salzgehalt respektive Abdampfrückstand oder weiteren hydrochemischen Parametern.

Zur Zeit der Bruchhohlraumverfüllung mit bergbaufremden Versatzmaterialien wurde den Ursachen dieser vereinzelt Extremwerte nicht nachgegangen. Zumindest nicht in einer in den vorliegenden Akten dokumentierten Weise.

In der Retrospektive kann aus dem ausgewerteten Datensatz „BW Haus Aden / Monopol“ keine Ursache für diese vereinzelt Extremwerte ermittelt werden. Möglicherweise gelingt dies an einer größeren Datenkohorte.

Die Abschlussberichte des Bergbautreibenden zu den Bauhöhen stellen fest, dass „zu keinem Zeitpunkt ein Austritt von Sickerwasser festgestellt“ wurde. Aufgrund der Eigenschaften des Versatzmaterials (s. Kap. 5), insbesondere den Abbinde- und Erhärtungseigenschaften, ist ein Wasseraustritt aus dem Versatzmaterial auch nicht zu erwarten. Die vereinzelt Schwermetall extremwerte sind aufgrund der Struktur des Datensatzes Haus Aden / Monopol keine Indikation für eine Schwermetallfreisetzung aus dem bergbaufremden Versatzmaterial.

Es wurde bereits eingangs Kap. 3 angeführt, dass Daten dieses seit dem Jahr 2008 auf Initiative des Landesamtes für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz durchgeführten Grubenwassermonitorings nicht das Tiefengrundwasser charakterisieren.

Bei den am Schacht Haus Aden 2 geförderten Grubenwässern von derzeit ca. 22-24 m³/min handelt es sich im Wesentlichen um geringer mineralisierte Überleitungswässer aus dem Einzugsgebiet Victoriadamme.

5 Versatzmaterialien

Zwischen der Mitte der 1980er Jahre und dem Jahr 2006 wurden 1,6 Mio. t bergbau-fremde Abfälle (v. a. industrielle Massenreststoffe, Filterstäube und Rauchgasreini-gungsrückstände) in 11 Bergwerken (BW) des Ruhrgebietes als Versatz eingebracht.

Das damalige Landesamt für Wasser und Abfall (LWA) ging im Jahr 1991 davon aus, dass jedes Jahr 3 bis 6 Mio. t Abfälle anfallen würden, die unter Tage verbracht werden könnten (LWA, S. I/79 Kurzfassung).

Von den 1,6 Mio. t Abfällen bzw. Reststoffen waren ca. 578.000 t besonders überwa-chungsbedürftige Abfälle gemäß Abfallgesetz (AbfG 1986), die gemäß dem Prinzip des vollständigen Einschusses in drei Bergwerken zum Nachversatz genutzt wurden. Die nicht überwachungsbedürftigen Abfälle gemäß AbfG 1986, wie Aschen aus der Kohle-verbrennung, wurden in acht Bergwerken nach dem Prinzip der immissionsneutralen Verbringung verbracht (ca. 1 Mio. t).

5.1 Datenerfassung und Literaturrecherche

- Machbarkeitsstudie (1990)
- Analysen der Versatzmaterialien bei der Verbringung (Abschlussberichte von Bergwerk Haus Aden / Monopol)
- Weitere Literaturrecherche

Die analogen Daten aus der Machbarkeitsstudie (Jäger et al. 1990) und die Analysen der Versatzmaterialien bei der Verbringung (Abschlussberichte von BW Haus A-den / Monopol) wurden digitalisiert (Excel-Tabellen), damit die Daten einer erweiterten Auswertung unterzogen werden können.

Eine Literaturrecherche zu den im Zeitraum der Verbringung durchgeführten wissen-schaftlichen Studien, bei denen die Eignung der Reststoffe (auch Bergematerial) als sekundäre Rohstoffe (z.B. in der Baustoffindustrie) und u.a. die hydraulischen und puzzolanischen Eigenschaften der verbrachten Versatzmaterialien untersucht wurden, ist durchgeführt wurden. Ziel ist es, durch zusätzliche Daten hinsichtlich chemisch-mineralogischer Zusammensetzung, Korngröße, Hydratationsverhalten und Festig-keitsentwicklung für die thermodynamischen Modellrechnungen und das Mobilitätsver-halten genauere Annahmen treffen zu können.

Darüber hinaus wurde internationale Literatur von Versatzmaterialien und Erfahrungen zum Stoffverhalten nach dem Versatz gesichtet und ausgewertet.

5.2 Metallinventar der bergbaufremden Versatzmaterialien

5.2.1 Machbarkeitsstudie

Chemische Stoffanalysen zu generell möglichen einzulagernden Versatzmaterialien wurden in der Machbarkeitsstudie von Jäger et al. (1990) durchgeführt. Dabei wurden Filterstäube und Rückstandsgemische aus Müllverbrennungsanlagen (MVA), Rückstände aus kommunaler Klärschlammverbrennung, Rückstände aus Lack- und Ölschlammverbrennung, Gießereialtsande, Gipsschlämme und Strahlmittelrückstände in die Untersuchung einbezogen.

Die Untersuchungen umfassten insgesamt 22 Proben, die mit dem Königswasseraufschluss analysiert wurden, wobei nur 20 Proben auf Quecksilber und 12 Proben auf Thallium untersucht wurden. Alle anderen aufgeführten Elemente wurden in allen 22 Proben analysiert (Tab.11).

Tab. 11: Chemische Stoffanalysen der untersuchten Reststoffe (Auswahl von Proben der Abfallgruppen I bis VII aus Band 3 der Machbarkeitsstudie). Analyse im Königswasseraufschluss (Jäger et al. 1990)

	Anzahl d. Proben	Minimum [mg/kg]	Median [mg/kg]	Maximum [mg/kg]
Arsen	22	0,4	7,4	190
Blei	22	3,3	407	13.700
Cadmium	22	<0,55	9,7	265
Chrom	22	3	117	755
Kupfer gesamt	22	3,2	150	1.100
Quecksilber	20	<0,1	0,5	1.094
Thallium	12	<1	0,3	6,2
Zink	22	14	2.787	19.800
Zinn	22	<5	25	5.930

5.2.2 Abschlussberichte

Die Datengrundlage für die aufgeführten Zahlen stellen die Massenaufstellungen von HMVA-Filterstaub und RAA-Schlämme in den Abschlussberichten der RAG dar (Tab. 12).

Eine Unterscheidung der Materialien erfolgte anhand der RSN-Nummer und der vorhandenen Beschreibungen („Flotationsberge“).

Tab. 12: Verbrachte Reststoffe und RAA-Schlämme in den einzelnen Bauhöhen (Datenquelle: Quartals- und Abschlussberichte der RAG)

Bauhöhe *Abrechnungstag	HMVA Filterstaub [t]	RAA Schlämme [t]	Verbrachte Masse [t]
Gb1 *11.06.1996	17.636	23.438	41.074
Gb2 *24.03.1995	5.184	23.933	29.118
Gb16 *06.01.1995	13.004	16.974	29.725
Gb17 *21.07.1995	11.105	13.623	24.302
Gb31 *18.02.1998	15.360	27.509	42.869
Σ	62.289	105.477	167.088

Die Tabelle 13 gibt die angelieferten Massen an RAA-Schlämmen, KW-Filterstaub und Flotationsbergen am Abrechnungsdatum je Verbringungsort an. Die Berechnung dieser Daten erfolgte durch das Aufsummieren der angelieferten Massen der Erzeuger sortiert nach RSN-Nr. und Verbringungsstandort.

Tab. 13: Massenbilanzierung RAA-Schlamm, andere Materialien (Datenquelle: Quartals- und Abschlussberichte der RAG)

Bauhöhe *Abrechnungstag	RAA-Schlamm [t] (RSN: 31613)	RAA-Schlamm [t] (RSN: 31620)	KW-Filterstaub [t] (RSN: 31314)	Flotations- berge [t]	Σ
Gb1 *11.06.1996	4.354	16.357	-	2.728	23.439
Gb2 *24.03.1995	4.363	19.725	25	-	24.113
Gb16 *06.01.1995	3.922	12.518	-	535	16.975
Gb17 *21.07.1995	2.576	9.831	-	1.216	13.623
Gb31 *18.02.1998	6.089	20.511	-	909	27.509
Σ	21.304	78.942	25	5.388	105.659

Die Bandbreite der anorganischen Belastungen der verbrachten Reststoffe auf Grundlage der Auswertung der Abschlussberichte bei der BR Arnsberg zeigt Tabelle 14 (Eluate). Außer den in Tabelle 14 dargestellten Parametern wurden im Eluat noch regelmäßig untersucht: CSB, Calcium, Mangan, Fluorid, Sulfat und Phosphat.

Tab. 14: Bandbreiten der Belastungen der verbrachten Reststoffe mit Schwermetallen und Chlorid (Datenquelle: Quartals- und Abschlussberichte der RAG)

Bandbreiten – Konzentrationen im Eluat DEV S4*								
	Pb [mg/L]	Cd [mg/L]	Cr [mg/L]	Cu [mg/L]	Mn [mg/L]	Hg [mg/L]	Zn [mg/L]	Chlorid [mg/L]
Gb1	0,028 – 121	< 0,001 - 60	< 0,001 - 3,5	< 0,001 - 0,6	< 0,001 - 5,2	< 0,001 - 0,1	< 0,01 - 510	28 - 38.750
Gb2	0,019 – 78	< 0,001 - 0,014	< 0,001 - 0,914	0,003 - 0,2	< 0,001 - 0,014	< 0,001 - 0,002	0,085 - 9,1	1.064 – 16.340
Gb16	0,05 – 22	< 0,001 -35	< 0,05 - 2,6	0,014 - 0,1	< 0,001 - 6,8	< 0,001	0,03 - 411	17 – 9.540
Gb17	0,051 – 177	< 0,001 - 0,197	0,003 - 1,5	< 0,001 - 0,388	< 0,001 - 0,014	< 0,001 - 0,007	0,05 - 3,6	41 - 26.840
Gb31	0,4 – 16	0,006 - 43	< 0,001 - 0,38	0,015 - 0,06	< 0,001 - 6,2	< 0,001 - 0,002	0,04 - 392	3970 - 29.160
Bandbreite Gesamt	0,028 – 177	< 0,001 - 60	< 0,001 - 3,5	< 0,001- 0,6	< 0,001 - 6,8	< 0,001- 0,1	< 0,01- 510	17- 38.750

* damalige Eluatuntersuchung gemäß DIN 38414 - DEV S4 (Feststoff-/Flüssigkeits-Verhältnis 1 : 10, Verwendung von destilliertem Wasser als Elutionsmittel, 24 Stunden Schütteln)

Die Tabelle 15 zeigt das Stoffinventar vom HMVA-Filterstaub für alle Bauhöhen. Hierbei wurden zunächst die drei Schwermetalle Blei, Cadmium und Zink ausgewertet, die im Rahmen der Machbarkeitsstudie als besonders kritisch eingestuft worden waren, und die in großen Massen in den Reststoffen enthalten sind. In der Summe sind dies 1.743 t Schwermetalle, davon ist das meiste Zink (1.321 t, 76 %), gefolgt von Blei (403 t, 23 %) und Cadmium (19 t, 1 %). In der Regel waren das auch die einzigen Parameter, die im Feststoff untersucht wurden. Weitere Metalle wie Vanadium, Molybdän, Antimon, Barium, Strontium und Arsen wurden nur in sieben Analysen für die Bauhöhe Gb 2 im Zeitraum Juli 1993 bis Januar 1994 untersucht.

Tab. 15: Verbrachtes Reststoffinventar des HMVA-Filterstaubs im BW Haus Aden / Monopol (gem. Auswertung Quartals- und Endberichte der RAG durch LFH)

Parameter	Gb 1	Gb 2	Gb 16	Gb 17	Gb 31	Summe
	Masse i. Tr. [t]					
Blei	110	39	69	41	144	403
Cadmium	4	2	3	4	6	19
Zink	293	132	268	149	479	1.321
Summe	407	173	340	194	629	1.743

i. Tr. = in der Trockenmasse

Vorgehen zur Abschätzung des Reststoffinventars

Zur möglichst genauen Abschätzung der in den Bauhöhen verbrachten Blei-, Cadmium- und Zinkmassen wurden die vorliegenden Filterstaubanalysen (Königswasseraufschluss) und die Auflistung der verbrachten Filterstaub-Massen aus den Abschlussberichten verwendet. Die Berechnung der verbrachten Massen an Pb, Cd und Zn erfolgte für jede Ursprungslokalität bzw. für jeden Erzeuger einzeln. Die Verknüpfung von Analytik und verbrachter Filterstaub-Masse erfolgte über die im Analyseprotokoll und in der Mengenaufstellung genannten Erzeugernummern. Zum Teil lag jedoch in machen Analyseprotokollen keine Erzeugernummer vor. In diesen Fällen erfolgte die Zuteilung über den Ursprungsort. In einem Einzelfall wurde zusätzlich zur Erzeugernummer noch zwischen „Filterstaub“ und „Gemisch“ unterschieden. Lagen mehrere Analysen für einen Erzeuger vor, so wurden die Ergebnisse der Analytik gemittelt.

Die Berechnung der verbrachten Masse an Pb, Cd und Zn erfolgte nach (hier Beispiel Blei):

$$x \frac{mg_{Blei}}{kg_{Filterstaub}} \times y \text{ kg}_{Filterstaub} = z \text{ mg}_{Blei}$$

x: gemessene Konzentration [mg/kg]

y: verbrachte Filterstaub-Masse [kg] bzw. [t]

z: verbrachte Masse an Pb [mg] bzw. [t]

Für die weitere Betrachtung wurden die für Gb 2 in den Abschlussberichten der RAG vorliegenden Filterstaub-Analysen, das heißt die genannten 7 Metallanalysen und 4 weitere Analysen, bei denen jedoch nur die Blei-, Cadmium- und Zink-Gehalte untersucht wurden, gemittelt. Die mittleren Metallgehalte der Filterstäube, welche im Abbaubetrieb Gb 2 verbracht wurden, sind in Tabelle 16 aufgeführt.

Die vollständige Analyse der in den Filterstäuben enthaltenen Metalle zeigt, dass sowohl Zink als auch Blei mit mittleren Gehalten von 22.510 mg/kg bzw. 6.586 mg/kg und 59,5 % bzw. 17,4 % Anteil am mittleren Gesamtmetallgehalt von 37.808 mg/kg, die dominierenden Metalle sind. Cadmium hat einen mittleren Gehalt von 415 mg/kg und einen Anteil von 1,1 %. Barium, Zinn sowie Kupfer haben einen Anteil am gesamt enthaltenen Metall von circa 5 %. Der Anteil von Antimon und Chrom gesamt liegt bei circa 2 %. Die übrigen analysierten Metalle haben Anteile < 1 %.

Arsen hat einen mittleren Gehalt von 79 mg/kg und einen Anteil von 0,21 %, der mittlere Gehalt von Quecksilber liegt bei 6 mg/kg und der Anteil beträgt 0,02 %. Somit haben sowohl Arsen als auch Quecksilber im Hinblick auf ihren Anteil an den gesamt in den Filterstäuben von Gb 2 enthaltenen Metallen eine untergeordnete Bedeutung.

Tab. 16 Mittlere Metallgehalte der in Gb 2 verbrachten Filterstäube (Metall-Analytik aus dem Zeitraum 07-1993 bis 01-1994; Ausnahme: Blei, Cadmium und Zink wurden von 07-1993 bis 04-1994 analysiert)

Parameter	Einheit	Mittelwert	Anteil [%]
Zink	mg/kg i. Tr.	22.510*	59,5
Blei	mg/kg i. Tr.	6.586*	17,4
Barium	mg/kg i. Tr.	2.106	5,6
Zinn	mg/kg i. Tr.	1.879	5,0
Kupfer	mg/kg i. Tr.	1.714	4,5
Antimon	mg/kg i. Tr.	872	2,3
Chrom gesamt	mg/kg i. Tr.	694	1,8
Cadmium	mg/kg i. Tr.	415*	1,1
Strontium	mg/kg i. Tr.	300	0,79
Bor	mg/kg i. Tr.	289	0,76
Nickel	mg/kg i. Tr.	207	0,55
Arsen	mg/kg i. Tr.	79	0,21
Vanadium	mg/kg i. Tr.	44	0,12
Lithium	mg/kg i. Tr.	42	0,11
Kobalt	mg/kg i. Tr.	40	0,10
Selen	mg/kg i. Tr.	20	0,05
Quecksilber	mg/kg i. Tr.	6	0,02
Thallium	mg/kg i. Tr.	3	0,01
Beryllium	mg/kg i. Tr.	2	0,004
Summe		37.808	100

*Mittelwert über Analysezeitraum 07/93 – 04/94

5.2.3 RAA-Schlämme

Aus den Protokollen der Abschlussberichte konnten keine Massenangaben für Pb, Cd, Zn und andere Inhaltsstoffe, welche ggf. mit dem RAA-Schlamm eingebracht wurden, ermittelt werden. Deshalb wurde versucht über eine Literaturrecherche Hinweise auf die Zusammensetzung von RAA-Schlämmen aus der Verbringungszeit zu erhalten. Es liegen jedoch bislang keine auswertbaren Daten vor.

Bei den RAA-Schlämmen handelte es sich um Reststoffe aus der Abwasseraufbereitung bei der Rauchgasentschwefelung aus der Kohleverbrennung (Abb. 15): Gips-schlämme und verunreinigte Gipsschlämme.

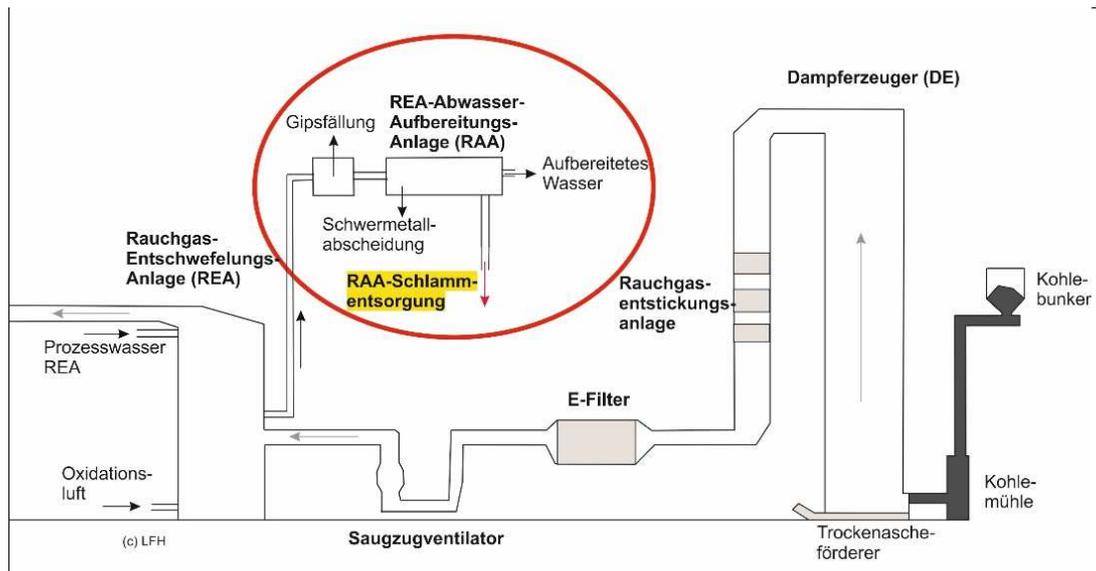


Abb. 15: Entstehung von RAA-Schlämme im Kraftwerk

In Bezug auf die chemische Zusammensetzung der RAA-Schlämme gibt es ein Defizit an Analyseergebnissen. Diesbezüglich wurden mit Unterstützung des Ministeriums an die wichtigsten Erzeuger der RAA-Schlämme herangetreten, um Analyseergebnisse aus der Zeit der Verbringung zu den RAA-Schlämmen zu erhalten, damit eine Mengenbilanzierung der verbrachten Stoffe und des daraus ggf. abzuleitenden Freisetzungspotenzials erfolgen kann. Die gelb markierten Kraftwerke in der Tabelle 17 wurden im projektbegleitenden Arbeitskreis zur Anfrage ausgewählt. Dazu liegen derzeit keine neuen Erkenntnisse vor.

Im projektbegleitenden Arbeitskreis erfolgte der Hinweis, dass mglw. die Anträge an die Bez. Regierung Detmold zur Verbringung der RAA-Schlämme des Kraftwerks Veltheim Informationen zur chemischen Zusammensetzung der Schlämme enthalten. Aus der Literatur ist bekannt, dass große Schwankungsbreiten der Zusammensetzung der RAA-Schlämme u.a. in Abhängigkeit der Zusammensetzung der eingesetzten Stoffe und der Anlagentechnik auftreten (siehe Tab. 17). Es können die dargestellten Werte aus diesem Grund nicht einfach auf andere Anlagen und Zeiträume übertragen werden. Bisher liegen den Gutachtern keine weiteren Daten vor (30.08.2016).

In Tabelle 18 sind die Spannbreiten der chemischen Zusammensetzung der Trockensubstanz von RAA-Schlämme aufgelistet. Der Gipsgehalt ($\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$) liegt bei 15 bis 90 M.-%.

Tab. 17: Erzeuger von den im Bergwerk Haus Aden / Monopol verbrachten RAA-Schlämmen (Datenquelle: Quartals- und Abschlussberichte der RAG)

Erzeuger	Erzeugernr.	RSN	Bauhöhe Grimberg	Summe verbrauchte Masse je Erzeuger [t]	Anteil an Gesamtmasse [%]
KW Hamburg/Wedel	A56000057	31613	1, 2, 16, 17, 31	5.725,61	5,4
KM Hamburg/Hafen	B10107A00	31613	1, 2, 16, 17	815,54	0,8
Stadtwerke Bremen / Hafen	D1111761	31613	1, 16, 17, 31	1.562,69	1,5
Stadtwerke Bremen / Hafen	D1111761	31620	2	1.088,92	1,0
KW Voerde/West	E1706066	31620	1, 2, 16, 17, 31	22.627,87	21,4
KW Heme	E9160274	31620	1, 2, 16, 17, 31	21.937,05	20,8
KW Lünen	E9784033	31620	1, 2, 16, 17, 31	13.197,83	12,5
GKW Weser/Veltheim	E77023102	31620	1, 2, 16, 17, 31	14.365,61	13,6
HKW Reuter/Berlin	L21010760	31620	1, 31	1.341,49	1,3
HKW Reuter/Berlin-West	L21010760	31620	1, 31	1.051,60	1,0
KW Mannheim	H19006500	31613	1, 2, 16, 17, 31	7.451,05	7,1
KW Bayer AG Uerdingen	E1140051	31613	1, 2, 16, 17, 31	958,12	0,9
Henkel KG aA	E11100017	31620	1, 2, 16, 31	359,22	0,3
KW Rostock	M03E00327	31620	1, 16, 17, 31	1.998,99	1,9
KW Heyden	E77023005	31613	2	910,73	0,9
KW Heyden	E77023005	31620	16	733,22	0,7
KW Wilhelshafen	CUE001000	31613	2, 16, 17	1.778,35	1,7
KW Siersdorf/KW Filterstaub	E3580065	31314	2	25,18	0,02
KW Hamburg/Tiefstack	B10117A00	31620	31	239,80	0,2
VKR KW Scholven	E5130525	31613	31	2.101,42	2,0
BW Prosper/Haniel Flotationsberge	-	-	1, 16, 17, 31	5.387,88	5,1
			Summe	10.5658,17	100,0

Gelb markierte Kraftwerke wurden im projektbegleitenden Arbeitskreis als relevant für das Inventar der BHV aufgrund ihres Anteils an der verbrauchten Reststoffmenge ausgewählt.

Tab. 18: Spannbreiten der chemischen Zusammensetzung der Trockensubstanz von RAA-Schlämme (VGB Kraftwerkstechnik 70(12), 1990)

Parameter	Formel	Einheit	Bandbreite
Aluminium	Al ₂ O ₃	M.-%	0,1 – 16
Calcium	CaO	M.-%	30 – 50
Eisen	Fe ₂ O ₃	M.-%	0,5 – 7
Kalium	K ₂ O	M.-%	1 – 10
Magnesium	MgO	M.-%	1 – 35
Natrium	Na ₂ O	M.-%	1 – 10
Silicium	SiO ₂	M.-%	0,5 – 55
Chlorid	Cl ⁻	M.-%	0,5 – 8
Fluorid	F ⁻	M.-%	0,1 – 10
Sulfat	SO ₄ ²⁻	M.-%	25 – 45
Arsen	As	mg/kg	1 – 240
Blei	Pb	mg/kg	2 – 360
Cadmium	Cd	mg/kg	2 – 15
Chrom	Cr	mg/kg	3 – 210
Kupfer	Cu	mg/kg	1 – 305
Nickel	Ni	mg/kg	20 – 110
Quecksilber	Hg	mg/kg	5 – 70
Zink	Zn	mg/kg	50 – 4000

5.3 Hausmüllverbrennungsaschen (HMVA)-Zusammensetzung und Mineralphasen in den Aschen

Die versetzten Materialien wurden nicht hinsichtlich ihrer Mineralphasen der Schwermetalle analysiert, die generelle stoffliche Zusammensetzung des angelieferten Materials ist hingegen bekannt (s. Tab. 15, 16 und 18) und wurde ausgewertet. Für eine Beurteilung der Mobilität und Stofffreisetzung bei Laugungsversuchen ist die Kenntnis zu vorliegenden Materialphasen als Ausgangspunkt entscheidend. Ebenso muss betrachtet werden, dass sich mit dem Aushärten des Versatzmaterials neue stabile Mineral-

phasen während des Abbindeprozesses bilden (s. Kap. 5.4). Aus der nationalen sowie der internationalen Literatur sind Untersuchungen zu der Elementzusammensetzung und der Mineralogie von Hausmüllverbrennungsaschen, sowohl in der Zeit des Versatzes in den 80er und 90er Jahren als auch später, bekannt und wurden ausgewertet (Lima et al. 2008; Wan et al. 2006; Van der Sloot et al. 2001; Van Herck et al. 2000; Andac & Glasser 1999; Birkel 1997; Gutmann et al. 1996; Artelt et al. 1993; US EPA 1981).

Die hier gezeigten Ergebnisse einer Literaturrecherche sollen zeigen, wie die internationale Forschung das Thema HMVA behandelt und zu welchen Ergebnissen die Forschung kommt. Eine genaue Modellierung für den betrachteten Standort bedarf einer umfassenderen Berechnung der Phasengleichgewichte der vorliegenden Mineralphasen. Diese Analyse von Herrn van Berk befindet sich in dem entsprechenden Detailbericht. Hier gezeigte Aussagen beziehen sich nicht auf eigene Daten des LFH, sondern auf die Fachliteratur, die zur Einordnung der Untersuchungsergebnisse des Konsortiums in einen internationalen Kontext notwendig sind. Dabei können die Ergebnisse aufgrund der Besonderheiten des jeweiligen Einzelfalls auch voneinander abweichen.

Die Zusammensetzung der HMVA in ihrer Mineralogie, Stoffzusammensetzung und insbesondere die Schwermetallkonzentration hängen von den eingesetzten Stoffen resp. Abfallart aber auch maßgeblich von der Auswahl des Verbrennungsprozesses/-verfahrens ab. Diese sind zeitlich und regional für jede Verbrennungsanlage, in einem gewissen Schwankungsbereich, spezifisch und dadurch untereinander schwer vergleichbar (Birkel 1997; Gutmann et al. 1996; Knissel 1991; Haus der Technik 1987).

Die sich daraus ergebenden deutlichen Unterschiede in der Zusammensetzung der Reststoffe zur Verwertung führen dazu, dass nur eine genaue Analyse des wirklich verbrachten Materials eine realistische Massenbilanz zur Bewertung des Gefährdungspotentials erlaubt. Solche Daten liegen für die HMVA in Haus Aden vor. Der Vergleich dieser Bandbreite der HMVA-Zusammensetzungen in Deutschland mit der internationalen Literatur dient der Einordnung der Stoffe in das globale Gesamtbild der HMVA-Verbringungen. Dazu werden international beschriebene Zusammensetzungsbereiche dargestellt (Tabelle 19).

Die Tabelle zeigt, dass die in Haus Aden verbrachten HMVA in ihrer Elementzusammensetzung über die Zeit hinweg Verbrennungsaschen aus der Schweiz, Gutmann et al. 1996 und Schlumberger und Bühler 2013, entsprechen. International zeigt auch der Vergleich mit Aschen aus Taiwan, dass die Zusammensetzungen sich in ähnlichen Konzentrationsbereichen befinden. Die Übertragbarkeit dieser bezüglich aus der Literatur vorliegenden Messdaten ist nicht uneingeschränkt, da nicht zu allen Elementen in den jeweiligen Studien Analysen gemacht wurden. Das Referenzmaterial zur Bewertung von Müllverbrennungsaschen in Taiwan (BCR No. 176) liegt sogar deutlich über den real gemessenen Elementkonzentrationen in den verbrachten HMVA.

Tab. 19: Zusammenstellungen von HMVA-Zusammensetzungen im internationalen und zeitlichen Vergleich

Messungen des Anliefermaterials Haus Aden		Beispiel zweier Filterstäube vor Verglasung (Gutmann et al. 1996)		Standardmaterial für Filterstäube und an Proben gemessene Werte (Huang et al. 2007)		Aktuelle Min. und Max. Werte von Müllverbrennungsanlagen in der Schweiz (Schlumberger und Bühler 2013)	
Element	Mittelwerte [mg/kg i. Tr.]	Typ 1 [mg/kg]	Typ 2 [mg/kg]	BCR No. 176 [mg/kg]	Probenwerte [mg/kg]	Min. [mg/kg]	Max. [mg/kg]
Silber	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	30	60
Aluminium	n.a.	79.000	20.000	101.600	14.500	25.000	45.000
Arsen	79	n.a.	n.a.	93	61,3	20	120
Bor	289	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Barium	2.106	1.450	650	3.910	390	50	200
Beryllium	2	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Kohlenstoff	n.a.	2.800	23.000	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Calcium	n.a.	142.000	314.000	88.000	243.000	100.000	250.000
Cadmium	415*	310	n.a.	470	160	150	1.000
Chlor	n.a.	55.000	160.000	n.a.	n.a.	40.000	150.000
Kobalt	40	10	n.a.	n.a.	n.a.	20	100
Chrom (gesamt)	694	600	270	863	70,3	100	500
Kupfer	1.714	930	340	1.302	610	1.500	5.000
Fluor	n.a.	4.600	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Eisen	n.a.	24.000	5.100	21.300	3.700	18.000	55.000
Quecksilber	6	20	n.a.	n.a.	n.a.	0	3
Kalium	n.a.	36.000	28.000	450.000	37.300	30.000	60.000
Lithium	42	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Magnesium	n.a.	15.300	12.000	218.000	7.900	2.000	18.000
Mangan	n.a.	950	450	1.390	310	400	900
Molybdän	n.a.	170	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Natrium	n.a.	30.000	44.000	430.000	43.000	25.000	70.000
Nickel	207	120	30	124	310	60	300
Phosphor	n.a.	6.300	2.400	n.a.	n.a.	1.000	8.000
Blei	6.586*	8.000	3.100	109.000	29.500	7.000	25.000
Schwefel	n.a.	27.000	9.200	446.000	3.900	30.000	150.000
Antimon	872	1.180	370	412	480	700	5.000
Selen	20	n.a.	n.a.	41	160	n.a.	n.a.
Silizium	n.a.	136.000	121.000	n.a.	n.a.	50.000	100.000
Zinn	1.879	3.200	720	n.a.	n.a.	800	3.000

Messungen des Anliefermaterials Haus Aden		Beispiel zweier Filterstäube vor Verglasung (Gutmann et al. 1996)		Standardmaterial für Filterstäube und an Proben gemessene Werte (Huang et al. 2007)		Aktuelle Min. und Max. Werte von Müllverbrennungsanlagen in der Schweiz (Schlumberger und Bühler 2013)	
Element	Mittelwerte [mg/kg i. Tr.]	Typ 1 [mg/kg]	Typ 2 [mg/kg]	BCR No. 176 [mg/kg]	Probenwerte [mg/kg]	Min. [mg/kg]	Max. [mg/kg]
Strontium	300	230	390	462	430	n.a.	n.a.
Thallium	3	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Titan	n.a.	10.100	3.600	n.a.	n.a.	2.500	5.000
Vanadium	44	87	30	100	10,3	n.a.	n.a.
Zink	22.510*	24.000	6.000	258.000	8.800	20.000	120.000
Zirkonium	n.a.	100	70	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.

n. a.: nicht angegeben

* relevante Schwermetalle in Haus Aden

Für die Freisetzung von Schwermetallen aus HMVA ist zum einen die Konzentration in der HMVA maßgeblich. Im Verbringungsmaterial sind darüber hinaus auch die Mischung mit den weiteren Versatzstoffen, die Schwermetallmobilität unter gegebenen Umweltbedingungen sowie der generelle Anteil des verbrachten Volumens am ehemaligen Hohlraumvolumen maßgeblich. So macht das verbrachte Reststoffvolumen nur 2-5 % des Volumens der Bruchzone aus. Dies führt nochmals zu einer geringeren Konzentration im Hinblick auf den Flutungsprozess.

Die Mobilisierbarkeit der Schwermetalle wird in der BHV auch von den vorliegenden Mineralphasen beeinflusst. Darüber hinaus wird das Laugungsverhalten der Reststoffe durch Druck, pH und Temperaturbedingungen bestimmt und es lässt sich ein Zusammenhang zwischen pH-Wert und mobilisiertem Anteil der Ausgangszusammensetzung herstellen (Van Herck et al. 2000).

Einen Überblick über typische Minerale in den HMVA verschafft die Röntgendiffraktometrie der Verbrennungaschen. Hierzu wurde umfangreich die vorliegende Literatur ausgewertet.

Tabelle 20 führt die nachgewiesenen Mineralphasen in Aschen aus der Hausmüllverbrennung auf, um ganz generell die möglichen Mineralphasen in den verbrachten HMVA zu zeigen.

Tab. 20: Verschiedene Untersuchungen zu den Mineralphasen in Filteraschen

Mineralphasen in Filteraschen (Birkel 1997)			
Hauptphasen		Nebenphasen und Spuren	
neu gebildetes Glas		Gips	CaSO ₄ * 2 H ₂ O
Kohlenstoff, Graphit			K ₄ Na ₄ Zn ₂ Fe ₂ (SO ₄) ₉
Quarz	SiO ₂		(K, Na) ₂ (Pb, Ca, Zn) (SO ₄ , Cl ₂) ₂
Anhydrit	CaSO ₄		ZnCl ₂ * 4 Zn(OH) ₂
Bassanit	CaSO ₄ * 0,5 H ₂ O		CaCl ₂ * Ca(OH) ₂ * H ₂ O
	(K, Na) ₂ SO ₄	Hämatit	Fe ₂ O ₃
	(K, Na) ₂ (Ca, Pb, Zn) ₂ (SO ₄) ₃	Magnetit	Fe ₃ O ₄
Halit	NaCl	Rutil, Anatas	TiO ₂
Sylvin	KCl	Ilmenit	FeTiO ₃
		Ulvöspinell	Fe ₂ TiO ₄
		Cuprit	Cu ₂ O
		Portlandit	Ca(OH) ₂
		Fluorit	CaF ₂
		Blei, Kupfer, Eisen	Pb, Cu, Fe
Häufige Minerale in Flugaschen (Lima et al. 2008)		Minerale in Kehrichtverbrennung, Schweiz (Artelt et al. 1993)	
Korund	Al ₂ O ₃	Sylvin	KCl
Anhydrit	CaSO ₄	Halit	NaCl
Kalzit	CaCO ₃	K-Zn-Chlorid	K ₂ ZnCl ₄
Hämatit	Fe ₂ O ₃	Anglesit	PbSO ₄
Sylvin	KCl		
Arkanit	K ₂ SO ₄		
Magnesit	MgCO ₃		
Forsterit	Mg ₂ SiO ₄		
Halit	NaCl		
Quartz	SiO ₂		

Tabelle 20 zeigt, dass in den Filterstäuben aus der Hausmüllverbrennung im Wesentlichen Chloride, Sulfate und Karbonate nachgewiesen wurden. Sulfate und Karbonate sind für das Langzeitverhalten des Verbringungsmaterials wichtig, da die Karbonate beispielsweise zur Pufferung des pH-Wertes beitragen. Die zementähnlichen Abbindeigenschaften der BHV werden unter anderem durch den Portlandit und die Sulfate in der HMVA gesteuert. Durch das Vorhandensein dieser Minerale bilden sich bei der Verfestigung des Materials verschiedene CSH-Phasen und Ettringit, die zum Aushärten des Versatzmaterials führen.

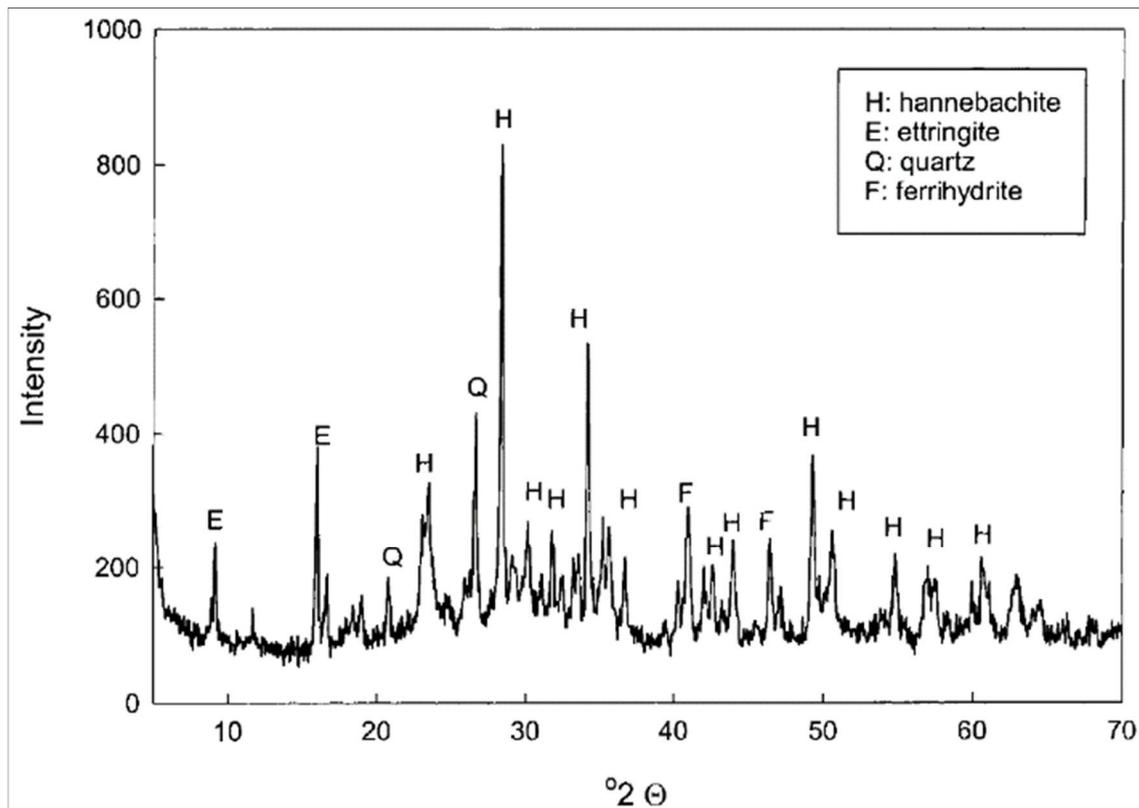


Abb. 16: Röntgendiffraktometrie Analyse gewonnener Kerne in die verbrachten Reststoffe (Hußmann und Klee 2001)

Die einzelnen Mineralphasen sind jeweils unter bestimmten Umgebungsbedingungen stabil und gehen bei veränderten Bedingungen in andere Minerale über oder gehen ggf. bei Kontakt mit Wasser in Lösung. Erst dann ist grundsätzlich eine Mobilisierung von Schwermetallen möglich. Da sich aber nicht alle Minerale umwandeln und eine Umwandlung bzw. Lösung nur teilweise erfolgt, kann unter bestimmten pH-Verhältnissen nur ein Teil der Schwermetalle mobilisiert werden.

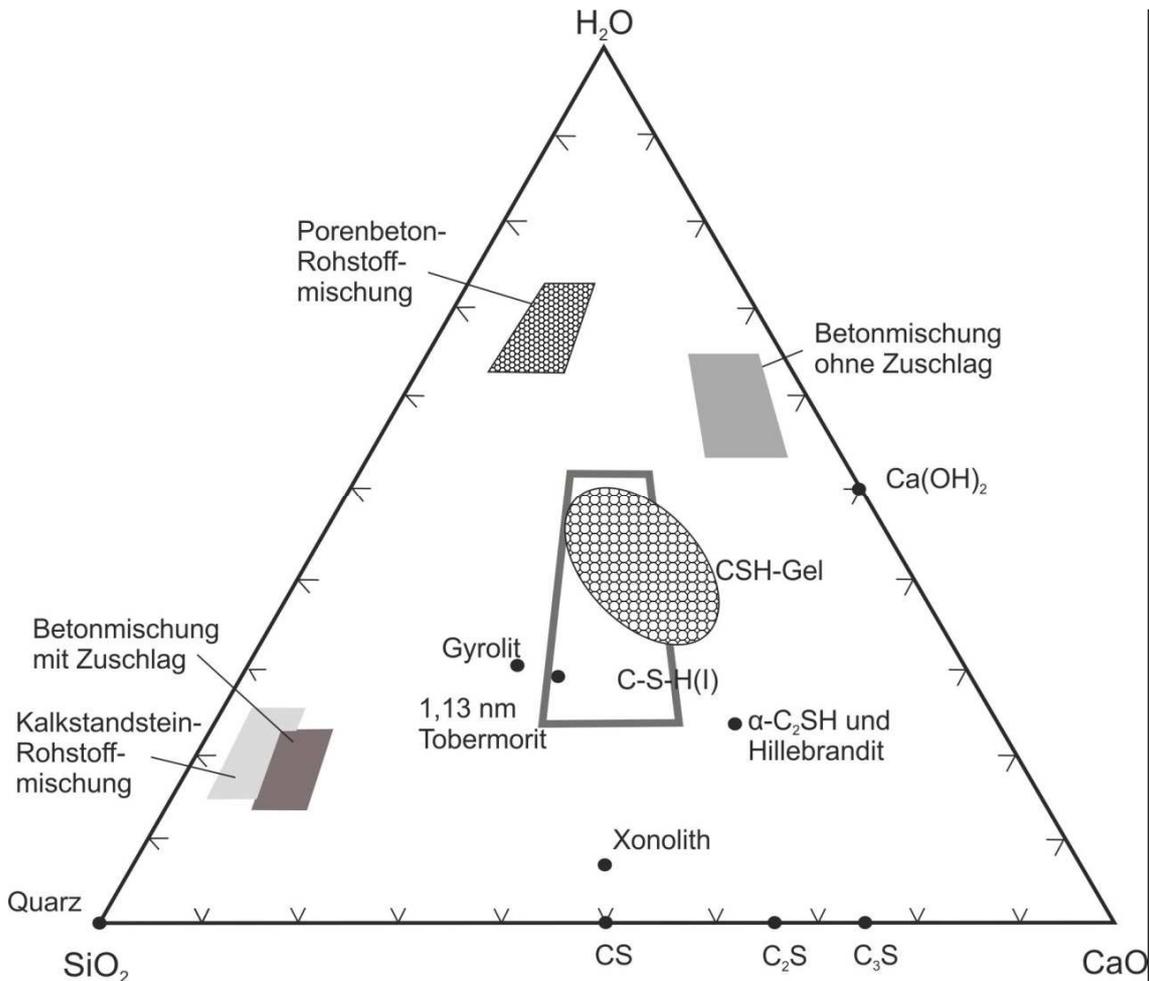


Abb. 17: Technische CSH-Phasen (Darstellungsart angepasst nach VDZ 2002)

5.4 Zustand der Bruchhohlraumverfüllung

Die Reststoffe wurden nach einem patentierten Verfahren (Ruhrkohle Montalith GmbH 1992; DE 4207182 A1), aus einem Gemisch aus Wasser, RAA-Schlamm und HMVA angesetzt und als pastöse Masse nach unter Tage mittels Pumpen verbracht.

Für die Risikobewertung ist der Zustand der BHV wichtig und die Frage, ob das Material noch als Suspension oder erhärtet vorliegt von großer Relevanz.

Generell gibt es drei denkbare Szenarien, was mit der verbrachten Reststoffsuspension im Bruchaufwerk passiert sein könnte:

- Im Bruchaufwerk liegt die Suspension wie eingebracht vor (freies Wasser).
- Die Suspension ist verdichtet und ausgehärtet (Wasser wurde eingebunden).

- In den Poren/Klüften/Hohlräumen im Bruchhaufwerk liegt die Suspension verteilt und ausgehärtet vor.
- Aus den Reststoffen hat sich ein monolithischer Block gebildet.

Um den Prozess der Verbringung genauer verstehen zu können, ist es notwendig zu wissen, wie der Bruchhohlraum bei der Verfüllung ausgesehen hat. In Abbildung 18 ist eine Aufnahme von Bruchhaufwerk im Nachgang zur Abbautätigkeit zu sehen. In dieses lose Haufwerk mit Hohlräumen zwischen den einzelnen Verbruchblöcken, wird eine mit dem angemischten Beton aus dem Hausbau vergleichbare Suspension in das Haufwerk eingeleitet. Dort verteilt sich diese in den Hohlräumen des Haufwerks, wodurch die BHV nicht als Monolith vorliegen kann, sondern die Poren und Klüfte des Verbruchs ausfüllt.



Abb. 18: Aufnahme von Bruchhaufwerk (DMT 1992)

Zur generellen Erläuterung der Prozesse und der daraus resultierenden Stoffeigenschaften, die beim Abbinden eines hydraulischen Bindemittels zu erwarten sind, hier anhand des allgemein bekannten Baustoffs Beton veranschaulicht. Beton wurde ausgewählt, da er, entsprechend der BHV, aus mehreren abbindenden Komponenten besteht. Die Bestandteile sind Zement, der dem BHV Material entspricht, einer Gesteinskörnung (früher Zuschlag), die hier dem Bruchhaufwerk entspricht und dem Zugabe-wasser (früher Anmachwasser), das dem Wasser in der Suspension entspricht.

Das Wasser in diesem Gemisch ist entscheidend, da durch Wasserzugabe das Bindemittel reagiert und nach einiger Zeit durch Mineralneubildung verbunden mit der Bindung des Wassers in neuen Mineralphasen erhärtet (VDZ 2002).

Das Erhärten setzt sich aus sich aus mehreren Prozessen zusammen. Zunächst steift das Gemisch an. Dies geschieht kurzfristig im Sekundenbereich, je nach eingestellter Aushärtedauer des jeweiligen Gemischs. Über das Wasser zu Zement Verhältnis (w/z) kann die Geschwindigkeit des Prozesses bestimmt werden. Nach dem Ansteifen beginnt der Beton zu erstarren. Dieser Vorgang kann von 0,5 Tagen bis zu einer gezielten Anzahl an Tagen dauern, was durch die Auswahl des Zements und die Anmischung des Betons eingestellt werden kann. Das Erhärten bezeichnet damit insgesamt den Übergang von Frischbeton zu Festbeton und ein Beton kann durch Mineralumwandlungen im Bindemittel auch noch nach Jahren weiter an Festigkeit gewinnen (VDZ 2002), was die in Abbildung 19 dargestellten Mineralumwandlungen zeigen.

Um die verschiedenen Zementmischungen in ihren Eigenschaften auf einen gemeinsamen Parameter beziehen zu können, wird die Normfestigkeit nach 28 Tagen gemessen. Hatte das Gemisch zu wenig Wasser führt dies zu einem Austrocknen und zu einem übermäßigen Schwinden. Den Grund für die 28 Tage als Referenzrahmen zeigt Abbildung 17, da nach 28 Tagen die wesentlichen Mineralneubildungen oder Umwandlungen stattgefunden haben. Wie das Diagramm zeigt (Abb. 17), bilden sich die für die Festigkeit entscheidenden Calciumsilicathydrate (CSH-Phasen) (Mineralbildungen) erst einige Stunden nach der Anmischung. Mit dem Anwachsen dieser Phasen verringert sich die Porosität und auch die Permeabilität des entstehenden Steins. Wie abgebildet verändert sich das Mineralgefüge im Betonstein und damit auch dessen Festigkeit (VDZ 2002).

Wie oben bereits beschrieben, wird die noch pastöse Masse während der BHV in das Bruchhaufwerk eingebracht. Durch den Eintrag über eine Schleppleitung am Boden der jeweiligen Bauhöhe, drückt sich im Porenraum und in den Klüften des Gesteinshaufwerks auch ein Teil des verbrachten Materials nach oben.

Genauer wird der Vorgang der Bruchholraumverfüllung in Abbildung 20 gezeigt. Der Streb baut die Kohle ab und zieht eine Schleppleitung hinter dem Abbau her, die im Verbrauchsbereich die Reststoffe einbringt, die die Hohlräume ganz oder zum Teil verfüllen. Labordaten aus der Zeit der Verbringung legen nahe, dass die k_f -Werte im Bereich der BHV sehr niedrig sind und denen von Grundwassergeringleitern entsprechen.

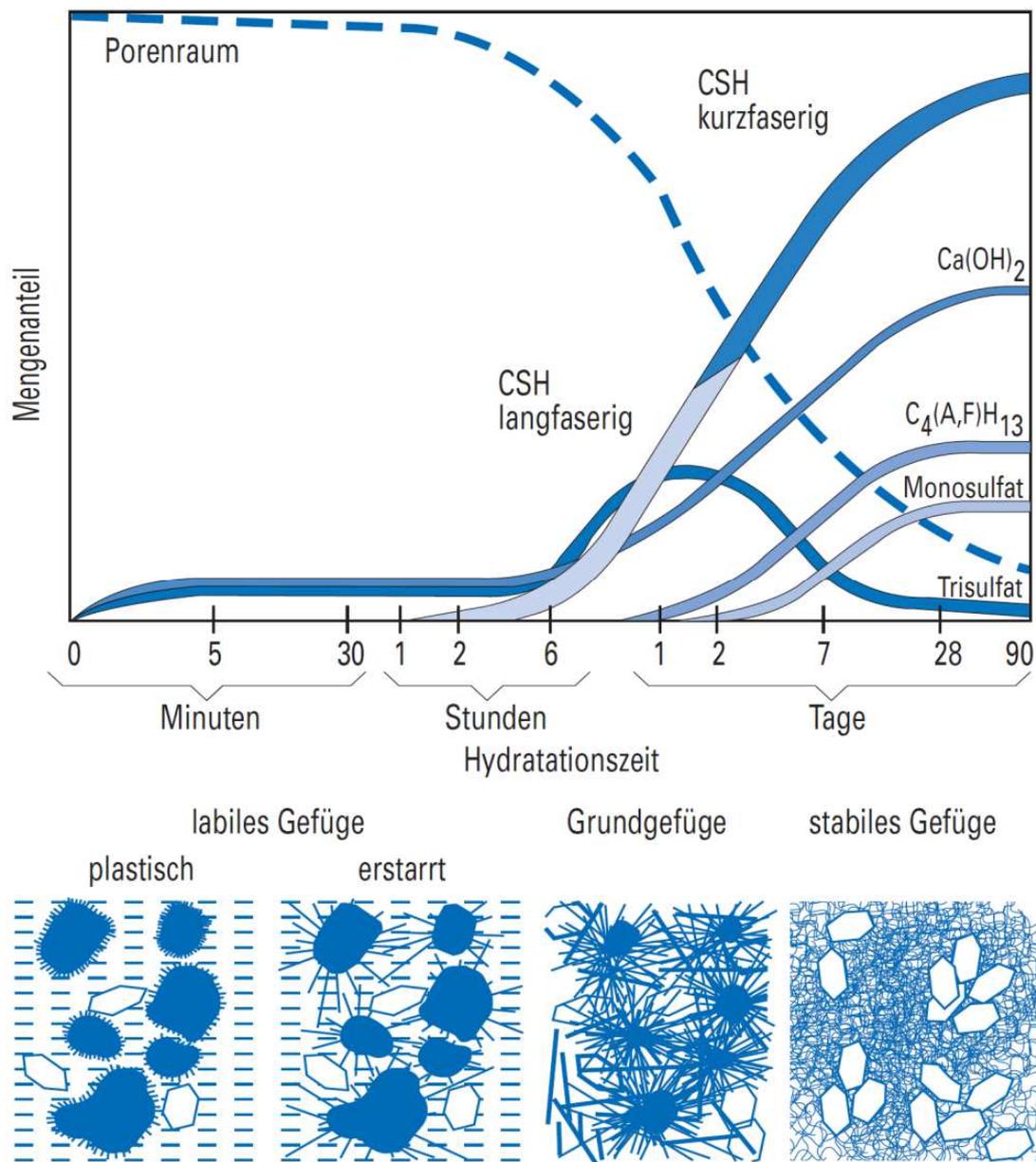


Abb. 19: Kristallwachstum beim Abbinden von Zement (VDZ 2002)

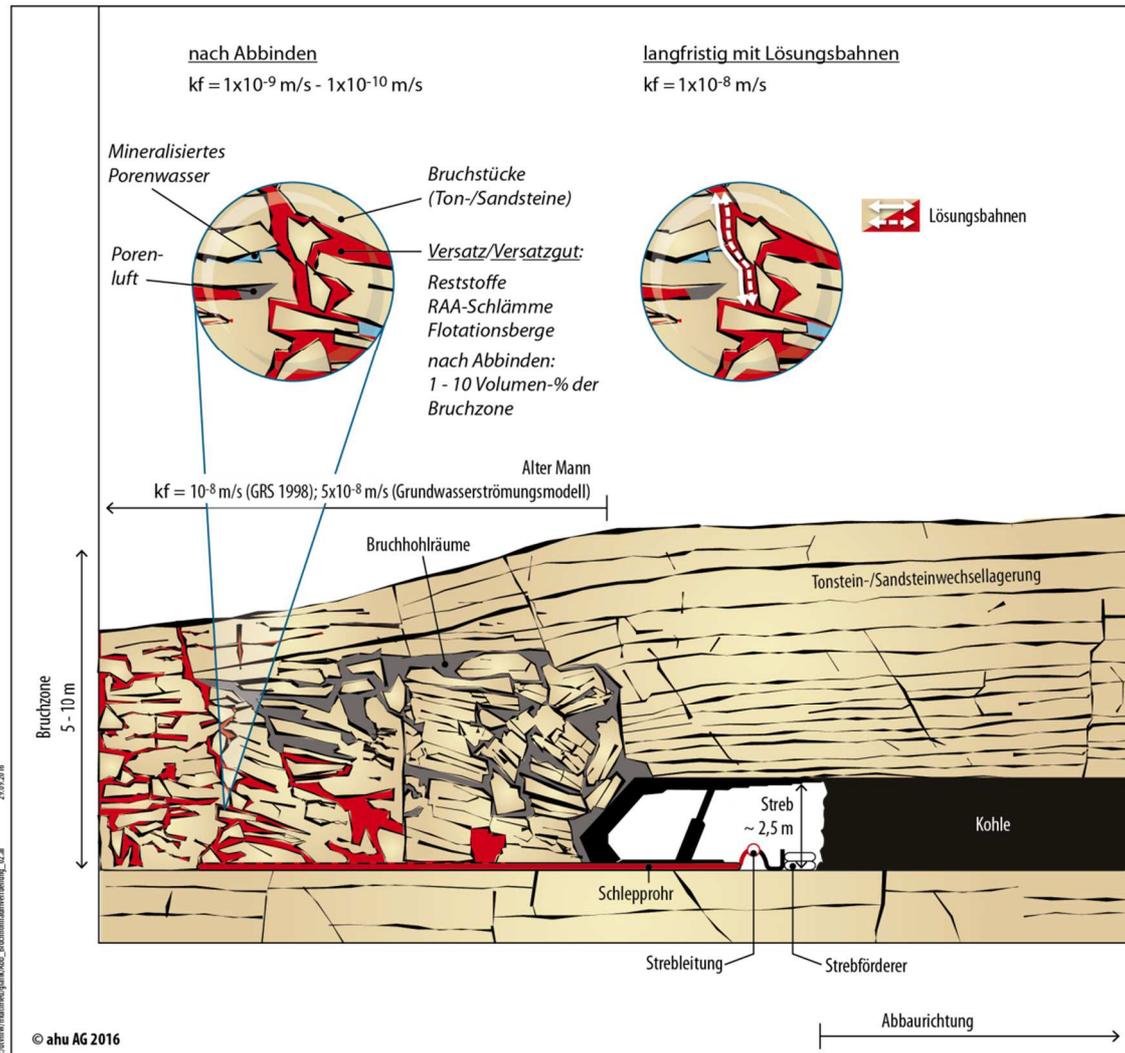


Abb. 20: Schematische Darstellung des Verbundes zwischen Abbaubetrieb und BHV (ahu 2016)

In Bezug auf die Ausgangsfrage dieses Kapitels auf die Festigkeit der BHV zeigt sich an Abbildung 18, dass die BHV kein monolithischer Block ist und es liegt nahe, dass das Bindemittel die verbrochenen Steinblöcke verkittet. Es muss, wie in Abbildung 20 zu sehen, davon ausgegangen werden, dass die Verkittung mit Bindemittel nur in einem Teil des Bruchhaufwerks vollständig ist und es auch Bereiche ohne BHV-Material in den Hohlräumen gibt. Grundsätzlich ergibt sich durch das Verbringungsverfahren, dass die Füllung der Hohlräume von unten nach oben abnimmt. Damit ist auch die Sohle des Abbaufeldes am ehesten durchgehend zementiert. Die Verfüllung mit Suspension nimmt mit der Steighöhe ab und wird maximal bis ca. 10 m Höhe nachweisbar sein, da das die angenommene Verbruchhöhe im Alten Mann ist.

Durch diese Zementierung des Haufwerks soll es zu einer Verringerung der Bergsenkung an der Erdoberfläche kommen. Dazu muss die Suspension durch ihr Aushärten das Bruchgefüge stützen. Das ist bei 2 bis 5 % des Volumens und der beschriebenen Verteilung der Zementierung hier nicht abschließend zu klären.

Um die Verfestigung der BHV abzuschätzen, müssen neben diesen qualitativen Überlegungen weitere Indizien vorliegen, die eine Erhärtung nahelegen.

Aktuell gibt es keine Proben des damals verbrachten Materials. Diese müssten sehr aufwendig bergmännisch gewonnen werden, deshalb wurden bisher keine neuen Proben genommen. Rückstellproben hätten, wenn es sie gäbe, keinen Wert bzw. würden keinen Erkenntnisgewinn bringen. Nach über 20 Jahren im Lager/Archiv würden solche Proben nicht mehr die Eigenschaften aus der Zeit der Reststoffverbringung aufweisen.

Hydraulische Bindemittel (Zement) können zudem auch nach Jahren und Jahrzehnten noch Festigkeitszuwächse aufweisen. Zudem würden solche Proben aus verschiedenen Gründen die Situation unter Tage nicht exakt wiedergeben:

- Es gibt keine Rückstellproben der eingebrachten Reststoffe.
- Ausgangsstoffe sind auch nicht repräsentativ, weil die Reststoffe nur 2-5 % der Bruchzone ausmachen und die Reststoffe auch mit ihren Nebengesteinen reagieren
- In der BHV herrschen höhere Drücke, Temperaturen und es sind hoch saline Porenwässer zu erwarten.
- Zu den Möglichkeiten einer aktuellen Beprobung durch übertägige oder untertägige Bohrungen wurden im Zwischenbericht Aussagen getroffen. Diese Bohrungen würden ca. 3 Jahre dauern.
- Die Bohrkernkerne ermöglichen lediglich eine punktuelle Information, da sie nur einen nicht repräsentativen Einblick in die BHV darstellen. Ihre Übertragbarkeit auf andere Lokalisationen ist als gering zu bewerten. Bei den bereits erfolgten Bohrungen in die BHV in Walsum, die zu dem Zeitpunkt noch besser zugänglich war, wurde in einem Falle ein nur gering verfüllter Bereich angetroffen.

Vor der Einbringung der BHV in die Bergwerke, gab es umfangreiche Untersuchungen zu deren Aushärteverhalten und auch zum Verfahren der Untertageverbringung von Reststoffen. Dieses Kapitel wird darstellen wie damalige Prüfkörper aussahen und welche Hinweise es insgesamt auf den Aggregatzustand der BHV gibt. Diese Laboranalysen und auch Vergleiche mit internationalen Verbringungen von Reststoffen zum Versatz nach unter Tage wurden die vorliegenden Daten aus der Zeit der BHV nochmals ausgewertet. Dazu gibt es verschiedene Quellen:

- Forschungsberichte zur Entwicklung eines Verfahrens zur unter Tage Verbringung von Reststoffen, Ergebnisse von Laborversuchen zur Aushärtung im Vorfeld der Verbringung, Überprüfung der Aushärtung im Bergwerk, Ergebnisse von Kontrollbohrungen,
- Störfälle während des Betriebs,
- internationale Literatur und Studien zum Thema der Erhärtung bzw. der Nutzbarkeit von HMVA und weiteren Filteraschen in der Zementherstellung, der Verbringung oder anderen Nutzungsmöglichkeiten (Recycling),
- Bildung von CSH-Phasen und entstehenden pH-Werten (Literatur).

Es gibt umfangreiche Literatur aus dem Bereich der Betontechnik, die das Aushärteverhalten von HMVA, Filterstäuben mit Zement oder ohne Zement und viele weitere Kombinationsmöglichkeiten auswerten. Hier wird, um sich nicht zu weit vom Thema zu entfernen, nur die Basisliteratur betrachtet. Daraus lassen sich aber die Grundzüge der Zementzusammensetzung und die wesentlichen chemischen Reaktionen, die zu einem Aushärten führen, erklären (VDZ 2002). Da es sich bei Filterstäuben oft um Materialien handelt, die die für Zementzuschlagstoffe wichtigen puzzolanischen Eigenschaften besitzen. Dadurch werden die in der Steinkohle verbrachten Reststoffe in anderen Industriezweigen als Rohstoff eingesetzt, was einer stofflichen Verwertung entspricht (Recycling) (Lin 2005; Van der Sloot et al. 2001; Traber et al. 2000; Shehata et al. 1999; Ubbriaco & Calabrese 1998).

5.4.1 Forschungsberichte, Laborversuche und Überprüfung der Erhärtung

Bevor die BHV begann, wurden zur Klärung möglicher Gefährdungen und der Prüfung der technischen Machbarkeit eine Machbarkeitsstudie in Auftrag gegeben, die auf Grundlage des Standes der Technik der damaligen Zeit die Eigenschaften der Reststoffgemische bei Verbringung, die Pumptechnik und den Abbauprozess betrachteten. Besondere Aufmerksamkeit galt in den Berichten der Sicherheit der BHV gegenüber dem Austrag von Schadstoffen (Jäger et al. 1990). Im Nachgang zu diesen Untersuchungen und auch als Überprüfungen des Verfahrens während der Laufzeit, wurden mehrere Berichte erstellt (EU 1999; Thein 1996; Thein & Klingel 1994, 1993, Thiehofe 1991).

In den Vorberichten wurden verschiedene Reststoffgemische getestet, um das Verfahren in die Umsetzungsphase bringen zu können und auf diese Testergebnisse wird im weiteren Verlauf auch eingegangen. Es kam zudem die Frage auf, ob ein „Nachmischen“ der verfüllten Stoffgemische eine Erkenntnis zum Zustand der BHV liefern könnte. Die synthetische Erzeugung von Versatzmaterial aus heute vorliegenden Ausgangsstoffen ist nicht zielführend, da sich die technischen Prozesse bei der Verbrennung von fossilen Brennstoffen und Hausmüll sehr stark verändert haben und auch die Zusammensetzung der Brennstoffe nicht mehr die gleiche ist. Damit wären die erzielten Ergebnisse nicht repräsentativ für die eigentlich verbrachten BHV-Materialien. Zudem sind keine Vollanalysen der Versatzmischungen überliefert und damit deren mineralogische Zusammensetzung ebenfalls nicht bekannt. Eine Reproduktion des alten Materials ist daher fachlich fundiert nicht möglich.

Ein „Nachmischen“ der Reststoffgemische wäre denkbar, ist aber nicht möglich, da die heutigen HMVA und RAA in ihrer Zusammensetzung aufgrund des Fortschrittes in der Verbrennungstechnik nicht mehr mit alten Aschen vergleichbar sind (Haus der Technik 1987, Patent 1992). Zudem müssten die Bedingungen von unter Tage im Labor simuliert werden (Druck, Temperatur, Tiefengrundwasser, Reststoffe nur 2% der Bruchhohlraumverfüllung etc.).

Als Teil der Untersuchungen einer möglichen unter Tage Verbringung, gab es auch ein vom Bundesministerium für Forschung gefördertes Projekt zur Entwicklung eines Verfahrens zur Verbringung von Kraftwerksabgängen in Bergwerken (Thiehofe 1991). Ein von der Europäischen Kommission gefördertes Projekt bezog sich auf das Verfahren der Verbringung von über Tage aus und mündete in dem von der RAG 1992 angemeldete Patent des Verbringungsverfahrens (DMT 1994; Patent DE19924207182 1992).

In diesen Forschungsprojekten wurden Laborversuche zum Aushärteverhalten durchgeführt, die in den Abbildungen 21 und 22 gezeigt werden. Im Labor ist das Reststoffgemisch vollständig ausgehärtet.

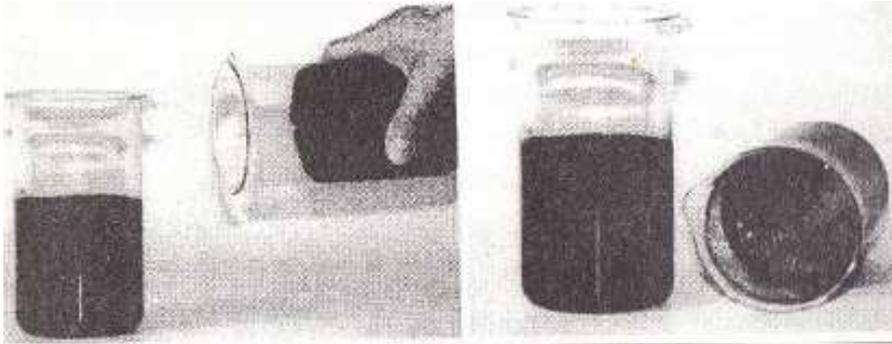


Abb. 21: Typisches Versatzgut mit den geforderten thixotropen Eigenschaften und hohem Feststoffgehalt (Steinkohlenbergbauverein Essen 1988)

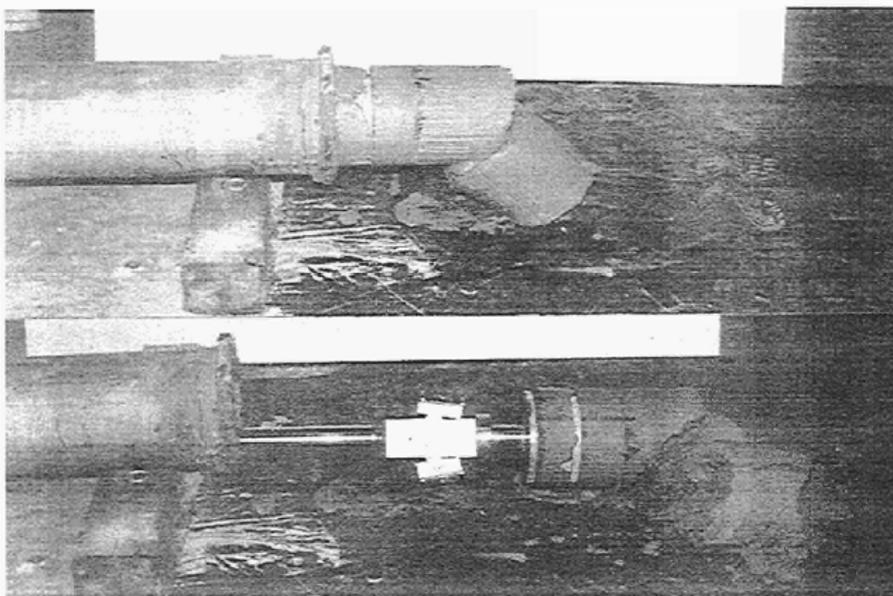


Abb. 22: Herausdrückvorgang mit Rohrreinigungsgerät (Steinkohlenbergbauverein Essen 1988)

Es zeigte sich, dass das Problem beim Pumpen nach unter Tage das zu schnelle Erstarren des Reststoffgemisches war. Daher wurden mittels Viskosimetern die Eigenschaften der jeweiligen Suspensionsgemische überwacht und mittels adäquater Zusammensetzung oder Verzögerern das Ansteifen und Aushärten eingestellt (siehe Störfälle). In weiteren Untersuchungen zu den Versuchsmischungen zeigte sich, dass Blöcke aus Versatzmaterial (Abb. 23) während des Versuchs erhärteten. Somit ist die generelle latent hydraulische Eigenschaft des Versatzmaterials nachgewiesen gewesen und es gibt keinen Grund das für die BHV nicht anzunehmen.

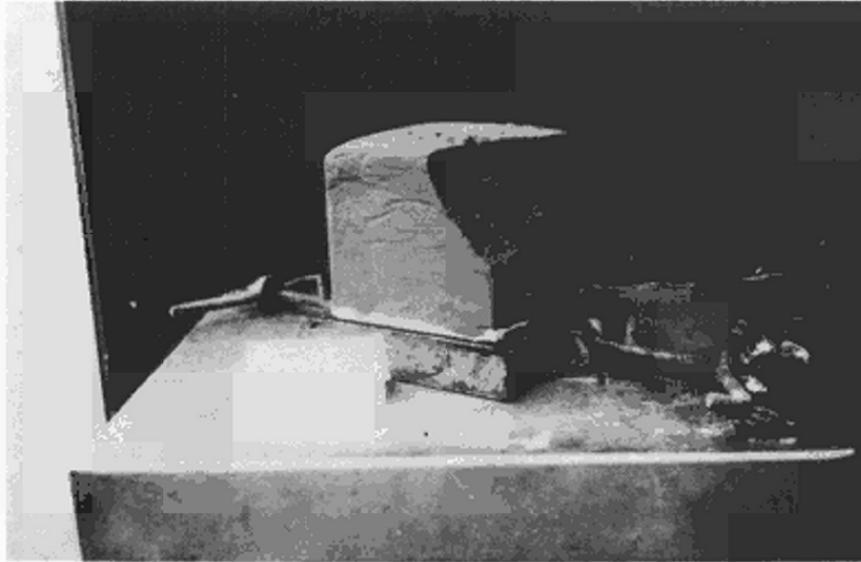


Abb. 23: Würfel aus EFA-Wasser-Gemisch (Mez et al. 1999)

5.4.2 Überprüfung der Erhärtung in der BHV

Diese Überprüfung des Aushärteverhaltens wurden in den Bergwerk Walsum und Consolidation Großversuche u.a. zur Untersuchung des Verhaltens der verbrachten Reststoffe durchgeführt. Dazu wurden auch Untersuchungen durchgeführt, die auf Bundes- und europäischer Ebene gefördert wurden und einer Überprüfung durch die Förderer unterlagen:

- Entwicklung und Erprobung eines Verfahrens für das Einbringen feinkörniger Aufbereitungs- und Kraftwerksabgänge in untertägigen Bruchhohlräumen (Thiehofe/RAG 1991, gefördert mit Mitteln des BMFT 0326416 B),
- Wissenschaftliche Begutachtung und labortechnische Untersuchungen zum technischen Großversuch – Verbringung vom MVA-Reststoffen als hydraulischer Nachversatz auf der Schachanlage Consolidation (Wilke & Skrzypek 1993),
- Qualitätssicherungsprogramm Walsum (Wilke & Dartsch 1995).

Wie bereits erwähnt, handelt es sich bei der Verbringung der Reststoffe um ein Gemisch, das als pastöse Masse nach unter Tage verbracht wurde. In seinen Aushärteeigenschaften entsprach das Reststoffgemisch dem von Zement (Aubert et al. 2004; Remond et al. 2002). Vom gesamten Volumen der ehemaligen offenen Strecke steht nur ein kleiner Teil (2 %) zur Verbringung zur Verfügung. Im Wesentlichen liegt ein zunächst aufgelockertes Haufwerk vor, das recht schnell durch den Gebirgsdruck wieder verfestigt wird und kaum Porosität aufweist.

Zur Überprüfung des Aushärtens wurde in die BHV in Bauhöhe EF43, BW Walsum, im Herbst 1988 eine ca. 170 m lange Erkundungsstrecke aufgefahren. Aufgrund der Gebirgsfestigkeit der BHV erfolgte dies im Sprengvortrieb (Thiehofe/RAG 1991).

Die dort angetroffene Ortsbrust (Abb. 24) zeigte eine verfestigte, künstliche Verfüllung der Bruchhohlräume. Hier wurde ein typisches Bild ausgewählt, es liegen aber noch verschiedene andere Aufnahmen vor, die die verfestigte BHV zeigen.



Abb. 24: Nahaufnahme einer Ortsbrust im Bergwerk Walsum. Gefüge aus Bruchbergen und Füllstoff nach Einbau über Schlepprohr (Steinkohlenbergbauverein Essen 1988, Thiehofe 1991)

Weiterhin wurden im BW Walsum zwei Jahre nach der Verbringung die BHV von unten in einem Trockenbohrverfahren angebohrt, um den Abbindeprozess näher zu untersuchen (Wilke & Dartsch 1995). Das im BW Walsum erbohrte Material war kein monolithischer, zementierter Kern, sondern es wurde ein nicht standfestes, trocken siebbares Material erbohrt, das als Nebengesteinsbruchstücke und vermutetem Versatzmaterial bestand.

Die festgestellten, geringen Schwermetallgehalte in diesem Material ließen es fraglich erscheinen, ob überhaupt die eingebrachten HMVA-haltigen Versatzstoffe angebohrt wurden. Dies ist insofern nicht verwunderlich, als die eingebrachten Versatzstoffe nur sehr geringe Volumenprozent eines Auflockerungsbereichs ausmachen. In den Abschlussberichten wurden die erreichten verpressten Mengen mit $0,1$ bis $0,5 \text{ m}^3$ je m^2 Verpressbereich angegeben. Bei einem Auflockerungsbereich in Höhe von 10 m entspräche das nur einem Volumenanteil von 1 bis 5% ; bei einem Auflockerungsbereich in Höhe von 5 m wären es 2 bis 10% .

Wilke & Skrzypek (1993) berichten, dass über zwei Bohrungen im BW Consolidation, Bauhöhe 143 des Flözes Ernestine, die 5 Monate nach Einbringen eines Nachversatzes mit bergbaufremden Versatzmaterial und einem Monat nach Unterbauung die BHV erstellt wurden, keine Spülung in die BHV verpresst werden konnte.

Dieser Bericht, der hier der Vollständigkeit halber angeführt wird, ergibt keine Kenntnis zum Zustand des Versatzmaterials, v.a. ob es erhärtet war.

5.5 Überschusswasser

Zement kann eine Wassermenge von etwa 40 % seiner Masse binden (Wasserzementwert 0,40). Weist ein Zementleim einen höheren Wasserzementwert auf, so wird das nicht mehr vom Zement gebundene Wasser mit Überschusswasser bezeichnet (Aus: <http://baulexikon.beuth.de/UEBERSCHUSSWASSER.HTM>)

Überschusswasser kann bei einer Phasentrennung beim Transport oder Versatz bei ungünstiger Einstellung der Suspensionseigenschaften auftreten. In wenigen Einzelfällen zu Zeiten der Großversuche BW Walsum bei Vorversuchen, die 1985/86 zur generellen Entwicklung einer Verbringungstechnik und damit verbundenen Anforderungen an die Suspension durchgeführt wurden, wurde Überschusswasser beobachtet. Im Nachhinein bei Betriebsstörungen (Abschlussberichte Grimberg), und in der aufgefahrenen Erkundungsstrecke (Walsum) wurden jedoch keine Indizien auf Überschusswasser festgestellt. Andere Versuche im Labor zur Optimierung des Verbringungsverfahrens und die Störfälle zeigen, dass das Problem eher eine zu schnelle Erstarrung des Gemischs war.

Der Feuchtegehalt einer BHV wurde beim Auffahren einer Erkundungsstrecke 04.10-2.12.1988 im Verfüllbereich des 3. Großversuchs 21.03-06.04.1988 Flöz EF (Bh. 44) Bergwerk Walsum (Thiehofe | Ruhrkohle AG, 1991; BMFT 0326416 B) bestimmt. Das Versatzmaterial bestand aus 30 % Flotationsberge und 70 % EFA. Es wurden 0,9 – 1,23 m³ Suspension je m² abgebauter Flözfläche entsprechend einem Verfüllungsgrad von 65-89% eingebracht. Das Gefüge aus verkeilten Bruchbergen und mit Füllstoff versetzten Zwischenräumen soll 6 Monate nach dem Versatz so fest gewesen sein, dass für den Vortrieb gesprengt werden musste. Es wurden festgestellt: *„Das für die hydraulische Förderung und das Verpressen auf 25 – 30 Gew. % Wasser angereicherte Gemisch war weitgehend entwässert und standfest. Schlammreste wurden nicht festgestellt. Restwassergehalte des Füllgutes bewegten sich zwischen 12 und 18 %; die ehemals trockenen Bruchberge hatten eine Feuchte zwischen 3,0 und 5,5 %.“* Und *„Da während der Injektionsphase und in dem Zeitraum bis zur Auffahrung der Erkundungsstrecke keine Überschusswasseraustritte beobachtet werden, ist davon auszugehen, dass dieses vom Bruchhaufwerk und dem Nebengestein aufgenommen wurde.“*

5.6 Störfälle während des Betriebs

Besondere Vorkommnisse und die getroffenen Maßnahmen gemäß dem Sonderbetriebsplan für die Reststoffverwertung als Nachversatz zur Bruchhohlraumverfüllung im Sinne des § 74 Abs. 3 BbergG sind in folgenden Unterlagen dokumentiert:

- Abschlussberichte der Abbaubetriebe Gb 1, Gb 2, Gb 16, Gb 17 und Gb 31
- Sachstandsberichte (Zeitraum: 03.1993 – 02.1998)

Die Auswertung der Berichte hinsichtlich der bei der Verbringung der Versatzmaterialien dokumentierten betriebsbedingten Störungen hat Folgendes ergeben:

In den vorliegenden Unterlagen sind sechs betriebsbedingte Störungen während des Zeitraums der Verbringung des Bruchhohlraumversatzes für Haus Aden / Monopol nach Aktenlage der Abschlussberichte dokumentiert (01.07.1993, 09.08.1993, 04.11.1993, 10.11.1994, 19.05.1995, 19.06.1995). In der übernommenen Aktenlage „Sachstandsberichte“ werden für den Zeitraum 01/95 bis 08/95 drei Betriebsstörungen genannt. Von diesen drei Betriebsstörungen wird eine als von der *schlechten Aufmischung der RAA-Schlämme im Mischer durch unbemerkten Ausfall von Zerkleinerungsmessern* beschrieben. Die Ursache entspricht dem Sachstandsbericht vom 10.11.1994. Die Gutachter ordnen diesen Sachstandsbericht der Betriebsstörung vom 10.11.1994 zu. Die übernommene Aktenlage *Abschlussberichte* weist für die Betriebsstörungen 19.05.1995 und 19.06.1995 zwei Vorberichte aus. Im zweiten Vorbericht wird als Datum der Betriebsstörung vom 19.06.1995 der 20.06.1995 angegeben. Aus der Beschreibung der Betriebsstörungen geht schlüssig hervor, dass dies der gleiche Fall ist. Die Gutachter bewerten nach Abgleich der Texte den Sachstand nach Lage Abschlussbericht als den korrekten.

Festgestellt wurden die betriebsbedingten Störungen anhand eines Anstiegs des Drucks in der Rohrleitung, in einem Fall durch die Auffindung eines geringen Austritts von Suspension durch ein Materialversagen (Rohrschuh) im Rahmen einer Befahrung.

Die Behebung der betriebsbedingten Störungen erfolgte über eine abschnittsweise Öffnung der Rohrleitung. Mit Ausnahme des Falls, der aufgrund eines Materialversagens eingetreten war, konnte die Rohrleitung nur durch Entfernen des verfestigten Materials durch gezieltes untertägliches Anpumpen, in einem Fall durch Aufbohren der gesamten verstopften Rohrleitung, behoben werden.

Die eingestellte Viskosität hatte sich erhöht bis hin zu einem vollständig festen Materialverbund. Die betriebsbedingten Störungen und deren Beseitigung sind gut dokumentiert.

Alle Störfälle sind mit einer genauen Beschreibung im Anhang 7 tabellarisch aufgelistet.

Nach folgender Auswertung haben sie keinen Einfluss auf die beschriebenen Mengenanteile von Reststoffen in der Bruchhohlraumverfüllung:

Gemäß der Tabelle 13 wurden in den Bauhöhen Gb 1, Gb 2, Gb 16, Gb 17 und Gb 31 insgesamt 62.289 t HMVA-Filterstaub sowie 105.477 t RAA-Schlamm, d.h. eine Materialgesamtmasse von 167.088 t, verbraucht.

Den Beschreibungen der Betriebsstörungen in den Abschlussberichten der Abbaubetriebe bzw. der Sachstandsberichte zufolge kam es lediglich bei zwei der sechs Betriebsstörungen zu Materialaustritten.

Bei der Betriebsstörung am 01.07.1993 im Abbaubetrieb Gb 2 kam es zum Austritt von 3 m³ bis 5 m³ Material sowie zu weiteren Materialaustritten im Verlauf der Störfallbehebung, die jedoch in den vorliegenden Berichten nicht weiter quantifiziert werden. Die Materialaustritte wurden, sofern dies möglich war, aufgefangen und dem Verarbeitungsprozess erneut zugeführt. Vier Stellen, an denen die Materialaustritte nicht restlos entfernt werden konnten, wurden durch Torkretieren versiegelt, so dass es hier zu geringen Verlusten an Material im Hinblick auf die Gesamtbilanz gekommen ist (Tab. 21).

Tab. 21: Zusammenfassung der Daten zu den Störfallberichten

Sachstandsberichte		Abschlussberichte	
01.07.1993	Gb 2	01.07.1993	Gb 2
09.08.1993	Gb 2	09.08.1993	Gb 2
04.11.1993	Gb 2	04.11.1993	Gb 2
10.11.1994	Gb 16 („Zerkleinerungsmesser“)	10.11.1994	Gb 16 („Zerkleinerungsmesser“)
01/95 - 08/95	3 Betriebsstörungen (1x „Zerkleinerungsmesser“)	19.05.1995*	Gb 17
		19.06.1995*	Gb 17

Bei der Betriebsstörung am 04.11.1993, ebenfalls im Abbaubetrieb Gb 2, traten insgesamt 2 m³ Material aus. In diesem Fall wird in den Berichten beschrieben, dass die Materialaustritte „ordnungsgemäß entsorgt“ wurden. Ob das Material dem Verarbeitungsprozess wieder zugeführt wurde geht aus den Berichten nicht hervor, so dass es in diesem Fall möglich ist, dass das Material aus dem Verbringungsprozess und somit aus der Gesamtbilanz herausfällt.

Das Austrittsvolumen der beiden Fälle beläuft sich folglich, soweit dies aus den Akten hervorgeht, auf ein Gesamtvolumen von insgesamt etwas mehr als 7 m³. Um nun die Relevanz dieses Volumens im Vergleich mit der verbrachten Gesamtmasse an Filterstaub und RAA-Schlamm zu überprüfen, wurde das Verhältnis zwischen diesen beiden Werten gebildet.

Hierzu wurde als ausgetretenes Volumen ein Wert von 7 m³ angenommen, d.h. die Relevanz-Überprüfung erfolgt unabhängig davon, ob das ausgetretene Material dem Verbringungsprozess wieder zugeführt wurde oder nicht. Zusätzlich wurde sowohl für den Filterstaub als auch für den RAA-Schlamm eine Feststoffdichte von 2500 kg/m³ angenommen, um die verbrachten Massen in ein Volumen überführen zu können. Der Wert für die Feststoffdichte wurde in Anlehnung an Messwerte aus den Abschlussberichten der RAG abgeschätzt. Eine Verhältnisbildung aus diesen Werten ergibt, dass circa 0,01 % des verbrachten Materialgesamtvolumens im Rahmen von Betriebsstörungen ausgetreten ist. Dieser Anteil kann daher als nicht relevant angesehen werden.

5.7 Auswertung nationaler und internationaler Literatur zum Thema BHV, insbesondere dem Aggregatzustand

Über die Machbarkeitsstudie von 1990 und damit verbundene Literatur hinaus, gibt es eine Reihe von Veröffentlichungen zur Nutzung von Bergwerken zur Verbringung von Reststoffen. Es werden verschiedene Reststoffarten, Bergwerkstypen sowie Verbringungsarten und -zielsetzungen geprüft und bewertet. So gibt es aus der Zeit der BHV Veröffentlichungen des Sachverständigenrates für Umweltfragen zur generellen Möglichkeit einer Verbringung von Reststoffen nach unter Tage, der dieses für einen guten Ansatz zur Lösung des Abfallproblems hält und ähnliche Auflagen wie der Betriebsplan

der BHV vorsieht (Wilke 1991). Im gleichen Jahr wurde auch eine Einschätzung zur Verbringung in Salzbergwerken vom Sachverständigenrat veröffentlicht, der vergleichbar einen Versatz oder eine Ablagerung dort für durchführbar hält sowie Sicherheitsauflagen definiert (Herrmann 1991). Des Weiteren wird 1998 noch die generelle Untertageverbringung von Reststoffen in verschiedenen Gesteinsformationen wissenschaftlich betrachtet (Herrmann & Röthemeyer 1998). In einer weiteren Veröffentlichung aus dem Jahr 2007 wird eine Verbringung nach unter Tage als einzige Möglichkeit langfristiger sicherer Gefahrstoffe zu verbringen, angesehen. Betrachtet werden dort insbesondere die Steinkohlebergwerke und Salzbergwerke im Vergleich, wobei über Tage Deponien grundsätzlich als nicht langzeitsicher eingestuft werden (tausende Jahre) (Öko-Institut e. V. 2007).

Die Steinkohlenbergwerke in Nordrhein-Westfalen sind nicht die einzigen Orte, an denen Reststoffe unter Tage verbracht wurden. In England wurde seit 1965 in der Walsall Wood Colliery chemischer Abfall verbracht (Franklin & Dusseault 1991), in Südafrika wurde ein Verfahren zur Abschätzung des Gefährdungspotential von Reststoffen zur Verbringung eingeführt, um dort Reststoffe sicher unter Tage verbringen zu können (Kortnik 2003). In Slowenien wurden in einem ehemaligen Blei-Zink Bergwerk Reststoff zum Versatz nach dem im Ruhrgebiet angewendeten Verfahren verbracht. Auch dort wurde ein Multibarrieren-System als Sicherung des eingelagerten Materials diskutiert. Aktuelle Daten zu diesem Projekt liegen allerdings nicht vor. Die Annahmen, das Vorgehen, die Erwartungen und ersten Ergebnisse passen jedoch zu den Erfahrungen aus dem Ruhrgebiet (Bajzelj & Kortnik 1997).

Hier soll als Beispiel die Verbringung von Reststoffen in einem Steinkohlebergwerk in Ohio (USA) besonders erwähnt werden, da nach der Verbringung die BHV wiederholt untersucht wurde. Zunächst wurden nach 1-2 Jahren Kerne gewonnen. Zu dieser Zeit war das Material noch nicht erstarrt, es gab lediglich Indizien für eine Erhärtung. Nach 2-3 Jahren war das Material erhärtet (Taerakul et al. 2004, Lamminen et al. 2001). Dieses Beispiel zeigt, dass die Prozesse des Erstarrens und Erhärtens je nach Eigenschaften der Materialien auch einen längeren Zeitraum benötigen können. Die wenigen Untersuchungen in den NRW-Bergwerken weisen deutlich kürzere Zeiten auf. Im Ergebnis findet aber auch in dem in USA untersuchten Bergwerk auf der Skala der BHV eine Erhärtung statt.

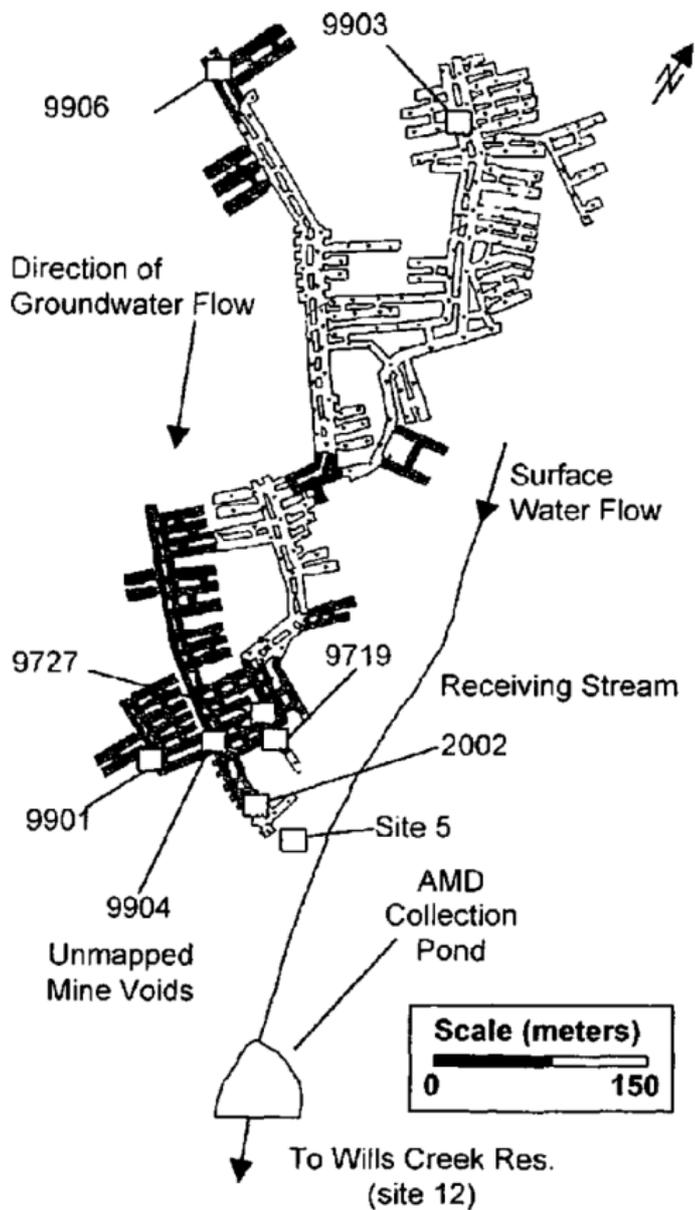


Abb. 25: Lage der Reststoffe in einem Steinkohlenbergwerk in Ohio, USA (Lamminen et al. 2001)

Neben den Praxisbeispielen und Erfahrungen anderer Reststoffverbringungen nach unter Tage gibt es grundlegende Literatur zum Verhalten von Zement und zementähnlichen Stoffen beim Aushärten. So gibt es Studien, die zeigen, dass sich die Aushärtung von Zement durch die Zugabe von HMVA verzögern kann, das Gemisch aber durch die sich bildenden Gipsphasen eine hohe Festigkeit erreicht (Ubbríaco und Calabrese 1998). Eine Steuerung des Erstarrungsprozesses durch Zugabe von Verbrennungsaschen ist möglich. Generell hängen die Dauer des Aushärtens und die Festigkeit des entstehenden Betonsteins von den sich bildenden Mineralphasen ab (Abb. 26 und 27).

Die Abbildungen 26 und 27 zeigen diese Entwicklung beispielhaft von der ersten Bildung von CSH-Phasen nach drei Stunden bis hin zum festen Mineralgefüge nach 28 Tagen mit modernen Untersuchungsmethoden, wie dem Environmental Scanning Electron Microscope. Mit zunehmendem Kristallwachstum schließen sich Poren und die Permeabilität sinkt. Gleichzeitig steigt die Festigkeit des entstehenden festen Erstarungskörpers. Das passiert bei der BHV vergleichbar in den entstandenen Bruchhohlräumen im Verbruchbereich und damit stabilisiert die „anthropogene Kluffüllung“ das Gefüge ähnlich einer natürlichen Quarzader im „natürlichen“ Gestein.

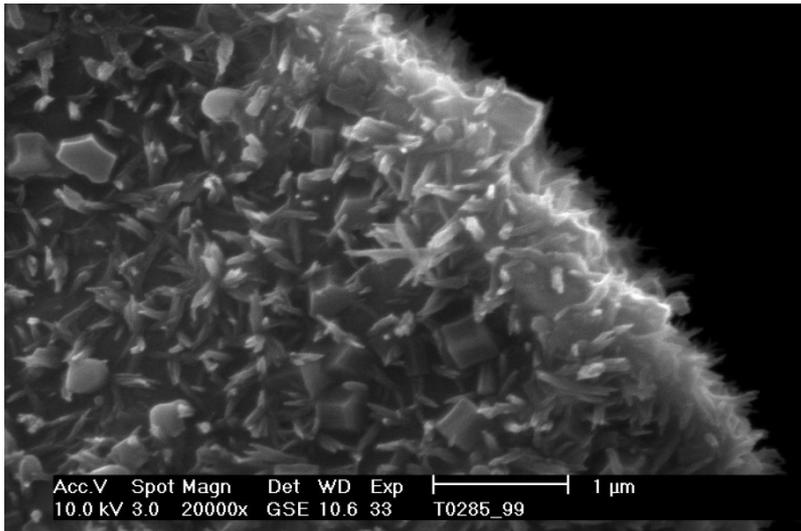


Abb. 26: ESEM-Aufnahme (Environmental Scanning Electron Microscope) von Zementstein nach 3 Stunden Hydratation (Erstarren)
Sichtbar sind erste nadelige CSH-Primärkristallite und noch kurzstengelige prismatische Ettringitkristalle (VDZ 2002).

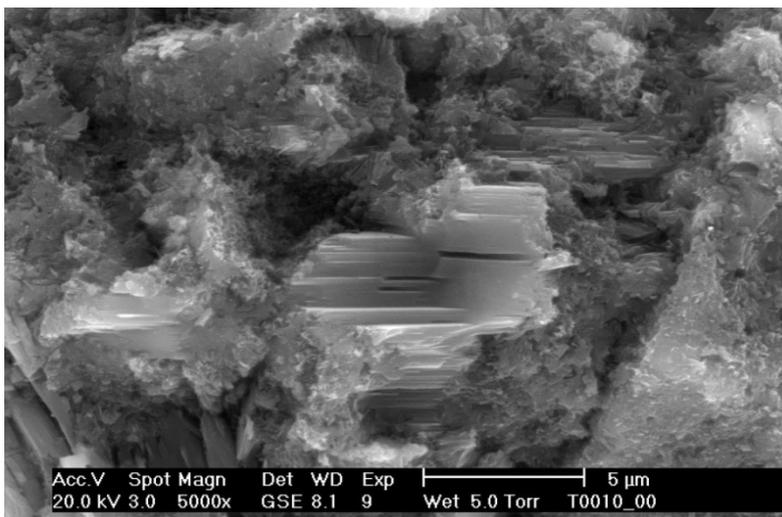


Abb. 27: ESEM-Aufnahme (Environmental Scanning Electron Microscope) von Zementstein nach 28 Tagen Hydratation (Erhärten)
Sichtbar sind jetzt das dichte CSH-Gefüge und bankige Calciumhydroxidkristalle (VDZ 2002).

In der Zementindustrie wird aufgrund der positiven Eigenschaften von Verbrennungaschen auf den Abbindungsprozess gezielt mit Aschenzugabe gearbeitet. So zeigt sich in Abbildung 28, dass sich Poren ohne Verbindung zu anderen Poren bilden (dead end poren), wodurch eine Durchströmung des Materials nicht mehr möglich ist. Zudem können Kristalle der neu gebildeten CSH-Phasen in diese Hohlräume hineinwachsen und so zur Verfestigung des Materials beitragen. (Yu 2015; Fu et al. 2002).

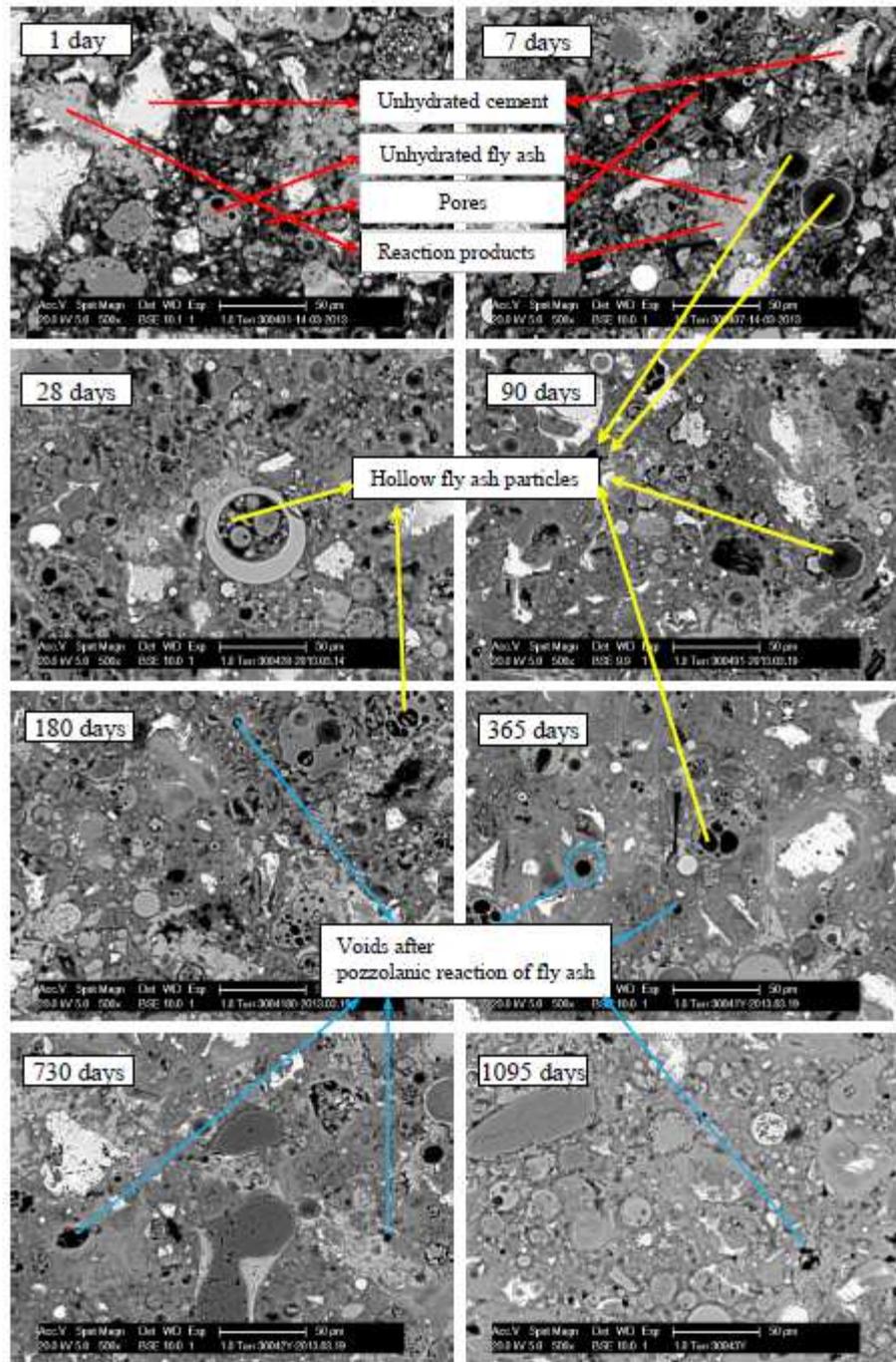


Abb. 28: Mikroskopische Aufnahmen des Porenraumes mit CSH-Phasen, die den Porenraum verschließen (Yu 2015)

Dieser zusätzliche Platz für Kristallwachstum von Ettringit und Calciumhydroxid erhöht die Festigkeit und die geringere Permeabilität sorgt dafür, dass keine Fluidströmung im Porenraum diesen Prozess stört (Fu et al. 2002).

5.8 Zusammenfassende Bewertung und Diskussion der Ergebnisse

Im Bergwerk Hausw Aden / Monopol wurden ca. 170.000 t bergbaufremdes Versatzmaterial verbracht. Dies sind HMVA und Schlämme aus der Abwasseraufbereitung bei der Rauchgasentschwefelung (RAA-Schlämme). Es handelt sich also nicht um REA-Gips, auch wenn das Hauptmineral auch der RAA-Schlämme Gips ist. Andere Versatzstoffe, wie Kraftwerksfilterstäube und Flotationsberge sind in diesem Bergwerk von sehr geringer Bedeutung.

Das Schwermetallinventar für die erste Bauhöhe Gb2 ist für den Zeitraum 07/93 – 01/94 vollständig dokumentiert. Ab April 1994 wurden an den zu verbringenden Versatzmaterialien für die Bauhöhe Gb2 ebenso wie für die weiteren vier Bauhöhen (Gb1, Gb16, Gb17 und Gb31) Feststoffanalysen nur noch auf Blei, Cadmium und Zink durchgeführt, die bei der Bauhöhe Gb2 fast 80 % der untersuchten Stoffe ausgemacht haben. Die Eluate der zu verbringenden Versatzstoffe wurden durchgehend auf alle Schwermetalle untersucht (S4-Schüttelversuche). Mit den HMVA wurden rund 1.700 t der genannten drei Schwermetalle in Haus Aden / Monopol verbracht.

In Bezug auf die chemische Zusammensetzung der RAA-Schlämme gibt es ein Defizit an Analysenergebnissen. Bei den RAA-Schlämmen handelt es sich um Gipsschlämme und verunreinigte Gipsschlämme. Die Recherche nach dem Schwermetallinventar ist noch nicht abgeschlossen.

Zur damaligen Zeit wurden nach Angabe der Abschlussberichte Rückstellproben genommen, die heute nicht mehr vorhanden sind. Die eingestellten Rezepturen für die Verbringung in die Bauhöhen wurden durch Prüfkörper auf ihre Viskosität überprüft.

Zum Zustand der Versatzstoffe, insbesondere ihre Verteilung im Bruchhaufwerk und ihr Aggregatzustand, sind im BW Haus Aden / Monopol keine direkten Untersuchungen durchgeführt worden. Daher wurden Ergebnisse aus aufgetretenen Störfällen, Laborversuchen, aus der materialwissenschaftlichen Literatur und Untersuchungen zum Aggregatzustand in anderen Bergwerken ausgewertet.

- Die ausgewerteten Störfälle zeigen, dass die verbrachten Reststoffe sich nicht entmischt haben und die Störfälle eingetreten sind, weil die Reststoffe bereits „zu steif“ waren.
- Alle den Gutachtern bekannten internationalen Untersuchungen zu dem Thema zeigen eine Erhärtung.
- Beim Erhärten erfolgt ein Kristallwachstum, das die Durchlässigkeit erheblich verringert (dead end Poren).
- Die Überprüfung von Thiehofe (1991) im BW Walsum (Auffahren einer Erkundungsstrecke in die BHV im Sprengvortrieb) zeigt eindeutig eine Erhärtung. Bei einer in Wilke & Dartsch (1995) beschriebenen Bohrung in den nachversetzten Bruchhohlraum in Walsum wurde vermutlich kein Reststoff angetroffen.

- Es gibt keine Indizien, die ein „Nicht-Erhärten“ nahelegen würden.
- Die thermodynamischen Modellierungen und die damaligen hydrochemischen Untersuchungen zeigen die Bildung von „Zementmineralien“ und einen hohen pH-Wert.

Ein Auftreten von Überschusswasser ist unwahrscheinlich und wurde bei der Verbringung auch nie beschrieben. Die verschiedenen, verbrachten HMVA-RAA-Mischungen haben entsprechend unterschiedliche Wasseransprüche. Viskosität und Abbindeverhalten wurden vor Verbringung in Standardversuchen (Rohrviskosimeter und Ausbreitmaß) überprüft, da Überschusswasser die Transporteigenschaften der Suspensionen ungünstig verändert (Sedimentation) und das Risiko von Betriebsstörungen steigert.

Moderne Untersuchungsverfahren belegen das Wachstum neugebildeter Minerale beim Abbindevorgang und das Verschließen des Porenraumes, die mit der Bildung von „dead end“ Poren einhergeht. Dadurch wird auch die Auflösung der gut wasserlöslichen Salze, die im Versatzmaterial enthalten sind, behindert, wenn die BHV mit Tiefengrundwasser oder einem ansteigenden Grubenwasser in Kontakt kommt. Erst mit einer längerfristigen Umkristallisation (siehe Detailbericht 4) werden auch diese Salze an- und aufgelöst.

In der hydrochemischen Modellierung (s. Detailbericht 4) erfolgte eine sehr schnelle Lösung der Salze im Kontakt mit einem Tiefen- oder Grubenwasser, da diese mikroskaligen Strukturen nicht berücksichtigt werden. Dies bedeutet die Betrachtung der BHV unter ungünstigen Bedingungen als - bezogen auf diesen Aspekt – „worst case“ Untersuchung.

6 Nebengesteine

Die Nebengesteine der mit Reststoffen verfüllten Bruchhohlräume spielen eine essenzielle Rolle, wenn es um den Verbleib der Schadstoffe in diesem Bereich geht. Eine mögliche Freisetzung wird zum Beispiel durch eine hohe Plastizität, ein hohes Sorptionsvermögen und eine geringe Durchlässigkeit der umgebenden Gesteine deutlich verzögert.

6.1 Datenerfassung und Literaturrecherche

Es wurden die folgenden Gutachten hinsichtlich Zusammensetzung der Nebengesteine ausgewertet:

- Machbarkeitsstudie von Jäger et al. (1990),
- Dissertation von Klinger (1994),
- Dissertation von Paas (1997),
- GRS-Bericht (Baltes, 1998).

6.2 Art der Nebengesteine

Charakteristisch für die zyklische Gliederung (Zyklothema) der flözführenden Schichten des Oberkarbons sind **Wurzelböden**, die aus mehr oder weniger durchwurzelten Ton- bis Siltsteinen aufgebaut sind und eine Mächtigkeit von bis zu 1,5 m erreichen. Sie bilden meist das Liegende der Kohlenflöze, die inkohlte, durch Anstieg des Grundwasserspiegels gebildete Torfablagerungen darstellen (Roeschmann, 1962). Wurzelböden stellen lediglich einen geringen Anteil an der Gesamtmächtigkeit dar.

Die meisten bekannten **Kohlenflöze** besitzen eine Mächtigkeit von weniger als 50 cm. Wenige werden über 2 m mächtig und erreichen in Einzelfällen Mächtigkeiten von bis zu 4 m. Etwa 75 Flöze gelten als abbauwürdig. Die Flöze sind nicht homogen aufgebaut, sondern bestehen entsprechend ihres Inkohlungsgrades aus Abschnitten unterschiedlicher Mineral-Zusammensetzung. Die höchsten Flözdichten bei gleichzeitig dominierender feinklastischer Sedimentation treten in den Bochumer und Essener Schichten auf.

Die Flöze werden von überwiegend feinkörnigen Sedimenten überlagert, die unter lagunären Sedimentationsbedingungen zur Ablagerung gelangten (Holl & Schaefer, 1992). Im Steinkohlenbergbau werden diese in wechselnden Anteilen tonig-siltigen bis feinsandigen Ablagerungen unter dem Begriff **Schieferton** zusammengefasst, wobei reine Tonsteine selten sind. In dieser dominierenden Lithofazies der kohleführenden Schichten des Oberkarbons dominieren Mineralkörner der Siltfraktion. Eine tektonische Schieferung tritt nicht auf. Der Ausdruck beschreibt den Zerfall der Gesteine entlang von Schichtflächen. Der Anteil an der Schichtmächtigkeit beträgt von den Sprockhöveler bis zu den Essener Schichten über 60% und von den Horster bis zu den Dorstener Schichten etwa 50%.

Die Schiefertone werden in "coarsening upward"-Sequenzen von **Sandsteinen** überlagert. Diese werden von Holl & Schaefer (1992) als Deltafrontsandsteine interpretiert, die in ein limnisch-fluviatiles Milieu überleiten. Häufig treten auch konglomeratische Bereiche auf. In den Sandsteinen sind als Aufarbeitungshorizonte vielfach Pflanzenhäckselschichten und kohlige Horizonte eingelagert. Die Gesteine kommen in lateraler Ausdehnung und mit stark wechselnden Mächtigkeiten im gesamten Ruhrkarbon vor. Sandsteinpakete mit Mächtigkeiten von über 20 m finden sich überwiegend in den Sprockhöveler, Wittener, Horster und höheren Dorstener Schichten (Hahne & Schmidt, 1982). Der Anteil der Sandsteine an der Gesamtmächtigkeit wechselt in den verschiedenen Schichtstufen. Die sogenannten Bochumer und Essener Schichten sind überwiegend schiefrig (Sandsteinanteil ca. 25% (Jäger et al. 1990)), während in den älteren Sprockhöveler und Wittener Schichten sowie in jüngeren Abfolgen (Horster und Dorstener Schichten) Sandsteine etwas häufiger eingelagert sind (Sandsteinanteil ca. 50% (Jäger et al. 1990)).

Karbonatische Tone (**Toneisensteine**) stellen bankweise oder in Form von Konkretionen schichtweise auftretende diagenetische Neubildungen von mehr oder weniger durch Ton verunreinigten Karbonaten dar, welche in untergeordneter Verbreitung auftreten (Jäger et al., 1990).

Die Nebengesteine der Kohle im Ruhrkarbon setzen sich nach Jäger et al. (1990) entsprechend mit abnehmender Häufigkeit wie folgt zusammen:

- Tonsteine (± siltig-feinsandige Tonsteine (Schieferon-Sandschieferon))
- Silt-Sandsteine
- Sandsteine und Konglomerate
- ± kohlige Ton-Siltsteine (Wurzelböden)
- ± karbonatische Tone (Toneisensteine)

Die stark schwankenden vertikalen und horizontalen Verteilungen der einzelnen Gesteinsfazies machen eine Angabe des quantitativen Mineralbestandes für die einzelnen Typen schwierig. Einen repräsentativen Querschnitt durch das Liegend- und Hangendmaterial liefert das anfallende Bergematerial. So ergibt sich nach Schmidt u. Schöpel (1984) aus der Untersuchung von Waschbergen des westdeutschen Steinkohlebergbaus auch, dass Gesteine mit hohem Tonmineralanteil überwiegen, während Sandsteine mit hohem Quarz/Feldspat-Gehalt im Vergleich mengenmäßig in den Hintergrund treten.

6.3 Zusammensetzung der Nebengesteine

Nach Klinger (1994) wurde eine Abschätzung der Mineralanteile in Gew.-% in den Gesteinen des flözführenden Ruhrkarbons auf der Basis der chemischen Zusammensetzung und röntgenographischen Untersuchungen vorgenommen (Tab.22):

Tab. 22: Abschätzung der Mineralzusammensetzung nach Klinger (1994) auf Basis der chemischen Zusammensetzung und der röntgenographischen Untersuchung

Mineral	Tonstein	Flotations- berge	Siltsteine	Sandsteine	Wurzelboden	Kohle
Illit	38	37	33	13	51	0
Clorit	4	3	3	3	2	0
Kaolinit	4	5	4	7	5	6
Summe Tonminerale	46	45	40	23	58	6
Feldspat	5	3	4	10	2	0
Quarz	26	19	40	58	18	0
Pyrit	0,3	2,6	0,1	0,1	1	3
Siderit	8,3	0	5,1	5,4	0,7	0
Ankerit/ Dolomit	0	6,7	0	0	0	3
C org.	3,2	13,2	0,8	0,2	8,1	59
Summe	89	90	90	97	88	71

Tonminerale und Quarz bilden in wechselnden Anteilen die Hauptbestandteile der Gesteine. Wurzelböden weisen den höchsten und Sandsteine nach der Kohle den geringsten Tonmineralgehalt auf. Die Tonmineralgehalte sind, überwiegend in Abhängigkeit von der Illitführung, in der Reihenfolge Wurzelböden >Tonstein >Siltstein >Sandstein >Kohle verteilt. Die Karbonatgehalte der Gesteine liegen nur mit wenigen Prozentanteilen (0 - 8,3%) der Gesteinsbestandteile fast ausschließlich als Siderit vor. Der Pyrit macht meist weniger als ein Prozent aus, jedoch sind im Mittel 80% des Gesamtschwefels an Pyrit gebunden (Klinger 1994).

Wedewardt (1995) analysierte die Nebengesteine auf ihre elementaren Bestandteile (Tab. 2). Die elementare chemische Zusammensetzung spielt eine Rolle bei der Differenzierung von geogenen Schwermetallen und Schwermetallen aus den untertage verbrachten Reststoffen (Anhang 8).

7 Literatur

- AbfG (1986): Gesetz über die Vermeidung und Entsorgung von Abfällen (Abfallgesetz – AbfG). – Bundesgesetzblatt, Jahrgang 1986, Teil I, Nr. 44: 1410-1420; Bonn.
- Andac, M. & Glasser, F. P. (1999): Long-term leaching mechanisms of Portland cement-stabilized municipal solid waste fly ash in carbonated water. – *Cement and Concrete Research*, 29, 2, 2: 179–186; Amsterdam (Elsevier).
- Artelt, H. M., Greinacher, E. & Meyer, G. (1993): Schwermetall- und chloridhaltige Filterstäube. I. – Phasenanalysen und Modellversuche zum Recycling. – *Journal für praktische Chemie*, 335: 255-261; Leipzig (Johann Ambrosius Barth).
- Aubert, J. E., Husson, B. & Vaquier, A. (2004): Use of municipal solid waste incineration fly ash in concrete. – *Cement and Concrete Research*, 34: 957-963; Amsterdam (Elsevier).
- Bajželj, U.; Kortnik, J. (1997): Use of Multi-Barrier Water-Proofing System for the Construction of Underground Waste Deposits. In: *IMWA Proceedings*, S. 451-462.
- Baltes, B. (Hrsg.) (1998): Entwicklung und Anwendung analytischer Methoden zur Eignungsuntersuchung der Verbringung bergbaufremder Rückstände in dauerhaft offene Grubenräume im Festgestein. – Abschlußbericht (Hauptband) GRS-140: 150 S.; Köln (Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH).
- Baulexikon Beuth: <http://baulexikon.beuth.de/UEBERSCHUSSWASSER.HTM>=
- BBergG (1980): Bundesberggesetz (BBergG). – Stand vom 31.08.2015: 79 S.
- Birkel, B. (1997): Chemisch-mineralogische Untersuchungen an einer Müllverbrennungsflugasche. – Studienarbeit: 54 S. + Anhang; Aachen (Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen).
- Dillmann; O. O. (1998): Der Ruhrsandstein. – *Naturstein*, 53, 12: 62-67, 11 Abb.; Ulm.
- DMT (1992): Ergänzendes Bildmaterial zu Thiehofe, B. (1991): Entwicklung und Erprobung eines Verfahrens für das Einbringen feinkörniger Aufbereitungs- und Kraftwerksabgänge in untertägige Bruchhohlräume – Teilvorhaben I: Ruhrkohle Niederrhein AG, Bergwerk Walsum.
- DMT (1994): – Verfüllung des Bruchhohlraumes und anderer abgeworfener Grubenbaue mit Flugasche und anderen feinkörnigen Abfallprodukten durch hydraulische Förderung vom Tage aus. – technische forschung kohle, Bericht EUR 14907 DE: 182 S.; Luxemburg (Europäische Kommission).
- Europäische Kommission (Hg.) (1999): Optimierung des pneumatischen Transports unter besonderer Berücksichtigung der veränderten Fördereigenschaften durch den Einsatz von Reststoffen : Infrastruktur und Verwaltung des Grubenbetriebs Bericht. Infrastruktur und Verwaltung des Grubenbetriebs. Luxemburg (Technische Forschung Kohle, EUR 17961 DE), zuletzt geprüft am 04.02.2016.
- Franklin, J. A. & Dusseault, M. B. (1991): *Rock Engineering Applications*. – 251 S.; New York, NY (McGraw-Hill, Inc.) – ISBN 0-07-021889-7.

- Friedrich, H. (2013): Die Risiken und langfristigen Umweltauswirkungen des untertägigen Versatzes von gefährlichen hochtoxischen Sonderabfällen in den Bergwerken der Steinkohle von NRW. – Gutachterliche Stellungnahme: 346 S., 25 Anl..
- Fu, X., Wang, Z., Tao, W., Yang, C., Hou, W., Dong, Y. & Wu, X. (2002): Studies on blended cement with a large amount of fly ash. – *Cement and Concrete Research*, 32, 7: 1153-1159; Amsterdam (Elsevier).
- Gurba, L. W. & Ward, C. R. (2000): Elemental composition of coal macerals in relation to vitrinite reflectance, Gunnedah Basin, Australia, as determined by electron microprobe analysis.- *Int. J. Coal Geology*, 44: 127-147.
- Gutmann, R., Wieckert, C. & Vonmont, H. (1996): Verglaste Filterstäube aus Müllverbrennungsanlagen – Schmelzverfahren, Prozeßführung und chemische Analyse. – UWSF – Z. Umweltchem. Ökotox., 8, 4: 187-196; Landsberg (ecomed verlagsgesellschaft AG & Co. KG).
- Hahne, C., Schmidt, R. & Müller, W. (1982): Die Geologie des Niederrheinisch-Westfälischen Steinkohlengebirges. – 106 S.; Essen (Glückauf).
- Haus der Technik e. V. (1987): Stand der Rauchgasreinigungstechnik. – Haus der Technik-Vortragsveröffentlichungen, 538: 114 S.; Essen (Vulkan Verlag).
- Herrmann, A. G. (1991): Die Untergrund-Deponie anthropogener Abfälle in marinen Evaporiten. – *Materialien zur Umweltforschung*, 18: 121 S., Metzler-Poeschel, Stuttgart.
- Herrmann, A. G. & Röthemeyer, H. (1998): Langfristig sichere Deponien – Situation, Grundlagen, Realisierung. – 464 S., Springer, Berlin.
- Huang, S.-J., Chang, C.-Y., Mui, D. T., Chang, F.-C., Lee, M.-Y. & Wang, C.-F. (2007): Sequential extraction for evaluating the leaching behavior of selected elements in municipal solid waste incineration fly ash. – *Journal of Hazardous Materials*, 149, 1: 180-188; Amsterdam (Elsevier).
- Hußmann, J. & Klee, H. (2001): Versatz im Steinkohlenbergbau. – Abfallentsorgung im Bergbau unter Tage (1. Kolloquium zum Bergbau und Umweltschutz in Aachen), Heft 88 der Schriftenreihe der GDMB: 31-38; Clausthal-Zellerfeld (GDMB – Gesellschaft für Bergbau, Metallurgie, Rohstoff- und Umwelttechnik).
- Jäger, B., Obermann, P. & Wilke, F. L. (1990): Studie zur Eignung von Steinkohlenbergwerken im rechtsrheinischen Ruhrkohlenbezirk zur Untertageverbringung von Abfall- und Reststoffen. – „Machbarkeitsstudie“, Bd. 1-4: 795 S., 55 Zeichnungen als Anlage; Düsseldorf (im Auftrag des Landesamtes für Wasser und Abfall NRW).
- Klinger, C. & Eckart, M. (2015): Boxmodell-gestützte Prognose zu Einleitwerten am Standort Haus Aden bei Flutung der Wasserprovinz Ost. – 7 S.; Essen (DMT).
- Klinger, C. (1993): Mobilisationsverhalten von anorganischen Schadstoffen in der Umgebung von untertägigen Versatzbereichen am Beispiel von Reststoffen aus Müllverbrennungsanlagen im Steinkohlengebirge des Ruhrkarbons. – Dissertation: 170 S., 78 Abb., 40 Tab.; Bonn (Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn).

zeitgleich erschienen in:

- Klinger, C. (1994): Mobilisationsverhalten von anorganischen Schadstoffen in der Umgebung von untertägigen Versatzbereichen am Beispiel von Reststoffen aus Müllverbrennungsanlagen im Steinkohlengebirge des Ruhrkarbons. – DMT-Berichte aus Forschung und Entwicklung, 23: 170 S., 78 Abb., 40 Tab.; Bochum (DMT).
- Knissel; W. (1991): Die Nutzung von Grubenräumen für den Umweltschutz. – Glückauf, 127, 15/16: 692-698; Essen (VGE Verlag).
- Kortnik, J. (2003): Backfilling waste material composites environmental impact assessment. – The Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, July/August 2003: 391-396; Johannesburg (SAIMM – South African Institute of Mining and Metallurgy).
- Lamminen, M., Wood, J., Walker, H., Chin, Y.-P., He, Y. & Traina, S. J. (2001): Effect of Flue Gas Desulfurization (FGD) By-Product on Water Quality at an Underground Coal Mine. – Journal of Environmental Quality, 30, 4: 1371-1381; Madison (ACSESS – Alliance of Crop, Soil, and Environmental Science Societies).
- Landesamt für Wasser und Abfall (1991): Studie zur Eignung von Steinkohlenbergwerken im rechtsrheinischen Ruhrkohlenbezirk zur Untertageverbringung von Abfall- und Reststoffen – Kurzfassung. – LWA Materialien Nr. 2/91: 73 S.; Düsseldorf (Landesamt für Wasser und Abfall NRW).
- Lima, A. T., Ottosen, L. M., Pedersen, A. J. & Ribeiro, A. B. (2008): Characterization of fly ash from bio and municipal waste. – Biomass and Bioenergy, 32: 277-282; Amsterdam (Elsevier).
- Lin, K.-L. (2005): The influence of municipal solid waste incinerator fly ash slag blended in cement pastes. – Cement and Concrete Research, 35(5): 979-986.
- Manning, D. A. C. & Hutcheon, I. E. (2004): Distribution and mineralogical controls on ammonium in deep groundwaters.- Appl. Geochemistry, 19(9): 1495-1503.
- Mez, W., Krämer, U., Hollinderbäumer, E., Rinnerberger, B. & Schauenburg, W. (1999): Verfüllung des Bruchhohlraumes und anderer abgeworfener Grubenbaue mit Flugasche und anderen feinkörnigen Abfallprodukten durch hydraulische Förderung vom Tage aus. – technische forschung kohle, Abschlußbericht EUR 17955 DE: 118 S.; Luxemburg (Europäische Kommission).
- Michel, G. (1964): Betrachtungen zur Hydrochemie des tiefen Grundwassers im Ruhrgebiet. – Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft, 116: 161-166; Hannover (Deutsche Geologische Gesellschaft).
- Michel, G. (1983): Die Sole des Münsterländer Kreide-Beckens.-N. Jb. Geol. Paläont. Abh., 166: 139-159; Stuttgart.
- Michel, G. (1997): Mineralwässer und Thermalwässer, Allgemeine Balneogeologie. Lehrbuch der Hydrogeologie, 7.- XI + 398 S.: Berlin (Borntraeger).

- Öko-Institut e.V. (Hrsg.), Dehoust, G., Küppers, P., Neles, J., Schüler, D. & Schmidt, G. (2007): Methodenentwicklung für die ökologische Bewertung der Entsorgung gefährlicher Abfälle unter und über Tage und Anwendung auf ausgewählte Abfälle. – Forschungsvorhaben: 428 S.; Darmstadt (Öko-Institut e.V.).
- Paas, N. (1997): Untersuchungen zur Ermittlung der geochemischen Barriere von Gesteinen aus dem Umfeld untertägiger Versatzräume im Steinkohlenbergbau des Ruhrkarbons. – Dissertation: 234 S., 105 Abb., 43 Tab.; Bonn (Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn).
- zeitgleich erschienen in:
- Paas, N. (1997): Untersuchungen zur Ermittlung der geochemischen Barriere von Gesteinen aus dem Umfeld untertägiger Versatzräume im Steinkohlenbergbau des Ruhrkarbons. – DMT-Berichte aus Forschung und Entwicklung, 54: 234 S., 105 Abb., 43 Tab.; Bochum (DMT).
- Patent (1992): Verfahren und Einrichtung zum Versetzen der Hohlräume von Grubenbauen (1992). Angemeldet durch Ruhrkohle Montalith GmbH am 06.03.1992. Anmeldenr: DE19924207182. Veröffentlichungsnr: DE 4207182 A1.
- Puchelt, H. (1964): Zur Geochemie des Grubenwassers im Ruhrgebiet. – Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft, 116: 167-203; Hannover (Deutsche Geologische Gesellschaft).
- RAG (1993-1998): Sachstandsberichte zu BW Haus Aden/Monopol - Bruchhohlraumverfüllung. – (unveröffentl.); Herne (Ruhrkohle Bergbau AG).
- RAG (1995-1998): Quartals- und Abschlussberichte zu den Abbaubetrieben Grimberg 1, 2, 16, 17 und 31, BW Haus Aden Monopol. – (unveröffentl.); Herne (Ruhrkohle Bergbau AG).
- Remond, S., Pimienta, P. & Bentz, D. P. (2002): Effects of the incorporation of Municipal Solid Waste Incineration fly ash in cement pastes and mortars I. Experimental study. – Cement and Concrete Research, 32: 303-311; Amsterdam (Elsevier).
- Roeschmann, G. (1992): Die Entstehung der Wurzelböden und kaolinischen Kohlen-tonsteine des Ruhrkarbons, - Fortschritte in der Geologie von Rheinland und Westfalen, Bd. 3: 497-524, Geologisches Landesamt Nordrhein-Westfalen, Krefeld.
- Ruhrkohle Montalith GmbH (1992): Verfahren und Einrichtung zum Versetzen der Hohlräume von Grubenbauen. – Patentanmeldung, Nr: DE19924207182.
- Schlumberger, S. & Bühler, J. (2013): Metallrückgewinnung aus Filterstäuben der thermischen Abfallbehandlung nach dem FLUREC-Verfahren. – Abfallverbrennung und Metallurgie: 377-396.
- Schmidt, R. & Schöpel, M. (1984): Die Abgänge des Steinkohlenbergbaus. Verwitterungs- und Lösungsvorgänge im Bergematerial, dargestellt an Lysimeteruntersuchungen. – Mitt. Westf. Berggewerkschaftskasse, 54: 338 S.; Bochum.

- Shehata, M. H., Thomas, M. D. A. & Bleszynski, R. F. (1999): The effects of fly ash composition on the chemistry of pore solution in hydrated cement pastes. - Cement and Concrete Research, 29: 1915-1920.
- Spickernagel (1988) → aus Machbarkeitsstudie (dort kein Literaturverzeichnis hinterlegt)
- Steinkohlenbergbauverein Essen (1988): Verfüllung des Bruchhohlraumes und anderer abgeworfener Grubenbaue mit Flugasche und anderen feinkörnigen Abfallprodukten durch hydraulische Förderung vom Tage aus. – technische forschung kohle, Bericht EUR 11721 DE: 108 S.; Luxemburg (Kommission der Europäischen Gemeinschaften).
- Taerakul, P., Lamminen, M., He, Y., Walker, H. Y., Traina, S. J. & Whitlatch, E. (2004): Long-Term Behavior of Fixated Flue Gas Desulfurization Material Grout in Mine Drainage Environments. – Journal of Environmental Engineering, Vol. 130, No. 7: 816-823; Reston, VA (ASCE – American Society of Engineers).
- Thein, J. (1996): Gutachterliche Stellungnahme zum Gutachten von Dipl. Geol. Zimmer bezüglich der Reststoffverbringung in den Baufeldern E3 und E4 des Bergwerkes Haus Aden/Monopol. - Rheinische Friedrich-Wilhelms Universität Bonn, -S., Bonn.
- Thein, J. & Klingel, R. (1994): Gutachtliche Stellungnahme zur Einhaltung der Anforderungsbedingungen f. d. Prinzip des vollst. Einschlusses bei der gepl. Verbring. von Reststoffen in die Abbaue von Flöz Grimberg 2/3 im Baufeld E 1 der Bergwerkes Haus Aden/Monopol, Betriebsbereich Monopol, der Ruhrkohle AG. – Rheinische Friedrich-Wilhelms Universität Bonn, -11S., Bonn.
- Thein, J. & Klingel, R. (1993): Gutachtlicher Stellungnahme zur Übertragbarkeit der geologischen und hydrogeologischen Randbedingungen der "Studie zur Eignung von Steinkohlenbergwerken im rechtsrheinischen Ruhrkohlebezirk zur Untertageverbringung von Abfall und Reststoffen" (Machbarkeitsstudie) für die grundwasser- verträgliche Verbringung von Reststoffen auf den linksrheinischen Teil des Abbau- feldes "Walsumer Horst-Altfeld" des Bergwerkes Walsum der Ruhrkohle AG. – Rheinische Friedrich-Wilhelms Universität Bonn, -11S., Bonn.
- Thiehofe, B. (1991): Entwicklung und Erprobung eines Verfahrens für das Einbringen feinkörniger Aufbereitungs- und Kraftwerksabgänge in untertägige Bruchhohlräume – Teilvorhaben I: Ruhrkohle Niederrhein AG, Bergwerk Walsum. – Forschungsbericht 0326416 B, Energieforschung und Energietechnologien: 96 S.; Bonn (Bundesministerium für Forschung und Technologie).
- Traber, D., Jacobs, F., Mäder, U. & Eggenberger, U. (2000): Einsatz von Sekundärstoffen im Beton - technische und ökologische Anforderungen. – Betonwerk und Fertigteil-Technik: 1-15.
- Turekian, K.K. & Wedepohl, K.H. (1961). Distribution of the elements in some major units of the earth's crust.- Geological Society of America, Bulletin 72: 175-192; Washington.
- Ubbriaco, P. & Calabrese, D. (1998): Solidification and stabilization of cement paste containing fly ash from municipal solid waste. – Thermochemica Acta, 321: 143-150; Amsterdam (Elsevier).

- US EPA (1981): Chemical speciation of flue gas desulfurization sludge constituents. – 334 S.; Cincinnati, OH (US Environmental Protection Agency).
- van der Sloot, H. A., Kosson, D. S. & Hjelmar, O. (2001): Characteristics, treatment and utilization of residues from municipal waste incineration. – Waste Management, 21, 8: 753-765; Amsterdam (Elsevier).
- van Herck, P., van der Bruggen, B., Vogels, G. & Vandecasteele, C. (2000): Application of computer modelling to predict the leaching behaviour of heavy metals from MSWI fly ash and comparison with a sequential extraction method – Waste Management, 20: 203-210; Amsterdam (Elsevier).
- Verein Deutscher Zementwerke e.V (VDZ). (2002): Zement-Taschenbuch. – 792 S., Verlag Bau + Techni GmbH, Düsseldorf.
- VGB Technische Vereinigung der Großkraftwerksbetreiber (Hg.) (1997): Bau und Betrieb von Aufbereitungsanlagen für REA-Produkte. – VGB-Richtlinie, 2: 146 S., Verlag technisch-wissenschaftlicher Schriften, Essen.
- Wan, X., Wang, W., Ye, T., Guo, Y. & Gao, X. (2006): A study on the chemical and mineralogical characterization of MSWI fly ash using a sequential extraction procedure. – Journal of Hazardous Materials, 134, 1-3: 197-201; Amsterdam (Elsevier).
- Wedewardt, M. (1995): Hydrochemie und Genese der Tiefenwässer im Ruhr-Revier. – Dissertation: 250 S., 60 Abb., 10 Tab, 2 Anl.; Bonn (Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn).
- zeitgleich erschienen in:
- Wedewardt, M. (1995): Hydrochemie und Genese der Tiefengewässer im Ruhr Revier. – DMT-Berichte aus Forschung und Entwicklung, 39: 250 S., 60 Abb., 10 Tab, 2 Anl.; Bochum (DMT).
- Wilke, F. L. & Dartsch, B. (1995): Endbericht über die Koordinierung und wissenschaftliche Begleitung des „Qualitätssicherungsprogrammes zur Verifizierung des in der Machbarkeitsstudie formulierten vollständigen Einschlusses der in den Bruchhohlraum eingebrachten Reststoffe“. – Bericht im Auftrag der Ruhrkohle Montalith GmbH: 87 S.; Berlin (Institut für Bergbauwissenschaften, Technische Universität Berlin).
- Wilke, F. L. & Skrzyppek, J. (1993): Wissenschaftliche Begutachtung und labortechnische Untersuchungen zum technischen Großversuch – „Verbringung von MVA-Reststoffen als hydraulischer Nachversatz auf der Schachanlage Consolidation“. – Bericht im Auftrag der Ruhrkohle Montalith GmbH: 36 S., 2 Anl.; Berlin (Institut für Bergbauwissenschaften, Technische Universität Berlin).
- Wilke, F. L. (1991): Untertageverbringung von Sonderabfällen in Stein- und Braunkohleformationen. – Materialien zur Umweltforschung, 19: 114 S., Metzler-Poeschel, Stuttgart.

Yu, Z. (2015): Microstructure Development and Transport Properties of Portland Cement-fly Ash Binary Systems – in view of service life predictions. – PhD-Thesis: 182 S.; Delft (Technische Universität Delft).

Weiterführende Literatur

Abanades, S., Flamant, G., Gagnepain, B. & Gauthier, D. (2002): Fate of heavy metals during municipal solid waste incineration. – *Waste Management & Research*, 20, 1: 55-68; Wien (ISWA – International Solid Waste Association).

BBodSchV (1999): Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV). – Stand vom 31.08.2015: 34 S..

Bedbur, E. (1993): Die Grenzen der Anwendungsmöglichkeiten der FREUNDLICH-Adsorptions-Konstanten K_{Fr} und N zur Beschreibung der Chemikaliensorption. – *Meyniana*, 45: 1-8; Kiel.

Benjamin, M. M. & Leckie, J. O. (1981): Multiple-Site Adsorption of Cd, Cu, Zn and Pb on amorphous iron oxyhydroxide. – *Journal of Colloid and Interface Science*, 79: 209-221; San Diego, CA.

Browning, E. (1969): Toxicity of industrial metals. – 2nd Ed.: 383 S.; London (Butterworths).

Christensen, T. H. (1987): Cadmium soil sorption at low concentrations: VI. A model for zinc competition. – *Water, Air, and Soil Pollution*, 34: 305-314.

Crannell, Bradley S.; Eighmy, T.Taylor; Krzanowski, James E.; Eusden, J.Dykstra; Shaw, Elisabeth L.; Francis, Carl A. (2000): Heavy metal stabilization in municipal solid waste combustion bottom ash using soluble phosphate. In: *Waste Management* 20 (2-3), S. 135-148. DOI: 10.1016/S0956-053X(99)00312-8.

Davis, J. A. & Leckie, J. O. (1978): Surface ionization and complexation at the oxide/water interfaces: 3. Adsorption of anions. – *J. Coll. Interf. Sci.*, 74: 32-43; San Diego, CA.

DIN 38414-4 (1984): Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung. Schlamm und Sedimente (Gruppe S): Bestimmung der Eluierbarkeit mit Wasser (S4). – 12 S.; Berlin (Beuth).

Godt, J., Scheidig, F., Grosse-Siestrup, C., Esche, V., Brandenburg, P., Reich, A. & Groneberg, D. A. (2006): The toxicity of cadmium and resulting hazards for human health. – *Journal of Occupational Medicine and Toxicology*, 1, 22: 6 S.; London (BioMed Central).

Johnson, C. A., Kaeppli, M., Brandenberger, S., Ulrich, A. & Baumann, W. (1999): Hydrological and geochemical factors affecting leachate composition in municipal solid waste incinerator bottom ash – Part II. The geochemistry of leachate from Landfill Lostorf, Switzerland. – *Journal of Contaminant Hydrology*, 40: 239-259; Amsterdam (Elsevier).

- Kida, A., Noma, Y. & Imada, T. (1996): Chemical speciation and leaching properties of elements in municipal incinerator ashes. – *Waste Management*, 16, 5/6: 527-536; Amsterdam (Elsevier).
- Kirby, C. S.; Rimstidt, J. D. (1994): Interaction of municipal solid waste ash with water. In: *Environmental Science & Technology* 28 (3), S. 443–451. DOI: 10.1021/es00052a016.
- Kirby, C. S.; Rimstidt, J. D. (1993): Mineralogy and Surface Properties of Municipal Solid Waste Ash. In: *Environmental Science & Technology* (27), S. 652–660.
- Kottke, Bernd (2008): Sickerwasserprognose für den Baustoff Stahlwerksschlacke zur Abschätzung der potentiellen Grundwasserkontamination. – Dissertation: 196 S.; Bochum (Fakultät für Geowissenschaften, Ruhr-Universität Bochum).
- Länderausschuss Bergbau (2006): Technische Regeln für den Einsatz von Abfällen als Versatz. – 21 S..
- LAWA (Hrsg.) (2004): Ableiten von Geringfügigkeitsschwellen für das Grundwasser. – 33 S.; Düsseldorf (Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA)).
- Martin, H. W.; Kaplan, D. I. (1996): Temporal Changes in Cadmium, Thallium, and Vanadium Mobility in Soil and Phytoavailability under Field Conditions.- *Water, Air and Soil Pollution*, 101: 399-410.
- McBride, M. B. (1999): Chemisorption and precipitation reactions. – *Handbook of Soil Science* (ed. M. E. Summer): B/265-B302; Boca Raton, FL (CRC Press).
- Michel, G. (1965): Zur Mineralisation des tiefen Grundwassers in Nordrhein-Westfalen, Deutschland. – *Journal of Hydrology*, 3: 73-87; Amsterdam (North-Holland Publishing Co.).
- Navarro-Pedreno, J.; Almendro-Candel, M. B.; Jordán-Vidal, M. M.; Mataix-Solera, J.; García-Sánchez, E. (2003): Mobility of cadmium, chromium, and nickel through the profile of a calcisol treated with sewage sludge in the southeast of Spain. In: *Environmental Geology* 44 (5), S. 545-553. DOI: 10.1007/s00254-003-0790-5.
- Oberverwaltungsbericht NRW (1997): Beschluss vom 18.07.1997 in dem verwaltungsgerichtlichen Verfahren des Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland, Landesverband Nordrhein-Westfalen e.V. gegen das Bergamt Kamen.
- Saar, R. A.; Weber, J. H. (1980): Lead(II)-Fulvic Acid Complexes. Conditional Stability Constants, Solubility, and Implications for Lead(II) Mobility. – *Environmental Science & Technology*, 14, 7: 877-880; Washington, D.C. (American Chemical Society).
- Salt, D. E., Prince, R. C., Pickering, I. J. & Raskin, I. (1995): Mechanisms of Cadmium Mobility and Accumulation in Indian Mustard. – *Plant Physiol.*, 109: 1427-1433; Rockville, MD (American Society of Plant Biologists).

- Sandifer, Richard D.; Hopkin, Stephen P. (1996): Effects of pH on the toxicity of cadmium, copper, lead and zinc to *Folsomia candida* Willem, 1902 (Collembola) in a standard laboratory test system. In: *Chemosphere* 33 (12), S. 2475-2486. DOI: 10.1016/S0045-6535(96)00348-7.
- Serclérat, I., Moszkowicz, P. & Pollet, B. (2000): Retention mechanisms in mortars of the trace metals contained in Portland cement clinkers. – *Waste Management*, 20: 259-264; Amsterdam (Elsevier).
- Tan, L. C., Choa, V. & Tay, J. H. (1997): The influence of pH on mobility of heavy metals from municipal solid waste incinerator fly ash. – *Environmental Monitoring and Assessment*, 44: 275-284.
- Thein, J., Veerhoff, M. & Klinger, C. (1997): Geochemische Barrieren bei Versatzbergwerken im Fels. – In: Matschullat, J., Tobschall, H. J. & Voigt, H.-J. [Hrsg.]: *Geochemie und Umwelt*: 227-243; Berlin (Springer).
- Thein, J. & Veerhoff, M. (2001): Langzeitsicherer Versatz mit bergbaufremden Abfällen im Festgestein. – *Abfallentsorgung im Bergbau unter Tage* (1. Kolloquium zum Bergbau und Umweltschutz in Aachen), Heft 88 der Schriftenreihe der GDMB: 171-191; Clausthal-Zellerfeld (GDMB – Gesellschaft für Bergbau, Metallurgie, Rohstoff- und Umwelttechnik).
- Umweltbundesamt (UBA) 2013: *Wasserwirtschaft in Deutschland – Teil 2: Gewässergüte*. – 116 S.; Bonn (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit).
- Umweltbundesamt (UBA) 2015: *Nationale Trendtabelle für die Berichterstattung atmosphärischer Emissionen (Schwermetalle) 1990-2013*. – Excel-Sammelmappe, Entstand vom 03.02.2015; Dessau (Umweltbundesamt). https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/dokumente/emissionsentwicklung_1990_-_2013_fuer_schwermetalle.xlsx, Zitationsdatum: 19.07.2016.
- VDEW-VGB-Gemeinschaftsausschuß „Reststoffe und Abfälle“ (1990): *Verwertungskonzept für Reststoffe aus Kohlekraftwerken (ergänzt durch Öl-, Gas-, Kern- und Wasserkraftwerke) – Teil III: Rückstände aus der Wasser- und Abwasseraufbereitung*. – *VGB Kraftwerkstechnik* 70, Heft 12: 1033-1040; Essen (VGB).
- Veerhoff, M. & Kemski, J.(1997): *Barrieren im Umfeld von Versatzbereichen im Ruhrkarbon. – Studie unter Berücksichtigung der Ergebnisse aus dem FuE-Vorhaben „Entwicklung und Anwendung analytischer Methoden zur Eignungsuntersuchung der Verbringung bergbaufremder Rückstände in dauerhaft offene Grubenräume im Festgestein“ im Auftrag der Ruhrkohle Montalith GmbH: 23 S.; Bonn (Kemski, Klingel & Veerhoff – Partnerschaft beratender Geologen).*
- Verein Deutscher Zementwerke (VDZ) (Hrsg.) (2002): *Zement-Taschenbuch 2002*. – 844 S.; Düsseldorf (Verlag Bau+Technik GmbH) – ISBN 3-7640-427-4.
- Vig, K., Megharaj, M., Sethunathan, N. & Naidu, R. (2003): Bioavailability and toxicity of cadmium to microorganisms and their activities in soil: a review. – *Advances in Environmental Research*, 8, 1: 121-135; Amsterdam (Elsevier).

- Voegelin, A., Vulava, V. M. & Kretzschmar, R. (2001): reaction-based model describing sorption and transport of Cd, Zn, and Ni in an acidic soil. – *Environmental Science and Technology*, 35: 1651-1657.
- Voegelin, A. & Kretzschmar, R. (2003): Modelling sorption and mobility of cadmium and zinc in soils with scaled exchange coefficients. – *European Journal of Soil Science*, 54: 387-400; Oxford (Blackwell Publishing Ltd.).
- Wang, Kuen-Sheng; Chiang, Kung-Yuh; Lin, Kae-Long; Sun, Chang-Jung (2001): Effects of a water-extraction process on heavy metal behavior in municipal solid waste incinerator fly ash. In: *Hydrometallurgy* 62 (2), S. 73-81. DOI: 10.1016/S0304-386X(01)00186-4.
- Wilkins, B. J., Brummel, N. & Loch, J. P. G. (1998): Influence of pH and zinc concentration on cadmium sorption in acidic, sandy soils. – *Water, Air, and Soil Pollution*, 101: 349-362.
- Wu, H.-Y. & Ting, Y.-P. (2006): Metal extraction from municipal solid waste (MSW) incinerator fly ash – Chemical leaching and fungal bioleaching. – *Enzyme and Microbial Technology*, 38, 6: 839-847; Amsterdam (Elsevier).
- Zehl, K. (2005): Schwermetalle in Sedimenten und Böden unter besonderer Berücksichtigung der Mobilität und deren Beeinflussung durch Sauerstoff. – Dissertation: 142 S.; Jena (Friedrich-Schiller-Universität Jena).

ANHANG 1 (Jäger et al. 1990)

Tab. A1-1: Maxima der teufenabhängigen Konzentrationswerte ausgewählter Ionen

Bestandteile	Maximalwert [mg/L]	Bemerkung
Na ⁺	60.000	stetige Zunahme mit der Teufe; Konzentrationsgradient bis -600 m NHN sehr steil
Ca ²⁺	4.000-5.000	starke Konzentrationsstreuung in tieferen Bereichen
Mg ²⁺	1.000-2.000	steiler Anstieg mit der Teufe; deutliches Maximum zwischen -600 m und -1000 m NHN
K ⁺	100-1.000	starke teufenunabhängigeg Streuung
Cl ⁻	60.000-100.000	starker Anstieg mit der Teufe, bis zu maximalen Werten ab -650 m NHN; tiefer keine Zunahme mehr
SO ₄ ²⁻	Keine Angabe	Konzentrationen streuen stark über die Teufe, Maximum zwischen -500 m NN und -750 m NHN, zu geringeren und größeren Teufen Abnahme der Konzentration
HCO ₃ ⁻	Keine Angabe	deutliche Abnahme mit der Teufe

Tab. A1-2: Mediane in den oberen Deckschichten (0-150 m) für Chlorid und Sulfat

Bestandteile	Medianwert [mg/L]
Cl ⁻	40
SO ₄ ²⁻	60-180

Tab. A1-3: Schwermetallgehalte in gemessenen Tiefenwasserproben

Bestandteil	Mittelwerte der Schwermetallkonzentrationen aus fünf geogenen Grundwässern (ca. -920 m NHN) aus dem westlichen rechtsrheinischen Revier	Schwermetallkonzentrationen des für Elutionen benutzten Tiefengrundwassers
	[mg/L]	[mg/L]
Pb	0,11	0,13
Zn	0,15	3,75
Cu	0,036	0,08
As	0,001	0,001
Cd	0,03	0,005

Tab. A1-4: Konzentrationsintervalle in Abhängigkeit von der Teufe für Chlorid

Konzentrationsintervalle [mg/L]	Teufenbereiche [m]
< 1.000	
1.000-10.000	-450
10.000-50.000	-600
>50.000	-1.500

Tab. A1-5: Konzentrationsintervalle in Abhängigkeit von der Teufe für Sulfat

Konzentrationsintervalle [mg/L]	Teufenbereiche [m]
50-300	
60-180	
250-800	-500
300-1.500	-750
250-900	-1000
150-600	-1300

Tab. A1-6 Mittlere mineralogische Zusammensetzung des Nebengesteins im Ruhrkarbon

Mineral	Minimalgehalt [%]	Maximalgehalt [%]	Mittlerer Gehalt [%]
Illit	41	66	57
Kaolinit	1	25	10
Chlorit	1	5	< 2
Summe Tonminerale	59	73	69
Quarz	11	27	17
Feldspat	1	4	< 2
Siderit	1	4	< 2
Dolomit	0	5	1
Kalzit	0	1	< 1
Pyrit	Spuren	9	< 3
Schwerminerale	Spuren	9	< 3
Kohle	3	17	7

Tab. A1-7: Elementkonzentrationen bestimmt aus der Waschberge im Vergleich zur allgemeinen Geochemie von Tonsteinen

Element	Minimalgehalt	Maximalgehalt	Mittlerer Gehalt	Tonsteine Turekian und Wedepohl (1961)
Si [%]	19,4	24,7	22	27,3
Al [%]	9,3	11,9	10,7	8
Fe [%]	2,27	3,88	2,94	4,72
Ti [%]	0,66	0,87	0,76	0,46
Mn [%]	0,03	0,1	0,05	0,09
Ca [%]	0,19	0,85	0,47	2,21
Mg [%]	0,79	1,13	0,91	1,5
Na [%]	0,25	1,49	0,88	0,96
Kohle [%]	3,43	3,96	3,7	2,66
S (gesamt) [%]	0,26	1,25	0,74	0,24
S (Sulfid) [%]	0,14	0,79	0,49	
Ba (ppm)	390	570	500	580
Sr (ppm)	83	138	114	300
Zn (ppm)	80	300	135	95
Pb (ppm)	31	61	40	20
Cu (ppm)	37	62	47	45
Cr (ppm)	130	190	145	90
As (ppm)	4,3	48	20,4	13
Cd (ppm)	0	0,13	0,07	0,3

Tab. A1-8: Kationenaustauschkapazitäten von Mineralen, die im Nebengestein häufig zu finden sind

Mineral	KAK [mmol(eq)/100 g]
Quarz	0,6 - 5,3
Feldspat	1,0 - 2,0
Kaolinit	3 - 15
Illit	10 - 40
Chlorit	10 - 40
Montmorillonit	70 - 150

Tab. A1-9: Ergebnisse der Versuche zur Schwermetallmobilität durch Eluation

Betrachtete Elementdesorption an Rea-Salze aus MVA	Destilliertes Wasser	CI-Grubenwasser
Pb	135 mg/L	212 mg/L
Zn	stärkere Eluation	
Cd	kaum mobilisiert	kaum mobilisiert
Adsorption nach 24 Tagen aus einer Lösung in Kontakt mit Schiefertönen		
Pb	21 mg/L	54 mg/L
Zn	0,4 - 4,7 mg/L	Nachweisgrenze
Cd	gleichbleibend	gleichbleibend

Tab. A1-10: Zusammensetzung des Eluationswassers auf Basis von Messdaten eines Tiefgrundwassers der Zeche Consolidation

Parameter	Einheit	Messwert
Trübung		sehr schwach trübe
Farbe		schwach gelblich
Geruch		dumpfig
Abdampfrückstand	[mg/L]	254.878,00
Glührückstand	[mg/L]	116.708,00
TOC	[mg/L]	7,80
spez.elekt. Leitfähigkeit	[mS/cm]	> 200
pH-Wert		5,57
Säurekapazität $K_{S\ 8,2}$	[mmol/L]	0,00
Säurekapazität $K_{S\ 4,3}$	[mmol/L]	1,80
Redoxspannung	[mV]	-177,00
O ₂ -Gehalt	[mg/L]	< 0,2
CSB	[mg/L]	29,00
Cl ⁻	[mg/L]	150.000,00
SO ₄ ²⁻	[mg/L]	< 5
NH ₄ ⁺	[mg/L]	75,10
F ⁻	[mg/L]	0,08
B ⁻	[mg/L]	0,25
Na ⁺	[mg/L]	75.750,00
K ⁺	[mg/L]	1.678,00
Ca ²⁺	[mg/L]	10.825,00
Mg ²⁺	[mg/L]	1.335,00

Parameter	Einheit	Messwert
Li ⁺	[mg/L]	195,00
Sr	[mg/L]	490
Ba	[mg/L]	13,2
Fe	[mg/L]	65,5
Mn	[mg/L]	7,35
Zn	[mg/L]	7,35
Cd	[mg/L]	0,01
Pb	[mg/L]	0,20
As	[mg/L]	< 0,001
Sb	[mg/L]	< 0,001
Th	[mg/L]	n.a.
Sn	[mg/L]	< 0,1

Tab. A1-11: Vor-Ort-Messungen der 6 Chargen des Tiefenwassers (Zeche Consolidation, 1210 m Tiefe), die in den Eluationsversuchen der Machbarkeitsstudie verwendet wurden

Charge	1	2	3	4	5	6
pH-Wert	5,51	5,48	5,49	5,5	5,51	5,52
spez. elektr. Leitfähigkeit	200.500	200.720	200.685	200.410	200.690	200.700
Redoxspannung	-178	-172	-192	-156	-165	-168
O ₂ -Gehalt	< 0,2	< 0,2	0,2	< 0,2	< 0,2	0,2

ANHANG 2 (Analytik)

Nachweisgrenzen:

Außer diesen groben Angaben zu Maximalwerten und Tiefenverläufen werden auch Nachweisgrenzen der chemischen Analysen für einige Stoffe angegeben (Tab. A1-1).

Tab. A2-1: Nachweisgrenze für ausgewählte Ionen, Verbindungen und Elemente (Jäger et al. 1990, Bd. 2)

Elemente/Ionen	Nachweisgrenze [mg/L]
Al	0,1
Be	0,002
Co	0,01
Cr	0,01
CN ⁻	0,01
Ni	0,05
Pb	0,05
PO ₄ ³⁻	0,03
Sb	0,001
Se	0,001
Sn	0,1
SO ₃	1
V	0,05
TOC	0,1
EOX	0,02
KW	0,1
PCDM	0,001

Diese Nachweisgrenzen gelten für die chemischen Analysen beim Hygieneinstitut Gelsenkirchen. In Bd. 3 der Machbarkeitsstudie wird allerdings bei der Analyse des für die Elutionen des Versatzmaterials genutzten Lösungswasser genauer auf die Nachweisgrenzen der Laboranalytik eingegangen. Auch das Lösungswasser wurde durch das Hygieneinstitut Gelsenkirchen analysiert (Tab. A2-2).

Tab. A2-2: Nachweisgrenzen des HIG (Jäger et al., 1990, Bd. 3, S. 99 ff) im Vergleich mit den Nachweisgrenzen nach Wedewardt (1995)

Es werden in der Machbarkeitsstudie keine umfangreicheren Aussagen zu den Nachweisgrenzen getroffen, weshalb bei gleich bleibendem Analyselabor die in Tabelle 1.2 aufgeführten Werte als allgemeingültig für die gesamte Studie betrachtet werden.

Parameter	Jäger et al. (1990)			Wedewardt (1995)	
	Meßmethode	Meßgerät	Nachweisgrenze [mg/L] oder Einheit angegeben	Methodenhinweis	Nachweisgrenzen [mg/L]
Farbe	DIN 38 404-C1-1				
Geruch	DEV B 1/2				
Temperatur (° C)	DIN 38 404-C4			in situ	
Wassergehalt	DIN 38 414-S2				
Gesamtrockenrückstand	DIN 38 409-H1				
Abdampfrückstand	DIN 38 409-H1			gravimetrisch (bei 105°C)	
Glührückstand	DIN 38 409-H1				
spez. elektr. Leitfähigkeit (µS/cm)	DIN 38 404-C8	Potentiometer	10	elektrometrisch im Labor	
pH-Wert	DIN 38 404-C5	Potentiometer		elektrometrisch im Labor	
Säurekapazität (mmol/L)	DIN 38 409-H7-1/2	Titrimeter	0,1		
freies CO ₂				volumetrische (Säure/Base-Titration)	
kalkaggressives CO ₂				Heyer-Versuch (Marmorpulver) mit anschließender Säure/Base-Titration	
Redoxspannung	DIN 38 404-C6	Potentiometer			
O ₂	DIN 38 408-G21	Titrimeter	0,1		

Parameter	Jäger et al. (1990)			Wedewardt (1995)	
	Meßmethode	Meßgerät	Nachweisgrenze [mg/L] oder Einheit angegeben	Methodenhinweis	Nachweisgrenzen [mg/L]
Cl ⁻	DIN 38 405-D1-2	Titrimeter	10	ionenchromatographisch	
SO ₄ ²⁻	DIN 38 405-D5-2	Gravimetrisch	5	ionenchromatographisch	<5
SO ₃ ⁻	DEV D6 1/2	Titrimeter	0,1		
S ²⁻	DEV D7	Photometer	0,03		
PO ₄ ³⁻	DIN 38 405-D11-2	Photometer	0,03		
NO ₃ ⁻	photom.Na-Sal.	Photometer	0,5	ionenchromatographisch	
NO ₂ ⁻	DIN 38 405-D10	Photometer	0,005		
NH ₄ ⁺	elektrometrisch	Ionenmeter	0,05	photometrisch (mit Salicylat und Hypochlorit gemäß DIN 38406, Teil 5)	
F ⁻	DIN 38 406-E22	Ionenmeter	0,005		
Br		Ionenchromatograph		potentiometrisch (Titration)	
B	DIN 38 406-E22	ICP-OIS	0,01	ICP-AES	
CN ⁻ (ges.)	DIN 38 405-D13-1	Photometer	0,01		
CN ⁻ (l. fr.)	DIN 38 405-D13-2	Photometer	0,01		
Na ⁺	DIN 38 406-E22	ICP-OIS	0,1	ICP-AES	
K ⁺	DIN 38 406-E22	ICP-OIS	0,5	ICP-AES	
Mg ²⁺	DIN 38 406-E22	ICP-OIS	0,05	ICP-AES	
Ca ²⁺	DIN 38 406-E22	ICP-OES	0,1	ICP-AES	
Li ⁺	DIN 38 406-E22	ICP-OES	0,05	ICP-AES	<0,1

Parameter	Jäger et al. (1990)			Wedewardt (1995)	
	Meßmethode	Meßgerät	Nachweisgrenze [mg/L] oder Einheit angegeben	Methodenhinweis	Nachweisgrenzen [mg/L]
Sr	DIN 38 406-E22	ICP-OES	0,01	ICP-AES	
Ba	DIN 38 406-E22	ICP-OES	0,01	ICP-AES	
Al	DIN 38 406-E22	ICP-OES	0,1	ICP-AES	<0,5
Sb	DIN 38 405-D18	AAS-Hydridsystem	0,001		
As	DIN 38 405-D18	AAS-Hydridsystem	0,001	Hydrid- und Kaltdampf AAS	<0,005
Be	DIN 38 406-E22	ICP-OES	0,002		
Pb	DIN 38 406-E6-1	Flammen-AAS	0,05	Graphitrohr-AAS;	<0,5
Pb, alternativ	DIN 38 406-E6-3	Graphitrohr-AAS	0,005		
Cd	DIN 38 406-E19-1	Flammen-AAS	0,005	Graphitrohr-AAS;	<0,05
Cd, alternativ	DIN 38 406-E19-3	Graphitrohr-AAS	0,0005		
Cr (ges.)	DIN 38 406-E22	ICP-OES	0,01	ICP-AES	<0,05
Cr (ges.), alternativ	DIN 38 406-E10-2	Graphitrohr-AAS	0,005	Graphitrohr-AAS	
Cr IV	DIN 38 405-D24	Photometer	0,01		
Fe	DIN 38 406-E22	ICP-OES	0,1	ICP-AES	<0,5(für -210 mNN <0,1)
Fe, alternativ	DIN 38 406-E19-1	Flammen-AAS	0,01		
Mn	DIN 38 406-E22	ICP-OES	0,01	ICP-AES	<0,05
Mn, alternativ	DIN 38 406-E19-1	Flammen-AAS	0,01		
Co	DIN 38 406-E22	ICP-OES	0,01		
Co, alternativ	DIN 38 406-E19-3	Flammen-AAS	0,01		
Cu	DIN 38 406-E22	ICP-OES	0,01	Graphitrohr-AAS	
Cu, alternativ	DIN 38 406-E19-3	Graphitrohr-AAS	0,01		

Parameter	Jäger et al. (1990)			Wedewardt (1995)	
	Meßmethode	Meßgerät	Nachweisgrenze [mg/L] oder Einheit angegeben	Methodenhinweis	Nachweisgrenzen [mg/L]
Ni	DIN 38 406-E22	ICP-OES	0,05	ICP-AES	<0,05
				Graphitrohr-AAS	
Ni, alternativ	DIN 38 406-E19-3	Graphitrohr-AAS	0,005		
Hg	DIN 38 406-E12-3	Kaltdampf-AAS	0,0002	Hydrid- und Kaltdampf AAS	<0,001
Se	DIN 38 406-D23	AAS-Hydridsystem	0,001	Hydrid- und Kaltdampf AAS	<0,005
Th	DIN 38 406-E6-3	AAS L'vov-Plattf.	0,01		
V	DIN 38 406-E22	ICP-OES	0,01	ICP-AES	<0,05
				Graphitrohr-AAS	<0,05
Zn	DIN 38 406-E22	ICP-OES	0,01	ICP-AES	
Zn, alternativ	DIN 38 406-E8-1	Flammen-AAS	0,01		
Sn	DIN 38 406-E22	ICP-OIS	0,5		
TOC	DIN 38 409-H3	IR-CO ₂ -Detektor	0,1		
KW	DIN 38 409-H18	IR-Gerät	0,1		
Phenol-Index o.Dest.	DIN 38 409-H16-1	Photometer	0,01		
Phenol-Index n.Dest.	DIN 38 409-H16-2	Photometer	0,01		
Polycyclen	LWA Schriftenreihe "Abfallwirtschaft NRW", Nr. 13, 1987	HPLC (Gradientenelution mit CH ₃ OH/THF; 30 °C	0,000001		
LHKW	DIN 38 407-F4	GC-FID	0,001		
PCB	DEV F2	GC ECD	0,00001		
PCDM	zus. m. PCB	GC ECD	0,001		
EOX	DIN 38 409-H8	Photometer	0,02		
CSB	DIN 38 409-H41	Titrimeter	15		

Parameter	Jäger et al. (1990)			Wedewardt (1995)	
	Meßmethode	Meßgerät	Nachweisgrenze [mg/L] oder Einheit angegeben	Methodenhinweis	Nachweisgrenzen [mg/L]
Si				angegeben wie das Verfahren für gelöste Kieselsäure: photometrisch (mit Molybdän gemäß DIN 38405)	
HCO ₃ ⁻				volumetrische (Säure/Base-Titration)	
I ⁻				potentiometrisch (Titration)	
Mo				ICP-AES	<0,05
				Graphitrohr-AAS	

ANHANG 3:

Tab. A3-1: Analytik zu Haus Aden aus dem DMT Bericht 39 „Hydrochemie und Genese der Tiefenwässer im Ruhr-Revier Wedewardt (1995)

Probe		Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7	Z8	Z9
Datum		03.03.1994	03.03.1994	03.03.1994	03.03.1994	08.03.1994	08.03.1994	09.03.1994	08.03.1994	08.03.1994
Entnahmeort		Haus Aden Scht 2; -940 m S; Fl. Karl / Blücher Untersuchungsstrep nach Westen, Damm	Haus Aden Scht 6 -940 m S Untersuchungsbohrung nach Westen	Haus Aden Scht 2 -680m S Hautqu St 5876	Haus Aden Scht 2 -680 m S BS H202	Haus Aden Scht 2	Haus Aden Scht 2	Haus Aden Scht 6	Haus Aden Scht Victoria 1/2	Haus Aden Scht 2 - 825mS, RS nach Osten, Damm 8250026
R-Wert		2607608	26074448	2606095	2606028	2609554	2609554	2607495	2606731	2607307
H-Wert		5724442	5724620	5726350	5726470	5721652	5721652	5274558	5721113	5721078
Teufe	mNHN	-931	-938	-689	-745	-336	-493	-526	-700	-788
Temperatur (in situ)	°C	40	39	32	20	18	15	25	28	36
pH		4,78	6,84	6,97	6,79	7,69	7,39	7,24	5,39	7,37
Leitfähigkeit	µS/cm	163500	165200	108100	121800	292200	91700	60700	153000	51400
Abdampfrückstand	mg/L	154200	166200	82800	97800	18520	68660	41540	144200	34200
Dichte	g/mL	1,0941	1,0976	1,0525	1,0615	1,008	1,0431	1,0272	1,0838	1,0207
Zufluß	L/min	10-15	1-2	10		5	1	20	30-40	60-100
freies CO ₂	mg/L	28	26	35	32	7	18	26	21	20
aggressives CO ₂	mg/L		<1						14	
Na ⁺	mg/L	41000	40000	26900	30000	5990	20800	13600	39300	11100
K ⁺	mg/L	762	426	366	372	66	260	170	439	154
Ca ²⁺	mg/L	7640	9090	2150	2630	310	2270	852	5660	903
Mg ²⁺	mg/L	13808	2200	648	805	124	679	319	1330	355

Probe		Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7	Z8	Z9
Datum		03.03.1994	03.03.1994	03.03.1994	03.03.1994	08.03.1994	08.03.1994	09.03.1994	08.03.1994	08.03.1994
Entnahmeort		Haus Aden Scht 2; -940 m S; Fl. Karl / Blücher Untersuchungsstrep nach Westen, Damm	Haus Aden Scht 6 -940 m S Untersuchungsbohrung nach Westen	Haus Aden Scht 2 -680m S Hautqu St 5876	Haus Aden Scht 2 -680 m S BS H202	Haus Aden Scht 2	Haus Aden Scht 2	Haus Aden Scht 6	Haus Aden Scht Victoria 1/2	Haus Aden Scht 2 - 825mS, RS nach Osten, Damm 8250026
Sr	mg/L	557	475	468	555	98	764	251	611	127
Ba	mg/L	1710	2460	500	599	12	119	43	737	80
NH ₄ ⁺	mg/L	37	45	39	5,5	<0,05	20	18	30	9,3
B	mg/L	1,66	0,81	5	6	3,6	5	5,2	2	3,5
Si	mg/L	7,5	3,9	5,3	5,4	4,1	4,4	5,5	2,9	6,3
Cl ⁻	mg/L	83200	86200	47100	54900	10100	39000	23700	76400	19800
SO ₄ ²⁻	mg/L	<5	<5	<5	<5	23	15	11	<0,5	7
HCO ₃ ⁻	mg/L	2	62	269	151	528	137	421	5	371
NO ₃ ⁻	mg/L	27	36	24	170	66	31	30	22	22
I ⁻	mg/L	17	7,9	16	7,9	3,2	5,3	5,5	11	4,4
Br ⁻	mg/L	120	147	44	50	13	54	22	90	25
Al	mg/L	0,6	<0,5	0,6		<0,5	<0,5	<0,5	1	<0,5
As	mg/L	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
Cd	mg/L	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Cr	mg/L	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Cu	mg/L	0,11	0,27	0,1		0,14	0,13	0,12	0,12	0,13
Fe	mg/L	18	35	1,4		<0,5	<0,5	<0,5	51	4,1
Hg	mg/L	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
Li	mg/L	22	13	15		2,9	8,2	7,5	19	5

Probe		Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7	Z8	Z9
Datum		03.03.1994	03.03.1994	03.03.1994	03.03.1994	08.03.1994	08.03.1994	09.03.1994	08.03.1994	08.03.1994
Entnahmeort		Haus Aden Scht 2; -940 m S; Fl. Karl / Blücher Untersuchungsstrep nach Westen, Damm	Haus Aden Scht 6 -940 m S Untersuchungsbohrung nach Westen	Haus Aden Scht 2 -680m S Hautqu St 5876	Haus Aden Scht 2 -680 m S BS H202	Haus Aden Scht 2	Haus Aden Scht 2	Haus Aden Scht 6	Haus Aden Scht Victoria 1/2	Haus Aden Scht 2 - 825mS, RS nach Osten, Damm 8250026
Mn	mg/L	2,2	1,2	<0,05		<0,05	0,21	0,06	3,1	0,22
Mo	mg/L	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Ni	mg/L	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Pb	mg/L	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5
Se	mg/L	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
V	mg/L	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Zn	mg/L	0,36	<0,05	<0,05	1,9	<0,05	3	<0,05	<0,05	<0,05
Tritium	TU			1,8				3,7	1,5	
Deuterium	promill	-26		-46,5	-43,8	-50	-36,7	-52,3	-26,2	-45,6
Sauerstoff-18	promill	-2,63		-5,97	-5,34	-7,36	-4,7	-7,39	-3,1	-6,67

Tab. A3-2: Fortsetzung Analytik zu Haus Aden aus dem DMT Bericht 39 „Hydrochemie und Genese der Tiefenwässer im Ruhr-Revier Wedewardt (1995)

Probenbezeichnung		Z10	Z11	Z12	Z13	Z14	Z15	Z16	Z17
Datum		08.03.1994	09.03.1994	12.04.1994	12.04.1994	12.04.1994	12.04.1994	12.04.1994	05.05.1994
Entnahmestelle		Haus Aden Scht 2 -825 m S RS nach Osten, Bohrloch nach BS 401	Haus Aden Scht 2 BS 425	Haus Aden Scht 2-940mS GB nach FI Sonnenschein Bohrloch zur Bandstr. S52	Haus Aden Scht 2 Victoria	Haus Aden Scht Kurf 3	Haus Aden Scht Kurf 3	Haus Aden Scht Kurf 3 -1060mS RS FI Karl	Haus Aden 1000 mS, Bandstr Robert/Albert RO 64 nach N St630
r-Wert		2606916	2610631	2611483	2607622	2609409	2609409	2609266	2607448
h-Wert		5721105	5722361	5721618	5721386	5718532	5718532	5718620	5726260
Tiefe	mNN	-789	-700	-1058	23	25	-210	-1067	-957
Temperatur (in situ)	°C	34	18	46	14	10	17	27	47
pH		7,53	7,24	7,07	7,51	7,44	7,65	4,99	6,21
spez. el. Leitfähigkeit	µS/cm	79100	111700	146400	2120	2640	4520	147100	177400
Abdampfdruckstand	mg/l	57560	94200	134900	1384	1912	2612	134300	174300
Dichte	g/ml	1,0358	1,0567	1,0766	0,9986	0,9986	1,0026	1,081	1,1076
Zufluß	l/min	4-5	-10-20	1-2	50	10-20	4	1-2	
freies CO ₂	mg/L	14	18	17	8	9	5	42	35
aggressives CO ₂	mg/L								9,7
Na	mg/L	18200	24000	37200	109	202	832	35100	50300
K	mg/L	231	265	672	5,3	11	12	18	517
Ca	mg/L	1740	4270	5770	266	302	125	7040	7630
Mg	mg/L	829	1720	935	17	46	28	1800	1440
Sr	mg/L	192	883	192	7,8	19	11	182	414
Ba	mg/L	2	24	258	<0,5	<0,5	<0,5	1,1	1260
NH ₄	mg/L	0,48	2,4	31	<0,05	0,09	0,28	29	46

Probenbezeichnung		Z10	Z11	Z12	Z13	Z14	Z15	Z16	Z17
Datum		08.03.1994	09.03.1994	12.04.1994	12.04.1994	12.04.1994	12.04.1994	12.04.1994	05.05.1994
Entnahmestelle		Haus Aden Scht 2 -825 m S RS nach Osten, Bohrloch nach BS 401	Haus Aden Scht 2 BS 425	Haus Aden Scht 2-940mS GB nach FI Sonnenschein Bohrloch zur Bandstr. S52	Haus Aden Scht 2 Victoria	Haus Aden Scht Kurf 3	Haus Aden Scht Kurf 3	Haus Aden Scht Kurf 3 -1060mS RS FI Karl	Haus Aden 1000 mS, Bandstr Robert/Albert RO 64 nach N St630
B	mg/L	2,9	0,48	1,1	<0,05	<0,05	<0,05	1	2,2
Si	mg/L	4,1	3,5	4,8	7,6	5,1	5,1	3,5	2,9
Cl	mg/L	32500	51000	72300	157	437	1110	72500	95500
SO4	mg/L	576	63	16	456	475	284	1220	<5
HCO3	mg/L	160	74	60	294	258	442	2	45
NO3	mg/L	34	90	110	2,4	11	0,13	110	160
J	mg/L	6,6	23	27	1,3	1,4	1,2	11	50
Br	mg/L	37	93	133	0,35	0,88	1	149	107
Al	mg/L	0,6	0,8	0,8	<0,5				0,8
As	mg/L	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
Cd	mg/L	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Cr	mg/L	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Cu	mg/L	0,11	0,12	0,15	0,11	0,14	0,12	0,11	0,24
Fe	mg/L	1,2	<0,5	9	0,6	0,8	<0,1	36	53
Hg	mg/l	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
Li	mg/L	7	5,2	16	<0,1	0,1	0,4	0,4	26
Mn	mg/L	2	1,2	1,5	<0,05	<0,05	<0,05	8	2,1
Mo	mg/L	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Ni	mg/L	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Pb	mg/L	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5

Probenbezeichnung		Z10	Z11	Z12	Z13	Z14	Z15	Z16	Z17
Datum		08.03.1994	09.03.1994	12.04.1994	12.04.1994	12.04.1994	12.04.1994	12.04.1994	05.05.1994
Entnahmestelle		Haus Aden Scht 2 -825 m S RS nach Osten, Bohrloch nach BS 401	Haus Aden Scht 2 BS 425	Haus Aden Scht 2-940mS GB nach FI Sonnenschein Bohrloch zur Bandstr. S52	Haus Aden Scht 2 Victoria	Haus Aden Scht Kurf 3	Haus Aden Scht Kurf 3	Haus Aden Scht Kurf 3 -1060mS RS FI Karl	Haus Aden 1000 mS, Bandstr Robert/Albert RO 64 nach N St630
Se	mg/L	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	0,005
V	mg/L	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Zn	mg/L	<0,05	0,36	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	0,31
Tritium	TU								
Deuterium	promill	-43,9	-22						
Sauerstoff 18	promill	-5,94	-2,56						

ANHANG 4

Aus dem DMT Bericht 23 zum „Mobilisationsverhalten von anorganischen Schadstoffen in der Umgebung von untertägigen Versatzbereichen am Beispiel von Reststoffen aus Müllverbrennungsanlagen im Steinkohlengebirge des Ruhrkarbons“ von Klinger 1994 stammen die in Tabelle A2-1 aufgeführten teufenabhängigen Konzentrationswerte der Hauptbestandteile der Grubenwässer des Ruhrkarbons. Sie wurden aus Archivdaten der DMT gewonnen und stellen die gemittelten Gehalte aller mit Teufenangaben versehenen Proben dar. Auch die Werte aus Tabelle A2-2 stammen aus dem DMT Bericht 23, allerdings zitiert Klinger die entsprechenden Werte aus einer „Studie zur Eignung von Steinkohlenbergwerken im rechtrheinischen Ruhrkohlenbezirk zur Untertageverbringung von Abfall- und Reststoffen“ von Jäger, Obermann und Wilke (1990). Es wurden keine Angaben über die zu Grunde liegende Analytik gemacht.

Tab. A4-1: Teufenabhängige Hauptelementverteilung (Klinger 1994)
Die Werte stellen die gemittelten Gehalte aller mit Teufenangaben versehenen Proben dar.

Teufe [m]	Na ⁺ [mg/L]	Ca ²⁺ [mg/L]	Mg ²⁺ [mg/L]	K ⁺ [mg/L]	Fe [mg/L]	Mn [mg/L]	Sr [mg/L]	Ba [mg/L]	Cl ⁻ [mg/L]	SO ₄ ²⁻ [mg/L]	HCO ₃ ⁻ [mg/L]	pH
40-300	2230	200	80	65	5	2,5	1,4	36	3940	720	600	7,4
300-600	10030	940	430	190	6	4,4	167	385	17600	1240	354	6,9
600-800	33410	2580	935	433	22	1	660	1183	56170	1260	236	6,9
800-900	41530	3410	970	600	39	1	162	412	49960	498	310	6,9
900-1000	37700	3630	1030	376	26	1,7	230	434	66780	534	156	6,9
1000-1400	54970	5070	1370	550	22	1,1	810	1350	85970	90	120	6,6

Tab. A4-2: Metallgehalte eines geogenen Chloridwassers nach Jäger et al. 1990 (zitiert nach Klinger, 1994)

Bestandteil	Gehalt [mg/L]	Probenort
Pb	0,13	Schachtanlage Consolidation; Schacht 4, 11. Sohle
Zn	3,7	Schachtanlage Consolidation; Schacht 4, 11. Sohle
Cu	0,08	Schachtanlage Consolidation; Schacht 4, 11. Sohle
Cr	<0,01	Schachtanlage Consolidation; Schacht 4, 11. Sohle
Ni	<0,05	Schachtanlage Consolidation; Schacht 4, 11. Sohle
Cd	<0,005	Schachtanlage Consolidation; Schacht 4, 11. Sohle
As	<0,001	Schachtanlage Consolidation; Schacht 4, 11. Sohle
Hg	<0,0002	Schachtanlage Consolidation; Schacht 4, 11. Sohle
V	0,1	Schachtanlage Consolidation; Schacht 4, 11. Sohle

ANHANG 5

Tab. A5-1: Grubenwässer von BW Haus Aden / Monopol von Gb 1 (1995 bis 1996, Datengrundlage: RAG); für die Berechnung des Mittelwertes wurde in den Fällen, bei denen der gemessene Wert "< bzw. > Nachweisgrenze" ist, der Wert der Nachweisgrenze verwendet

Parameter	Einheit	Mittelwert	Max	Min
Absetzbare Stoffe nach 2h	mL/L	0,9	6,5	< 0,1
Abfiltrierbare Stoffe	mg/L	147	950	7
Abdampfdruckstand errechnet	mg/L	20956	149923	191
spez. el. Leitfähigkeit	µS/cm	27363	> 150000	365
Dichte	g/mL	1,013	1,103	1,000
pH-Wert	-	7,6	8,3	6,9
Säurekapazität bis pH 8,2	mmol/L	0,00	0,16	0,00
Säurekapazität bis pH 4,3	mmol/L	2,10	3,93	1,04
Summe Erdalkali (errechnet)	mg/L	1572	9849	47
Natriumchlorid (errechnet)	mg/L	15865	121242	23
Ammonium	mg/L	9,3	49	< 0,02
Natrium	mg/L	6243	47696	9
Kalium	mg/L	214	1065	3
Calcium	mg/L	1234	7116	41
Magnesium	mg/L	268	1923	5,3
Barium	mg/L	33	741	< 1
Strontium	mg/L	41	442	< 1
Zink	mg/L	2,9	32	< 0,02
Kupfer	mg/L	0,043	0,42	< 0,001
Arsen	mg/L	0,004	0,01	< 0,001
Blei	mg/L	0,052	0,529	< 0,001
Cadmium	mg/L	0,005	0,031	< 0,001
Chrom (gesamt)	mg/L	0,015	0,05	< 0,001
Chrom VI	mg/L	< 0,010	< 0,010	< 0,010
Nickel	mg/L	0,037	0,355	< 0,001
Quecksilber	mg/L	0,001	0,002	< 0,001
Chlorid	mg/L	12508	92000	27
Bromid	mg/L	45	205	< 0,3
Sulfat	mg/L	341	1990	9,4
Hydrogencarbonat (errechnet)	mg/L	128	240	63
Carbonat (errechnet)	mg/L	0,3	10	0
Hydroxid (errechnet)	mg/L	0	0	0
Cyanid (gesamt)	mg/L	0,01	0,02	< 0,01
PCB-Summe aus 6 Isomeren (DIN)	µg/L	0,01	0,03	< 0,01
PCB gesamt (LAGA)	µg/L	0,05	0,15	< 0,05
PCDM-Gesamtgehalt	µg/L	0,1	1,1	< 0,1

Tab. A5-2: Grubenwässer von BW Haus Aden / Monopol von Gb 2 (1993 bis 1994, Datengrundlage: RAG); für die Berechnung des Mittelwertes wurde in den Fällen, bei denen der gemessene Wert "< bzw. > Nachweisgrenze" ist, der Wert der Nachweisgrenze verwendet

Parameter	Einheit	Mittelwert	Max	Min
Absetzbare Stoffe n. 2h	mL/L	4	27	< 0,1
Abfiltrierbare Stoffe	mg/L	654	3336	< 5
Abdampfrückstand errechnet	mg/L	23322	89857	484
spez. el. Leitfähigkeit	µS/cm	31091	107100	909
Dichte	g/mL	1,013	1,057	1,000
pH-Wert	-	7,5	8,4	6,5
Säurekapazität bis pH 8,2	mmol/L	0,0	0,04	0,0
Säurekapazität bis pH 4,3	mmol/L	3,02	8,72	1,39
Summe Erdalkali(errechnet)	mg/L	1961	9107	100
Natriumchlorid (errechnet)	mg/L	17131	62160	130
Ammonium	mg/L	6,8	20	0,05
Natrium (errechnet)	mg/L	6739	24454	51
Kalium	mg/L	64	173	12
Calcium	mg/L	1529	7167	77
Magnesium	mg/L	405	1800	23
Barium	mg/L	< 5	< 5	< 5
Strontium	mg/L	27	140	< 5
Zink	mg/L	4,5	20	0,31
Kupfer	mg/L	0,015	0,051	0,005
Arsen	mg/L	0,002	0,006	< 0,001
Blei	mg/L	0,035	0,094	0,003
Cadmium	mg/L	0,003	0,011	< 0,001
Chrom	mg/L	0,003	0,009	< 0,001
Chrom VI	mg/L	0,004	< 0,010	< 0,001
Nickel	mg/L	0,036	0,122	< 0,002
Quecksilber	mg/L	0,001	< 0,001	< 0,0005
Chlorid	mg/L	13700	55060	227
Bromid	mg/L	42	133	< 0,25
Sulfat	mg/L	747	1890	37
Hydrogencarbonat (errechnet)	mg/L	184	532	80
Carbonat (errechnet)	mg/L	0,2	2	0
Hydroxyd (errechnet)	mg/L	0	0	0
Sulfid	mg/L	2,2	6,6	< 0,02
Cyanid (gesamt)	mg/L	< 0,02	< 0,02	< 0,02
PCB-Summe aus 6 Isomeren (DIN)	µg/L	0,01	0,01	< 0,01
PCB gesamt (LAGA)	µg/L	0,05	0,05	< 0,05
PCDM-Gesamtgehalt	µg/L	< 0,1	< 0,1	< 0,1

Tab. A5-3: Grubenwässer von BW Haus Aden / Monopol von Gb 16 (1994, Datengrundlage: RAG); für die Berechnung des Mittelwertes wurde in den Fällen, bei denen der gemessene Wert "< bzw. > Nachweisgrenze" ist, der Wert der Nachweisgrenze verwendet

Parameter	Einheit	Mittelwert	Max	Min
Absetzbare Stoffe nach 2h	mL/L	1,3	23	< 0,1
Abfiltrierbare Stoffe	mg/L	476	9400	< 5
Abdampfdruckstand errechnet	mg/L	20234	161491	189
spez. el. Leitfähigkeit	µS/cm	23432	> 150000	322
Dichte	g/mL	1,013	1,107	1,000
pH-Wert	-	7,7	9,0	6,7
Säurekapazität bis pH 8,2	mmol/L	0,00	0,04	0,00
Säurekapazität bis pH 4,3	mmol/L	2,73	6,94	1,48
Summe Erdalkali(errechnet)	mg/L	1341	11710	43
Natriumchlorid (errechnet)	mg/L	16089	126471	15
Ammonium	mg/L	5,6	44	< 0,02
Natrium	mg/L	6330	49753	6
Kalium	mg/L	53	335	2
Calcium	mg/L	1001	8640	38
Magnesium	mg/L	271	2360	5
Barium	mg/L	35	510	< 5
Strontium	mg/L	43	460	< 5
Zink	mg/L	3,7	22	0,13
Kupfer	mg/L	0,028	0,05	< 0,001
Arsen	mg/L	0,002	0,004	< 0,001
Blei	mg/L	0,022	0,1	< 0,001
Cadmium	mg/L	0,011	0,2	< 0,001
Chrom (gesamt)	mg/L	0,019	< 0,05	< 0,001
Chrom VI	mg/L	< 0,010	< 0,010	< 0,010
Nickel	mg/L	0,07512	0,34	< 0,001
Quecksilber	mg/L	< 0,001	< 0,001	< 0,001
Chlorid	mg/L	12059	99620	22
Bromid	mg/L	32	178	< 0,25
Sulfat	mg/L	349	1770	0,02
Hydrogencarbonat (errechnet)	mg/L	166	423	88
Carbonat (errechnet)	mg/L	0,1	2	0
Hydroxid (errechnet)	mg/L	0	0	0
Cyanid (gesamt)	mg/L	0,01	< 0,02	< 0,01
PCB-Summe aus 6 Isomeren (DIN)	µg/L	0,01	0,02	< 0,01
PCB gesamt (LAGA)	µg/L	0,06	0,1	< 0,05
PCDM-Gesamtgehalt	µg/L	0,1	0,1	< 0,1

Tab. A5-4: Grubenwässer von BW Haus Aden / Monopol von Gb 17 (1995, Datengrundlage: RAG); für die Berechnung des Mittelwertes wurde in den Fällen, bei denen der gemessene Wert "< bzw. > Nachweisgrenze" ist, der Wert der Nachweisgrenze verwendet

Parameter	Einheit	Mittelwert	Max	Min
Absetzbare Stoffe nach 2h	mL/L	0,7	5,0	< 0,1
Abfiltrierbare Stoffe	mg/L	218	1380	8
Abdampfrückstand errechnet	mg/L	29154	120195	157
spez. el. Leitfähigkeit	µS/cm	38198	140100	302
Dichte	g/mL	1,018	1,080	1,000
pH-Wert	-	7,5	8,3	6,9
Säurekapazität bis pH 8,2	mmol/L	0,01	0,16	0,00
Säurekapazität bis pH 4,3	mmol/L	2,03	3,14	1,19
Summe Erdalkali(errechnet)	mg/L	2873	18070	33
Natriumchlorid (errechnet)	mg/L	20525	87871	35
Ammonium	mg/L	11	46	< 0,02
Natrium	mg/L	8076	34568	18
Kalium	mg/L	162	650	3
Calcium	mg/L	2388	16000	30
Magnesium	mg/L	373	2190	3
Barium	mg/L	52	500	< 5
Strontium	mg/L	64	410	< 5
Zink	mg/L	5,8	32,0	< 0,02
Kupfer	mg/L	0,106	1,5	0,002
Arsen	mg/L	0,001	0,002	< 0,001
Blei	mg/L	0,074	0,529	< 0,001
Cadmium	mg/L	0,006	0,03	< 0,001
Chrom (gesamt)	mg/L	0,010	< 0,05	< 0,001
Chrom VI	mg/L	< 0,010	< 0,010	< 0,010
Nickel	mg/L	0,060	0,52	< 0,001
Quecksilber	mg/L	< 0,001	< 0,001	< 0,001
Chlorid	mg/L	17767	75000	21
Bromid	mg/L	46	159	< 0,25
Sulfat	mg/L	202	817	< 5
Hydrogencarbonat (errechnet)	mg/L	123	192	73
Carbonat (errechnet)	mg/L	0,5	10	0
Hydroxid (errechnet)	mg/L	0	0	0
Cyanid (gesamt)	mg/L	0,01	0,02	< 0,01
PCB-Summe aus 6 Isomeren (DIN)	µg/L	0,01	0,03	< 0,01
PCB gesamt (LAGA)	µg/L	0,06	0,15	< 0,05
PCDM-Gesamtgehalt	µg/L	0,2	0,8	< 0,1

Tab. A5-5: Grubenwässer von BW Haus Aden / Monopol von Gb 31 (1996 bis 1998, Datengrundlage: RAG); für die Berechnung des Mittelwertes wurde in den Fällen, bei denen der gemessene Wert "< bzw. > Nachweisgrenze" ist, der Wert der Nachweisgrenze verwendet

Parameter	Einheit	Mittelwert	Max	Min
Absetzbare Stoffe nach 2h	mL/L	1,1	9	< 0,1
Abfiltrierbare Stoffe	mg/L	283	1796	< 5
Abdampfdruckstand errechnet	mg/L	57585	154884	292
spez. el. Leitfähigkeit	µS/cm	69774	> 150000	567
Dichte	g/mL	1,037	1,105	1,000
pH-Wert	-	7,2	8,2	5,6
Säurekapazität bis pH 8,2	mmol/L	0,00	0,00	0,00
Säurekapazität bis pH 4,3	mmol/L	2,24	3,78	0,40
Summe Erdalkali(errechnet)	mg/L	4394	12588	58
Natriumchlorid (errechnet)	mg/L	40746	121448	86
Ammonium	mg/L	14,6	38	< 0,02
Natrium	mg/L	16029	47777	34
Kalium	mg/L	250	1560	3,1
Calcium	mg/L	3203	8990	51
Magnesium	mg/L	952	2830	7
Barium	mg/L	51	486	< 1,0
Strontium	mg/L	188	687	< 1,0
Zink	mg/L	13,4	118	< 0,02
Kupfer	mg/L	0,035	0,11	0,002
Arsen	mg/L	0,005	0,04	< 0,001
Blei	mg/L	0,125	0,52	0,005
Cadmium	mg/L	0,214	4,2	< 0,001
Chrom (gesamt)	mg/L	0,020	0,08	< 0,001
Chrom VI	mg/L	< 0,010	< 0,010	< 0,010
Nickel	mg/L	0,075	0,638	0,004
Quecksilber	mg/L	< 0,001	< 0,001	< 0,001
Chlorid	mg/L	33243	95400	70
Bromid	mg/L	101	364	< 0,3
Sulfat	mg/L	328	1590	< 5
Hydrogencarbonat (errechnet)	mg/L	136	231	24
Carbonat (errechnet)	mg/L	0	0	0
Hydroxid (errechnet)	mg/L	0	0	0
Cyanid (gesamt)	mg/L	0,01	0,12	< 0,01
PCB-Summe aus 6 Isomeren (DIN)	µg/L	0,02	0,17	< 0,01
PCB gesamt (LAGA)	µg/L	0,09	0,85	< 0,05
PCDM-Gesamtgehalt	µg/L	0,1	0,5	< 0,1

ANHANG 6

Anhang 6 zeigt Ganglinien des Grubenwassers für Bauhöhen, in denen bergbaufremdes Versatzmaterial verbracht worden ist. Die Daten zu den Grafiken wurden den Abschlussberichten zu den jeweiligen Bauhöhen entnommen und beruhen auf Angaben des Bergbautreibenden gegenüber den Aufsichtsbehörden. Die Beprobung von je drei Stellen auf die Zusammensetzung des Grubenwassers erfolgte aufgrund der Nebenbestimmungen der Sonderbetriebspläne.

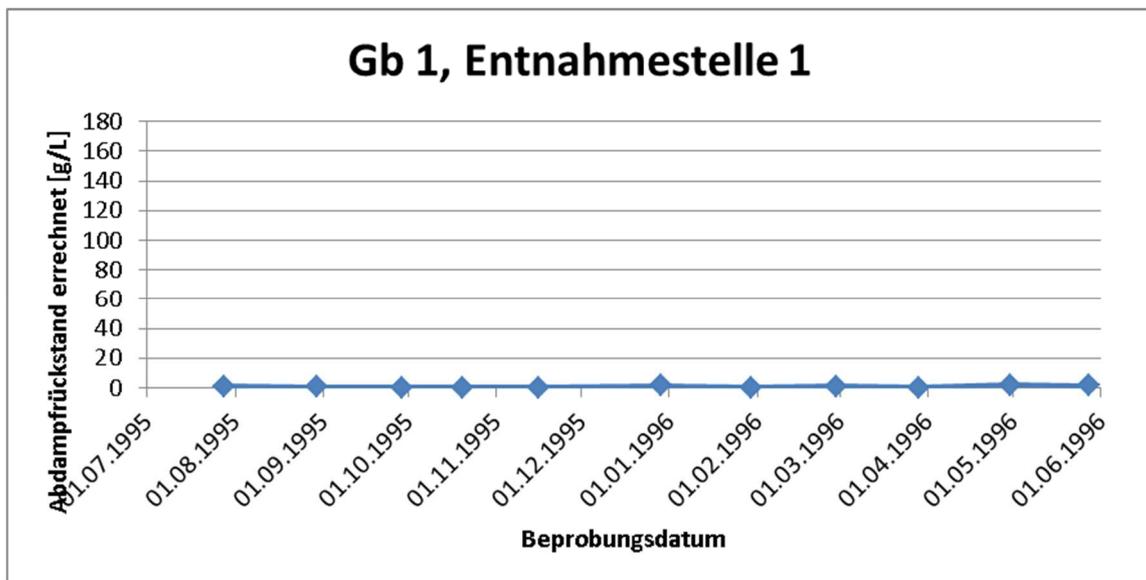


Abb. A6-1: Zeitlicher Verlauf des Abdampfrückstandes an der Entnahmestelle 1, Gb 1 (Datengrundlage: RAG)

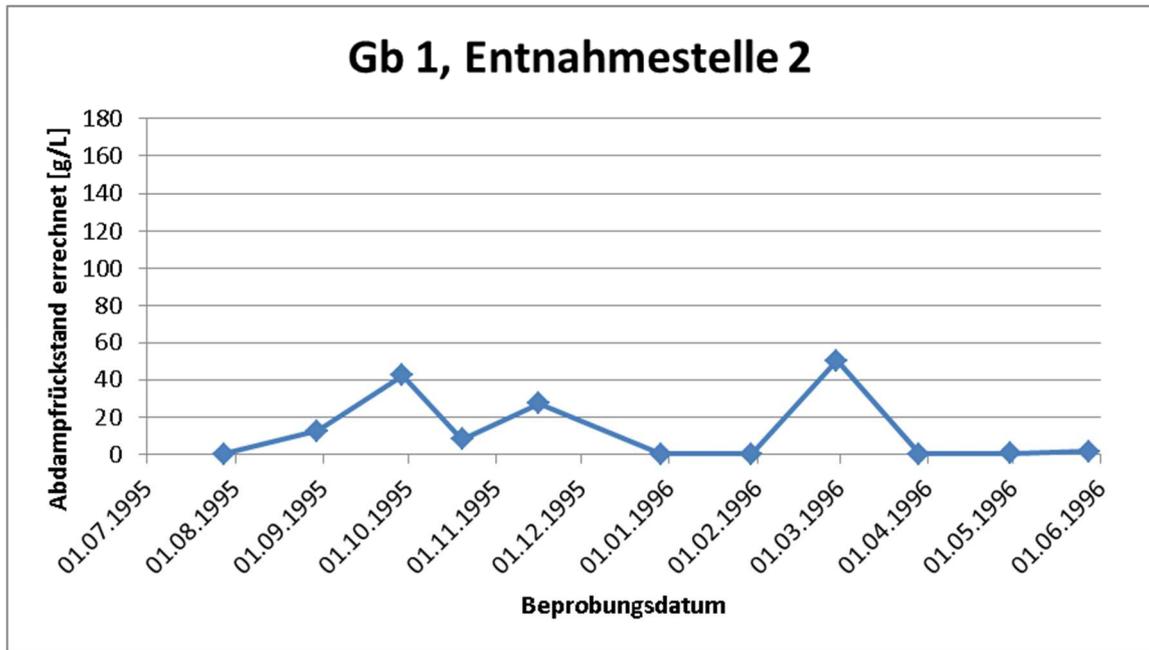


Abb. A6-2: Zeitlicher Verlauf des Abdampfrückstandes an der Entnahmestelle 2, Gb 1 (Datengrundlage: RAG)

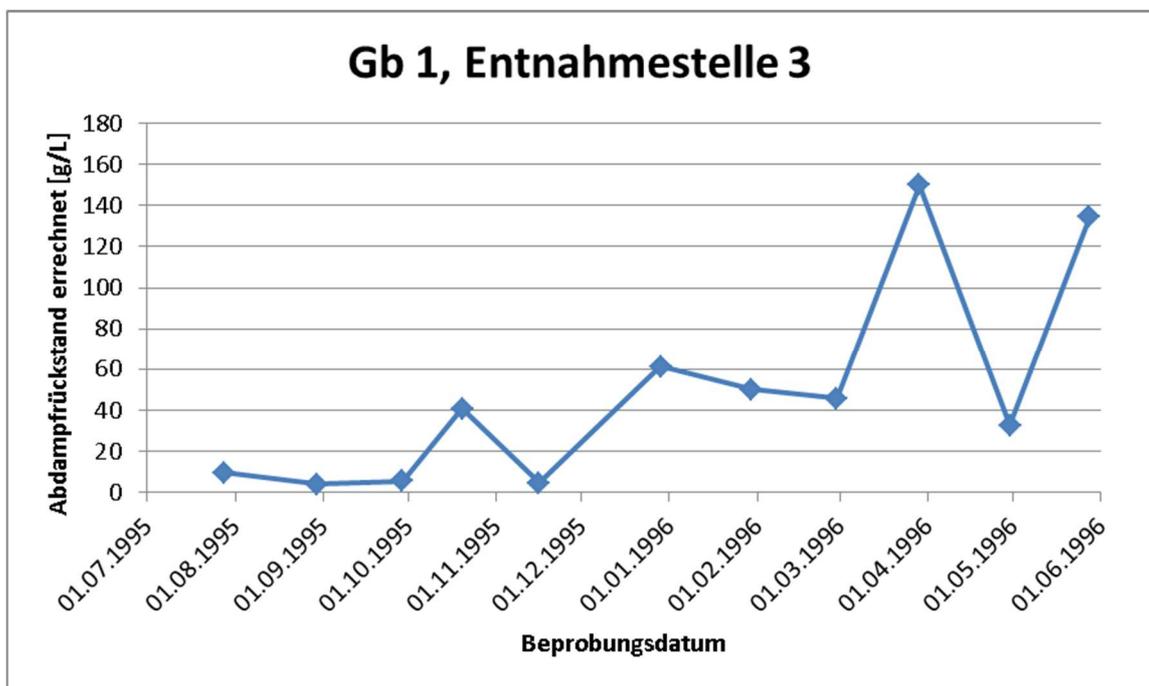


Abb. A6-3: Zeitlicher Verlauf des Abdampfrückstandes an der Entnahmestelle 3, Gb 1 (Datengrundlage: RAG)

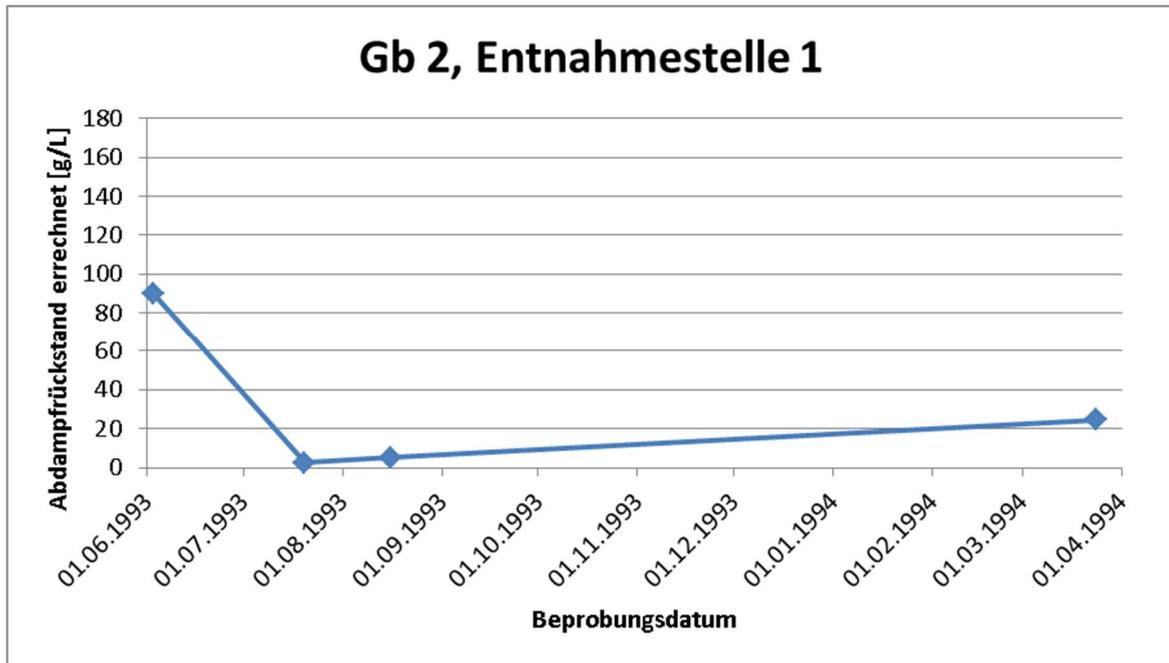


Abb. A6-4: Zeitlicher Verlauf des Abdampfrückstandes an der Entnahmestelle 1, Gb 2 (Datengrundlage: RAG)

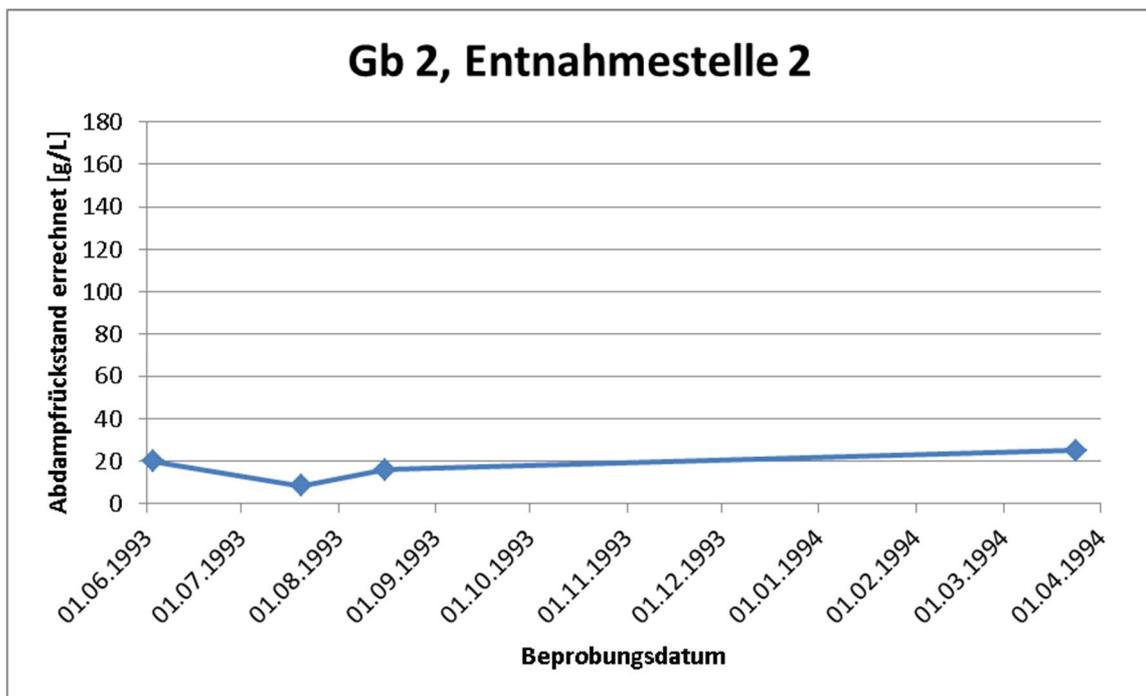


Abb. A6-5: Zeitlicher Verlauf des Abdampfrückstandes an der Entnahmestelle 2, Gb 2 (Datengrundlage: RAG)

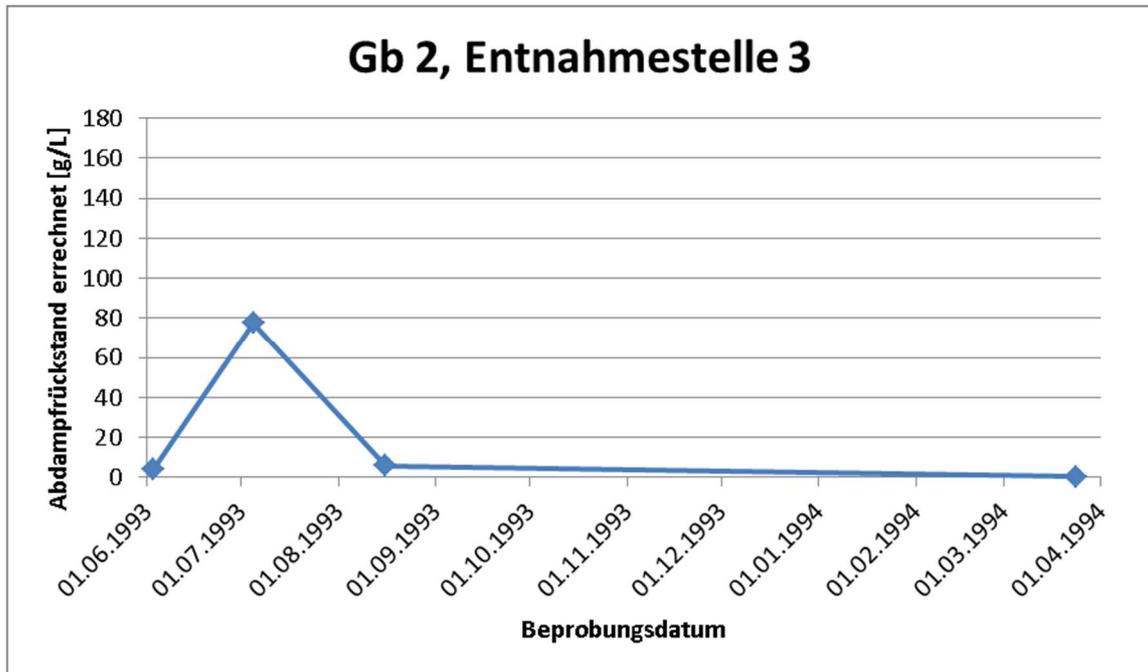


Abb. A6-6: Zeitlicher Verlauf des Abdampfrückstandes an der Entnahmestelle 3, Gb 2 (Datengrundlage: RAG)
Die Bezeichnung der Beprobungsstellen ist nicht eindeutig und nicht konsistent; aus Sicht des Gutachters wurde die Probe vom 05.07.1993 an nicht vergleichbarer Stelle bezüglich der übrigen Proben genommen.

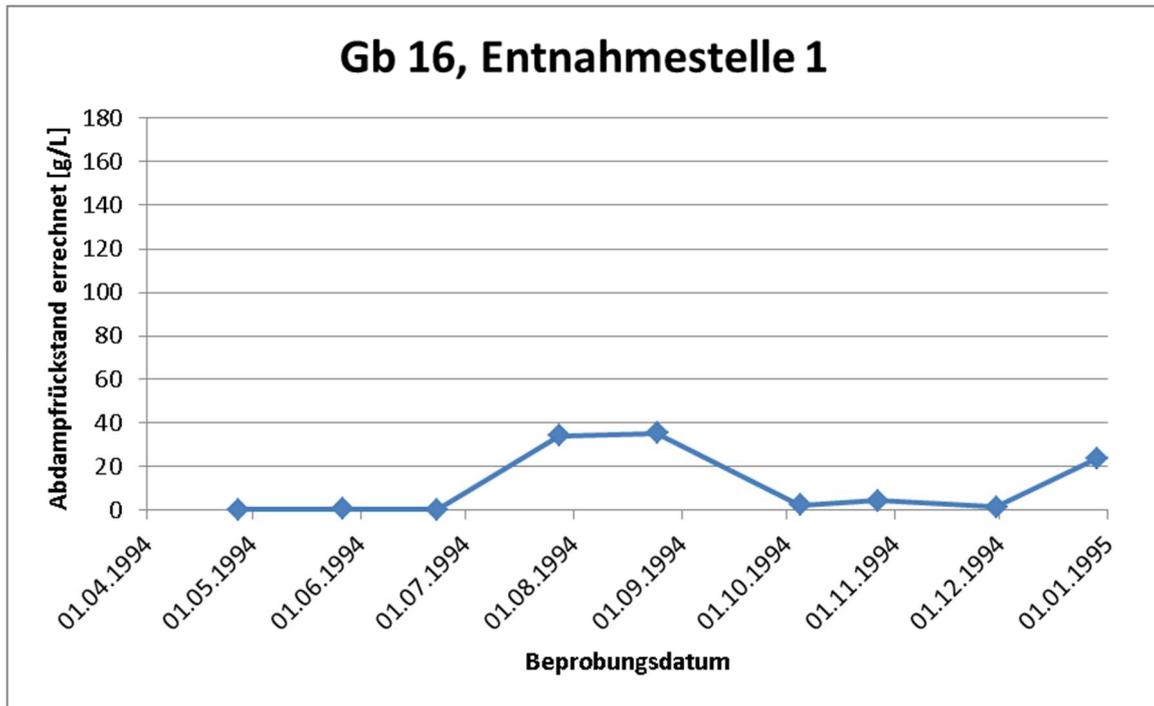


Abb. A6-7: Zeitlicher Verlauf des Abdampfrückstandes an der Entnahmestelle 1, Gb 16 (Datengrundlage: RAG)

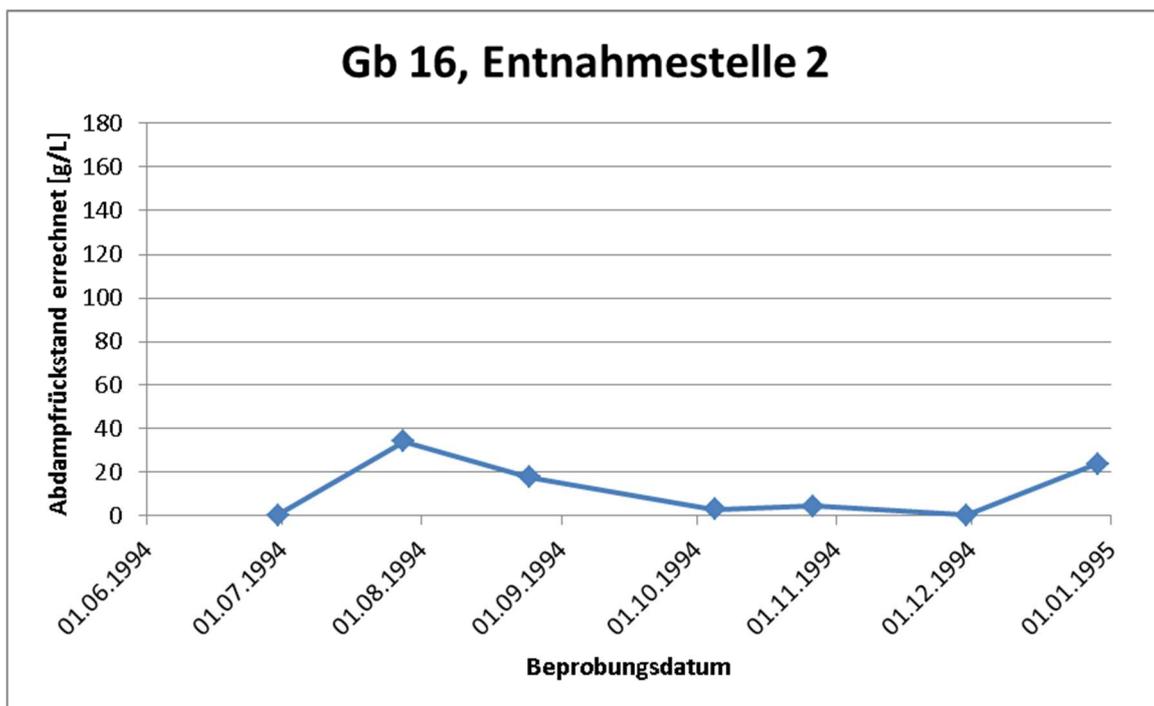


Abb. A6-8: Zeitlicher Verlauf des Abdampfrückstandes an der Entnahmestelle 2, Gb 16 (Datengrundlage: RAG)

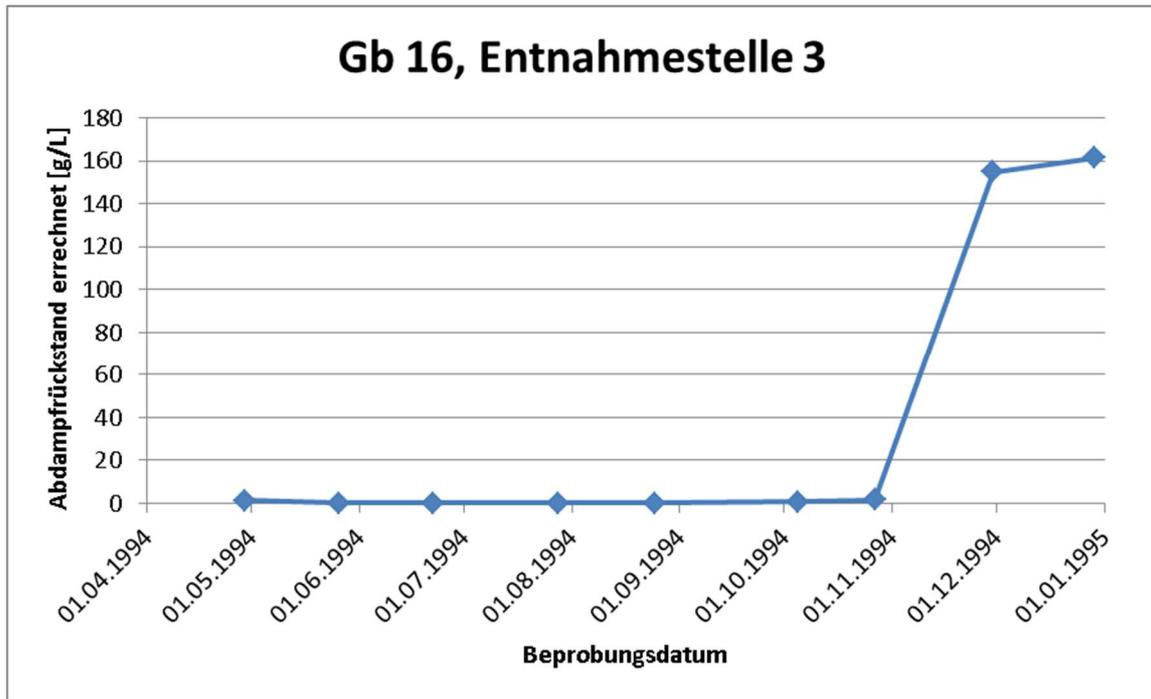


Abb. A6-9: Zeitlicher Verlauf des Abdampfrückstandes an der Entnahmestelle 3, Gb 16 (Datengrundlage: RAG)

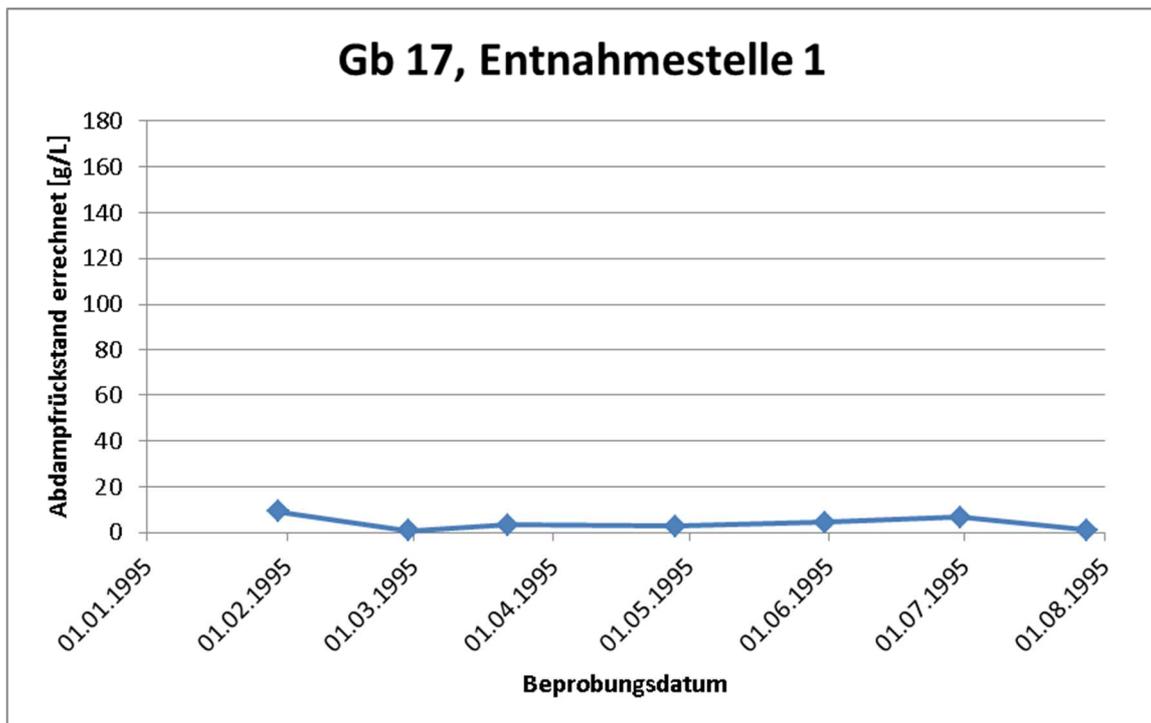


Abb. A6-10: Zeitlicher Verlauf des Abdampfrückstandes an der Entnahmestelle 1, Gb 17 (Datengrundlage: RAG)

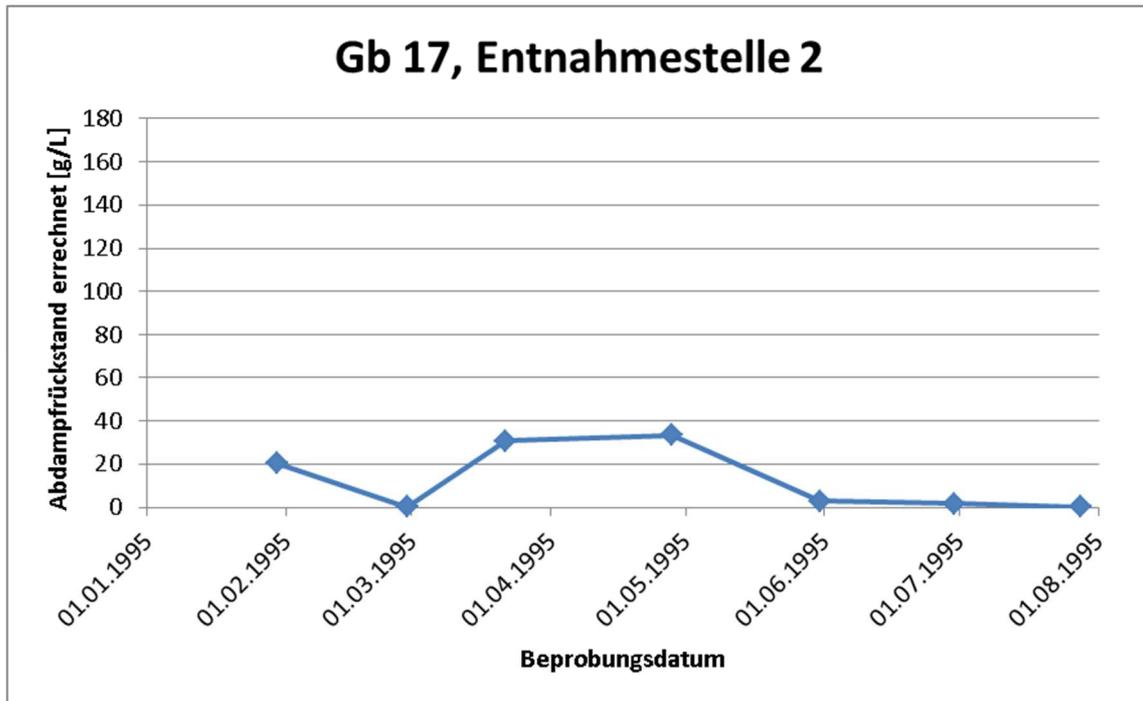


Abb. A6-11: Zeitlicher Verlauf des Abdampfrückstandes an der Entnahmestelle 2, Gb 17 (Datengrundlage: RAG)

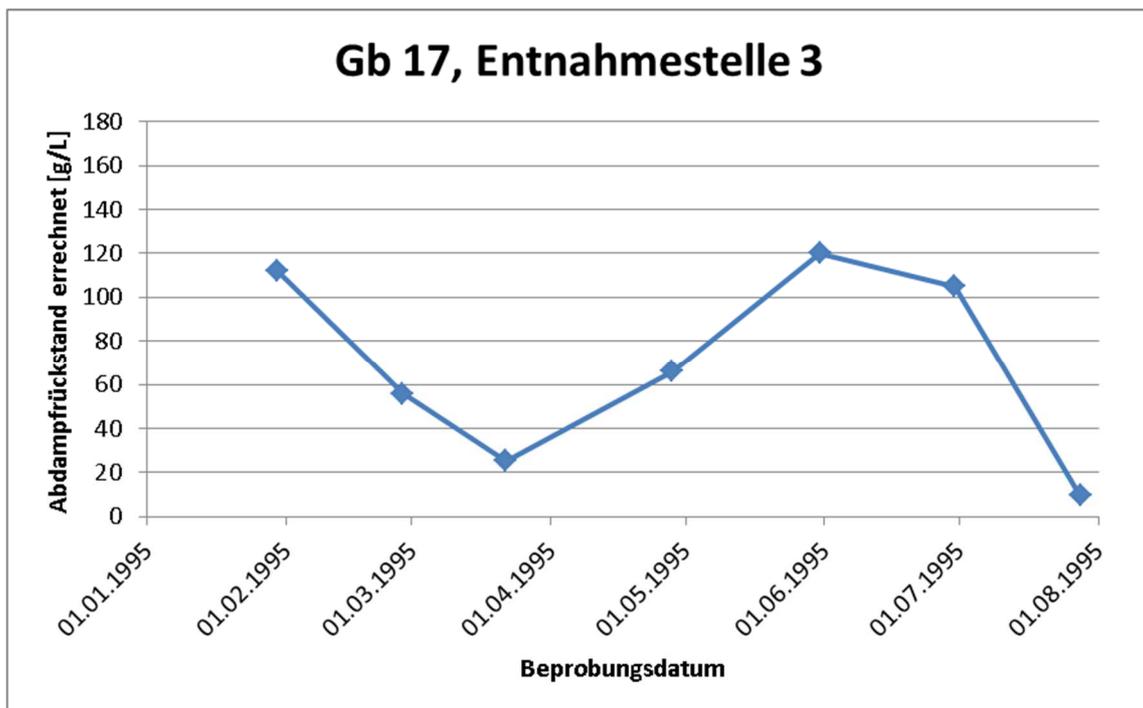


Abb. A6-12: Zeitlicher Verlauf des Abdampfrückstandes an der Entnahmestelle 3, Gb 17 (Datengrundlage: RAG)

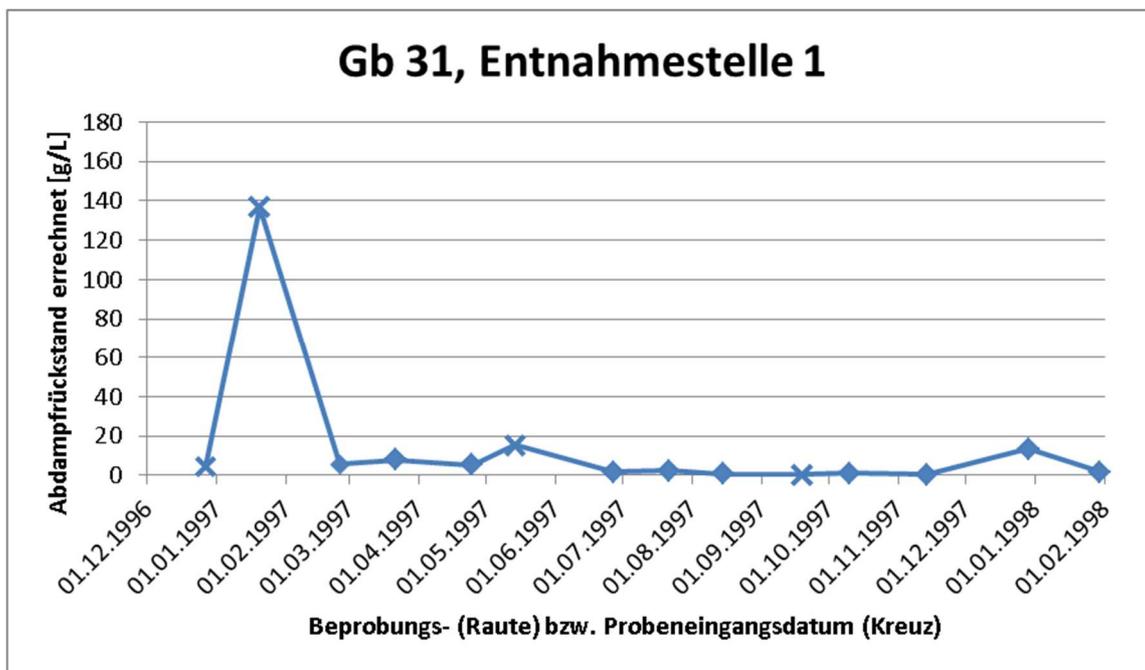


Abb. A6-13: Zeitlicher Verlauf des Abdampfrückstandes an der Entnahmestelle 1, Gb 31 (Datengrundlage: RAG)
 Aus Sicht des Gutachters wurde die Probe vom 20.01.1997 an einer abweichenden Beprobungsstelle oder unter nicht repräsentativen Bedingungen entnommen.

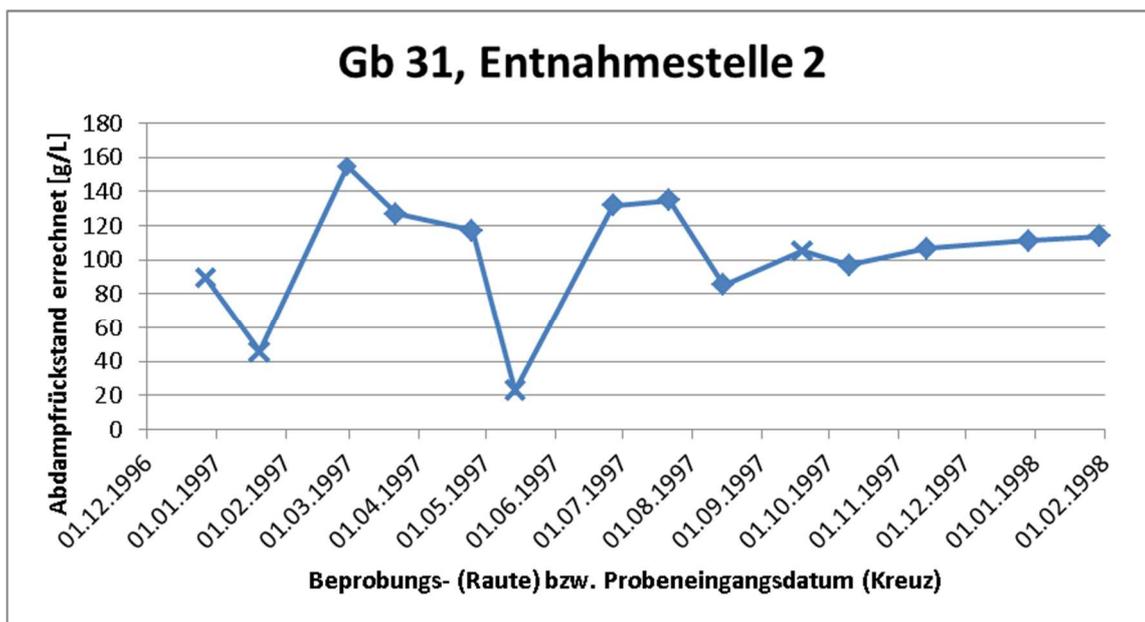


Abb. A6-14: Zeitlicher Verlauf des Abdampfrückstandes an der Entnahmestelle 2, Gb 31 (Datengrundlage: RAG)
 Aus Sicht des Gutachters wurden die Proben vom 20.01. und 14.05.1997 an einer abweichenden Beprobungsstelle oder unter nicht repräsentativen Bedingungen entnommen.

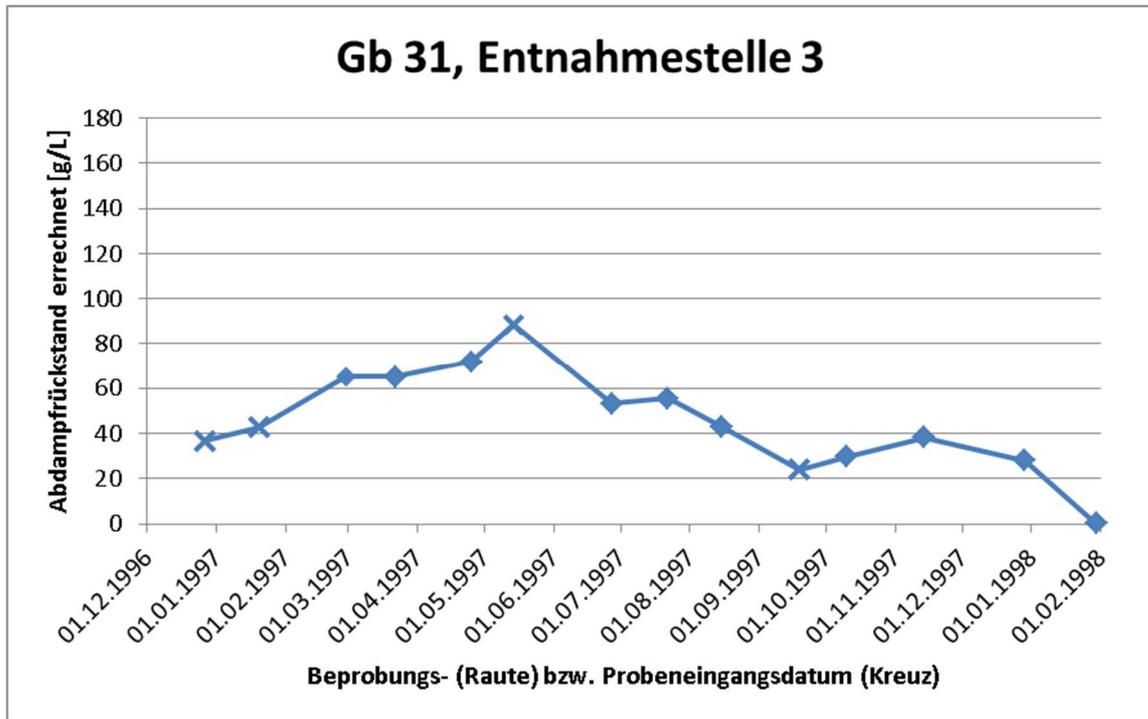


Abb. A6-15: Zeitlicher Verlauf des Abdampfrückstandes der Entnahmestelle 3, Gb 31 (Datengrundlage: RAG)

ANHANG 7

Tab. A7-1: Beschreibungen der Betriebsstörungen (Datengrundlage: Abschlussberichte und Sachstandsberichte der RAG)

Datum	Abbaubetrieb	Ort des Störfalls	Volumen des Material-austritts	Materialbeschaffenheit	Art und Ursache des Störfalls	Maßnahmen zur Behebung des Störfalls
01.07.93	Gb 2	-760 m Sohle, ca. 100 m von Schacht Grillo 4 entfernt	ca. 3 – 5 m ³ Materialaustritte während der Störfallbehebung	Feststoff-Wasser-Gemisch (100% HMVA Iserlohn)	1) Undichtigkeit am Flanschanschluss der Berstscheibe 2) Wiederaufnahme des Pumpbetriebs nach Austausch des Rohrstücks und des Rohrleitungsinhalts (Austausch mit Gemisch aus RAA, HMVA Würzburg und Wasser) durch Viskositätsanstieg nach längerer Pumppause aufgrund technischer Probleme nicht möglich	<ul style="list-style-type: none"> • Austausch des Rohrstücks und zweimaliger Austausch des Rohrleitungsinhalts (beim zweiten Austausch wurde das Material durch ein RAA-Wasser-Gemisch ersetzt) • Materialaustritte wurden in Spezialcontainern aufgefangen und dem Verarbeitungsprozess erneut zugeführt • An 4 Stellen konnten die Materialaustritte nicht restlos entfernt werden. Diese Bereiche wurden durch Torkretieren versiegelt
09.08.93	Gb 2	schwerpumpbarer Bereich in der Kopfstrecke Grimberg 1/2	kein Materialaustritt	Feststoff-Wasser-Gemisch (90% MVA Würzburg, 10% RAA) und RAA-Gemisch	Wiederaufnahme d. Pumpbetriebs nach Pumpunterbrechung durch Viskositätsanstieg nicht möglich	<ul style="list-style-type: none"> • Abschnittsweises Abpumpen des Rohrleitungsinhalts • Rohrleitungsinhalt wurde in den Bruchhohlraum gepumpt
04.11.93	Gb 2	Kopfstrecke Gb 2, in der Nähe des Strebeingangs; Schlepprohr 6	ca. 2 m ³	Feststoff-Wasser-Gemisch (50% MVA, 50% RAA)	Druckabfall in der Rohrleitung durch Ansprechen der Berstscheibe	<ul style="list-style-type: none"> • Einstellung des Pumpbetriebs • Ordnungsgemäße Entsorgung des Austrittsvolumens mittels Spezialcontainern
10.11.94	Gb 16	-760 m Sohle, Bereich Schacht Grillo 4	kein Materialaustritt	Feststoff-Wasser-Gemisch (80% HMVA Hamm, 20% RAA)	<ul style="list-style-type: none"> • Druckanstieg in der Rohrleitung • Viskositätsanstieg durch unvollständige Aufmischung des RAA-Schlammes → Ausfall zweier Messerköpfe im Mischer 	<ul style="list-style-type: none"> • Abpumpen des Rohrleitungsinhalts • Abgepumptes Material wurde dem Verarbeitungsprozess erneut zugeführt
19.05.95	Gb 17	Bereich der Bandstrecke Gb 16 bis zum Streb Gb 17, Bereich südliche Basis Baufeld Gb E1 und südliche Basis Gb Baufeld E2	kein Materialaustritt	Feststoff-Wasser-Gemisch (35% KVA Hoechst, 35% HMVA Essen, 30% RAA)	Wiederaufnahme d. Pumpbetriebs nach Pumpunterbrechung durch Viskositätsanstieg nicht möglich	<ul style="list-style-type: none"> • Abschnittsweises Abpumpen des Rohrleitungsinhalts • Nicht mehr pumpfähiges Material wurde in Spezialcontainern aufgefangen und dem Verarbeitungsprozess erneut zugeführt
19.06.95	Gb 17	Bereich der Bandstrecke Gb 1	kein Materialaustritt	Feststoff-Wasser-Gemisch (80% KVA Bonn, 20% RAA)	Druckanstieg in der Rohrleitung durch Viskositätszunahme	Abschnittsweises Abpumpen des Rohrleitungsinhalts und Auffangen in Spezialcontainern

ANHANG 8

Tab. A8-1: Analysen der untersuchten Gesteine von Wedewardt (1995).

Probenbezeichnung	Einheit	Sandstein (Oberkarbon)	Sandschiefer (Oberkarbon)	Tonmergelge- stein (Em- scher Mergel)	Kalkstein (Oberturon)	Kalkstein (Mittelturon)	Sandstein (Bochum Grünsand)	Kalkstein (Turon)	Sandstein (Essen Grünsand)
Glühverlust 500°	%	1,2	4,2	3,1	4,3	0,4	2	1,5	4,8
Glühverlust 1000°	%	2,9	8,2	21,8	27,4	39,5	12,3	28,9	9,8
F	%	<0,02	0,04	0,05	0,06	0,02	0,14	0,03	0,09
Br	%	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
J	%	<0,001	<0,001	0,003	0,003	0,003	0,01	0,018	<0,001
S	%	<0,01	<0,01	<0,01	0,02	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
CO3	%	0,22	1,83	18,4	23	35,4	7	27,7	2,71
Si	%	37,4	30	22,5	19,4	7	28,4	10,1	28,5
Al	%	5,5	10,3	5	3,6	1	2,2	3,2	2,9
Fe	%	2	4,6	2,7	1,7	0,6	7,3	2	10,5
Na	%	1,1	0,7	0,5	0,4	0,1	0,2	0,2	0,2
K	%	1,8	2,6	1,6	1,2	0,2	3,8	1,2	4,2
Ca	%	0,1	0,2	23,2	40	47,2	11,1	58,3	4,9
Mg	%	0,4	1	0,8	0,6	0,3	1,3	0,9	1,6
Sr	mg/kg	79	113	1.400	1.500	934	364	707	264
Ba	mg/kg	210	309	472	840	182	164	180	193
B	mg/kg	34	83	6.700	305	146	222	97	5.225
Cl	mg/kg	1.190	896	696	962	1.200	698	309	665
SO4	mg/kg	43	258	983	909	456	568	988	592

Probenbezeichnung	Einheit	Sandstein (Oberkarbon)	Sandschiefer (Oberkarbon)	Tonmergelstein (Em-scher Mergel)	Kalkstein (Oberturon)	Kalkstein (Mittelturon)	Sandstein (Bochum Grünsand)	Kalkstein (Turon)	Sandstein (Essen Grünsand)
As	mg/kg	2	6	10	6	<1	4	1	18
Cd	mg/kg	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
Cr	mg/kg	32	97	54	37	8	61	25	109
Cu	mg/kg	7	37	15	10	5	4	7	5
Hg	mg/kg	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Li	mg/kg	16	76	30	24	8	50	23	54
Mn	mg/kg	400	624	200	191	172	102	322	234
Mo	mg/kg	<1	1	2	<1	<1	<1	<1	<1
Ni	mg/kg	15	47	27	32	6	27	16	44
Pb	mg/kg	7	19	17	12	3	5	6	22
Se	mg/kg	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
V	mg/kg	38	122	83	50	11	80	41	170
Zn	mg/kg	41	112	80	41	12	52	25	60