

KALI & STEINSALZ

01
2020

Wertvolle Rohstoffe aus Deutschland

Artschwager, Poppitz, Wilsnack
Die Rückstandshalde – wirklich eine
Black Box?

Scherr, Baucke
Bildverarbeitung zur Prozess- und
Qualitätskontrolle in der Kaliindustrie

Triebel, Flach
Emulsionssprengstoffe für den
Kali- und Steinsalzbergbau

DER KALI- UND SALZBERGBAU IST SYSTEMRELEVANT



Sehr geehrte Leserinnen und Leser,

die Corona-Pandemie wirbelt unser Land kräftig durcheinander. Wir alle sorgen uns um unsere Familien, Freunde, Kollegen und auch um uns selbst.

In unserem Bergbau sind die Auswirkungen natürlich auch zu spüren. Die Arbeit von uns allen hat sich verändert. Das geht weit über die hygienischen Grundregeln (Händewaschen, Husten-/Niesen-Etikette, Händeschütteln) hinaus. Die Umkleide- und Duschköglichkeiten wurden ebenso angepasst wie die Seilfahrt. Die Pausengestaltung und Schichtsystematik kamen auf den Prüfstand. In der Verwaltung hat das Thema Homeoffice einen völlig anderen Stellenwert bekommen. Besprechungen als Video- und Telefonkonferenzen wurden binnen kürzester Zeit zum Standard. Dienstreisen und Schulungen sind auf ein Mindestmaß reduziert worden.

Die Bundesregierung hat einen Schutzschirm für die Wirtschaft beschlossen, der Sofort- und Liquiditätshilfen, Stabilisierungsfonds, Kurzarbeitergeld und andere Maßnahmen umfasst. Alles Bestandteile, um den Leitsatz von Bundeswirtschaftsminister Peter Altmaier „Wir tun alles, damit kein gesundes Unternehmen schließen muss.“ in die Realwirtschaft zu überführen. Es wurden Unterstützungsmaßnahmen für Unternehmen mit systemischer Relevanz (Kritische Infrastruktur) geschaffen.

In der Krise hat sich deutlich gezeigt, dass die heimische Kali- und Salzindustrie für die Grundversorgung in Deutschland und Europa systemrelevant ist. Systemrelevant für

- die Lebensmittelproduktion,
- die Versorgung wichtiger Industriezweige und der (End-) Verbraucher sowie
- Teile der öffentlichen Ordnung.

Die Lebensmittelproduktion braucht die Landwirtschaft und ihre Erträge. Unsere Branche stellt mineralische Düngemittel her, die Mikronährstoffe wie Kalium – ein wichtiger Hauptnährstoff zur Pflanzenernährung – und Magnesium sowie Schwefel enthalten. Weitere Mikronährstoffe (Bor, Zink, Mangan u. a.) werden produktbezogen bereitgestellt. So werden landwirtschaftliche Erträge in Menge und Qualität abgesichert und unsere Grundernährung gewährleistet. Wir sollten auch nicht vergessen, dass Salz elementar wichtig für den menschlichen Körper und seine

Stoffwechselfunktionen ist (Regelung des Wasserhaushaltes, Gewebespannung als Grundlage für die Erregbarkeit von Nerven und Muskeln, Knochenbau und Verdauung).

Andere wichtige Industriezweige wie die Pharma-, Futtermittel-, Zellstoff- und Chemieindustrie stellen aus den Rohstoffen Kali und Salz hochwertige und essentielle Endprodukte her. Zum Beispiel Dialyse- und Infusionslösungen, die bei Covid-19-Patienten eingesetzt werden, sowie Desinfektionsmittel, die mit Hilfe der Chlor-Alkali-Elektrolyse produziert werden. Auch die Zellstoffindustrie (Stichwort: Toilettenpapier) und die Wasserenthärtung (Stichwort: Krankenhäuser) sind weitere Beispiele, die bei der Corona-Pandemie in den Vordergrund gerückt sind.

Aber unser Bergbau erfüllt zusätzlich noch eine andere volkswirtschaftlich wichtige Aufgabe: Wir sind Teil einer notwendigen Entsorgungskette (Müllabfuhr – thermische Verwertung inkl. Energieerzeugung – Verwertung und Beseitigung), die wir helfen sicherzustellen. Die untertägigen Hohlräume der Kali- und Salzindustrie werden genutzt, um u. a. Rauchgasreinigungsrückstände und Aschen aus Verbrennungsanlagen langzeitsicher und schadlos zu verwerten bzw. zu beseitigen. Damit wird ein großer Teil des Entsorgungsbedarfs in Deutschland abgedeckt. So gilt es – und das nicht nur im Zusammenhang mit der Corona-Krise – dafür zu sorgen, dass beispielsweise Klinikabfälle (zum Beispiel Mundschutz, Handschuhe) fachgerecht entsorgt werden können.

Nach meiner Einschätzung veranschaulichen die zuvor erwähnten Zusammenhänge und Beispiele sehr deutlich, warum die mineralischen Rohstoffe Salz und Kali sowie die Dienstleistung der untertägigen Entsorgung systemrelevant und damit äußerst wertvoll für unsere Bevölkerung sind. Gerade in der Krise wird verständlich, warum wir immer wieder von Neuem eine Stärkung der heimischen Produktion fordern und für ausgewogene Randbedingungen werben.

Es grüßt Sie mit einem herzlichen Glückauf

Ihr

Christoph Wehner

03 Editorial

04 Impressum

05 Abstracts

06 Artschwager, Poppitz, Wilsnack Die Rückstandshalde – wirklich eine Black Box?

24 Scherr, Baucke Bildverarbeitung zur Prozess- und Qualitätskontrolle in der Kaliindustrie

34 Triebel, Flach Emulsionssprengstoffe für den Kali- und Steinsalzbergbau

47 Nachrichten aus den Unternehmen

Titelbild:
Absetzeinheit (Pylon) auf der Halde IV des Standortes Wintershall,
Werk Werra, K+S Minerals and Agriculture GmbH

Impressum

Kali und Steinsalz

herausgegeben vom Verband
der Kali- und Salzindustrie e.V. (VKS e. V.)

VKS e. V.

Reinhardtstraße 18A
10117 Berlin
Tel. +49 (0) 30.8 47 10 69.0
Fax +49 (0) 30.8 47 10 69.21
info.berlin@vks-kalisalz.de
www.vks-kalisalz.de

Erscheinungsweise

dreimal jährlich in loser Folge
ISSN 1614-1210

Redaktionsleitung

Dieter Krüger, VKS e. V.
Tel. +49 (0) 30. 8 47 10 69 13

Redaktionsausschuss

Dr. Burkhard Dartsch, K+S Minerals and Agriculture GmbH
Uwe Handke, K+S Minerals and Agriculture GmbH
Gerd Kübler, K+S Aktiengesellschaft
Dr. Frieder Tonn, K+S Aktiengesellschaft
Dr. Ludger Waldmann, K+S Aktiengesellschaft
Christoph Wehner, VKS e. V.

Gestaltung

Dirk Linnerz
Mobil: +49 (0) 171.1448597
info@linnerz.com
www.linnerz.com

Hinweis zu Rechten an Bildern, Grafiken u. a.

Alle Bildrechte liegen bei den Autoren. Davon abweichende Ausnahmen werden mit einer Quellenangabe gekennzeichnet. Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der Grenzen des Urheberrechts ist ohne schriftliche Genehmigung des VKS e. V. unzulässig. Dies gilt auch für herkömmliche Vervielfältigungen (darunter Fotokopien, Nachdruck), Übersetzungen, Aufnahme in Mikrofilmarchive, elektronische Datenbanken und Mailboxes sowie für Vervielfältigungen auf CD-ROM oder anderen digitalen Datenträgern. Jede im Bereich eines gewerblichen Unternehmens zulässig hergestellte oder benutzte Kopie dient gewerblichen Zwecken gem. § 54 (2) UrhG und verpflichtet zur Gebührenzahlung an die VG Wort, Abteilung Wissenschaft, Goethestr. 49, D-80336 München.

06 Artschwager, Poppitz, Wilsnack: The potash tailing heap – really a black box?

In the context of permitting procedures for heap expansions on Hattorf and Wintershall sites, an extensive drilling and research programme on both heaps was carried out in order to prove and complement to the model conception of flow processes inside the heaps. The programme was based on general knowledge of processes in saline environments as well as on former research work, on which this article gives a short overview. As a consequence of the displayed research results, heaps turn out not to be a homogenous, monolithic body, but show varying characteristics throughout the residues, depending on the position inside the heap and their ageing process. For that reason, the model conception of heaps was extended, as presented in the article. Furthermore, flow processes inside the heap were identified, observed and described. The results of the drilling programme provide important basics for the development of technical concepts to minimize the heap's environmental impacts.

24 Scherr, Baucke: Machine vision systems for quality and process control purpose in potash industry

Image processing systems in the potash and rock salt industry basically describe automation processes that are based on the human visual system. The first systems for example were used in the form of QR code scanners in packaging and final processing. With increasing performance and decreasing costs of hardware components, the market for industrial image processing (so-called machine vision) grew continuously and rapidly, opening up a completely new area of application. Within the K+S Group, this field of application is handled by the analytics and research centre. Such solutions are promising in the area of process control and quality assurance of production goods, which is becoming increasingly important in terms of differentiation from competitors. By integrating this technology, the efficiency of plants can be significantly increased.

34 Triebel, Flach: Emulsion explosives for potash and rock salt mining

Drill and blast is still a core process in underground mining operations around the world. In particular in underground potash and rock salt mining in Germany, blasting it is widely applied because of safety concerns deriving from special geologic conditions and economic reasons.

Due to the dry conditions underground, granular bulk explosives based on ammonium nitrate are very suitable in potash and rock salt mining. This was identified very early by MSW-Chemie GmbH, the most important manufacturer in Germany, which has been supplying the mining industry with high-quality Ammonium Nitrate Fuel Oil (ANFO) explosives for many decades. By according research and development, especially the nitrogen oxide emissions of these explosives have been continuously reduced. However, the values achieved are not sufficient to meet the very high requirements resulting from the new occupational exposure limits for nitrogen oxides applicable in the mining industry from November 2021.

K+S has been using bulk emulsion explosives in trials since 2002 in order to gain experience and to take advantage of the considerably lower nitrogen oxide emissions in the blast fumes. These activities have been significantly strengthened since 2016, in particular to adapt the logistics and the on-site mixing technology to the special conditions and requirements of the K+S mines. In 2019, the K+S Group decided to introduce emulsion explosives in all mines in Germany.

On this occasion, this article presents the current fundamentals of bulk emulsion explosives technology. The benefits regarding much lower toxic fumes are highlighted, and the major challenges of the transition towards the application of bulk emulsion explosives in the K+S mines are described.

DIE RÜCKSTANDSHALDE – WIRKLICH EINE BLACK BOX?

Haldenbohrungen liefern neue Erkenntnisse zu Strömungsprozessen und Wasserhaushalt in Rückstandshalden der Kaliindustrie



Vertikalbohrung auf der ESTA-Rückstandshalde des Standortes Hattorf, Werk Werra, K+S MA



Christian Artschwager
Sachgebietsleiter Geotechnik,
Umwelt/Genehmigungen
K+S MA, Werk Werra



Hanka Poppitz
Teamleiterin Halden,
Umwelt/Genehmigungen
K+S MA, Werk Werra



Dr. Thomas Wilsnack
IBeWa, Ingenieur-
partnerschaft für
Bergbau, Wasser und
Deponietechnik

Veranlasst durch die Haldenerweiterungsverfahren an den Standorten Hattorf und Wintershall wurde ein umfangreiches Bohr- und Erkundungsprogramm der Rückstandshalden des Werkes Werra der K+S Minerals and Agriculture GmbH realisiert. Dies erfolgte mit dem Ziel, die bestehende Modellvorstellung vom Aufbau des Haldenkörpers zu verifizieren, zu erweitern und die Strömungsprozesse im Haldenkörper zu beurteilen. Die durchgeführten Feld- und Laboruntersuchungen basierten auf dem bisherigen Kenntnisstand und den Ergebnissen früherer Untersuchungen sowie allgemeinen Prozessvorstellungen, über die nachfolgend ein Überblick gegeben wird. Im Ergebnis konnten der „Black Box“ Halde einige Erkenntnisse entlockt werden: die Modellvorstellungen zum Aufbau des Haldenkörpers wurden erweitert und die ablaufenden Strömungsprozesse differenziert beschrieben. Es zeigte sich, dass die Halde keineswegs ein homogener, monolithischer Körper ist, sondern die Rückstandseigenschaften innerhalb der Halde und damit auch die Strömungsprozesse raum- und zeitabhängig variieren. Mit den Ergebnissen wurden wesentliche Grundlagen für die Weiterentwicklung technischer Konzepte zur Minimierung von Umweltauswirkungen im Rahmen der Haldenerweiterungsverfahren geschaffen.

The potash tailing heap – really a black box?

In the context of permitting procedures for heap expansions on Hattorf and Wintershall sites, an extensive drilling and research programme on both heaps was carried out in order to prove and complement to the model conception of flow processes inside the heaps. The programme was based on general knowledge of processes in saline environments as well as on former research work, on which this article gives a short overview. As a consequence of the displayed research results, heaps turn out not to be a homogenous, monolithic body, but show varying characteristics throughout the residues, depending on the position inside the heap and their ageing process. For that reason, the model conception of heaps was extended, as presented in the article. Furthermore, flow processes inside the heap were identified, observed and described. The results of the drilling programme provide important basics for the development of technical concepts to minimize the heap's environmental impacts.

1. Einführung

Mit der Einführung des § 22a der Allgemeinen Bundesbergverordnung (ABBergV) und des zugehörigen Anhangs 6 wurde im Jahr 2008 die Anforderung definiert, die Wasserbilanz von Abfallentsorgungseinrichtungen sowohl während der Betriebs- als auch für die Nachsorgephase zu ermitteln (Anhang 6, Nr. 2 zu § 22a ABBergV). Für die Rückstandshalden der Kaliindustrie wurde es damit erforderlich, Haldenwasserbilanzen aufzustellen, die hierfür erforderlichen Parameter zu bestimmen, und die Bilanzen fortzuschreiben. Eine konkrete Prognose des Haldenwasseranfalls in Menge und Zusammensetzung war bereits zuvor von Interesse für die Haldenbetreiber, um die Entsorgungssicherheit der anfallenden Haldenwässer zu gewährleisten. Den Haldenwasserbilanzen kommt allerdings in Verbindung mit den Vorgaben der EU-Wasserrahmenrichtlinie eine wachsende Bedeutung für die Entsorgung flüssiger Rückstände über die Einleitung in Gewässer zu.

Gleichzeitig fordert der § 22a ABBergV, Abs. 1, die von den Abfallentsorgungseinrichtungen – in diesem Fall den Rückstandshalden – ausgehenden Umweltauswirkungen so weit wie möglich zu vermeiden oder zu vermindern. Grundlage für die Weiterentwicklung der bei der Aufhaltung zur Anwendung kommenden technischen Konzepte ist dafür ein verbesserter Kenntnisstand in Bezug auf die Strömungsprozesse im Haldenkörper.

Seit Beginn der Aufschüttung von Großhalden führte die Kaliindustrie wiederholt Untersuchungen an Rückstandshalden im Kontext dieser Fragestellungen durch, um die strömungstechnischen Prozesse und stofflichen Eigenschaften des Rückstands innerhalb der Haldenkörper zu erkunden. Zu nennen sind hier verschiedene Projekte, wie beispielsweise die Haldendurchörterung Bleicherode und eine Reihe von Bohrprogrammen durch K+S in den Werken Neuhoft-Ellers und Zielitz, an der Althalde Niedersachsen in Wathlingen sowie im Werk Werra.

Auf diesen Untersuchungen gründet die Vorstellung zur Zonierung der Rückstandshalden in einen weitgehend undurchlässigen Haldenkern und einen wenige Dekameter breiten Haldenmantel, in welchem die wesentlichen Strömungsprozesse innerhalb des Rückstands stattfinden.

Die im § 22a ABBergV definierten Anforderungen rückten, bei den in den vergangenen Jahren durchgeführten Genehmigungsverfahren zur Erweiterung der Rückstandshalden, zunehmend in den Fokus. So wurde beispielsweise im Rahmen des Scopings für die Haldenerweiterungen in Hattorf und Wintershall die behördliche Forderung erhoben, die Strömungsprozesse innerhalb der Halden zu beschreiben, durch Bohrungen weiterführend zu

erkunden und die Modellvorstellung von einem dichten Haldenkern zu überprüfen.

Die hierbei ermittelten Ergebnisse sollten nicht nur zur Verbesserung des Kenntnisstands über die „Black Box“ Halde dienen, sondern darüber hinaus insbesondere zur Ermittlung und Verifizierung der Eingangsparameter für die Haldenwasserbilanzen und damit der Prognosen über die Auswirkungen auf Grund- und Oberflächenwässer sowie über den Haldenwasseranfall in der Betriebs- und Nachbetriebsphase. Diese wiederum bilden die Grundlage für die zu entwickelnden technischen Konzepte zur Herrichtung der Haldenaufstandsfläche und Minimierung der Umweltauswirkungen sowie für die zu planenden Entsorgungsstrategien.

Die umfangreichen Ergebnisse der Erkundungen sowie detaillierte Informationen zu den durchgeführten Untersuchungen wurden in den Antragsunterlagen zu den Haldenerweiterungsverfahren an den Standorten Hattorf [1] und Wintershall [2] dokumentiert. Nachfolgend wird eine Übersicht des erreichten Kenntnisstandes und Prozessverständnisses gegeben.

2. Ausgangslage: Bisheriger Kenntnisstand zu den Prozessen in den Haldenkörpern

An allen Großhalden der deutschen Kaliindustrie werden im Jahr jeweils mehrere Millionen Kubikmeter Rückstand aus der Aufbereitung von Kalirohsalzen abgelagert. Die chemisch/mineralogische Zusammensetzung und Materialeigenschaften der „frischen“ Rückstände, d.h. im Zustand der Aufhaltung, hängen von den Lagerstättenbedingungen und angepasst daran, den an den Werken der Haldenstandorte eingesetzten Aufbereitungsverfahren ab. Es werden im Wesentlichen als „trockenes“ Aufbereitungsverfahren das ESTA®-Verfahren sowie als „nasse“ Aufbereitungsverfahren die Flotation und das Heißlöseverfahren eingesetzt. Zur Staubminderung wird der ESTA®-Rückstand angefeuchtet. Die einzelnen Rückstandsteilströme werden auf dem Weg zum Abwurfpunkt auf der Halde miteinander vermischt.

Von den Rückstandsanteilen der verschiedenen Aufbereitungsverfahren am Gesamtrückstand hängen maßgeblich die Kornverteilung und Kornform, die Restfeuchte, und, in Verbindung mit dem Chemismus des Rohsalzes, auch der Chemismus der dem Rückstand anhaftenden Salzlösung ab. Die mineralogische Zusammensetzung des Rückstands bestimmt u.a. dessen Hydratationsfähigkeit und Gleichgewichtsfeuchte. Die Parameter Korngrößenverteilung, Salzlösungsgehalt und Salzlösungschemismus haben wesentlichen Einfluss auf die geotechnischen und strömungstechnischen Eigenschaften des Rückstands und

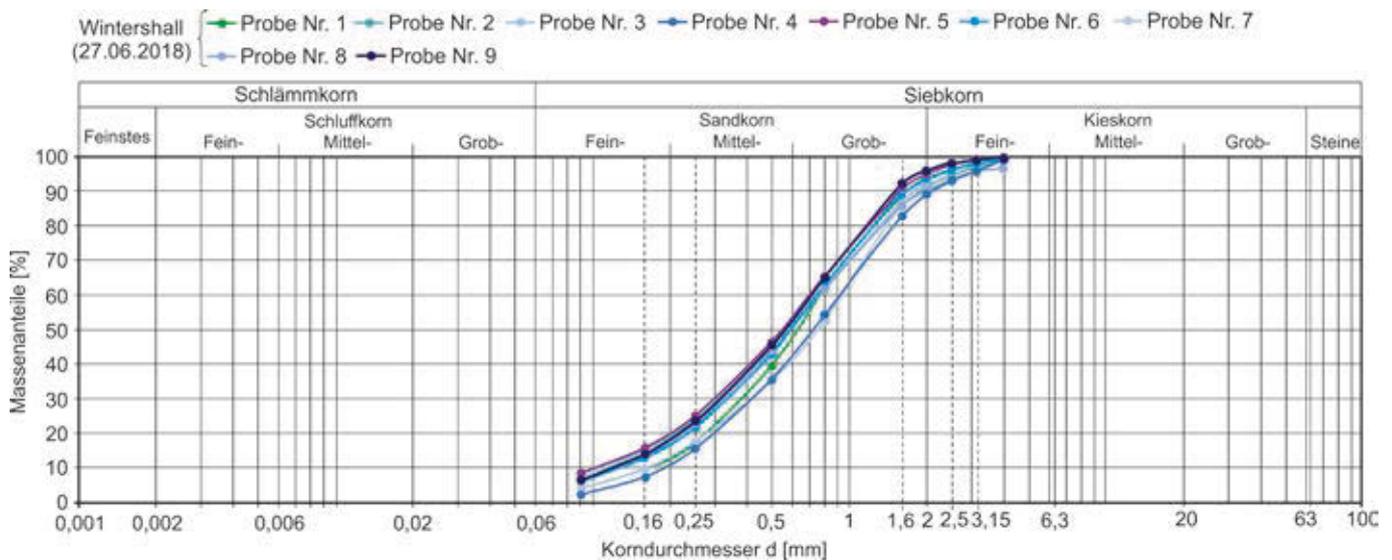


Abbildung 1: Korngößenverteilung des Rückstandsmaterials der Halde Wintershall [4]

daraus resultierend auf das Festigkeits- und Verformungsverhalten des Haldenkörpers.

Die Aufhaldung der Aufbereitungsrückstände erfolgt im Block- oder Flankenschüttverfahren ohne bzw. teilweise kombiniert mit der Schüttung von Bermen. Zur Minimierung der Aufstandsfläche und des damit verbundenen Haldenwasseranfalls werden kompakte Haldenformen und Haldenhöhen im Mittel von etwa 150 m bis 180 m über Grund angestrebt. Dies ist standortabhängig mit einem Flächenverbrauch von mehreren Hektar pro Jahr verbunden.

Die so entstehenden Haldenkörper stellen initial, d. h. im jeweiligen Flankenbereich mit laufendem Schüttbetrieb, eine poröse Lockermaterialschüttung dar. Der Rückstand hat im „frischen“ Zustand granulare Eigenschaften mit einem Hauptkörnungsspektrum im Sandbereich und überwiegend eng gestufter Kornverteilung. In diesem Zustand ist der Rückstand schütffähig, vergleichbar mit natürlichen Mineralgemischen. Die Abbildung 1 zeigt exemplarisch die Kornverteilungen des Gesamtrückstands der Halde IV, Wintershall.

Nach der Ablagerung führen chemisch-mineralogische Prozesse unter Atmosphäreneinfluss und dem Einfluss der anhaftenden Restfeuchte sowie eine lastbedingte Kompaktion (Verdichtung des Rückstands unter Eigenlast) zu einer Verfestigung des Rückstands. Im Haldenkörper hat der Rückstand dann Festgesteinscharakter. Dies führt, wegen der besonderen salzmechanischen Eigenschaften, spannungsabhängig zu elastischen, plastischen und viskosen, d.h. zeitabhängig kriechenden Verformungen. Aufgrund der dem geschütteten Rückstand anhaftenden Restfeuchte ist von einer teilweisen Füllung des Porenraums mit Salz-

lösung, d. h. von einem ungesättigten Zustand auszugehen. Aufgrund der porösen Lagerungsstruktur besteht an der Schütt- bzw. Haldenoberfläche eine vergleichsweise hohe Porosität und Permeabilität (s. Infobox).

Der Kenntnisstand vor Untersuchungsbeginn zum Aufbau des Haldenkörpers unter Berücksichtigung der vorstehend beschriebenen Prozesse ist im „Reference Document on Best Available Techniques for Management of Tailings and Waste-Rock in Mining Activities“ in der Fassung aus 2009 zusammenfassend dargestellt [3]: Die Rückstandshalden weisen demnach eine undurchlässige Haldenkernzone auf. Das sich restfeuchte- und niederschlagsbedingt bildende Haldenwasser fließt in einer äußeren Zone rund um diese Kernzone ab (siehe Abbildung 2). Die hier zitierte Fassung aus 2009, die dem Untersuchungsprogramm zu Grunde lag, wurde zwischenzeitlich durch die neu strukturierte Fassung 2018 ersetzt.

3. Weiterführende Untersuchungen zum Haldenkörperverhalten im Zuge von Genehmigungsverfahren zu Haldenerweiterungen im Werk Werra

Veranlasst durch die behördliche Forderung nach einer weitergehenden Erkundung des Haldenkörperverhaltens und der Überprüfung der bisherigen Vorstellung zur Haldenzonierung (siehe Abbildung 2) im Rahmen der Genehmigungsverfahren zu den Haldenerweiterungen wurde im Zeitraum 2013–2015 ein umfangreiches, fachgebietsübergreifendes Erkundungsprogramm an den Rückstandshalden Hattorf und Wintershall umgesetzt.

Dieses fußte auf den Untersuchungszielen, dem vorstehend beschriebenen Kenntnisstand sowie umfangreichen Recherchen zu Erkenntnissen aus anderen

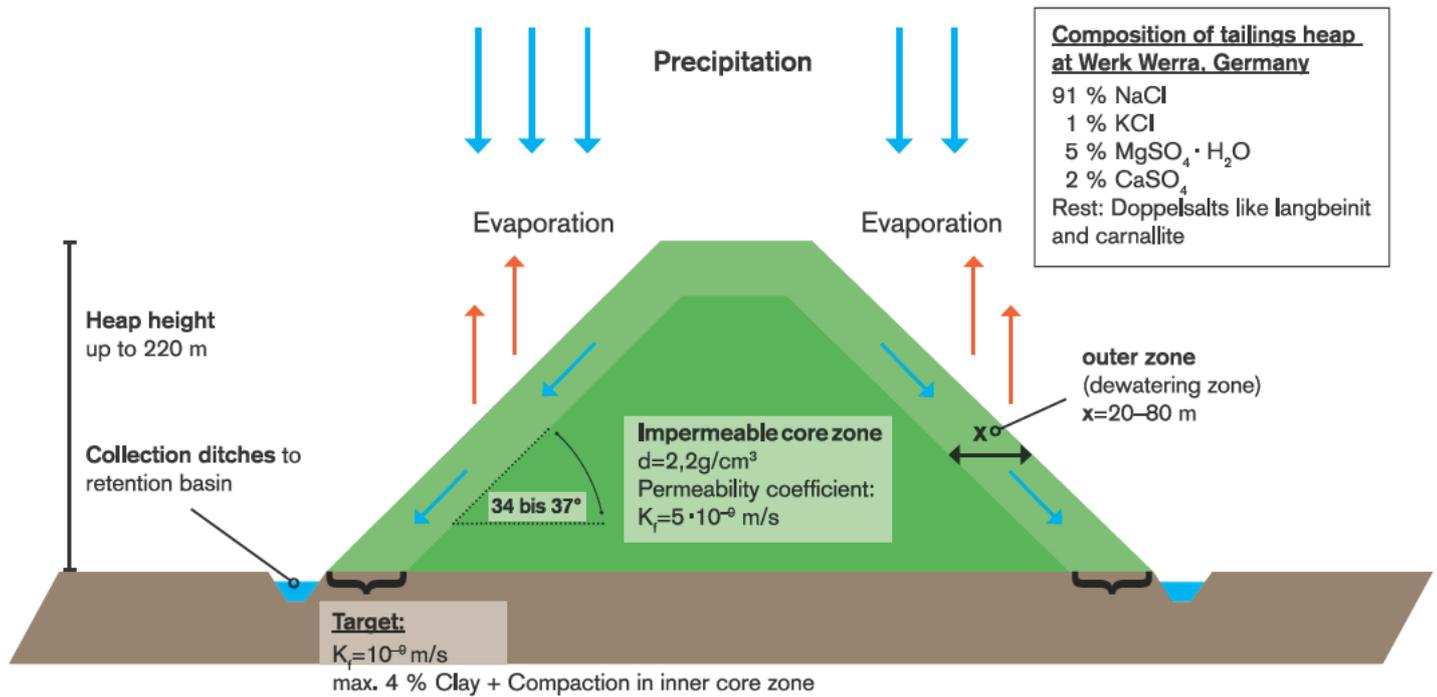


Abbildung 2: Schematischer Querschnitt durch eine Rückstandshalde, digitalisiert aus [3]

Untersuchungsprogrammen an in Betrieb befindlichen und stillgelegten Rückstandshalden der Kaliindustrie. Es umfasste zwei Vertikal- und drei Horizontalbohrungen am Standort Hattorf sowie eine weitere Horizontalbohrung am Standort Wintershall, jeweils mit Längen von mindestens rund 100 m. Die Bohrungen wurden im Seilkernverfahren mit durchgehendem Kerngewinn durch die BOG Bohr- und Umwelttechnik GmbH, Caaschwitz, ausgeführt. Im Hinblick auf die geplanten Laborversuche wurden zur Gewinnung möglichst ungestörter Kernproben PVC-Liner und als Bohrspülung Luft eingesetzt. Begleitend zu den Bohrungen wurden geophysikalische und geohydraulische Bohrlochuntersuchungen sowie Kamerabefahrungen durchgeführt. Untersuchungen zu physikalischen Eigenschaften sowie die chemische und mineralogische Analytik des Kernmaterials wurden im Analytik- und Forschungszentrum der K+S (AFZ) durchgeführt. Weiterhin wurden Kernproben für strömungstechnische Untersuchungen gewonnen, welche durch die IBeWa Ingenieurpartnerschaft für Bergbau, Wasser und Deponietechnik Freiberg durchgeführt wurden.

Durch die Zusammenführung aller Ergebnisse aus Erkundung, Laborversuchen und Literaturdaten konnte das nachfolgend beschriebene Bild zu den Strömungsprozessen in der Halde gezeichnet werden. Bei den Halden Hattorf und Wintershall handelt es sich um kieseritische Steinsalzhalde, d.h. der aufgehaldete Rückstand besteht

überwiegend aus Natriumchlorid mit geringen Restgehalten an Kieserit. Die Zusammensetzung ist für beide Halden vergleichbar, so dass jeweils ein identisches Programm an Bohrloch- und Laboruntersuchungen aufgelegt wurde.

Am Standort Hattorf wurden für die Bohrungen Bereiche mit unterschiedlich langer Ablagerungsdauer zwischen rund 4 Jahren und rund 20 Jahren zur Erkundung ausgewählt, um zeitabhängige Prozesse beurteilen zu können. Über diesen Zeitraum gab es keine wesentlichen Änderungen in der Zusammensetzung der aufgehaldeten Rückstände.

Am Standort Wintershall wurde mit einer zusätzlichen Bohrung gezielt eine alte Haldenoberfläche durchteuft, die vor der erneuten Überschüttung für längere Zeit dem Atmosphäreneinfluss ausgesetzt war. Im Ergebnis sollten daraus Erkenntnisse über Strömungsprozesse an ehemaligen Haldenoberflächen abgeleitet werden. Gleichzeitig sollten grundsätzliche, auf der Halde Hattorf gefundene Gegebenheiten überprüft werden.

Zur Überprüfung der bestehenden Modellvorstellung von Haldenmantel und -kern und basierend auf den im Vorfeld erfolgten Literaturrecherchen wurden Methoden und Kriterien zur Abgrenzung von Bereichen innerhalb der Halde definiert. Diese umfassten:

1. Lage, Volumen und Chemismus von Zuflüssen in die Bohrungen (Beobachtungen im Bohrgeschehen, geo-

- hydraulische Untersuchungen, Packertests und Kamerafahrten),
2. Ergebnisse der Dichte- und Porositätsbestimmungen sowie die berechneten Porenraumsättigungen (mit zunehmender Überlagerung ist grundsätzlich eine Kompaktion des Rückstands und Verringerung der Porosität bei gleichzeitig steigender Sättigung zu erwarten),
 3. Ergebnisse der Durchlässigkeitsbestimmungen (geohydraulische Bohrlochuntersuchungen und Laborversuche im Kontext zu den Annahmen unter Punkt 2),
 4. Anteile von Porenwasser und Kristallwasser am Gesamtwassergehalt sowie generelle Änderungen der Zusammensetzung des Rückstands und des Haldenwassers im Teufenverlauf,
 5. Verhältnisse von möglichem Haftlösungsgehalt zum analytisch ermittelten Porenlösungsgehalt innerhalb des Rückstands auf Basis der Laboruntersuchungen (Beeinflussung Parameter zu Punkt 4 und 5 durch die Strömungsprozesse innerhalb der Halde).

Die Auswertung aller Ergebnisse zu den Hattorfer und Wintershaller Haldenbohrungen erfolgte in Gutachten zu den Haldenerweiterungsverfahren durch die Autoren Christian Artschwager, Robert Braatz und Hanka Poppitz. Darin wurden auch zwei im Jahr 1998 durchgeführte Haldenbohrungen am Standort Hattorf eingebunden. Die komplexe Bewertung der umfangreichen und in vielen Aspekten neuen Erkenntnisse zum Haldenkörperverhalten hat zu einer Weiterentwicklung des Modells zur Zonierung des Haldenkörpers geführt.

3.1 Ergebnisse bohrbegleitender Untersuchungen

Die Beobachtung der Salzlösungszutritte beim Bohrgeschehen bestätigte die Erwartung abnehmender Zutrittsmengen zum Bohrlochtiefsten hin und damit bei zunehmender Kompaktion und Dichte des Rückstands. Es zeigte sich aber auch, dass sich für verschieden alte Haldenbereiche ein variables Bild ergibt. Bedingt durch Lösungs- und Fällungsprozesse unter Niederschlagseinfluss entwickelt sich im Haldenkörper zeit-, last- und temperaturabhängig ein System bevorzugter Wegsamkeiten. In Anbetracht der verschiedenen, mehrdimensional abhängigen Haupteinflussfaktoren auf die Strömungsprozesse im Haldenkörper ist anhand der bohrbegleitenden Untersuchungen eine klare Abgrenzung zwischen Haldenmantel und Haldenkern jedoch nicht möglich.

Auch die Einbautechnologie bzw. das Schüttregime verbunden mit der sich zeitabhängig entwickelnden Haldengeometrie können die Strömungsprozesse beeinflussen. Überschüttete ehemalige Halden- und Schüttoberflächen,

die vormals lange der Witterung ausgesetzt waren und nicht unter dem Einfluss der Auflast kompaktiert wurden, können über einen längeren Zeitraum als bevorzugte Wegsamkeiten für Salzlösungen fungieren. Dies wurde insbesondere am Standort Wintershall beobachtet, wo gezielt eine solche Oberfläche durchbohrt wurde.

Die Kamerabefahrungen haben gezeigt, dass die beobachteten Wasserzutritte in den Bohrlöchern hauptsächlich über Makroporen erfolgen. Schaum- und Blasenbildungen an der Bohrlochwandung sind dabei Indiz für die Zweiphasenströmung der Fluide Gas und Salzlösung/Haldenwasser. Die Zutritte waren räumlich eng begrenzt und häufig an Inhomogenitäten, wie z.B. alte Schüttoberflächen, gebunden, die anhand von Tonanreicherungen im Bohrloch gut erkennbar waren. Solche Zutrittsbereiche wechselten sich mit trockenen Bohrlochabschnitten ab. Klüfte wurden hingegen nicht angetroffen.

3.2 Erkenntnisse aus chemischen und mineralogischen Untersuchungen sowie Wassergehaltsbestimmungen

Chemische und mineralogische Analysen des Kernmaterials im Vergleich zu frisch geschüttetem Rückstand haben gezeigt, dass die Rückstandszusammensetzung sich im Haldenkörper zeit- und raumabhängig verändert. Dies wird vorrangig auf Lösungsprozesse, untergeordnet auch auf Verlagerungs- und Fällungsprozesse innerhalb des Haldenkörpers, zurückgeführt. Dies spiegelt sich auch in der Analytik des Haldenwassers wider. Diese Veränderungen, die sich gegenseitig überlagern und beeinflussen, werden im Folgenden als Alterationsprozesse zusammengefasst und sind exemplarisch für den Standort Wintershall in Abbildung 3 dargestellt.

Der auf den Haldenkörper auftreffende Niederschlag sättigt sich durch Auflösung des Rückstands oberflächennah an Natriumchlorid auf (Auflösung von Halit als Hauptbestandteil im Rückstand) und passiert den Haldenkörper dann auf vorhandenen Wegsamkeiten, da er selbst kein weiteres Lösungspotential gegenüber dem Rückstand besitzt. Die Ausbildung neuer Wegsamkeiten und Schaffung von Porenverbindungen nehmen daher viel Zeit in Anspruch. Einmal bestehende Wegsamkeiten, insbesondere im Bereich der Haldenendkontur, etablieren sich so im Laufe der Zeit als bevorzugte Fließpfade.

Die Sekundärkristallisation setzt eine chemische Übersättigung der Porenlösung am jeweiligen Kristallsat voraus. Daher ist die Sekundärkristallisation gleichzeitig ein Nachweis für die Zehrung von Wasser aus der versickernden Salzlösung. Als mögliche zehrende Vorgänge sind die Verdunstung sowie die Kristallisation von Hydratphasen zu nennen. Beide Prozesse sind abhängig

von der Zusammensetzung der Sickerlösung, den thermodynamischen Bedingungen und der mineralogischen Zusammensetzung des Feststoffes.

Die im gealterten Rückstandssalz nachgewiesenen Sekundärbildungen (s. Abb. 3) belegen, neben der Zehrung von Wasser durch Einbindung in die jeweilige Kristallstruktur, auch das Fehlen einer nachhaltigen Durchströmung des jeweiligen Bereichs aufgrund der guten Löslichkeit dieser Phasen, welche zu einer Herauslösung aus dem Rückstand geführt hätte. Das Vorhandensein und die Verteilung von Sekundärbildungen innerhalb des Haldenkörpers können als Indiz für Zonen mit verstärkten Strömungsprozessen und damit verbundenen Verlagerungsprozessen im jeweiligen Bereich gewertet werden. Da sich Sekundärbildungen (Hydratphasen) laborativ anhand erhöhter Kristallwasseranteile im Rückstand nachweisen lassen, kann das Verhältnis von Porenlösung zu Kristallwasser am Gesamtwassergehalt für die Abgrenzung verschieden strömungsaktiver Bereiche im Haldenkörper herangezogen werden.

Die Haldenkernbereiche stellen sich dabei als Bereiche mit durchgehend hohen Kristallwasseranteilen (Verhältnis Porenwasser zu Kristallwasser $\geq 1:2$) dar (vgl. Abbildung 4). Hier ist der Rückstand durch Lösungsprozesse unbeeinflusst, wie auch die chemische Zusammensetzung des Rückstands zeigt. Es schließt sich daran in Richtung der Haldenoberfläche ein Übergangsbereich mit wechselnden Anteilen von Poren- und Kristallwasser am Gesamtwasser-

gehalt an, der auf eine nur bereichsweise Durchströmung des Rückstands schließen lässt. Analog zu den Erkenntnissen früherer Haldenbohrungen am Standort Hattorf wurde, entgegen den Ergebnissen für die Haldenkerne, in den Randbereichen der Halden ein deutliches Überwiegen des Porenwassers gegenüber dem Kristallwasseranteil dokumentiert. Dies wird auf eine Sickerwasserbeeinflussung und stattgefundenen Lösungsprozesse in diesem Bereich zurückgeführt.

Dabei ist zu beachten, dass, gemäß den Ergebnissen für den Standort Hattorf, die Breite des Übergangsbereiches zeitabhängig ist. Die Ergebnisse zeigen – in Übereinstimmung mit den Ergebnissen zu den Sättigungen im Porenraum –, dass in tieferen Bohrlochbereichen keine nachhaltigen Sickerwasserbewegungen stattgefunden haben, welche Lösungsprozesse und eine Erhöhung der Porenwasseranteile am Gesamtwassergehalt zur Folge hätten. Die dort gemessenen Salzlösungsgehalte waren geringer als bei der Aufhaldung.

Die bereichsweise festgestellte Anreicherung magnesiumhaltiger Phasen, im Vergleich zu dem initialen Gehalt, zeigt außerdem das Stattfinden der vorstehend erwähnten Verlagerungs- und Rekristallisationsprozesse innerhalb der Haldenkörper in Abhängigkeit von den thermodynamischen Bedingungen.

Neben den vorstehend beschriebenen Beobachtungen ließ auch die unterschiedliche Mineralisation der beprobten Salzlösungen aus den einzelnen Bohrlochabschnitten



Abbildung 3: Alterationsprozesse des Rückstands – Ergebnisse aus Haldenbohrungen Quelle: [Poppitz, 2020]

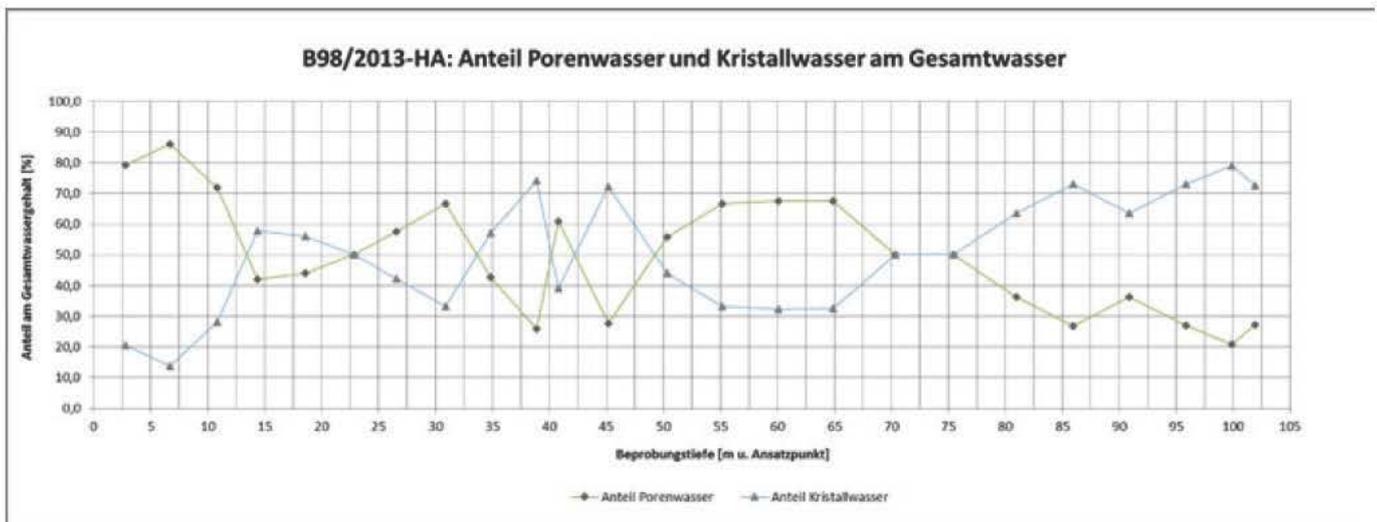


Abbildung 4: Schwankende Anteile von Poren- und Kristallwasser am Beispiel der Vertikalbohrung B98/2013-HA [1]

den Schluss auf verschiedene Zonen innerhalb der Halde zu. Diese lassen darauf schließen, dass die Salzlösungen in unterschiedlicher Weise in Kontakt zum Niederschlag bzw. dem Haldenwasser gekommen sind. In den Horizontalbohrungen zeigten sich zum Bohrlochtiefsten hin, bei abnehmenden Zuflussmengen, Salzlösungen mit gegenüber den Randbereichen zunehmenden und erhöhten Kalium- und Magnesiumkonzentrationen. Diese Wertstoffrestgehalte waren im Haldenmantel bereits ausgewaschen, in tieferen Bereichen jedoch aufgrund der stark verlangsamten, nur lokal in Bereichen mit Wegsamkeiten ablaufenden Strömungs-, Lösungs- und Verlagerungsprozesse noch vorhanden.

3.3 Ergebnisse geophysikalischer und geohydraulischer Untersuchungen

Durch die Firma BLM GmbH wurden in allen Haldenbohrungen an den Standorten Hattorf und Wintershall geophysikalische Bohrlochuntersuchungen durchgeführt. Die Messergebnisse wurden in Auswertebereichen (Anlagen zu [1] und [2]) mit den thematischen Schwerpunkten Bohrlochgeometrie, Korrelationsmessungen, Strukturuntersuchungen und hydrodynamische Messungen (Vertikalbohrungen) ausgewertet und interpretiert. Als Grundlage für die korrelative Auswertung der geophysikalischen Messergebnisse wurden die an den Haldenbohrungen laborativ ermittelten Werte des Kaliumgehalts (Gamma-Ray-Log), die Gesamtwasser- und Salzlösungsgehalte, die Anteile des Natriums und Chlorids (Neutron-Neutron-Log) und die Nassroh- und Reindichten (Gamma-Gamma-Dichte-Log) verwendet. Nachfolgend werden zu den drei thematischen Schwerpunkten die wesentlichen Ergebnisse beschrieben.

Bohrlochgeometrie

Insgesamt sind mit der Teufe eine zunehmende Maßhaltigkeit der Bohrungen (Außendurchmesser der Bohrkronen 146 mm) und abnehmende Ausbruchsneigung an der Bohrlochwandung festzustellen. In den Hattorfer Horizontalbohrungen reicht die Zone stärkster Ausbrüche an der Bohrlochwandung mit Kalibern bis rund 160...190 mm bis in Teufen von rund 35 bis 44 m unter Ansatzpunkt. In der Endteufe der Bohrungen wurden jeweils Kaliber von rund 150 mm gemessen.

In den Vertikalbohrungen sind die Zonen mit starken Wandausbrüchen sowohl im Tiefenbereich als auch im Kaliber weniger stark ausgeprägt. Diese Zonen mit maximalen Kalibern im Bereich 150 bis 160 mm reichen bis rund 22 bzw. 36 m unter Ansatzpunkt. Die Bohrlochkonturen im weiteren Bohrungsverlauf bis zur Endteufe sind jeweils sehr maßhaltig mit Kalibern <150 mm. Lokale Kalibererweiterungen im mm-Bereich im sonst maßhaltigen Bohrprofil sind insgesamt mit Zonen verbunden, in denen mit der Bohrkerndokumentation, aber auch mit den geophysikalischen Strukturuntersuchungen, Besonderheiten im Gefüge des Rückstandssalzes /Haldenkörpers, wie z.B. ehemalige Schütt-/Haldenoberflächen, poröse/kavernöse Strukturen oder Unstetigkeiten in der Raumfüllung sowie auch vereinzelt Risse (teils mit Öffnung), festgestellt wurden.

Im Wesentlichen sind in allen anderen Bohrungen die Zonen stärkerer Ausbruchserscheinungen in einer Teufe beendet, in denen die Laboruntersuchungen Nassroh-dichten in einem Wertebereich größer rund 1,85...1,90 g/cm³ erreicht haben. Die Kaliberkontur ist damit ein qualitativer Anzeiger für die Kornbindung/Festigkeit des

Rückstandsalzes. In den Horizontalbohrungen korrelieren die Zonen mit stärkeren Bohrlochausbrüchen/ Kalibererweiterungen in der Tendenz mit denjenigen, in denen auch mit der Bohrerndokumentation im Maß und Umfang der feuchten Anteile bzw. anhand der Ausflussmessungen und Kamerabefahrungen wasserwegsame Bohrungsabschnitte festgestellt wurden.

Korrelationsmessungen

Gamma-Ray-Log

Anhand der Messungen ergibt sich zwischen den Kaliumgehalten aus Laboruntersuchungen und dem GR-Log eine weitgehend gute Korrelation.

Gamma-Gamma-Dichte-Log

Die auf Grundlage einer Eichung indirekt bestimmten Dichten stimmen im Verlauf/Trend und im Betrag gut mit den laborativ ermittelten Nassrohdichten überein. In allen Messkurven ist gut die mit der Tiefe zunehmende Dichte im Haldenkörper zu erkennen.

Neutron-Neutron-Log

Das wesentliche Ziel des Neutron-Neutron-Logs ist, stärker von weniger durchfeuchteten Bohrungsabschnitten abzugrenzen und ggf. besonders wasserwegsame Zonen zu detektieren. Hierbei bestehen allerdings im Rückstandsalz erhebliche verfahrensbedingte Schwierigkeiten, da ein gegenläufiger Einfluss von NaCl- und Lösungs-/Wassergehalt auf die Messergebnisse der NN-Amplituden besteht. Darüber hinaus setzt sich zudem der Gesamtwassergehalt im Rückstandsalz aus Poren- und Kristallwasser zusammen, wobei nur das Porenwasser die Durchfeuchtung beeinflusst.

In den Horizontalbohrungen mit geringem Haldenalter zeigten sich die Messprofile des NN-Logs insgesamt wenig strukturiert, wobei in Teilbereichen der Kurvenverlauf des NN-Logs tendenziell mit denen der Gesamtwasser- und Salzlösungsgehalte sowie der Summe aus Na-/Cl-Gehalten korreliert. In den übrigen, in älteren Haldenabschnitten angesetzten Bohrungen ist das Messprofil, insbesondere in den lösungsgefüllten Bohrlochabschnitten, stärker differenziert. Verminderte Werte im NN-Log stimmen hier mit wasserwegsamem bzw. durchfeuchteten Zonen überein, die anhand der übrigen Labor- und Bohrlochversuche festgestellt wurden.

Temperatur-Log

Grundvoraussetzung für die Auswertung des Temperatur-Logs ist, dass vor der Messung der natürliche Temperaturausgleich abgewartet werden muss.

Bei den Horizontalbohrungen wird vermutet, dass die verschiedenartig ausgebildeten Temperaturbereiche und Verläufe der Messkurven mit dem unterschiedlichen Alter der erbohrten Haldenkörperbereiche zusammenhängen. In der Bohrung B99/2013 HA, mit einem Alter des Haldenkörpers zwischen 17 und 21 Jahren, sind die „Alterungsprozesse“ in Folge Kompaktion, Auflösung und Verformung am weitesten vorangeschritten, so dass sich hier das am stärksten strukturierte Temperatur-Log zeigt. In der Endteufe wurde eine Temperatur von rund 23°C gemessen. In den „jüngeren“ Bohrungen B100/2013 HA (Schüttalter rund 5 bis 8 Jahre) sowie B104/2013 HA (Schüttalter rund 4 bis 7 Jahre) ist die Zonierung im Haldenkörper im Hinblick auf Durchfeuchtungen/Wasserwegsamkeiten, die im Temperatur-Log angezeigt werden könnten, weniger stark ausgeprägt. Hier wurden im Haldeninneren maximale Temperaturen von rund 19 bzw. 25°C gemessen.

Anhand der Temperaturmesskurven zu den Vertikalbohrungen wurden in den Messberichten der BLM GmbH vertikale Durchlässigkeitsbeiwerte über und unter dem Wasserspiegel in der Größenordnung 10^{-8} bis 10^{-7} m/s ausgewertet. Die Ergebnisse bestätigen die erwarteten Zusammenhänge von Porosität, Sättigung und Durchlässigkeit.

Strukturuntersuchungen

Die Strukturuntersuchungen erfolgten bei allen Bohrungen mit einem optischen Bohrlochscanner (OBI). In lösungsgefüllten Bohrlochabschnitten wurde darüber hinaus in Folge der Trübung des Bohrlochfluids mit Überlappung zum OBI ein akustischer Scanner (ABF) eingesetzt. Die eindeutig erkennbaren, sichtbaren Trennflächen wurden in Schüttflächen und Klüfte unterteilt:

Schüttflächen – Sind infolge von Ablagerungszyklen oder/und Materialunterschieden im Schüttgut entstanden und stellen quasi Schichtgrenzen innerhalb der Halde dar. Mit den geophysikalischen Strukturuntersuchungen wurde in allen Bohrungen eine hohe Anzahl an Schütt- bzw. ehemaligen Haldenoberflächen festgestellt. Einfallrichtung und -winkel spiegeln die lokale Schütthistorie wider. Der Großteil der Schüttflächen fällt mit einem Winkel kleiner als der Schüttwinkel bei der Aufhaldung, d.h. kleiner rund 38...40°, ein.

Klüfte – Aufgabenbezogen charakterisiert als überwiegend durchtrennte teilweise offene, in der Regel gut erkennbare Klüfte oder/und entlang von Klüftstrukturen angeordnete Löcher, Poren o. ä. Im Vergleich zur Bohrerndokumentation und Kamerabefahrung können Klüfte relativ häufig mit Zonen lokaler Auffälligkeit in der Raumfüllung (poröse/kavernöse Strukturen) oder z.T. auch Rissen in Übereinstimmung gebracht werden. Diese

grenzen oft an markante Schütt-/Haldenoberflächen an. Eine Plausibilisierung der Einstufungen im Abgleich zu anderen Ergebnissen (z.B. Kernansprache) erwies sich als hilfreich.

Hydrodynamische Messungen

In den beiden Hattorfer Vertikalbohrungen haben sich, nach Erreichen der Endteufe, im Ruhezustand Salzlösungsspiegel in Teufen von rund 45 m und 56 m unter Ansatzpunkt (u. AP) eingestellt. Im Anschluss wurden

INFO-BOX: POROSITÄT UND PERMEABILITÄT, ZWEPHASENSTRÖMUNG

Porosität

Die Porosität ist das Maß für den offenen Hohlraum in einem Feststoff. Der Gesamtgehalt wird als totale Porosität (n_t [Vol.-%]) bezeichnet und kann aus der Rein- und Trockenrohichte des Materials berechnet werden. Die effektive Porosität eines porösen Materials ist ein Maß für den im Strömungsprozess nutzbaren bzw. am Strömungsprozess beteiligten, miteinander verbundenen Porenraum entsprechend Gleichung 1 des Glossars. Die in einem porösen Material erreichbare/auffüllbare Porosität wird teilweise ebenfalls als effektive Porosität (n_{eff} [Vol.-%]) bezeichnet. Die effektive Porosität entspricht der Differenz von totaler Porosität n_t und der mit anhaftender Lösung gefüllten Porosität n_{HL} .

Die strömungstechnische Wirkung einer Porosität wird durch die Porengrößenverteilung und die Verbindungen zwischen den einzelnen Poren bestimmt. Jeder einzelne Porenquerschnitt bestimmt mit seinem Durchmesser und dem daraus resultierenden Kapillardruck gegenüber einer benetzenden Flüssigkeit das integrale Kapillardruckverhalten des porösen Materials und die Fähigkeit der Retardation von Salzlösung im Porengefüge (Haftlösung, siehe Glossar). Dies bestimmt die Sättigungsverteilung im Porenraum und in der Folge die Einstellung der effektiven Permeabilitäten für die unterschiedlichen Phasen.

Permeabilität

Die absolute Permeabilität k [m^2] ist ein Gesteinsparameter, der sich als Proportionalitätsfaktor für den linearen Zusammenhang von Druckgradient i und Darcy-Geschwindigkeit u für die Strömung eines Fluides in einem vollständig mit diesem Fluid gesättigten porösen Material

$$u = k \times i$$

ergibt. Im Grundwasserbereich wird die Permeabilität, unter Berücksichtigung der dynamischen Viskosität und der Dichte von Grundwasser bei 10 °C (1,3E-03 Pas, 999,7 kg/m³), als Durchlässigkeitsbeiwert k_f in m/s angegeben.

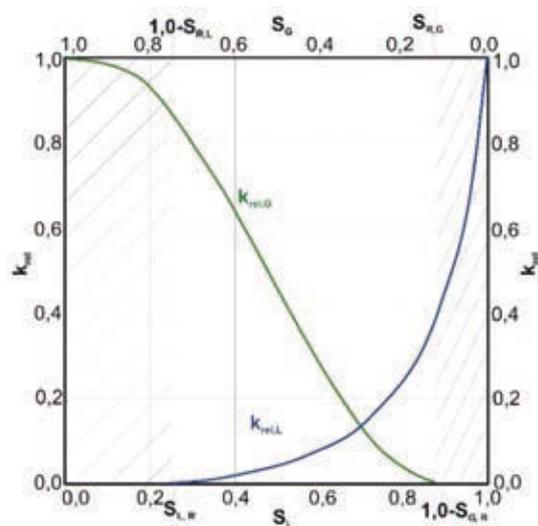
$$k_f = \frac{k \times \rho_f \times g}{\eta_f}$$

Ist ein Gemisch von Gas und Flüssigkeit im porösen Material enthalten, ist es erforderlich das Durchlässigkeitsverhalten in Abhängigkeit von den Volumenanteilen der beiden Phasen im Porenraum zu betrachten. Die Darstellung der Sättigungsbedingungen im Porenraum erfolgt vielfach auf der Basis des Volumenanteils der Flüssigkeit, der Flüssigkeitssättigung (S_L [-]). Ist der Porenraum zu 100 % mit Flüssigkeit gefüllt, steht kein Porenraum für eine Gasströmung zur Verfügung, das Material ist gegenüber Gas undurchlässig, die effektive Gaspermeabilität ($k_{eff,G}$ [m^2]) ist gleich null. Dies gilt bei Betrachtung eines vollständig gaserfüllten in gleicher Weise für die effektive Flüssigkeitspermeabilität ($k_{eff,L}$ [m^2]). Das Material ist gegenüber der Flüssigkeit undurchlässig.

Die Natur oberhalb des Grundwasserspiegels (und oft auch darunter) kennt nur selten einen vollständig mit einer Phase gesättigten Porenraum. In der Regel werden die natürlichen Strömungsprozesse oberhalb eines geschlossenen Wasser-/Lösungsspiegels durch die variable Phasenverteilung im Porenraum bestimmt – Zweiphasenströmung.

Voraussetzung für den Beginn der Strömung einer Phase ist die Ausbildung einer kohärenten Phasenverteilung im Porenraum. Es muss also einen Porenraum geben, der durchgehend untereinander verbunden mit der betrachteten Phase gefüllt ist. Die sich aus dieser Voraussetzung ergebenden zwei Sättigungsgrenzen werden vielfach als Restgassättigung ($S_{R,G}$ [-]) respektive als Restflüssigkeitssättigung ($S_{R,L}$ [-]) bezeichnet. Je nachdem, von welcher Seite der Sättigungsänderung der Prozess betrachtet wird, müssen diese Restsättigungen über- oder unterschritten werden, damit eine Strömung der Phase einsetzt. Ist dieser Zustand einmal erreicht, ergibt sich die effektive Permeabilität in Abhängigkeit vom angewendeten Druckgradienten, den Benetzungseigenschaften der Phasen und den sich daraus ergebenden Kapillardruckbedingungen im Porengefüge. In jedem Fall ist die effektive Permeabilität der Phase geringer als die absolute Permeabilität des porösen Materials.

Das Verhältnis von effektiver Phasenpermeabilität und absoluter Permeabilität wird als relative Permeabilität der Phase ($k_{rel,P}$ [-]) bezeichnet und ergibt sich aus: $k_{rel,P} = k_{eff,P}/k$ [-]. Zur Veranschaulichung ist der beschriebene Zusammenhang in Abhängigkeit von der Porensättigung mit Flüssigkeit in der nachfolgenden Abbildung vereinfacht dargestellt.



Relative Permeabilität in Abhängigkeit von der Sättigung des Porenraumes mit Lösung (nach [5])

hydrodynamische Messungen mit dem Ziel durchgeführt, die Wasser- bzw. Fluidführung der Halde ganz allgemein zu ermitteln, Bereiche mit besonderer hydrodynamischer Effektivität abzugrenzen und die lateralen Durchlässigkeitsbeiwerte im Haldenmaterial insgesamt und für Teilabschnitte zu bestimmen. Hierzu wurden im Ruhe- und im hydraulisch angeregten Zustand Messfahrten mit verschiedenen Sonden, u.a. elektrisches Leitfähigkeits-Log, Impellerflowmeter-Log und Tracer-Fluid-Logging, sowie Kamerabefahrungen durchgeführt. Die hydrodynamische Anregung erfolgte dabei im Wesentlichen, um Lösungsprozesse zu vermeiden, mit im Voraus aus den Bohrungen gepumptem Haldenwasser.

Auf Grundlage der hydrodynamischen Messungen mit Infiltration wurde in der Vertikalbohrung B97/2013 HA für die Zuflusszone des Bohrlochs im Teufenbereich von rund 32,0 bis 36,0 m u. AP ein lateral, längs zur „Schichtung/Schüttung“ wirksamer mittlerer Durchlässigkeitsbeiwert von $k_f = 3,7 \cdot 10^{-6}$ m/s berechnet. Für die Verlustzonen unterhalb ergaben sich entsprechende Durchlässigkeitsbeiwerte im Bereich rund $1,0/5,0 \cdot 10^{-7}$ m/s (rund 37 bis 60 m u. AP) bzw. $2,0/1,0 \cdot 10^{-8}$ m/s (62 bis 98 m u. AP).

In der Vertikalbohrung B98/2013 HA wurde in der Zuflusszone des Bohrlochs im Teufenbereich von rund 52,0 bis 59,0 m u. AP ein maximaler wirksamer Durchlässigkeitsbeiwert lateral, längs zur „Schichtung/Schüttung“ von $k_f = 1,8 \cdot 10^{-6}$ m/s ausgewiesen. Für die Verlustzonen unterhalb ergaben sich mit der Teufe abnehmende Durchlässigkeitsbeiwerte im Bereich rund $2,1 \cdot 10^{-6}$ m/s bis $6,8 \cdot 10^{-8}$ m/s.

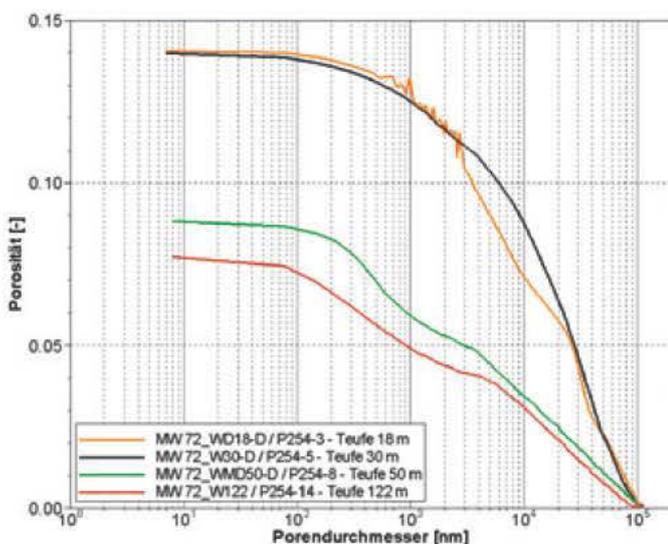


Abbildung 5: Porengrößenverteilung für Proben aus unterschiedlicher Teufe der Halde Wintershall, methodisch bedingte obere Grenze des maximalen Porendurchmesser ca. 100 μ m

Die Durchlässigkeitsbeiwerte lateral, längs zur „Schichtung/Schüttung“ sind jeweils deutlich größer als die dazu diskordanten, vertikalen Durchlässigkeitsbeiwerte, die anhand der Temperatur-Logs ausgewertet wurden. Dies ist auch in Böden oder Sedimentgesteinen als Anisotropiekoeffizient $a = k_{f,h}/k_{f,z}$ bekannt. Nach Erfahrungswerten liegt a in einer Größenordnung bis rund 10 [7]. Je nach Wahl der Vergleichswerte lassen sich im vorliegenden Fall Anisotropiekoeffizienten im Bereich $a \approx 16$ bis 61 abschätzen.

4. Erkenntnisse zu Strömungsprozessen im Haldenkörper auf Basis der Erkundungsergebnisse der Haldenbohrungen

Der Wasserhaushalt und die Strömungsprozesse in einem Haldenkörper werden, neben den lagerstätten- und aufbereitungsbedingten Materialeigenschaften des Rückstands, von den folgenden Einflussgrößen und Prozessen bestimmt:

- Schütttechnologie, Schüttregime, Schütthistorie und Haldengeometrie
- meteorologische und thermodynamische Randbedingungen,
- strömungstechnische Eigenschaften Porosität und Permeabilität, die von der kompaktionsbedingten Dichtentwicklung des Rückstands sowie den chemisch/mineralogischen Prozessen (Auflösung, Fällung, Kristallisation) abhängen.

Diese Einflussgrößen und Prozesse sind mit dem sich entwickelnden Haldenkörper zeit- und raumabhängig, wie die Haldenbohrungen gezeigt haben: Der initiale Zustand einer porösen Lockergesteinsschüttung wird im Zuge der fortlaufenden Beschüttung und zunehmenden Überlagerung, d.h. lastabhängig, sowie durch das Eindringen von Niederschlagswasser in den Haldenkörper und die daraus resultierenden chemisch/mineralogischen Wechselwirkungen mit dem Rückstand zeitabhängig und räumlich variabel verändert. Ausdruck davon sind die bereits beschriebenen Kompaktions- und Verfestigungsprozesse. Insbesondere die Kompaktion führt, begünstigt durch das visko-elastoplastische Verformungsverhalten des Rückstands, zu einer zunehmenden Dichte mit entsprechender Reduktion der Porosität und Permeabilität.

Die Feld- und Laboruntersuchungen haben gezeigt, dass es sich bei den Rückstandshalden um ungesättigte poröse Körper handelt, in welchen alle Strömungsprozesse den Gesetzmäßigkeiten der Zweiphasenströmung unterliegen (siehe Info-Box Porosität/Permeabilität).

Die Zweiphasenströmung der Fluide Gas und Flüssigkeit wird durch die Parameter Salzlösungsgehalt und Porosität bestimmt. Beide Parameter sowie das daraus resultierende

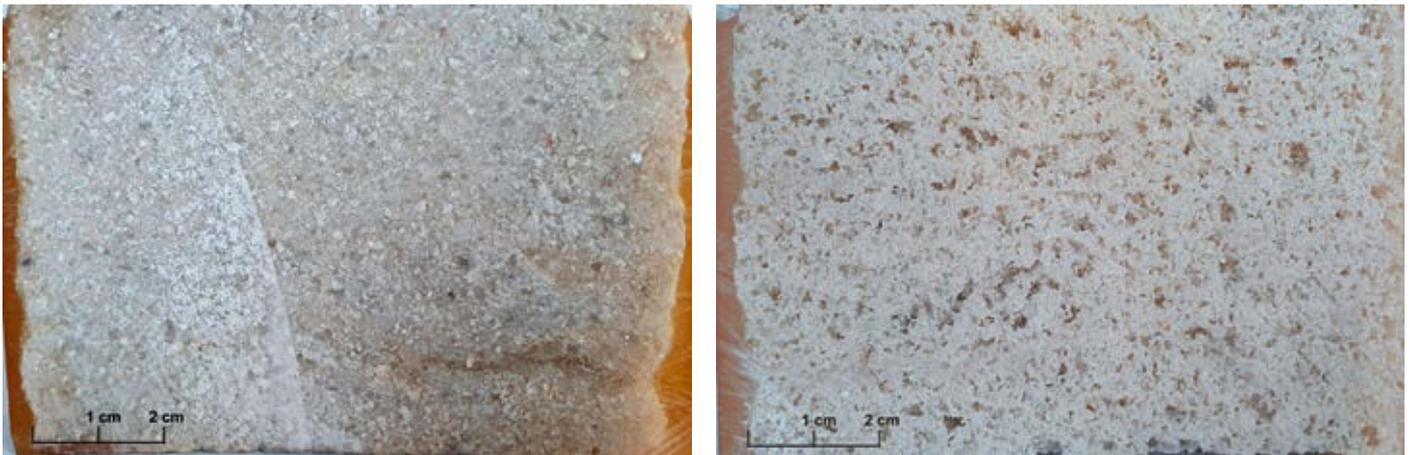


Abbildung 6: Porosität von Haldenmaterial der Halde Wintershall aus einer Teufe von ca. 8,5 m, links: Originalmaterial, Porenraum mit Epoxidharz gefüllt; rechts: Negativabbild des Porenraums nach dem Herauslösen des Salzes

Kapillardruckverhalten und die Sättigungsverteilung verändern sich entsprechend der oben beschriebenen Prozesse im Haldenkörper last- und zeitabhängig. Die genannten Eigenschaften bestimmen wiederum die absolute Permeabilität des Materials und die aus der Porensättigung resultierenden effektiven Permeabilitäten für die gasförmige und die flüssige Phase. Die in der Praxis zur Beurteilung verwendeten Durchlässigkeitsbeiwerte sind als Ausdruck der absoluten Permeabilitäten anzusehen (z.B. Abb. 2) und vermitteln daher kein adäquates Bild der tatsächlichen für die Gas- und Salzlösungsströmung wirksamen effektiven Permeabilität des Rückstands für die fluiden Phasen (siehe Info-Box).

In den gegenständlichen Haldenkörpern besteht die Flüssigkeitsphase in den Poren aus Salzwasser, in dem in verschiedener Konzentration und chemischer Zusammensetzung Salze gelöst sind (→ Porenlösung). Bereits im Zuge der Aufhaldung kommt es bei der Ablagerung der Rückstände in Abhängigkeit von der Zusammensetzung der Salzlösungen und den thermodynamischen Bedingungen zu Rekristallisationsprozessen aus dieser salzhaltigen Lösung. Die Kapillarkräfte bewirken, dass diese Kristallisationsprozesse in den Zwickeln zwischen den Partikeln beginnen und zu einem Verwachsen führen – es bildet sich innerhalb kurzer Zeit eine feste Kruste. Auch innerhalb der Halde kommt es durch die Kristallisation sekundärer Salzphasen zusätzlich zu der gravitativen Verdichtung, zu der beschriebenen Verfestigung des Schüttguts. Parallel unterliegt das Rückstandsmaterial, insbesondere an der Haldenoberfläche, Lösungsprozessen in Folge des auftretenden Niederschlags. Beide Prozesse haben Einfluss auf Porenform und -anteil im Rückstand und führen an der Haldenoberfläche zur Ausbildung eines typischen Chlo-

ridkarst-Formschatzes. Dieser besteht aus Salzkarren und -schratten sowie runden Lösungskavitäten, welche die Infiltration in die Halde begünstigen.

Ein Teil der Porenlösung liegt innerhalb des Rückstands als →Haftlösung vor. Der Haftlösungsgehalt stellt als besonderer, laborativ zu bestimmender Parameter den Gehalt an Salzlösung im Porenraum einer ungesättigten Probe dar, der adsorptiv und/ oder kapillar bei Luftdruckbedingungen gegen die Schwerkraft gehalten/ fixiert wird.

Der Gesamtwassergehalt des Rückstands wird, neben der Porenlösung, auch durch den Anteil an →Kristallwasser, d.h. das an den kristallinen Feststoff gebundene Wasser, bestimmt. Dieser wiederum ist abhängig von der mineralogischen Rückstandszusammensetzung bei der Aufhaldung sowie den daraus unter dem Atmosphäreinfluss und den in der Halde herrschenden Druck- und Temperaturbedingungen gebildeten Sekundärphasen.

Die strömungstechnische Wirkung einer Porosität wird durch die Porengrößenverteilung und die Verbindungen zwischen den einzelnen Poren bestimmt. Abbildung 5 gibt, im Ergebnis von Quecksilberporosimetrieuntersuchungen an Proben aus unterschiedlicher Teufe der Halde Wintershall, eine Vorstellung zur Porengrößenverteilung des Materials. Bedingt durch die Versuchsmethodik werden Poren bis zu einem maximalen Durchmesser von ca. 100 µm berücksichtigt. Die Grafik verdeutlicht die mit zunehmender Teufe geringer werdende Porosität des Haldenmaterials. Mit zunehmender Teufe reduziert sich der Anteil an größeren Porenquerschnitten. Es ist davon auszugehen, dass ein Strömungsprozess in einem porösen Material durch die größten verbundenen Poren bestimmt wird. Der überwiegende Anteil der Porosität wird in einem Strömungsprozess aufgefüllt, jedoch nicht durchströmt. Ein

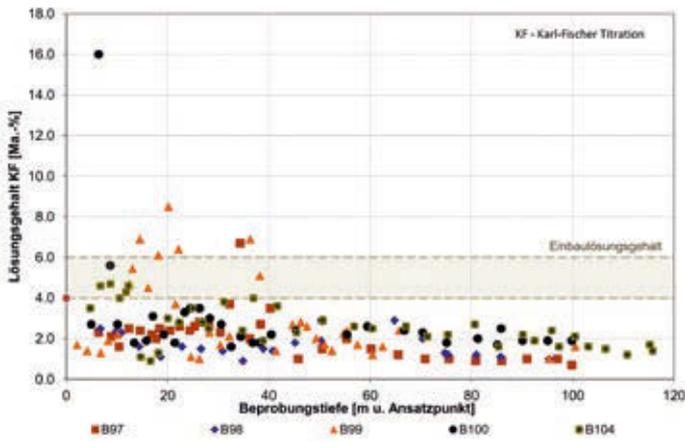


Abbildung 7: Salzlösungsgehalt in Abhängigkeit von der Beprobungstiefe (Ergebnisse K+S KALI GmbH), Halde Hattorf (B97, B98 = Vertikalbohrungen, B99, 100, 104 = Horizontalbohrungen)

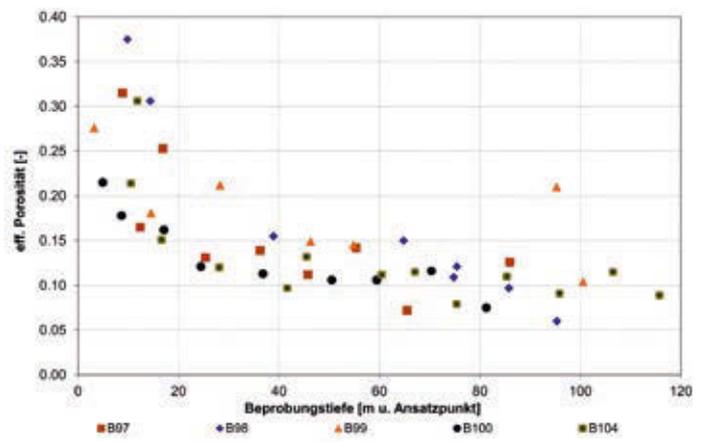


Abbildung 8: Effektive Porosität in Abhängigkeit von der Beprobungstiefe, Halde Hattorf (B97, B98 = Vertikalbohrungen, B99, 100, 104 = Horizontalbohrungen)

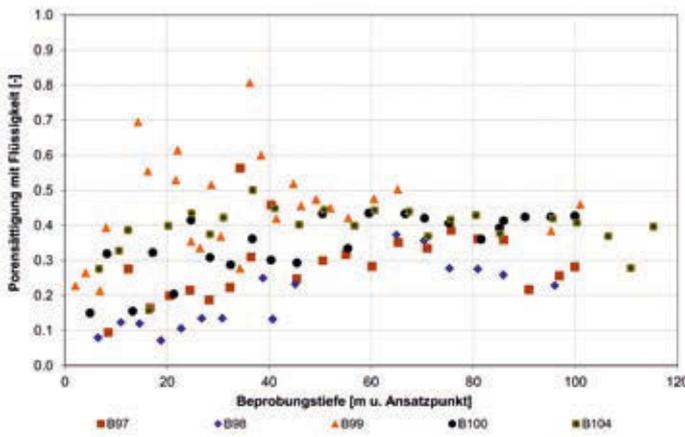


Abbildung 9: Flüssigkeitssättigung im Porenraum in Abhängigkeit von der Beprobungstiefe, Halde Hattorf (B97, B98 = Vertikalbohrungen, B99, 100, 104 = Horizontalbohrungen)

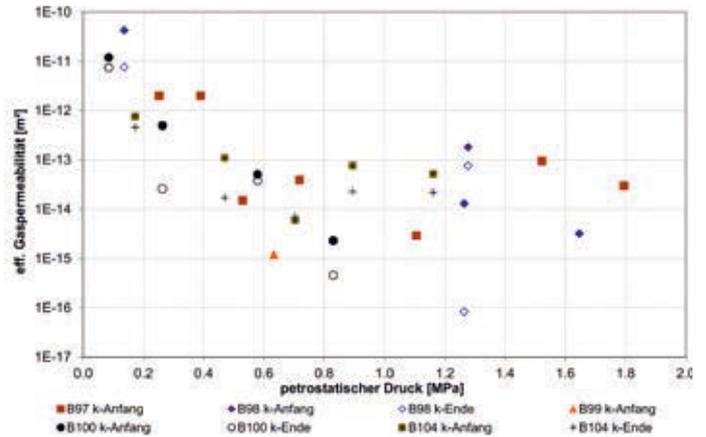


Abbildung 10: Effektive Gaspermeabilität in Abhängigkeit vom petrostatischen Druck, Halde Hattorf (B97, B98 = Vertikalbohrungen, B99, 100, 104 = Horizontalbohrungen)

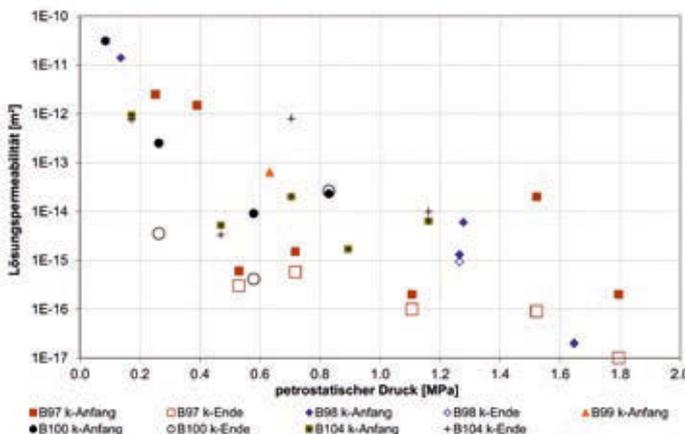


Abbildung 11: Effektive Salzlösungspermeabilität in Abhängigkeit vom petrostatischen Druck, Halde Hattorf (B97, B98 = Vertikalbohrungen, B99, 100, 104 = Horizontalbohrungen)

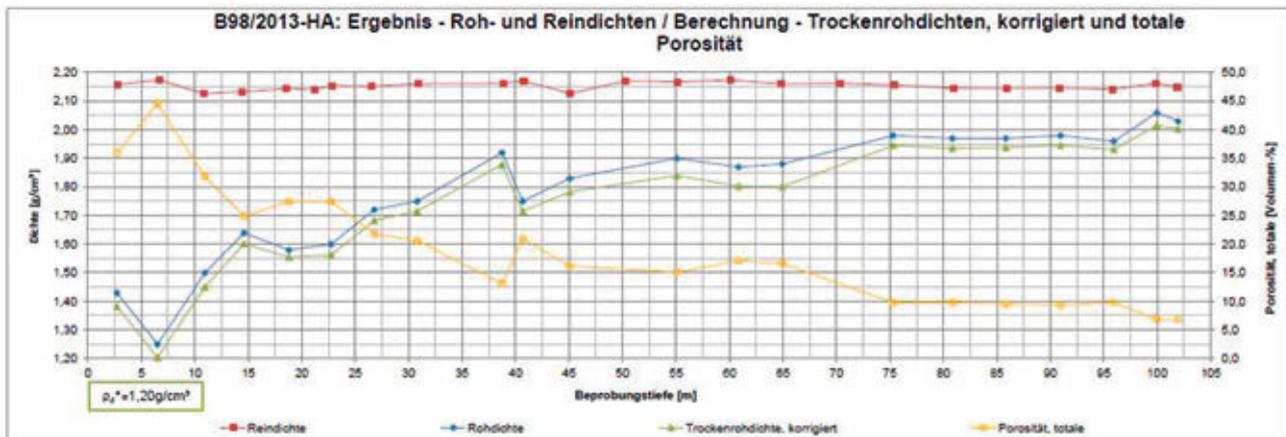


Abbildung 12: Dichteentwicklung über die Bohrteufe, exemplarisch anhand der Vertikalbohrung B 98, Halde Hattorf [1]

visueller Eindruck für die Porosität von Haldenmaterial wird in Abbildung 6 gegeben. Für die Probe wurde eine totale Porosität von 30,0 Vol.-% und eine effektive Gaspermeabilität von $1,8 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2$ ($1,3 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$) ermittelt.

Jeder einzelne Porenquerschnitt bestimmt mit seinem Durchmesser und dem daraus resultierenden Kapillardruck gegenüber einer benetzenden Flüssigkeit das integrale Kapillardruckverhalten des porösen Materials und die Fähigkeit der Retardation / des Rückhalts von Salzlösung im Porengefüge. Dies bestimmt die Sättigungsverteilung im Porenraum und in der Folge die Einstellung der effektiven Permeabilitäten für die unterschiedlichen Phasen (siehe Info-Box).

Die Berücksichtigung der Zweiphasenströmung wird als wesentlich für die Beurteilung der Strömungsprozesse und damit des Wasserhaushaltes einer Salzhalde angesehen, da sie nicht nur für das frisch geschüttete Material, sondern dauerhaft für den gesamten Haldenkörper gilt. Das DARCY-Gesetz, in seiner einfach handhabbaren Lösung für die einphasige Strömung in einem mit dem strömenden Fluid gesättigten Porenraum, gilt für diese Bedingungen nicht. Um diese „Hürde“ zu umgehen, wird vielfach argumentiert, dass die Anwendung des Geltungsbereiches des DARCY-Gesetzes zu einer konservativen Einschätzung der zu beurteilenden Prozesse führt. Für repräsentative bilanztechnische Beurteilungen des Wasserhaushaltes ist dieser vereinfachte Ansatz jedoch nicht gerechtfertigt. Er führt für die Bedingungen einer Salzhalde mit den oben genannten Zusammenhängen und Wechselwirkungen zu einer erheblichen Fehlbeurteilung der Prozesse und der Auswirkungen auf die Umwelt.

In Abbildung 7 bis Abbildung 9 sind exemplarisch für die ESTA-Rückstandshalde Hattorf die Parameterprofile des Salzlösungsgehaltes, der effektiven Porosität und der

Porenraumsättigung in Abhängigkeit von der Beprobungstiefe dargestellt. Die ermittelten effektiven Gaspermeabilitäten und effektiven Salzlösungspermeabilitäten sind als Funktion des petrostatischen Druckes (der Auflast des überlagernden Haldenmaterials) in der Beprobungstiefe in Abbildung 10 und Abbildung 11 dargestellt. Die Entwicklung von Dichte und Porosität über die Tiefe verdeutlicht Abbildung 12 exemplarisch für die Bohrung B98/2013 HA.

Für die Beurteilung der Retardations- bzw. Speicherwirkung des Haldenmaterials gegenüber dem eindringenden Sickerwasser ist der an einer Probe ermittelte Unterschied zwischen dem möglichen Haftlösungsgehalt w_{HL} und dem ermittelten Porenlösungsgehalt w_L im Haldenkörper von Bedeutung. Anhand des Verhältnisses von Haftlösungsgehalt zum Salzlösungsgehalt können die folgenden generellen Interpretationen abgeleitet werden:

$w_{HL}/w_L > 1$: Der Haftlösungsgehalt ist größer als der ermittelte Salzlösungsgehalt. Dies lässt auf ein Speicher- bzw. Retardationsvermögen des Materials gegenüber einem Sickerprozess im Haldenkörper schließen.

$w_{HL}/w_L \approx 1$: Der Haftlösungsgehalt entspricht annähernd dem Salzlösungsgehalt. Haldenbereiche, aus denen entsprechende Proben stammen, besitzen damit kein Speicher- bzw. Retardationsvermögen gegenüber einem Sickerwasserstrom. Es ist zu vermuten, dass es sich um höher permeable Bereiche handelt, die sich im Gleichgewicht zum Sickerwasserstrom befinden.

$w_{HL}/w_L < 1$: Der Salzlösungsgehalt ist größer als der Haftlösungsgehalt. Dies deutet auf eine stärkere Durchströmung im Beprobungsbereich der Halde hin.

In Auswertung der für die Halde Hattorf dargestellten Ergebnisse können, für die durch die Bohrungen beurteilbaren Haldenbereiche, folgende Schlussfolgerungen formuliert werden:

- Der überwiegende Teil der ermittelten Salzlösungsgehalte – Abbildung 7 – liegt unter oder in der Größenordnung des Einbaulösungsgehaltes von 4 Ma.-% bis 6 Ma.-%. Ab einer Teufe von ca. 40 m liegen alle Salzlösungsgehalte unterhalb des Einbaulösungsgehaltes. Oberhalb dieses Teufenbereiches wurden nur für einzelne Probenkörper höhere Salzlösungsgehalte nachgewiesen, die auf einen Einfluss von Niederschlagswässern schließen lassen. Dies betrifft fast ausschließlich die Bohrung B99/2013 HA, die den ältesten Haldenkörperbereich aufgeschlossen hat und in dem die Alterationsprozesse am weitesten vorangeschritten sind.
- Ab einer Teufe von ca. 40 m ändert sich die effektive Porosität nur noch geringfügig – Abbildung 8. Die Porosität liegt in der Größenordnung von ca. 10 Vol. % und nimmt mit zunehmender Teufe weiterhin geringfügig ab. Die Reduzierung der Porosität wird auf die Kompaktion des Materials unter dem Einfluss der Auflast des geschütteten Materials zurückgeführt. Anhand der Dichteentwicklung über die Bohrteufe, exemplarisch dargestellt in Abbildung 12, kann die Kompaktion des Rückstands nachvollzogen werden.
- Entsprechend den Parameterprofilen für den Salzlösungsgehalt und die effektive Porosität ändert sich die Porensättigung mit Flüssigkeit (Abbildung 9) in Teufen größer ca. 40 m nur noch geringfügig. Sie streut um eine Größenordnung von ca. 0,35. Eine vollständige Sättigung des Porenraums wurde im Rahmen der Haldenbohrungen für keine Probe nachgewiesen.
- Bedingt durch die Permeabilitätsuntersuchungen an triaxial eingespannten Kernproben kommt es über den Versuchsverlauf zu einer Kompaktion der Probenkörper unter dem Einfluss des im Versuch angewendeten, geringen Manteldruckes. In Abbildung 10 und Abbildung 11 sind daher, wenn erforderlich, die Permeabilitäten am Anfang und am Ende des Versuches angegeben.

Die auf den petrostatischen Druck bezogenen Profile der ermittelten Permeabilitäten zeigen eine Änderung der Permeabilitäten über bis zu 6 Zehnerpotenzen über die Teufe. Ab einem Teufenniveau von ca. 40 m deutet sich für die effektive Gaspermeabilität eine Streuung um das Permeabilitätsniveau von ca. $1 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$ an. Für die Salzlösungspermeabilität liegt ab dieser Teufe das Permeabilitätsniveau in der Größenordnung von ca. $1 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$ und darunter. Der Verlauf steht in guter Übereinstimmung mit

den Ergebnissen des Porositätsprofils in Abbildung 8. Die, im Vergleich zu den effektiven Permeabilitäten, geringeren Salzlösungspermeabilitäten können auf den Einfluss einer Restgassättigung und/oder die Wechselwirkungen zwischen der für die Tests verwendeten Salzlösung und dem Feststoff zurückgeführt werden.

Die Permeabilitätsprofile weisen eine deutliche Reduzierung der Permeabilitäten über die Haldenmächtigkeit nach. Mit zunehmender Dichte reduziert sich die Porosität und somit die Permeabilität. Ausgehend von dem Kriechverhalten der Salinargesteine unter der Auflast (visko-elastoplastische Verformung) ist langfristig von einer weiteren Verdichtung des Haldenmaterials und einer weiteren Verringerung der Permeabilität auszugehen.

Die Ergebnisse der dargestellten Parameter bestätigen die oben vorgestellten Prozessvorstellungen zu den Strömungsprozessen im Haldenkörper. Die für die Parameterprofile der Halde Hattorf ermittelten Zusammenhänge gelten in gleicher Weise für die Erkundungsergebnisse der Bohrungen in der Halde Wintershall.

Die Halden müssen als ungesättigte Strömungsräume angesehen werden. Die Strömungsvorgänge in den Haldenkörpern werden durch die Zweiphasenströmung in Abhängigkeit von den Kapillardruckbedingungen und den Sättigungsverteilungen im Porenraum bestimmt. Dabei ist für einen Teufenbereich größer 40 m mit großer Sicherheit davon auszugehen, dass die Sättigungsbedingungen maßgeblich durch die Einbaulösungsgehalte bestimmt werden. Eine Erhöhung der Porensättigung durch den Zustrom von Niederschlagswässern kann aus den Erkundungsergebnissen für diesen Teufenbereich nicht abgeleitet werden.

Damit ergibt sich die Frage, wo und wie sich das durch den auftreffenden Niederschlag gebildete Haldenwasser im Haldenkörper bewegt und auf welchem Weg dieses mit welcher Beschaffenheit den Haldenkörper wieder verlässt.

Es ist davon auszugehen, dass diese Prozesse maßgeblich an den Haldenmantel, also den Bereich bis ca. 40 m Teufe (Abbildung 13), gebunden sind, denn nur für diesen Bereich des Haldenkörpers weisen die Ergebnisse lokal erhöhte Flüssigkeitssättigungen nach, die auf den Atmosphären einfluss zurückzuführen sind.

Die Versickerung der aus Niederschlagswasser und im Kontakt zur Luftfeuchte (in Abhängigkeit von den thermodynamischen Bedingungen an der Haldenoberfläche und in der Porenatmosphäre) gebildeten Salzlösung gehorcht in dem initial ungesättigten Haldenkörper den Gesetzmäßigkeiten der Zweiphasenströmung.

Durch den Zutritt von Wasser kommt es zu auflösungsbedingten Veränderungen der Porosität und der Porengrößenverteilung. In der Folge ändert sich oberflächennah

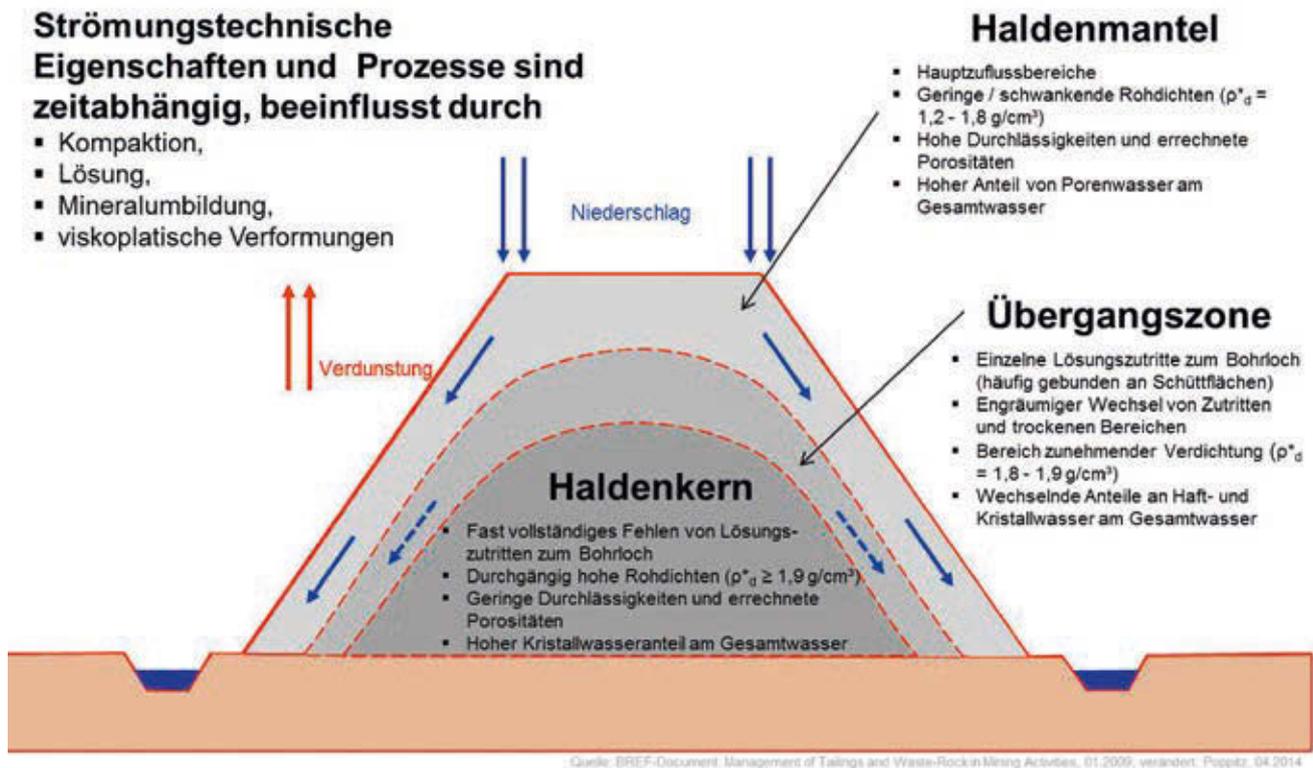


Abbildung 13: Schematische Darstellung der Modellvorstellung zum Aufbau der Strömungsräume in einem Haldenkörper

die Porensättigung mit Salzlösung. Bei einer Erhöhung der Porensättigung mit Salzlösung erhöht sich die effektive Salzlösungspermeabilität. In Abhängigkeit von der Größe des je Niederschlagsereignis zutretenden Flüssigkeitsvolumens ist von einer Verteilung in den oberflächennahen Schichten des Haldenkörpers auszugehen. In Wechselwirkung der kapillaren Retardation, der Geometrie des Haldenkörpers und der Verteilung der Permeabilitätssituation im Größenmaßstab der Poren sowie der Porenverteilung kommt es zur Ausbildung eines Strömungsprozesses in Richtung des größten Druckgradienten, der höchsten, kohärent verbundenen Flüssigkeitssättigung sowie der sich daraus ergebenden höchsten effektiven Salzlösungspermeabilität. Der Haldenkontur folgend, kommt es zu einem lateralen hypodermischen Abfluss des mineralisierten Haldenwassers in der Mantelzone der Halde.

5. Weiterentwicklung der Modellvorstellung zum Haldenaufbau

Aufbauend auf den vorstehend skizzierten Erkundungsergebnissen wurden die Strömungsprozesse im Haldenkörper beschrieben und allgemeine Charakteristika zur Beurteilung und Abgrenzung einzelner Zonen innerhalb des Haldenkörpers abgeleitet. Die bisherige Modellvorstellung zum Aufbau des Haldenkörpers wurde bestätigt und wie folgt erweitert: In den randnahen Bereichen des Haldenkörpers ist eine Haldenmantelzone ausgeprägt, die anhand der Untersuchungsergebnisse als nachhaltig

durchströmter Bereich zu beschreiben ist. Weitere Charakteristika der Mantelzone können Abbildung 13 entnommen werden. Zwischen dem Mantelbereich, der an den Strömungsprozessen innerhalb der Halde teilnimmt, und dem Haldenkern, in welchem nahezu keine Strömungsprozesse stattfinden, befindet sich, gemäß der Ergebnisse der Haldenbohrungen, eine Übergangszzone, in welcher vereinzelte Salzlösungszutritte auftreten, die jedoch überwiegend wenig ergiebig sind und geringe Mengenanteile an den gemessenen Gesamtabflüssen einnehmen. Salzlösungsbeeinflusste Bereiche wechseln sich hier engräumig mit trockenen oder schwach feuchten Bereichen mit geringer Sättigung des Porenraums ab.

Die in der Kamerabefahrung beobachtete Gasbewegung, gekennzeichnet durch das Auftreten von Schaumstellen (Bläschenbildung an Bohrlochwandung) ohne erkennbaren Abfluss im Bereich der Übergangszzone, kann als Indiz für die zunehmende Kompaktion des aufgehaldeten Materials gewertet werden. Von den Untersuchungen am Standort Hattorf ist ferner bekannt, dass die Breite der Übergangszzone altersabhängig ist.

Salzlösungszutritte in die Haldenbohrungen bzw. Fließbewegungen sind in der Übergangszzone im Wesentlichen an ehemalige Schüttoberflächen, d.h. an besondere Wegsamkeiten gebunden. Mit zunehmender Kompaktion, erkennbar anhand der steigenden Rohdichten und der fortschreitenden Alterationsprozesse, werden diese Weg-

samkeiten für Salzlösungen verschlossen, der verdichtete Kernbereich wächst nach außen hin und die Breite der Übergangszone nimmt mit zunehmendem Alter des Schüttbereichs ab. An diese Übergangszone schließt sich zum Haldeninneren die Haldenkernzone an. Diese ist charakterisiert als sehr gering permeabler Bereich. Die für den Haldenkern ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerte entsprechen dabei in der Größenordnung den Erfahrungen aus anderen Haldenbohrungen, beispielsweise am Standort Zielitz oder aus der Haldendurchörterung Bleicherode. Der Kernbereich der Halde Bleicherode wurde im Abschlussbericht ebenfalls als gering durchlässig charakterisiert [6]. Die so erweiterte Modellvorstellung des Haldenkörpers ist in Abbildung 13 dargestellt.

Durch die Untersuchung verschieden alter Bereiche im Rahmen der Haldenbohrungen am Standort Hattorf wurde gezeigt, dass sich diese Zonierung altersabhängig mit zunehmender Alteration und Kompaktion des Haldenkörpers verändert. Durch die gezielte Erkundung einer lange bestehenden und später überschütteten alten Haldenoberfläche wurde mit einer ergänzenden Horizontalbohrung für den Standort Wintershall weiterhin festgestellt, dass Schütthistorie und Haldenkubatur den Prozess der Kompaktion und damit die Entwicklung bzw. das Verschließen bevorzugter Wegsamkeiten beeinflussen. Es zeigte sich, dass bei nur geringmächtiger Überdeckung der Schüttflächen die Kompaktion nicht ausreicht, um bevorzugte Wegsamkeiten zu verschließen. Diese können weiterhin mit Haldenwässern durchströmt werden, wenn sie an den Haldenmantel angebunden sind. Bei den Rückstandskörpern handelt es sich also nicht um homogene, monolithische Körper. Vielmehr variieren die Charakteristika des Rückstands und damit auch die Strömungsprozesse raum-, last- und zeitabhängig.

6. Nutzung der Erkenntnisse zur Entwicklung technischer Konzepte für Haldenerweiterungen

Die Erkenntnisse zu Strömungsprozessen im Haldenkörper bildeten eine wesentliche Grundlage zur Weiterentwicklung der technischen Konzepte im Rahmen der derzeit durchgeführten Haldengenehmigungsverfahren im Werk Werra. Stellvertretend für eine Reihe von Erkenntnissen seien einige Beispiele hierfür nachfolgend genannt:

- Verbesserung der haldeninternen Entwässerung durch Anlage linienhafter Haldenwasserfassungselemente und Positionierung entsprechend der Erkenntnisse zur Haldenzonierung (z.B. parallel zum Haldenfuß innerhalb des Haldenmantels in Bereichen mit Innengefälle des Haldenuntergrunds sowie im Haldenfußbereich bestehender Haldenoberflächen, die zur Überschüttung vorgesehen sind).

- Berücksichtigung der Erkenntnisse zum Temperaturgefälle innerhalb der Halde, um Kristallisationen in den Linienelementen zu vermeiden, bzw. durch Anlage von Spülrohren im Randbereich, um diesen zu begegnen.
- Ableitung von Empfehlungen für die Gestaltung des Schüttprozesses (z.B. kontinuierlicher Vortrieb in eine Hauptschüttrichtung, Planung der Schütthöhen unter Berücksichtigung der Kenntnisse zur Kompaktion).
- Einbindung der Erkenntnisse zu Strömungsprozessen im Haldenkörper in Wasserhaushaltsbetrachtungen.
- Ableitung von Kenntnissen über den Einfluss unlöslicher Komponenten im Rückstand und deren Anreicherung an der Haldenoberfläche als Grundlage für die gezielte Unterstützung des Effekts zur Erhöhung der Verdunstungsleistung.
- Ableitung methodischer Erkenntnisse zu geeigneten Untersuchungsverfahren für das Medium Salz (z. B. zu Feuchtebestimmung).

Weiterhin leisten die Untersuchungsergebnisse einen Beitrag zur Bewertung der Erfordernis und Wirksamkeit der bislang angewandten und zukünftig geplanten Schutzmaßnahmen zur Minimierung der von den Halden ausgehenden Umweltauswirkungen. Auch über die derzeit laufenden Genehmigungsverfahren hinaus bieten die Erkenntnisse weiterhin vielfältige Ansätze für die Verbesserung des Prozessverständnisses, die begründete Qualifizierung der Wasserbilanzen der Halden sowie die aus dem Prozessverständnis abgeleiteten Maßnahmen zur Minimierung der von den Halden ausgehenden Umweltauswirkungen.

Literatur

1. Artschwager, Braatz, Poppitz (2014): Haldenkörperbohrungen am Standort Hattorf – Ergebnisbericht. Band 3.17 des Rahmenbetriebsplans 04/09-HA (Antragsunterlage zum Nachhaltigen Rückstandsmanagement am Standort Hattorf). 115 Seiten + Anlagen.
2. Artschwager, Braatz, Poppitz (2018): Haldenkörperverhalten – Auswertung der Haldenkörperbohrung am Standort Wintershall unter Einbeziehung der Ergebnisse für den Standort Hattorf. Band 3.15 des Rahmenbetriebsplans 27/12-WI (Antragsunterlage zum Nachhaltigen Rückstandsmanagement am Standort Wintershall) incl. Anlagen.
3. European Commission (2009): Reference Document on Best Available Techniques for Management of Tailings and Waste-Rock in Mining Activities.
4. Ingenieursozietät Prof. Dr.-Ing. Katzenbach GmbH (2020): Sachverständigen-Gutachten Nr. IK 1853/01 – Untersuchungen zur Vergleichbarkeit des Rückstandsmaterials der Halden Wintershall und Neuhof. Unveröffentlicht.

5. Luckner, L.; Schestakow, W. M. (1986): Migrationsprozesse im Boden- und Grundwasserbereich. Leipzig: Dt. Verl. für Grundstoffindustrie.

6. Mänz, K., Liebmann, H., Köhler, J. (1994): Abschlussbericht über die wissenschaftliche Begleitung der Haldendurchörterung Bleicherode. Kali-Umwelttechnik GmbH Sondershausen. Unveröffentlicht.

7. Wagner, Steffen (o. J.): Einführung in die Geoströmungstechnik. Freiberg: Lehrbrief des Instituts für Bohrtechnik und Fluidbergbau, TU Bergakademie Freiberg.

Glossar

Effektive Porosität

Am Strömungsprozess beteiligter Porenraum

$$n_{eff} = n_t - n_x - n_{HL} \quad |1|$$

n_{eff} effektive Porosität [Vol.-%]

n_t totale Porosität → Gesamtporosität [Vol.-%]

n_x geschlossene Porosität (Tot-Porosität) [Vol.-%]

n_{HL} Haftlösungsporosität [Vol.-%]

Gesamtwassergehalt

Anteil des gesamten im Rückstand enthaltenen Wassers bezogen auf die Trockenmasse der Originalsubstanz. [Angabe in Masse-%]. Ermittelt durch Ofentrocknung bei 550°C (Glühverlust, Bezug auf Trockenmasse). Gesamtwasser ist die Summe aus

→ Porenwasser und dem in die Kristallstruktur des Rückstands eingebundenen

→ Kristallwasser. Angabe in [Masse-%] | 1 |

Haftwasser/Haftlösung

im Porenraum einer ungesättigten Probe adsorptiv und/oder kapillar bei Luftdruckbedingungen gegen die Schwerkraft gehaltene/ fixierte Flüssigkeit (z.B. Wasser oder mineralisiertes Wasser-Salzlösung).

In der Rückstandshalde liegt die Flüssigkeit als salzhaltige Haftlösung vor. Der Aufsatzungsfaktor ist abhängig von der für den Untersuchungs-/Probenbereich bestimmten Flüssigkeitsdichte (diese wiederum abhängig von der Gesamtmineralisation und der Temperatur). Gemessene Haftwassergehalte werden deshalb dichtekorrigiert.

Im Prüfbericht des K+S Analytik- und Forschungszentrums ausgewiesenes Haftwasser entspricht dem Porenwasser (Bestimmung durch Karl-Fischer-Titration).

Kristallwasser/ Hydratwasser

An und/oder im kristallinen Feststoff gebundenes Wasser. Kristallwasser liegt in den Phasen im Haldenkörper entweder → schwach gebunden (z.B. Glaubersalz, Epsomit, Freisetzung

durch Ofentrocknung bei 105°C) oder → stark gebunden (z.B. Kieserit, Gips, Freisetzung durch Ofentrocknung bei 550 oder 600°C) vor.

Porenwasser/Porenlösung

gesamte, im Porenraum enthaltene Flüssigkeit (z.B. Wasser oder mineralisiertes Wasser – Salzlösung). Summe aus freiem (mobilem/entwässerbarem) und anhaftendem (immobilen/ nicht entwässerbarem) Anteil (→ Haftwasser/-lösung). Das Porenwasser wurde durch das K+S-Analytik- und Forschungszentrum durch Karl-Fischer-Titration bestimmt und in Prüfberichten unter „Wassergehalt“ ausgewiesen.

In der Rückstandshalde liegt die Flüssigkeit als salzhaltige Porenlösung vor. Der Aufsatzungsfaktor ist abhängig von der für den Untersuchungs-/Probenbereich bestimmten Gesamtmineralisation und der Flüssigkeitsdichte.

Angaben zum Wasser- bzw. Salzlösungsgehalt stellen das Verhältnis von Wasser- bzw. Salzlösungsmasse zur Trockenmasse einer Probe dar, wobei im Salzlösungsgehalt die Dichte und die Gesamtmineralisation der Salzlösung, d.h. des Haldenwassers, berücksichtigt wurden (Dichtekorrektur).

Der Begriff „Haftwasser“ wird häufig synonym für Porenwasser verwendet; es handelt sich dabei um den durch Ofentrocknung bei niedrigen Temperaturen und ggf. Korrektur um Kristallwassergehalte ermittelten Wassergehalt.

Sättigungsbeiwert

Gibt an, zu welchem Anteil das Porenvolumen einer Probe mit Flüssigkeit gefüllt ist (in Rückstandshalde salzhaltige Lösung). Synonym: Sättigungszahl

$$S_r = \frac{n_L}{n_t} = \frac{w_L \cdot \rho_s}{e \cdot \rho_L}$$

n_L mit Salzlösung gefüllter Porenanteil [Vol.-%]

n_t Gesamtporenanteil [Vol.-%]

w_L Salzlösungsgehalt [%]

e Porenzahl [Vol.-%]

ρ_L Salzlösungsdichte [g/cm³]

ρ_s Reindichte [g/cm³]

Trockenrohichte

Quotient aus der Trockenmasse einer Probe und dem Volumen (Symbol ρ_d , Angabe in [g/cm³]). Berechnet aus der gemessenen Rohdichte und dem Porenlösungsgehalt (Wassergehalt, bestimmt durch Karl-Fischer-Titration, dichtekorrigiert):

$$\rho_d^* = \frac{\rho}{1+(w_L^*/100)}$$

ρ_d^* Trockenrohichte [g/cm³]

ρ Nassrohichte [g/cm³]

w_L^* Porenlösungsgehalt [%]





DAVID SCHERR, M.Sc.
K+S Analytik- und
Forschungszentrum,
K+S Aktiengesellschaft



DIPL.-ING. GUIDO BAUCKE
K+S Analytik- und
Forschungszentrum,
K+S Aktiengesellschaft

BILDVERARBEITUNG ZUR PROZESS- UND QUALITÄTSKONTROLLE IN DER KALIINDUSTRIE

Bildverarbeitende Systeme in der Kali- und Steinsalzindustrie beschreiben in der Regel Automatisierungsverfahren, die sich am menschlichen visuellen System orientieren. Erste Systeme fanden beispielsweise in Form von QR Code Scannern in der Verpackung und Endabfertigung Anwendung. Mit zunehmender Leistungsfähigkeit und Sinken der Kosten der Hardwarekomponenten wurde der Markt für industrielle Bildverarbeitung (sogenanntes Machine Vision) kontinuierlich und rapide größer, wodurch sich ein gänzlich neues Anwendungsgebiet erschloss. Dieses Aufgabengebiet wird innerhalb der K+S Gruppe durch das Analytik- und Forschungszentrum bearbeitet. Vielversprechend sind derartige Lösungen im Bereich der Prozesssteuerung und der Qualitätssicherung von Produktionsgütern, was im Hinblick auf Differenzierung von Mitbewerbern zunehmend bedeutender wird. Durch Integration dieser Technik kann die Effizienz der Anlagen deutlich gesteigert werden.

Machine vision systems for quality and process control purpose in potash industry Image processing systems in the potash and rock salt industry basically describe automation processes that are based on the human visual system. The first systems for example were used in the form of QR code scanners in packaging and final processing. With increasing performance and decreasing costs of hardware components, the market for industrial image processing (so-called machine vision) grew continuously and rapidly, opening up a completely new area of application. Within the K+S Group, this field of application is handled by the analytics and research centre. Such solutions are promising in the area of process control and quality assurance of production goods, which is becoming increasingly important in terms of differentiation from competitors. By integrating this technology, the efficiency of plants can be significantly increased.

Einleitung

Moderne Bildverarbeitungssysteme in der Kali- und Steinsalzindustrie finden sich vermehrt als Qualitätssicherungswerkzeuge bei der (End-)Produktabfertigung zur Kontrolle von Verpackungen oder zur Kontrolle des ordnungsgemäßen Sitzes der Label in Form von Barcode- und QR-Code-Scannern.

Mit Sinken der Kosten und Verbesserung der Leistungsfähigkeit ergeben sich für K+S zudem auch neue Möglichkeiten im industriellen Umfeld, mithilfe von geeigneten bildverarbeitenden Systemen bestehende Anlagen zu automatisieren. Ein Beispiel hierfür können Systeme zur Überwachung der Form und Farbe von Granulaten oder komplexe Steuerungs- oder Regelungssysteme auf Basis der Korngröße sein.

Das K+S Analytik- und Forschungszentrum beschäftigt sich mit Bildverarbeitungssystemen überwiegend im Rahmen der Prozess- und Qualitätskontrolle zur optischen Partikelgrößenmessung.

Diese komplexen Systeme werden nun fortschreitend tiefer in die Automatisierung und Regelung der Aufbereitungsanlagen integriert. Auf Basis dieser Messwerte werden beispielsweise im Prozessbereich Entscheidungen zum Anlagenbetrieb getroffen. Auch ein vollautomatisiertes Regeln einzelner Anlagenteile ist durch die erzeugten Messwerte möglich.

Auch werden von verschiedenen Teilbetrieben Systeme zur automatischen Überwachung der Produkteigenschaften wie Farbe, Form oder Störbestandteile gefordert. Zur Kontrolle der Produktfarbe gibt es kommerzielle Systeme für den Labor- oder Prozessbereich. Diese Systeme sind aber meist nicht für die anspruchsvol-

len Bedingungen der Kali- und Salzindustrie geeignet, sondern wurden für bestimmte Einsatzbereiche in der chemischen- und Zulieferindustrie entwickelt. Für den Einsatz in der Kali- und Steinsalzindustrie müssen diese Systeme meist unter zusätzlicher Anschaffung von Einzel- bzw. Kleinseriensystemen umgerüstet werden.

Das K+S Analytik- und Forschungszentrum hat daher begonnen, selbstentwickelte Systeme zur Farb-, Korngrößen- und Störbestandteilerfassung zu entwickeln und zu implementieren. Die Anpassungsfähigkeit der Systeme an nahezu jeden Einsatzfall ist ein großer Vorteil. Systeme beispielsweise, welche ausschließlich zur Prozesssteuerung der Korngrößen in Granulierprozessen verwendet werden, benötigen geringere Anforderungen an die Genauigkeit und können dementsprechend einfacher konstruiert sein und damit kostengünstiger implementiert werden als jene, welche vollwertige Partikelgrößenverteilungen erstellen können. Kommerzielle Lösungen hingegen bieten gleichbleibende Genauigkeiten für jede Problemstellung. Dabei gilt: Je tiefer ein System in eine bestehende Anlage integriert werden muss, desto geringer ist die Verfügbarkeit an zukaufbaren Fertiglösungen und desto sinnvoller ist die Eigenentwicklung von Systemen.

Die industrielle Bildverarbeitung in Form tief integrierter Systemlösungen stellt zudem die Weichen zum angestrebten Standard „Industrie 4.0“: Ein solches System ist beispielsweise nicht nur in der Lage Partikelgrößenverteilungen zu erstellen, auf Basis derer Anlagenkomponenten automatisiert gesteuert werden. Die Systeme sind ebenso in der Lage,

das Anlagenpersonal z.B. auf dem Mobiltelefon zu informieren, sollten außergewöhnliche Ereignisse eintreten. Zudem können diese Systeme ferngewartet werden, wodurch ein Teil der Instandhaltungsmaßnahmen dezentral und schnell durchgeführt werden können.

1. Grundlagen der industriellen Bildverarbeitung

Bildverarbeitungssysteme gliedern sich in die Anlagenkomponenten Kamerasensor, Rechner und Kommunikationseinheit (1).

Der Sensor ist dabei meist eine industrielle Videokamera. Die Kommunikation der Kamera mit dem Rechner erfolgt dabei meist über „Ethernet“ (bis 100 m) oder alternativ über „USB“ (bis 5 m). Spezielle Verbindungen wie „Camera Link“ oder „Firewire“ sind mittlerweile auf Spezialfälle begrenzt.

Die Kommunikationseinheit stellt die Verbindung zwischen Bildbearbeitungssystem und Prozessleitsystem bzw. Produktionsanlage her. Diese Schnittstelle kann als Digital- bzw. Analogschnittstelle (24VDC; 0/4-20 mA oder 0-10V) bzw. als Netzwerkschnittstelle (Profibus, TCP/IP, OPC, u.v.m.) ausgeführt werden. Im Einzelfall hängt die Art der Kommunikationseinheit von der Komplexität der vom Bilderfassungssystem erfassten Information und der Entfernung zwischen Sender (Bildverarbeitungssystem) und Empfänger (z.B. PLS) ab. Bei einfachen Ja-Nein-Entscheidungen kann eine 24VDC-Digitalschnittstelle ausreichend sein, bei umfassenden Messdaten wird eine TCP/IP-Verbindung zu einem PLS bevorzugt.

Der Rechner stellt dabei das Herzstück eines Bildverarbeitungssystems dar, welches die Bilder des Sensors

auswertet und das Signal an die Kommunikationseinheit weitergibt. Rechnersysteme sind dabei sowohl als konventionelle PC-Systeme als auch als spezialisierte Industrierechner im Einsatz. Durch die Verfügbarkeit von Mehrprozessorsystemen und die generelle Leistungssteigerung in den letzten Jahren ist die Rechenzeit als limitierender Faktor in den Hintergrund gerückt.

Für einfache Anwendungen gibt es mittlerweile Systeme, die Kamera, Prozessor und Signalausgabe in einem Gerät vereinen. Diese sogenannten Smart-Cameras ermöglichen dem Benutzer schnell und effizient, Bildverarbeitungssysteme aufzubauen und selbstständig zu integrieren. Mit diesen Kompaktlösungen können beispielsweise QR-Codes sowie Barcodes ausgelesen werden. Außerdem

können Toleranzüberschreitungen bei der Fertigung immer gleicher Bauteile in Echtzeit detektiert werden. Komplexere Aufgaben bedürfen der Verwendung dezidierter, leistungstärkerer Rechner und einer separaten Signalausgabeeinheit. Diese werden dann beispielsweise mithilfe der systemprogrammierungsorientierten Programmiersprache C++ oder der modernen Programmiersprache LabVIEW® programmiert.

1.1 Besonderheiten in der Kaliindustrie

Bei der Bereitstellung geeigneter Kamera- und Beleuchtungssysteme in der Kaliindustrie sind vor allem Staub und Korrosion wichtige zu berücksichtigende Faktoren. Die meisten Kamerasysteme sind von Haus aus nicht robust genug, um bei solchen Umgebungsbedingungen langfristig

zu funktionieren und benötigen daher ein geeignetes Schutzgehäuse. Dieses Gehäuse erhöht die mechanische, thermische und chemische Widerstandsfähigkeit der Kamera und der Optik. Die verwendeten Schutzgehäuse sind dabei meist aus eloxiertem Aluminium gefertigt und haben eine entspiegelte Schutzscheibe. Die Scheibe kann meist zusätzlich mit einem Windvorhang zum Schutz gegen Staub versehen werden.

Filigrane Beleuchtungssysteme aus der Prozessautomationssparte der Automobil- oder Verpackungsindustrie haben sich hingegen in der rauen Betriebsumgebung nicht bewährt. Alternativ werden Beleuchtungssysteme auf Basis handelsüblicher industrieller Scheinwerfer (LED, Halogen) und deren geschickter Kombination zu Hell- und Dunkelfeldbeleuchtungs-



Abbildung 1: Messaufbau einer Tiefbunker-Bahntleerung (ca. 1000 t/h)

systemen bevorzugt. Zu beachten ist aber, dass z.B. günstige industrielle LED-Systeme durch die Verwendung einfacher Netzteile ein starkes 50-Hz-Flimmern zeigen. Alternativ werden daher gleichstrombetriebene Systeme verwendet.

2. Umgesetzte Beispiele in der K+S Gruppe

2.1 Farberkennung

Ein System zur Farberkennung wurde am Verladehafen in der Tiefbunker-Bahnentleerung umgesetzt. Dort werden verschiedenen Düngemittelprodukte und Salze auf Binnen- und Seeschiffe verladen. Dabei werden am Standort verschiedenste Düngemittel aus unterschiedlichen Werken mit der Bahn angeliefert, in verschiedenen Schuppen eingespeichert und bei Bedarf verladen. Eine mögliche Fehlerquelle liegt darin, dass es bei Entladung der Züge zu Warenvermischung kommen kann. Dabei werden Produkte unterschiedlicher Färbung oder chemischer Zusammensetzung vermengt. Bereits geringe Mengen kontaminieren das Haufwerk irreversibel.

Grundsätzlich wird die Erkennungsfunktion durch die Analyse des Farbspektrums des auf dem Band liegenden Materials gewährleistet. Das System arbeitet dabei wie ein Grenzwertwächter, der ab einer frei festlegbaren Farbabweichung einen akustischen und optischen Alarm ausgibt. Das zu überwachende Farbspektrum wird dabei von dem schichthabenden Verlademitarbeiter mittels Knopfdruck als „Zielprodukt“ angelernt. Der Bediener hat über das Programm die Möglichkeit, das Produkt auf dem Förderband optisch zu überwachen. Sollte der Farbwert über den definierten Schwellwert abweichen, wird dies vom

Programm detektiert und gemeldet. Der Aufbau ist einfach und robust umgesetzt. Die Kamera befindet sich in einem Aluminiumgehäuse, welches über dem Band positioniert ist, und die Beleuchtung ist mittels eines handelsüblichen Scheinwerfers umgesetzt. Es hat sich gezeigt, dass trotz hoher Staubbelastung über dem Band eine Reinigung der Kamera nur rund alle zwei Wochen notwendig ist.

2.2 Granuliertellersteuerung

Die K+S Minerals and Agriculture GmbH stellt Kieserit ($MgSO_4 \cdot H_2O$) in Form von Rollagglomerat her. Hierbei wird feines Kieserit mithilfe einer Salzlösung auf drei Pelletiertellern (\varnothing 4,5 m) agglomeriert. Die Steuerung der Granulieranlage erfolgt durch Anpassung der auf den Teller aufgetragenen Menge an Salzlösung, welche als Granulier-Hilfsmittel dient. Dies bedeutet, dass mit zunehmender Zugabe an Lösung die durchschnittliche Partikelgröße in Abhängigkeit von der Verweilzeit auf dem Teller

steigt. Resultierend daraus sinkt die Partikelanzahl, da der Massenstrom des auf den Teller gegebenen zu granulierenden Kieserits annähernd gleich gehalten wird.

In der Regel erfolgt die komplette Steuerung einer solchen Granulieranlage über die optische Bewertung eines Anlagenbedieners, der direkt am Teller die Menge an Salzlösung nach seinem Ermessen anpasst. Um den Pelletierprozess effizient fahren zu können, muss neben anderen Kriterien der mittlere Partikeldurchmesser konstant gehalten werden können. Um Partikelgrößenverteilungen in diesem Größenbereich analytisch zu erfassen, wird konventionell das getrocknete Granulat gesiebt oder mit dynamischen Bildanalyseverfahren ausgewertet. Da die Siebanalyse für feuchte Granulate ungeeignet ist und eine vorgeschaltete Trocknung eine Zeitverzögerung bedeutet, erwuchs die Idee, die Anlagensteuerung durch die Detektion des mittleren Partikeldurchmessers mittels eines bild-

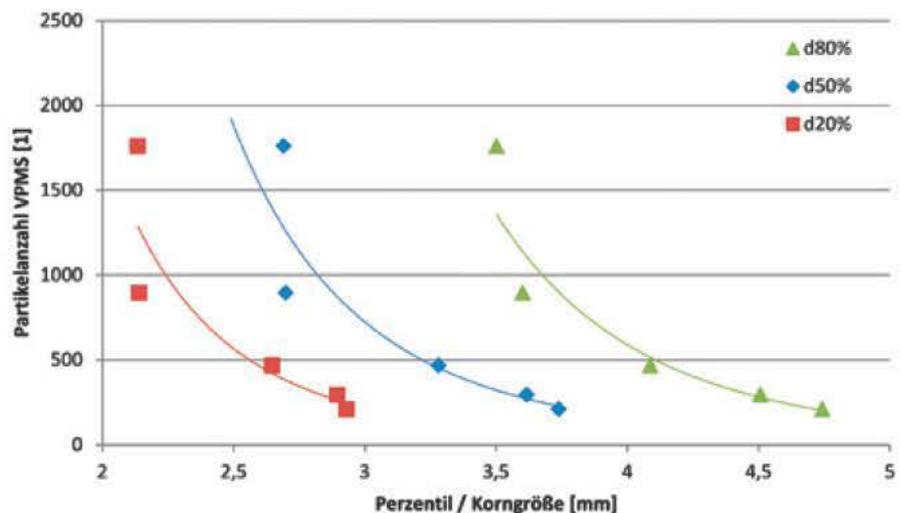


Abbildung 2: Zusammenhang d80 % / d50 % und d20 % mit der Partikelanzahl



Abbildung 3: Installation von Kamera und Beleuchtung über der Abwurfschurre eines Pelletiertellers – Umsetzung im Auflichtverfahren

verarbeitenden Systems (Machine Vision) umzusetzen. Dies bietet den Vorteil, Partikelgrößenverteilungen kontinuierlich zu erfassen und als Steuerungskenngröße direkt zur Verfügung zu stellen. Unter Verwendung eines speziell konfigurierten bildverarbeitenden Systems (Machine Vision) können außerdem die rauen Betriebsbedingungen der Anlage berücksichtigt werden, indem beispielsweise ein geeignetes Kameragehäuse verwendet wird.

Nach Rücksprache mit mehreren Herstellern wurde wegen zu hoher Umbaukosten und Zweifeln an der technischen Umsetzbarkeit die Anschaffung eines vollautomatischen kommerziell erhältlichen Gesamtsystems verworfen. Diese Lösung basierte auf der Idee einer automatischen Probennahme der noch feuchten Granulate, welche anschließend einer konventionellen optischen Korngrößenanalyse zugeführt werden sollten. Dies erschien jedoch nicht umsetz-

bar, da die frischen, noch klebrigen Granulate zwangsläufig zu Fehlfunktionen des Systems geführt hätten. Daher erwuchs die Idee, ein Inlinesystem am Tellerabwurf zu installieren, welches mit Auflicht und ohne Probennahme funktioniert. Ein solches System für die spezielle Situation war jedoch am Markt in dieser Art nicht verfügbar. Im Zuge eines Forschungsprojekts des K+S Analytik- und Forschungszentrums wurde daher eine Machbarkeitsstudie gestartet, bei der die Umsetzung auf Basis einer eigenen Soft- und Hardwarelösung erfolgreich erprobt wurde. Dazu zeichnet das entwickelte Bildverarbeitungssystem den optischen Granulateindruck maschinenlesbar auf und interpretiert diesen. Anschließend werden daraus Partikelgrößen extrahiert und ausgewertet. Die Menge an Salzlösung kann mit diesem Messwert und einem PID-Regler angepasst werden.

Die Partikel erscheinen als helle Agglomerate auf dunkelgrauem Grund. Durch die Positionierung des Systems an der Abwurfschurre sind die Partikel nahezu in einer Monokornschicht angeordnet, einzig die Vereinzelung der Partikel ist unvollständig. Daher müssen sich berührende Partikel segmentiert, also getrennt werden (2). Um die Partikel zuverlässig voneinander zu trennen, werden verschiedenen Algorithmen kombiniert. Zugrunde liegt aber in allen Fällen eine sogenannte Wasserscheidentransformation, auch „Watershed“ genannt (3).

In einem nächsten Automatisierungsschritt soll nun die Menge an Salzlösung vollautomatisch angepasst werden. Die Übertragung der Korngrößenwerte als d_{50} % erfolgt dabei als analoges Signal an das PLS. Zur Steuerung der Salzlösungsmenge

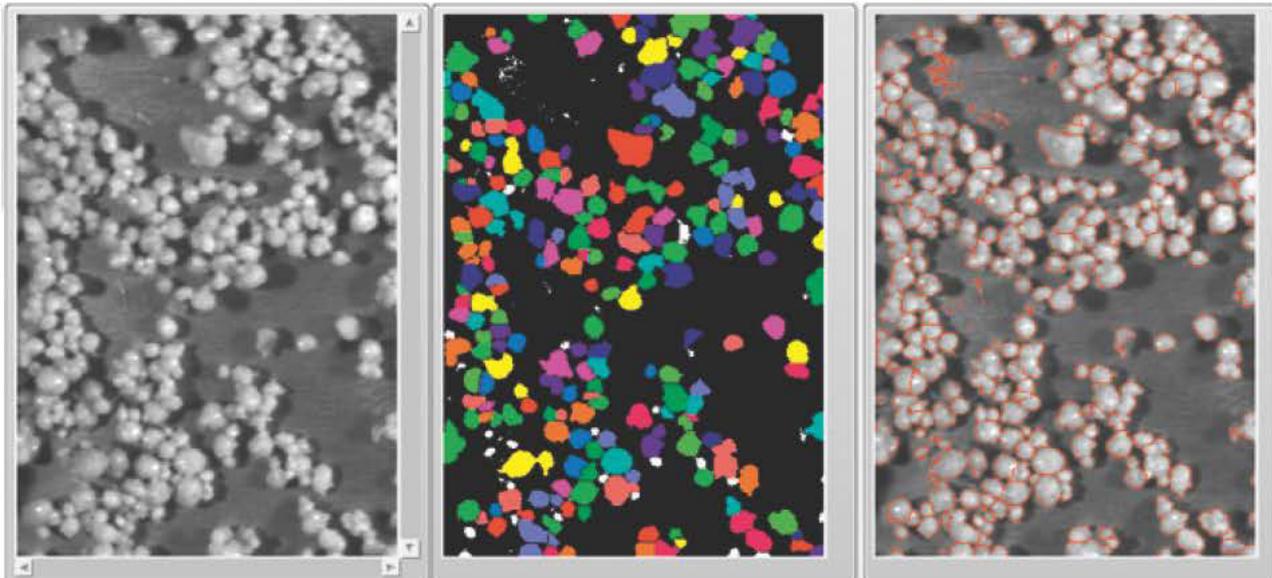


Abbildung 4: Ergebnis der Bildanalyse; (li.) Aufnahme der Partikel im Dunkelfeld; (mi.) Ergebnis der Segmentierung; (re.) Overlay der Segmentierung auf das Ausgangsbild

sollen automatisiert Ventile geregelt werden. Durch den Verschleiß (bedingt durch Kieserit-Kristalle und Anhydrit in der Lösung) werden dazu Kugelhähne und Quetschventile erprobt.

Zusammenfassend kann aus den Messwerten und den ersten Erfahrungen eine generelle Machbarkeit abgeleitet werden. Für einen endgültigen Test im Sinne eines „Proof of Concept“ ist aber noch die Einbindung der Ventilsteuerung notwendig.

2.3 Dunkelkornbestimmung im Steinsalzgrubenbetrieb

Eine weitere Anwendungsmöglichkeit für industrielle Bildverarbeitung ergibt sich in den Gruben der Steinsalzindustrie. Dort kann die Kamertechnik zur Qualitätskontrolle des geförderten Salzes dienen. Großer Vorteil eines solchen Systems ist, dass optische Salzparameter unmittelbar nach dem Abbau bereits in der Grube detektiert werden. Die daraus gewonnenen Informationen können dann

direkt an die sich anschließenden Aufbereitungsprozesse weitergegeben werden. Auf Basis dieser Daten kann sich die Fabrik frühzeitig auf die entsprechenden Salzqualitäten einstellen.

Das Steinsalz der betrachteten Lagerstätte beinhaltet als Nebenbestandteil unter anderem auch Calciumsulfat. Der Anteil des Cal-



Abbildung 5: In den Lagerstätten der K+S Minerals and Agriculture GmbH wird Steinsalz untertägig abgebaut. Neben Steinsalz können auch Anteile von Anhydrit (hier schwarz) enthalten sein

ciumsulfats, als Mineralphase Anhydrit vorliegend, schwankt je nach Revier, in welchem gerade abgebaut wird. Anhydrit stellt sich als dunkelgraue bis schwärzliche Bereiche im Steinsalz dar und fällt deshalb auch als Dunkelbestandteil im Salz auf. Überschreitet der Anteil des Anhydrits im geförderten Rohsalz einen gewissen Schwellenwert, wird das Salz als Auftausalz bzw. Streusalz verwendet. Unterschreitet hingegen der Anteil des Dunkelbestandteils den Schwellenwert, wird das Steinsalz der Fabrik zur weiteren Aufbereitung zugeführt. Es hat sich gezeigt, dass der Dunkelbestandteil von Rohsalz durch optische Messsysteme bestimmt werden kann. Die Ergebnisse einer chemische Analyse sind zwar genauer als die einer optischen Messung, für eine Vorsortierung des Salzes in der Grube sind die Ergebnisse aber hinreichend genau. Mit einer optischen Online-Analytik in der Grube kann also frühzeitig auf Grenzwertüberschreitungen reagiert



Abbildung 6: Prototyp der Dunkelbestandteilmessung, installiert über dem Rohsalzband der Steinsalzgrube

werden, und damit gelangen weniger dunkle Partikel in das Produkt.

Zur Bestimmung des Dunkelbestandteils des in der Grube geförderten Steinsalzes wurde im Rahmen einer Machbarkeitsstudie eine Kamera über ein Rohsalzband an der Firste positioniert, welche in Verbindung mit einem geeigneten Beleuchtungssystem Aufnahmen vom Rohsalz macht. Die Herausforderung dieses Aufbaus besteht darin, scharfe bzw. optimal belichtete Aufnahmen des Rohsalzes zu erstellen, währenddessen sich das Förderband mit einer Geschwindigkeit von bis zu 3 m/s bewegt.

Zur Auswertung der Aufnahmen wurde von K+S eigens ein Programm entwickelt, welches speziell für dieses Anwendungsgebiet optimiert ist. Das Programm fordert kontinuierlich von

der Kamera die Anzahl der Bilder an, die notwendig sind, um jeden vorbeilaufenden Salzabschnitt des Rohsalzes zu fotografieren, sodass kein Bandabschnitt ausgelassen wird. Ausgewertet wird der Flächenanteil, welcher nach Kalibration von dem Auswerteprogramm als zu dunkel detektiert wird, in Bezug auf die Gesamtfläche der Aufnahme. Auch ein leeres Band wird von der Software erkannt. Das Programm gibt dann einen zeitlichen Verlauf des Anhydritanteils aus, sodass der Trend verfolgt werden kann. Die entsprechende Warte in der Grube bzw. die Fabrik über Tage hat somit jederzeit Zugriff auf die aktuellen optischen Parameter des geförderten Rohsalzes.

2.4 Korngrößenbestimmung Verladebetrieb

Für die Zielstellung einer schnellen und automatischen Korngrößenanalyse von granulierten Produktgütern während des Verladeprozesses wurde ein bildverarbeitendes Online-Mess-

system im Rahmen der Optimierung und Standardisierung der Verladeprobenahmen implementiert. Während des Verladens des Granulats in Waggons oder LKWs werden kontinuierlich Probegut analysiert und die Partikelgrößenverteilungen zur Verfügung gestellt. Mit dem System ist eine frühzeitige Reaktionsmöglichkeit des Verladepersonals bei Grenzwertüberschreitungen möglich.

Bestimmte Düngemittelgranulate werden grundsätzlich aus dem Schuppen verladen, in welchen sie zuvor aus der Produktion kommend zum Zwischenspeichern und zum Nachreifen eingespeichert wurden. Während des Einspeicherns – dies gilt besonders beim Aufschütten freifließender körniger Haufwerke – kommt es dort naturgemäß zur Entmischung, die Inhomogenität zur Folge hat (4).

Der Feinanteil des Produktgutes sammelt sich im Inneren des Haufwerks, wohingegen gröbere Partikel nach außen abfließen. Diese Entmischung kann sich bei der Verladung

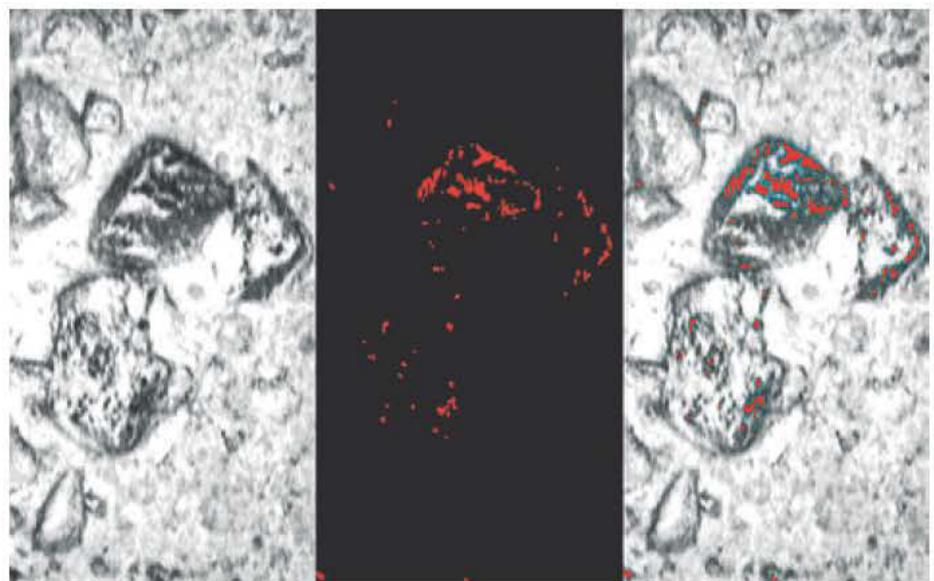


Abbildung 7: Aufnahme vom Rohsalzband in der Grube: Links ist ein Ausschnitt der Originalaufnahme zu sehen, mittig ist der von der Software ausgewertete Anhydritanteil der Aufnahme gezeigt. Das rechte Bild zeigt die Überlagerung der ersten beiden Bilder



Abbildung 8: Online-Messsystem zur Bestimmung von Partikelgrößenverteilungen während eines Verladeprozesses

bemerkbar machen, soll doch jeder Waggon oder LKW spezifikationsgerecht verladen werden. Spezifikationsgerecht bedeutet, dass sich ein definierter Anteil des Granulates im Korngrößenbereich von 2–4 mm befinden muss. Überkorn größer 4 mm und Unterkorn kleiner 2 mm

sowie Staub dürfen nur zu einem gewissen Toleranzbereich im Produkt enthalten sein. Um das Produkt entsprechend spezifikationsgerecht zu verladen, muss dieses auf dem Weg in den Waggon bzw. LKW bei Bedarf wieder vergleichmäßig werden. Zur Verladung aus dem Schuppen nimmt

ein Mitarbeiter mit einem Radlader Produkt auf und kippt es in die Verladeanlage. Er entscheidet, ob aus dem Haufwerk gröberes oder feineres Material verladen werden soll. Grundlage für diese Entscheidung kann die automatische Korngrößenanalyse sein: Sobald sich das zu ladende Produkt außerhalb der Spezifikation bewegt, wird das Verladepersonal über eine SMS vom Online-Messsystem informiert, sodass entsprechend Gegenmaßnahmen getroffen werden können. Im gegenteiligen Fall wird das Verladepersonal dann wieder informiert, wenn spezifikationsgerecht verladen wird. Zusätzlich werden in kurzen periodischen Zeitabständen gesamte Partikelgrößenverteilungen erstellt und archiviert. Aus diesen Daten kann dann zum Beispiel ein Gesamtzugdurchschnitt erstellt werden.

Der Vorteil eines solchen Systems ist in der Qualitätssicherung begründet. Die Verladung ist der letzte Verfahrensschritt, welchen das Produkt durchläuft, bevor es das Werk verlässt. Somit ist dieser auch die letzte Gelegenheit, um nicht spezifikationsgerechtes Produkt zu erkennen. Aus diesem Grund ist eine Qualitätskontrolle im Hinblick auf Partikelgrößenverteilung sinnvoll und unabdingbar. Durch Erzeugen von kontinuierlichen Messergebnissen kann der Verladeprozess annäherungsweise in Echtzeit nachvollzogen werden, um gegebenenfalls Maßnahmen zu ergreifen.

3. Zusammenfassung

Bildverarbeitende Systeme können in vielerlei Hinsicht zur Wertschöpfung in der Kali- und Steinsalzindustrie beitragen, wenn sie sinnvoll implementiert werden. Die Bewertung der



Abbildung 9: Partikelgrößenverteilung in einem aufgeschütteten Haufwerk: Der Feinanteil (hier rot dargestellt) befindet sich überwiegend im Kern des Haufwerks. Der grobe Anteil (weiß) hingegen fließt nach außen ab. Von außen ist kaum Feinanteil zu sehen

Die Steigerung der Effizienz von durch bildverarbeitende Systeme automatisierten Anlagenteilen oder Anlagen kann nur dann gewährleistet sein, wenn das System robust und die Standzeit der oft komplexen Systeme ausreichend hoch ist, beziehungsweise die Ausfallzeiten gering sind.

Das gilt besonders für diesen Industriezweig mit eher rustikalen Umgebungsbedingungen. Dies ist in den vorgestellten Anwendungsbeispielen gelungen und wird in Zukunft konsequent weiter verfolgt.

Danksagung

Das Analytik- und Forschungszentrum dankt dem ehemaligen Kollegen und wissenschaftlichen Mitarbeiter Dr. Paul Meißner für das Mitwirken an diesem Artikel.

Literaturverzeichnis

1. Christian Demant, Bernd Streicher-Abel, Peter Waszkewitz. Industrielle Bildverarbeitung: Wie optische Qualitätskontrolle wirklich funktioniert. s.l. : Springer, 2013.
2. Jähne, Bernd. Digitale Bildverarbeitung. s.l. : Springer, 2013.
3. Soille Pierre. Morphological Image Analysis: Principles and Applications. s.l. : Springer, 2013.
4. Stieß, Matthias. Mechanische Verfahrenstechnik-Partikeltechnologie. Berlin Heidelberg : Springer Verlag, 2009.
5. Mörl, Lothar, et al. Laboruntersuchung und Sprotionsisothermen für KCL 99. 1998.
6. Fermum, Lars. www.vision-doctor.de. [Online] <http://www.vision-doctor.de/optik.html>.
7. National Instruments Corporation. A Practical Guide to Machine Vision Lighting. [Online] 14. 10. 2015. [Zitat vom: 01. 10. 2019.] <http://www.ni.com/white-paper/6901/en/>.

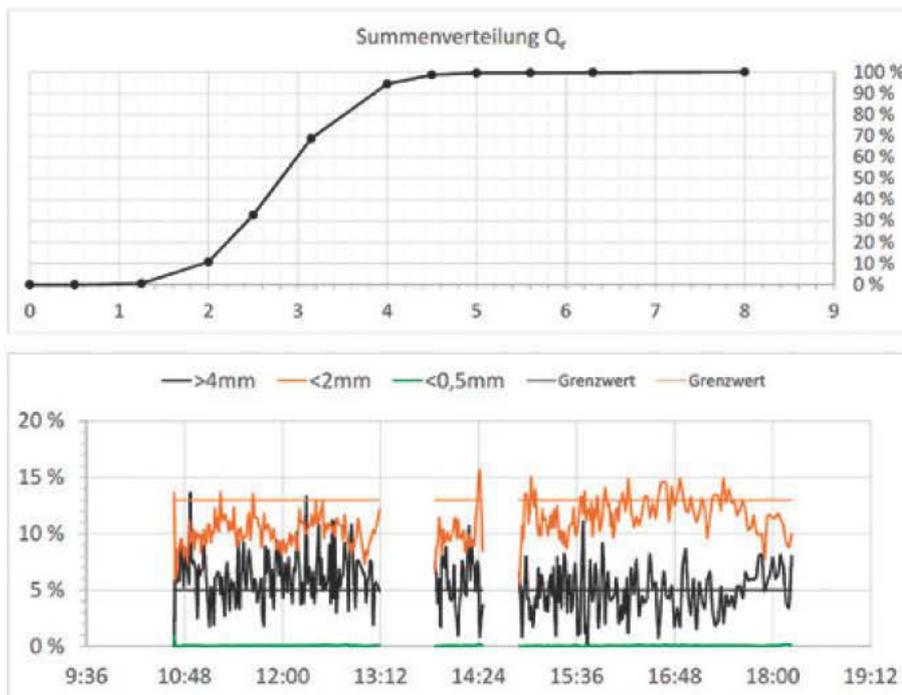


Abbildung 10: Durchschnittliche Partikelgrößenverteilung des Gesamtzugs (oben) und zeitlicher Verlauf der überwachten Qualitätsparameter (unten)

Zweckmäßigkeit einer potenziellen Lösung ist natürlich ein unumgänglich wichtiges Kriterium, bevor sich für eine Umsetzung entschieden wird.



DR. RÜDIGER TRIEBEL
Referatsleiter Bergbau
K+S Aktiengesellschaft, Kassel
und Geschäftsführer
MSW-CHEMIE GmbH,
Langelsheim



DR. FREDERIK FLACH
Leiter Labor/Entwicklung
MSW-CHEMIE GmbH,
Langelsheim

EMULSIONSPRENGSTOFFE FÜR DEN KALI- UND STEINSALZBERGBAU

Im untertägigen Bergbau stellt die Gewinnung mit Bohr- und Sprengarbeit weltweit nach wie vor einen Kernprozess dar, während andere Lösetechniken untergeordnete Rollen spielen. Im Kali- und Steinsalzbergbau in Deutschland ist die Sprengtechnik besonders weit verbreitet, weil die besonderen geologischen, sicherheitstechnischen und wirtschaftlichen Bedingungen dies erfordern. Ausnahmen bilden seit einigen Jahren Einsätze, bei denen die Vermeidung von Sprengerschütterungen oder die Vortriebsgeschwindigkeit im Fokus stehen und keine Gasgefahren zu erwarten sind. Im internationalen Kali-bergbau überwiegt die Anwendung der schneidenden Lösetechnik in flachen, mächtigen und ungestörten Flözen, sofern die übrigen Lagerstättenbedingungen dies erlauben.

Aufgrund der in der Regel trockenen Bedingungen unter Tage eignen sich lose, auf Ammoniumnitrat basierende Sprengstoffe besonders für den Einsatz im Kali- und Steinsalzbergbau. MSW-Chemie GmbH als bedeutendster Hersteller in Deutschland erkannte dies

sehr früh und versorgt seit vielen Jahrzehnten den Bergbau zuverlässig mit hochqualitativen Sprengstoffen. Die Stickoxidemissionen wurden stetig verringert, insbesondere durch intensive Zusammenarbeit mit den Lieferanten der Rohstoffe. Allerdings sind die erzielten Werte für die K+S-Betriebe teilweise nicht hinreichend, um die sehr hohen Anforderungen aus den zukünftig anzuwendenden, stark abgesenkten Arbeitsplatzgrenzwerten für Stickoxide zu erfüllen. K+S hat bereits seit 2002 versuchsweise Emulsionssprengstoffe eingesetzt, die an der Verwendungsstelle hergestellt und geladen werden, um Erfahrungen zu sammeln und die Vorteile der noch geringeren Stickoxidemissionen zu nutzen. Seit 2016 wurden diese Aktivitäten deutlich verstärkt, um insbesondere die Logistik und die Verwendung an die besonderen Bedingungen der K+S-Bergwerke anzupassen. Für die Anwendung der 2016 in der TRGS 900 festgelegten Arbeitsplatzgrenzwerte für Stickoxide gilt im Bergbau eine Übergangsfrist von 5 Jahren, welche die Dauer der Umset-

zung der umfangreichen technischen Maßnahmen berücksichtigen soll. In 2019 hatte die K+S Gruppe nach mehreren Einsätzen und deren Auswertung entschieden, Emulsionssprengstoffe in allen Bergwerken der Gruppe in Deutschland einzuführen. Dazu wurde eine Projektgruppe gebildet, welche die Umstellung u. a. mit Unterstützung externer Partner vorbereitet.

Aus diesem Anlass stellt dieser Beitrag die wesentlichen Grundlagen von Emulsionssprengstoffen und deren Anwendung in den K+S-Bergwerken vor. Im November 2019 berichtete die Branche Bergbau im Ausschuss für Gefahrstoffe (AGS) fristgemäß über den Fortschritt der Maßnahmen und die erreichten Ziele. Aufgrund von Verzögerungen bei der Entwicklung und Inbetriebnahme von neuen Maschinen und Fahrzeugen sowie wegen des hohen Zeitbedarfes für die vollständige Einführung von emissionsarmen Sprengstoffen wurde klar signalisiert, dass die aktuelle Übergangsfrist nicht ausreichen wird, daher wird die Branche eine Verlängerung beantragen.

Emulsion explosives for potash and rock salt mining Drill and blast is still a core process in underground mining operations around the world. In particular in underground potash and rock salt mining in Germany, blasting it is widely applied because of safety concerns deriving from special geologic conditions and economic reasons.

Due to the dry conditions underground, granular bulk explosives based on ammonium nitrate are very suitable in potash and rock salt mining. This was identified very early by MSW-Chemie GmbH, the most important manufacturer in Germany,

which has been supplying the mining industry with high-quality Ammonium Nitrate Fuel Oil (ANFO) explosives for many decades. By according research and development, especially the nitrogen oxide emissions of these explosives have been continuously reduced. However, the values achieved are not sufficient to meet the very high requirements resulting from the new occupational exposure limits for nitrogen oxides applicable in the mining industry from November 2021.

K+S has been using bulk emulsion explosives in trials since 2002 in order to gain experience and to take advantage of the considerably lower nitrogen

oxide emissions in the blast fumes. These activities have been significantly strengthened since 2016, in particular to adapt the logistics and the on-site mixing technology to the special conditions and requirements of the K+S mines. In 2019, the K+S Group decided to introduce emulsion explosives in all mines in Germany.

On this occasion, this article presents the current fundamentals of bulk emulsion explosives technology. The benefits regarding much lower toxic fumes are highlighted, and the major challenges of the transition towards the application of bulk emulsion explosives in the K+S mines are described.

Theoretische Grundlagen

ANC-Sprengstoffe

Zusammengesetzte Sprengstoffe auf Basis von Ammoniumnitrat (AN) als Sauerstoffträger und eines oder mehrerer Kohlenstoffträger (C) werden allgemein als ANC-Sprengstoffe bezeichnet. In der Regel werden ANC-Sprengstoffe aus der Mischung von porösen Ammoniumnitrat-Granulaten, sogenannten Prills, mit Diesel- oder Mineralöl hergestellt. Diese Gemische werden nach der englischen Bezeichnung „Ammonium Nitrate Fuel Oil“ abgekürzt als ANFO-Sprengstoffe benannt.

Seit den 1960er Jahren wird ANFO in Deutschland für die sprengtechnische Gewinnung im Kali- und Steinsalzbergbau eingesetzt. ANFO zeichnet sich vor allem durch seine Eigenschaft als handhabungssicherer Gesteinssprengstoff mit hohem Schwadenvolumen aus. Der Einsatz ist insbesondere durch die verhältnismäßig günstige und in großem Maßstab realisierbare Herstellung begründet. Auf Basis von geprilltem Ammoniumnitrat liegt

ein granularer Sprengstoff mit ausgezeichnete Rieselfähigkeit vor, der sich in großen Mengen pneumatisch transportieren und über Schachtfalleitungen sicher und effizient in Teufenbereiche von mehr als 700 m

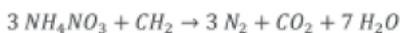
fördern lässt. Abbildung 1 zeigt exemplarisch eine Probe des Sprengstoffs ANDEX LD, das Granulat weist eine mittlere Korngröße von 1,5 mm auf und ist durch seine rote Farbgebung gekennzeichnet. Der untertägige



Abbildung 1: Exemplarische Darstellung einer Probe ANDEX LD

Transport kann sehr effektiv gestaltet werden, der Sprengstoff lässt sich mit einfacher und sicherer Technik pneumatisch laden. Die Verwendung im Kali- und Steinsalzbergbau stellt keine besonderen Anforderungen an die Wasserfestigkeit des Sprengstoffs, sodass ANFO die wirtschaftlichste Variante für die sprengtechnische Gewinnung darstellt.

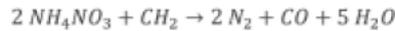
Allerdings ist die Umsetzung mit der Entstehung toxischer Sprengschwaden verbunden. Insbesondere Stickoxide (NO und NO₂) sowie Kohlenstoffmonoxid (CO) stellen kritische Schwadenbestandteile dar, die es zum Schutz von Mensch und Umwelt auf das erreichbare Minimum zu reduzieren gilt. Ebenso führen die toxischen Schwaden zu teilweise erheblichen Einschränkungen im Betriebsablauf unter Tage, da die erforderlichen Auswetterzeiten maßgeblich durch die Schwadenzusammensetzung des Sprengstoffs bestimmt werden. Chemisch gesehen ist die Entstehung der toxischen Reaktionsprodukte auf die unvollständige Umsetzung der Reaktionspartner zurückzuführen. Eine stöchiometrisch ausgewogene Reaktion weist eine ausgeglichene Sauerstoffbilanz auf und liefert die größte Energiefreisetzung:



Gleichung 1

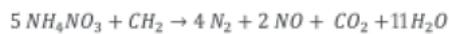
Nach Gleichung 1 entstehen bei der idealen Umsetzung keine toxischen Schwadenbestandteile, die Reaktionspartner setzen sich vollständig zu Stickstoff, Kohlenstoffdioxid und Wasser um. Sofern die Sauerstoffbilanz nicht ausgeglichen ist, findet eine unvollständige Umsetzung mit geringerer Energiefreisetzung statt. Bei Überschuss der Brennstoffphase liegt eine negative Sauerstoffbilanz vor und

es entsteht u. a. Kohlenstoffmonoxid (vgl. Gleichung 2):



Gleichung 2

Liegt dagegen ein Überschuss des Sauerstoffträgers vor, wird dieser nicht vollständig reduziert, sodass entsprechend der Reaktion in Gleichung 3 Stickoxide freigesetzt werden:



Gleichung 3

Die Umsetzung der Reaktionspartner wird maßgeblich durch die Mengengleichung bestimmt. Rechnerisch ist die Sauerstoffbilanz einer Mischung aus Ammoniumnitrat und Öl bei einem Massenanteil von 5,7 % Öl ausgeglichen [1]. In der Praxis wird in der Regel ein leichter Überschuss des Brennstoffs in die Mischung gegeben, sodass eine leicht negative Sauerstoffbilanz vorliegt [2]. Die Güte der Umsetzung von ANFO-Sprengstoffen wird nicht ausschließlich durch die Massenbilanz bestimmt, sondern vielmehr durch die Mikrostruktur der Prills und der Ölverteilung darin. Der Reaktionsmechanismus erfordert eine möglichst große Kontaktfläche zwischen den Reaktionspartnern, damit Brennstoff und Sauerstoffträger intensiv miteinander vermischt sind. Physikalisch wird dies innerhalb der Ammoniumnitrat-Prills durch das Porennetzwerk und die Dimension der Festkörperstruktur bestimmt. Durch kontinuierliche Weiterentwicklungsmaßnahmen ist es MSW-Chemie in den letzten Jahrzehnten gelungen, die Freisetzung toxischer Schwadenbestandteile des Produktes ANDEX sukzessive zu verringern [3]. Es hat sich aber auch gezeigt, dass mit dem aktuellen Produkt ANDEX LD nahezu alle technischen Möglichkeiten ausgereizt sind und nur durch den

Einsatz von Emulsionssprengstoffen eine im Vergleich noch stärkere Reduktion der toxischen Sprengschwaden erreicht werden kann [3]. Die signifikante Reduktion ist maßgeblich auf die intensive Durchmischung der Reaktionspartner innerhalb der Emulsion zurückzuführen. Dieser feindisperse Zustand kann nur in Fluiden, nicht jedoch innerhalb von Festkörpern erreicht werden.

Aufbau, Struktur und Zusammensetzung der Emulsionsmatrix

Emulsionen sind disperse Systeme aus mindestens zwei nicht miteinander mischbaren Flüssigkeiten, dabei liegt die disperse Phase in Form von fein verteilten Tröpfchen innerhalb einer kontinuierlichen Phase vor. Die Beschreibung der Struktur geht auf die Begriffe Wasser und Öl zurück. Der Begriff Wasser kennzeichnet dabei hydrophile Fluide. Flüssigkeiten mit primär lipophilen Wechselwirkungen werden als Öl bezeichnet. Je nachdem welches Medium die disperse Phase darstellt, werden einfache Emulsionstypen aus zwei Flüssigkeiten als Öl-in-Wasser-(O/W) oder Wasser-in-Öl-Emulsion (W/O) beschrieben [4]. Beispiele für die unterschiedlichen Emulsionstypen aus dem Alltag sind z. B. Milch oder Sahne (O/W), bzw. Margarine oder Mayonnaise (W/O).

Für die Herstellung einer Emulsion aus den beiden Phasen ist der Eintrag mechanischer Energie zum Dispergieren der inneren Phase erforderlich. Durch die intensive Durchmischung erhält man eine sogenannte Kurzzeit-Emulsion, ohne den Zusatz von Emulgatoren führt eine schnelle Tropfenkoaleszenz umgehend zum Brechen der Emulsion und es kommt zum Aufrahmen der spezifisch leichteren Phase.

Setzt man zur Herstellung der Emulsion einen geeigneten Emulgator ein, so kann die Stabilität der Emulsion erheblich verlängert werden. Thermodynamisch strebt jedes System den Zustand der niedrigsten Energie an, sodass die Emulsion bestrebt ist, die freie Grenzflächenenergie durch Koaleszenz der dispersen Phase zu minimieren. Dieser Prozess kann durch grenzflächenaktive Moleküle (Emulgatoren) verlangsamt werden. Emulgatoren sind in der kontinuierlichen Phase löslich und führen zu einer maßgeblichen Reduktion der Oberflächenspannung. Es handelt sich um amphiphile Molekularstrukturen, die sowohl hydrophile als auch lipophile Bausteine enthalten und sich dadurch unter geeigneten Voraussetzungen an der Phasengrenzfläche anordnen können, sodass die Emulsion gegenüber der Koaleszenz stabilisiert wird [4]. Neben dem Volumenverhältnis der beiden Phasen und der Herstellungsweise entscheidet vor allem der Emulgator über die Stabilität und den Typ der resultierenden Emulsion. Generell stellt das Fluid, in dem der Emulgator besser löslich ist, die kontinuierliche Phase der Emulsion dar (Bancroft-Regel) [4]. Ebenso ist die strukturelle Konfiguration des Emulgators eine wesentliche Randbedingung, diese kann auch durch den pH-Wert, die Ionenstärke und molekulare Wechselwirkungen bestimmt werden.

Ein wesentliches Merkmal von Emulsionen ist der feindisperse Zustand der inneren Phase. Durch eine geeignete chemische Zusammensetzung und Herstellungsweise können Tropfengrößen unterhalb von $10\ \mu\text{m}$ erreicht werden. Die erreichbare Tropfengröße wird bei konstantem Volumenverhältnis der beiden Pha-

sen sowohl durch den Emulgator als auch durch die Beanspruchungsintensität beim Dispergieren bestimmt.

$$x_T \propto \frac{\sigma}{\tau} \propto \frac{\sigma}{\dot{\gamma} \cdot \eta}$$

Gleichung 4

Entsprechend der in Gleichung 4 dargestellten Proportionalität ist die erreichbare Tropfengröße x_T eine Funktion der Oberflächenspannung σ und der wirkenden Schubspannung τ bei der mechanischen Dispergierung. Letztere wird im Wesentlichen durch die Scherrate des Mixers $\dot{\gamma}$ und die Viskosität η des Fluides bestimmt. Es zeigt sich, dass für die Herstellung einer möglichst feindispersen Emulsion sowohl die Wahl eines geeigneten Emulgators zur Verringerung der Oberflächenspannung als auch der Einsatz eines Dispergiersystems mit hoher Scherrate von großer Bedeutung sind.

Abbildung 2 veranschaulicht, dass mit abnehmender Tropfengröße der dispersen Phase das Verhältnis von Oberfläche zu Volumen eines Tropfens erheblich vergrößert wird. Daraus

resultiert eine deutliche Zunahme der Phasengrenzfläche, diesen Effekt nutzt man u. a. beim Emulsions Sprengstoff aus. Die Emulsionsmatrix ist eine W/O-Emulsion, wobei der Brennstoff in Form von Mineralöl die kontinuierliche Phase und eine übersättigte Lösung oxidierender Salze die disperse Phase darstellt. Die Kontaktfläche der Reaktionspartner ist im Vergleich zu konventionellen ANC-Sprengstoffen durch die feindisperse Struktur mit Tropfengrößen in der Größenordnung von $10\ \mu\text{m}$ wesentlich vergrößert, und die reaktive Umsetzung der Sauerstoffträger wird durch den gelösten Zustand der Salze zusätzlich gefördert [5]. Diese strukturelle Eigenschaft begünstigt die stöchiometrisch ausgewogene Reaktion des zusammengesetzten Sprengstoffs, sodass die Energieausnutzung der Umsetzung steigt und weniger toxische Reaktionsprodukte entstehen [1].

Nachteilig für den Energiegehalt des Explosivstoffs ist die Verwendung von Wasser als Lösungsmittel für die Sauerstoffträger. Zur Reduktion der

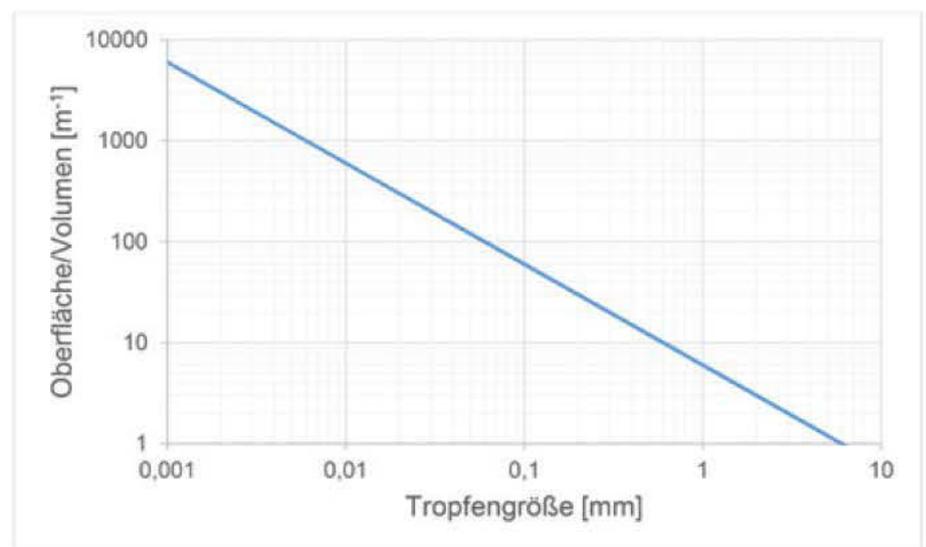


Abbildung 2: Oberfläche-zu-Volumen-Verhältnis kugelförmiger Tropfen in Abhängigkeit der Tropfengröße

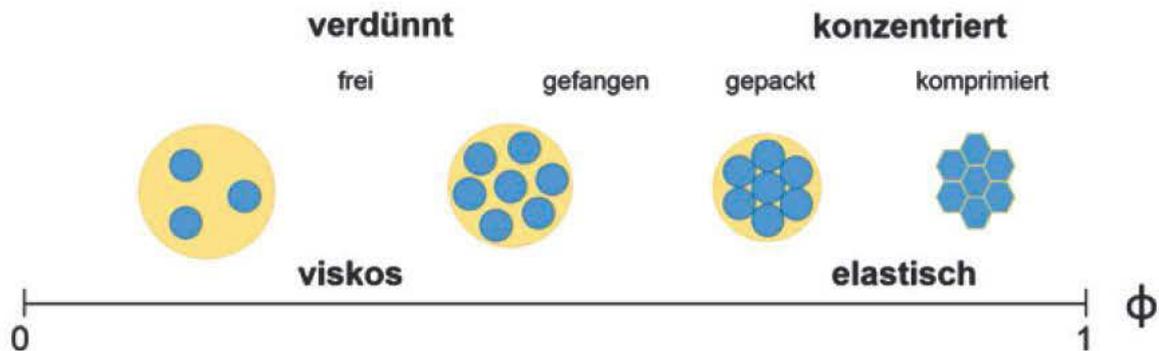


Abbildung 3: Schematische Darstellung der Tropfenanordnung und der Grenzflächenmorphologie einer monodispersen Emulsion in Abhängigkeit des Volumenanteils der dispersen Phase nach [7]

Menge dieser inerten Komponente nutzt man die starke Temperaturabhängigkeit der Löslichkeit sauerstoffliefernder Salze aus, die mit zunehmender Temperatur deutlich steigt. Je nach Zusammensetzung wird die Wasserphase bei der Herstellung auf 70 bis 100 °C erwärmt. In der Regel wird Ammoniumnitrat als primärer Sauerstoffträger eingesetzt, zur Verringerung der Kristallisationstemperatur der Nitratlösung und zur Anpassung der Sauerstoffbilanz können darüber hinaus weitere Salze, wie Natriumnitrat, Calciumnitrat oder Natriumperchlorat, hinzugegeben werden [5, 6]. Der typische Wassergehalt in der fertigen Emulsion liegt bei etwa 10 bis 20 %.

Ebenso kommt der Brennstoffphase eine wesentliche Bedeutung zu, diese setzt sich bei pumpfähigen Emulsionen in der Regel aus Mineralöl und Emulgator zusammen. Für den Ausgleich der Sauerstoffbilanz sind, je nach Rezeptur, 4 bis 8 % Brennstoff erforderlich. Für die Emulgierung wird die Brennstoffphase ebenfalls erwärmt. Darüber hinaus können zur Einstellung der Konsistenz der Emulsionsmatrix neben Mineralöl auch Wachse aufgeschmolzen werden. Bedingt durch die Volumenanteile der Wasser- und Ölphase in der W/O-Emulsion resultiert

eine hochgefüllte Emulsion, die in Abhängigkeit der Tropfengrößenverteilung und der inhaltlichen Zusammensetzung eine polyederförmige Struktur annehmen kann.

Abbildung 3 stellt eine schematische Darstellung der Tropfenstrukturen und der Grenzflächenzustände für eine monodisperse und gegenüber Aggregation stabilisierten Emulsion als Funktion des Volumenanteils der dispersen Phase dar. Im verdünnten Bereich weisen die Tröpfchen eine kugelförmige Struktur auf. Bis zu einem Volumenanteil von 0,3 ist die gegenseitige Beeinflussung der Tröpfchen untergeordnet, die physikalischen Eigenschaften der Emulsion werden durch den Charakter der kontinuierlichen Phase bestimmt [4]. Mit zunehmendem Volumenanteil steigt die Viskosität aufgrund der gegenseitigen Wechselwirkungen zwischen den Tröpfchen an. Die Überschreitung des Volumenanteils von 0,5 führt zur Anordnung der Tröpfchen in Form einer kubischen Kugelpackung, sodass diese in Kontakt treten. Die Einschränkung der Mobilität ist mit einem signifikanten Anstieg der Emulsionsviskosität verbunden und kann mit einem „gefangenen“ Zustand verglichen werden [7].

Bei einer weiteren Erhöhung des Volumenanteils stellt sich das konzentrierte Regime ein. Die maximale Raumerfüllung monodisperser Tröpfchen wird in der dichtesten Kugelpackung bei einem Volumenanteil von 0,74 erreicht. Eine weitere Anhebung des Volumenanteils der dispersen Phase kann nur durch einen polydispersen Zustand oder die zwangsläufige Kompression und Deformation der Tropfen kompensiert werden, sodass eine polyederförmige Struktur entsteht [7]. Emulsionszubereitungen für lose, also unverpackte Anwendungen können Volumenanteile an übersättigter Nitratlösung von bis zu 0,92 enthalten [6]. Die Tropfen sind in diesem Zustand von einem dünnen, lamellaren Film aus Stabilisator und Brennstoff umgeben. In diesem Bereich weist die konzentrierte Emulsion viskoelastische Fließeigenschaften auf. Der hohe elastische Anteil resultiert maßgeblich aus der Arbeit gegen die Grenzflächenspannung, wenn die Oberfläche der bereits komprimierten Tropfen durch Scherung vergrößert werden soll [7]. Im Allgemeinen kann die Rheologie von Emulsionen durch die Veränderung der Zusammensetzung und der Herstellungsweise beeinflusst werden.

Eine Veränderung der Tropfengrößenverteilung ist immer mit Einflüssen auf die Struktur der Packung verbunden. Weitere Einflussparameter auf das rheologische Verhalten der Emulsionsmatrix sind darüber hinaus die Viskosität der kontinuierlichen Phase und mögliche attraktive Wechselwirkungen zwischen den Tropfen. Die stark pastöse Konsistenz der Emulsionsmatrix wird durch Abbildung 4 veranschaulicht, im ruhenden Zustand weist diese eine deutliche Fließgrenze auf. Darüber hinaus verleiht die Lichtstreuung an den Tröpfchen der Emulsionsmatrix ein trübes Erscheinungsbild. Für die Anwendung im Kali- und Steinsalzbau sollte ggf. die Einfärbung der Matrix zur Verbesserung der optischen Erkennung unter Tage in Erwägung gezogen werden.

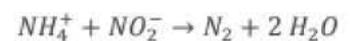
Aufgrund des hohen Volumenanteils der Wasserphase und der großen Menge an gelösten Salzen

werden besondere Anforderungen an den Emulgator gestellt. Die Qualität des Emulgators bestimmt insbesondere die Stabilität, die Lagerfähigkeit und die Tropfengröße der Emulsionsmatrix. Zum Einsatz kommen hier spezielle Moleküle und definierte Mischungen dieser. Neben der emulgierenden Wirkung verhindern die Moleküle auch das Auskristallisieren der übersättigten Salzlösung bei Temperaturen unterhalb des eigentlichen Kristallisationspunktes. Mit zunehmender Alterung verschlechtert sich die Qualität der Emulsionsmatrix durch Kristallwachstum. Stabilisator-moleküle können auch Einfluss auf die Form von Kristallen nehmen und so den Alterungsprozess durch die Begrenzung des Wachstums unterdrücken [8].

Sensibilisierung der Emulsionsmatrix

Im Ausgangszustand ist die Emulsionsmatrix nicht detonationsfähig,

die explosiven Eigenschaften werden erst durch die Erzeugung einer feindispersen Gasblasenstruktur in der Ladesäule hervorgerufen. Während des Ladevorgangs wird die Bildung von fein verteilten Gasblasen durch den definierten Zusatz chemischer Reaktive eingeleitet, sodass die Dichte der Emulsionsmatrix gezielt verringert wird. Dieser Prozess wird als Sensibilisierung bezeichnet, er basiert auf einer chemischen Reaktion von Natriumnitrit mit Ammoniumnitrat zu Stickstoff und Wasser (vgl. Gleichung 5).



Gleichung 5

Die Strukturgebung bestimmt maßgeblich die detonativen Eigenschaften des Emulsions Sprengstoffs [9, 10]. Der Detonationsvorgang wird durch die eingeschlossenen Gasblasen verstärkt, diese fungieren bei der Initiierung als sogenannte hot spots und tragen zur Detonationsfortpflanzung bei. Die Stoßwelle der Initialladung führt zur adiabaten Kompression der Gasblasen, sodass die damit verbundene Wärmeentwicklung maßgeblich zur Aktivierung der chemischen Umsetzung des Sprengstoffs beiträgt. Darüber hinaus werden die komprimierten Gasblasen stärker als die umgebende Matrix in Detonationsrichtung beschleunigt, sodass sich diese schneller als die Stoßwellenfront bewegen. Im Niederdruckbereich vor der Stoßfront tritt die schlagartige Expansion der Gasblasen ein, dadurch wird ein hohes Maß an Energie freigesetzt. Durch das Vorhandensein vieler Blasen mit synchronem Verhalten entwickelt sich ein ausgeprägtes Druckprofil, das die Fortpflanzung der Reaktion unterstützt [11].

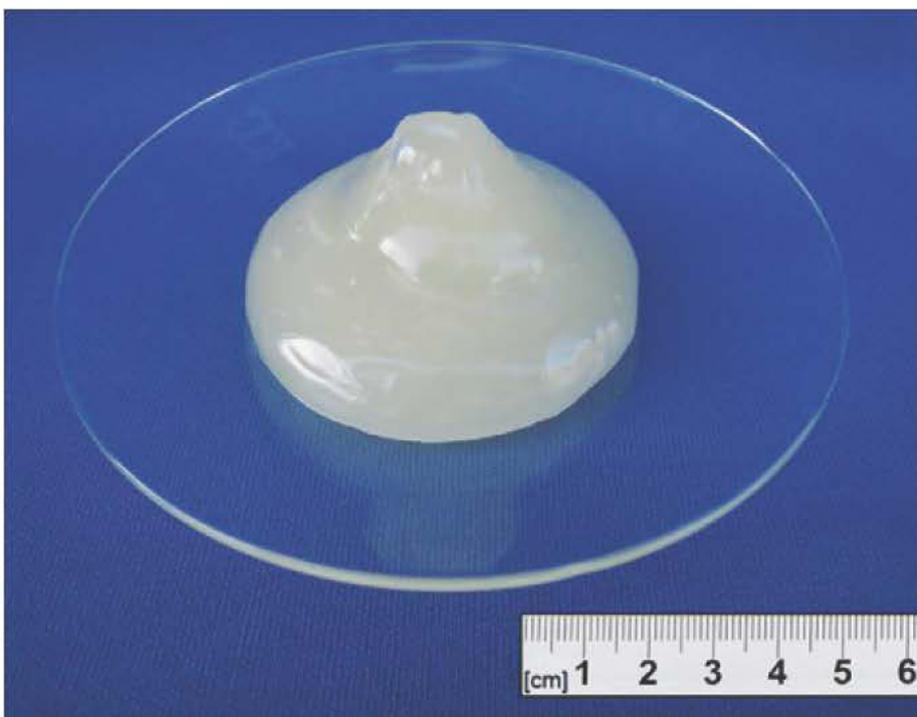


Abbildung 4: Exemplarische Darstellung einer Probe Emulsionsmatrix

Der beschriebene Prozess zur chemischen Sensibilisierung von lose verwendeten Emulsionssprengstoffen wird an der Verwendungsstelle mit sogenannten Mischladegeräten durchgeführt. Das Reaktiv wird in der Regel als Gleitfilm im Ladeschlauch eingesetzt, sodass die Wandreibung der Emulsionsmatrix und somit der Druckverlust verringert werden. Über einen statischen Mischer am Schlauchende werden beide Komponenten unmittelbar vor dem Austreten in das Bohrloch vermischt, sodass die Sensibilisierung direkt beim Ladevorgang erfolgt. Die Geschwindigkeit der chemischen Gasbildung wird stark von der Temperatur beeinflusst, sodass insbesondere bei niedrigeren Temperaturen der Einsatz von Katalysatoren erforderlich ist. Zur Beschleunigung der in Gleichung 5 beschriebenen Reaktion wird der pH-Wert der Emulsionsmatrix durch die Zugabe einer Säure reduziert. Dies kann z. B. auch mit einem zweiten Reaktiv im Mischladegerät erfolgen. Darüber hinaus beinhalten viele Reaktive z. B. Harnstoff oder Thiocyanat als weiteren Katalysator. Während die unvollständige Umsetzung des Natriumnitrits bei der Sensibilisierung zur unerwünschten Bildung von Stickoxiden führen kann, sorgt der Katalysator für eine verbesserte Umsetzung des Reaktivs. Es wurde nachgewiesen, dass in Kombination mit Zitronensäure als pH-Regulator praktisch keine Stickoxide bei der chemischen Gasbildung entstehen [12].

Durch die variable Dosierung der Additive für die Gasblasenbildung lässt sich die Dichte des Sprengstoffs im Bohrloch gezielt einstellen. Die hochviskose Konsistenz der Matrix konserviert die Gasbläschen in der Ladesäule, sodass diese über einen

ausreichend langen Zeitraum detonationsfähig bleibt. In der Regel können durch die Einstellung Ladedichten im Bereich von 1.200 bis 800 kg/m³ erreicht werden. Diese Flexibilisierung beim Ladevorgang des Emulsionssprengstoffs ermöglicht eine zusätzliche Anpassung des Energiegehalts an die jeweils durchzuführende Sprengarbeit bzw. an die Sektionen, in denen unterschiedliche Energiedosierungen erforderlich sind.

Eine weitere technologische Besonderheit beim Einsatz der Mischladetechnologie stellt die Möglichkeit des sogenannten string loadings dar. Hierbei wird der Ladevorgang mit einer automatischen Schlauchrückzugseinrichtung durchgeführt, sodass durch die Abstimmung der Rückzugsgeschwindigkeit mit der Fördermenge an Emulsionsmatrix ein definierter Füllgrad in das Bohrloch geladen werden kann [13]. Dieses Verfahren ist insbesondere zum Erreichen niedriger Ladedichten und für partiell gefüllte Bohrlöcher im Konturbereich geeignet, sodass auf zusätzliche Sprengmittel, wie z. B. Sprengschnur, oder andere aufwändig herzustellende gestreckte Ladungen verzichtet werden kann.

Weitere Vorteile in der Anwendung ergeben sich aus der strukturabhängigen Detonationsfähigkeit. Hier ist insbesondere die vereinfachte Transportlogistik der nicht sensibilisierten Emulsionsmatrix zu nennen. Ebenso stellt Emulsionssprengstoff einen handhabungssicheren Sprengstoff mit vergleichsweise niedriger mechanischer und thermischer Empfindlichkeit dar, sodass eventuell im Haufwerk zurückgebliebene Sprengstoffreste beim Wegladen kein größeres Gefahrenpotential als der momentan eingesetzte Sprengstoff ANDEX LD darstellen.

Evaluation des Potentials zur Reduktion toxischer Sprengschwaden durch den Einsatz von Emulsionssprengstoffen

In der theoretischen Betrachtung wurde bereits angemerkt, dass bei der detonativen Umsetzung von Emulsionssprengstoffen gegenüber granularen ANC-Sprengstoffen deutlich geringere toxische Sprengschwaden zu erwarten sind. Unterschiedliche Studien über definierte Schwadenmessungen und den Einsatz in Grubenbetrieben bestätigen diese These.

Kluge berichtet über die signifikante Reduktion toxischer Sprengschwaden durch den Einsatz patronierter Emulsionssprengstoffe gegenüber gelatinösem Sprengstoff im untertägigen Kohlebergbau [14]. Ebenso konnte Zawadzka-Małota bei Messungen unterschiedlicher Sprengstoffe in einer Schwadenkammer zeigen, dass patronierte Emulsionssprengstoffe im Vergleich zu gelatinösen Sprengstoffen die niedrigsten spezifischen Schwadenvolumina an NO_x freisetzen [15].

Harris et al. führten eine vergleichende Studie zur Messung der toxischen Schwadenbestandteile unterschiedlicher Sprengstoffe unter definierten Randbedingungen in einer Schwadenkammer durch. Die Gegenüberstellung der Messwerte aus den Schwaden einer lose verwendeten Emulsion und ANFO zeigt deutlich geringere spezifische Schwadenvolumina der toxischen Bestandteile in den Schwaden der Emulsion. Die Reduktion von CO lag bei 33 % und für NO_x wurde eine Reduktion von 71 % gemessen [16].

Sapko et al. haben die spezifischen NO_x-Schwadenvolumina von ANFO und lose verwendetem Emulsionssprengstoff bei unterschiedlichen Einschlussbedingungen gemessen.

Unabhängig vom Einschluss wurde deutlich, dass die spezifischen Schwadenvolumina des Emulsionssprengstoffes deutlich niedriger liegen, im Mittel wurde für NO_x eine Reduktion von ca. 83 % und für CO ca. 25 % gegenüber ANFO nachgewiesen [2].

Darüber hinaus haben Nyberg et al. gezeigt, dass auf Zusatzstoffe, wie beispielsweise Aluminium oder geprilltes Ammoniumnitrat, zur Minimierung der toxischen Schwaden von Emulsionssprengstoffen verzichtet werden sollte [17].

Eine bereits 2002 durchgeführte Studie zum Einsatz von Emulsionssprengstoff im Grubenbetrieb des Kaliwerkes Neuhof-Ellers hat das Potential in der Reduktion toxischer Sprengschwaden im Einsatz unter Tage erkennen lassen [18]. Gegenüber dem damaligen Standard ANDEX 2000 wurde mit unterschiedlichen Emulsionen im Mittel eine signifikante Reduktion erreicht. Für

NO und NO_2 wurden Reduktionen von bis zu 60 % bzw. 80 % erreicht, und die Anteile an CO wurden um bis zu 70 % reduziert. Unter anderem wurde die Versuchsreihe später aufgrund nicht ausgereifter technologischer Merkmale der Mischladetechnologie und der Dichterreduktion eingestellt [18].

Es ist anzumerken, dass die Messwerte der unterschiedlichen Studien immer an die vorgegebenen Versuchsbedingungen gebunden sind und stark von der Qualität der eingesetzten Sprengstoffe abhängen. Dennoch bestätigen alle Studien das signifikante Potential der Reduktion toxischer Sprengschwaden durch den Einsatz von Emulsionssprengstoff. Auf Basis dieser Grundlage wurden weiterführende Messungen mit dem neusten Stand der Technik durchgeführt.

Dabei kam durchweg die Mischladetechnologie zum Einsatz, deren grundsätzliches Prinzip beispielhaft in Abbildung 5 dargestellt ist.

Einsätze mit Emulsionssprengstoff in den K+S Grubenbetrieben

Bestimmung der spezifischen Schwadenvolumina von Sprengstoffen unter Tage

In 2017 wurde der Versuchsaufbau im Grubenbetrieb Neuhof-Ellers so gewählt, dass in derselben Abbaustrecke an aufeinanderfolgenden Tagen jeweils ganze Abschlüsse gesprengt und die entstehenden Emissionen gemessen wurden. Dabei kam hochwertige stationäre Messtechnik zum Einsatz, zur Kontrolle wurden auch mobile Messgeräte eingesetzt.

Zunächst wurden einige Messungen mit ANDEX LD durchgeführt, danach mit Emulsionssprengstoffen und abschließend erneut mit ANDEX LD. Dieses Vorgehen gewährleistet, dass mögliche Fehlereinflüsse im komplexen Gewinnungsbetrieb unter Tage rechtzeitig erkannt, vermieden oder zumindest deutlich reduziert werden können.

Der Vortrieb hatte eine Breite von ca. 14 m bei einer Abbauhöhe von ca. 2,5 m und einer Abschlaglänge von etwa 6,8 m. Das Sprengschema, also die Anordnung der Sprengbohrlöcher und die Zündreihenfolge, wurde unverändert vom Schema für ANDEX LD übernommen, da nicht die sprengtechnische Optimierung, sondern der Nachweis der Reduzierung der Stickoxidemissionen im Vordergrund stand.

Der Emulsionssprengstoff wurde unter Verwendung einer Schlauchrückzugsvorrichtung geladen, um die Enddichte in etwa auf die Ladedichte von ANDEX LD einstellen zu können. Die Sprengergebnisse waren durchweg einwandfrei, die Stückigkeit des Haufwerks zeigte, dass die Zertrümmerungswirkung, resultierend in der Fragmentierung, höher war als mit ANDEX LD.

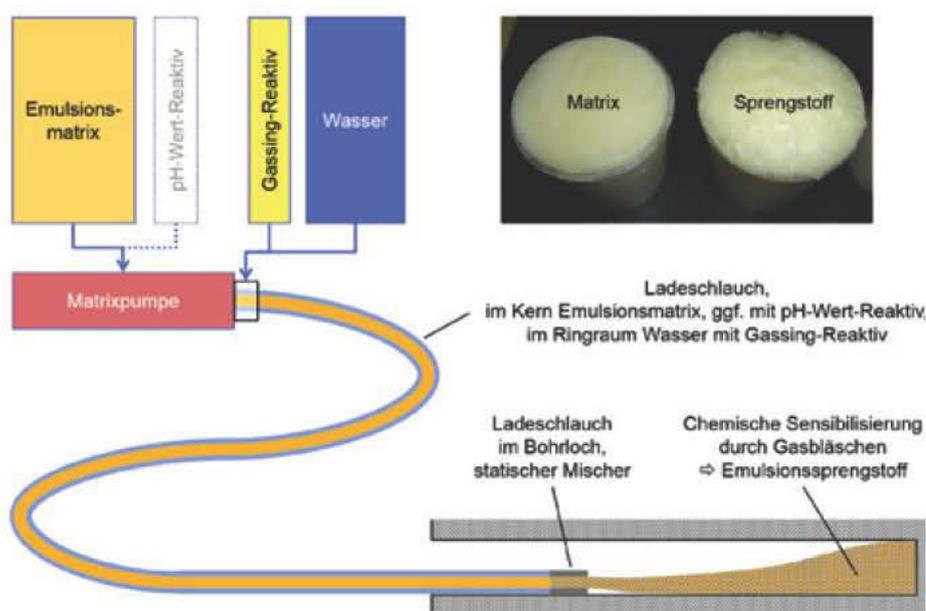


Abbildung 5: Schematische Darstellung des Prinzips der Mischladetechnologie für Emulsionssprengstoffe in Anlehnung an [19]

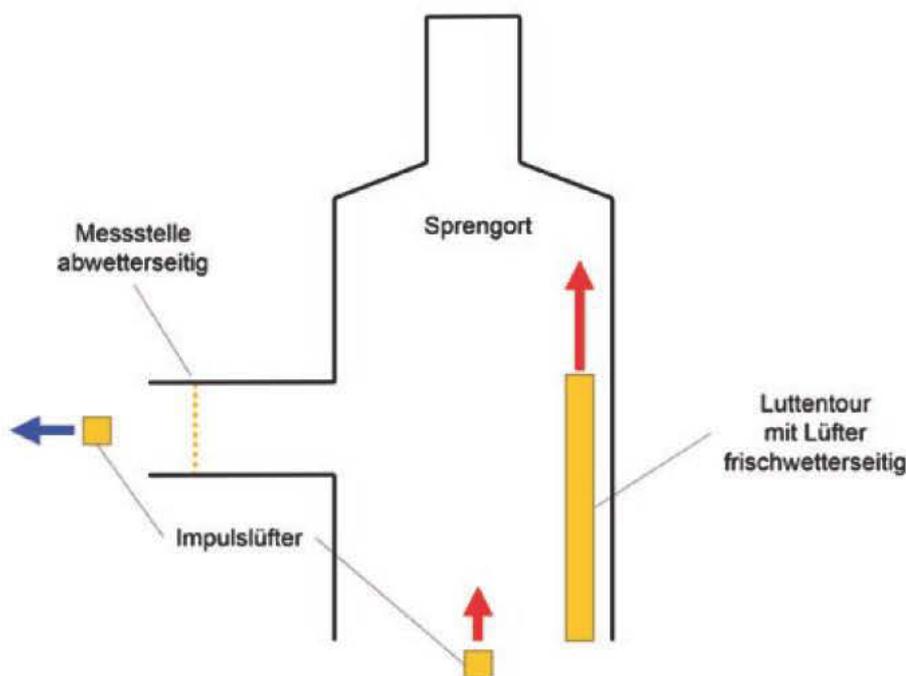


Abbildung 6: Schema der Schwadenmessungen (Draufsicht)

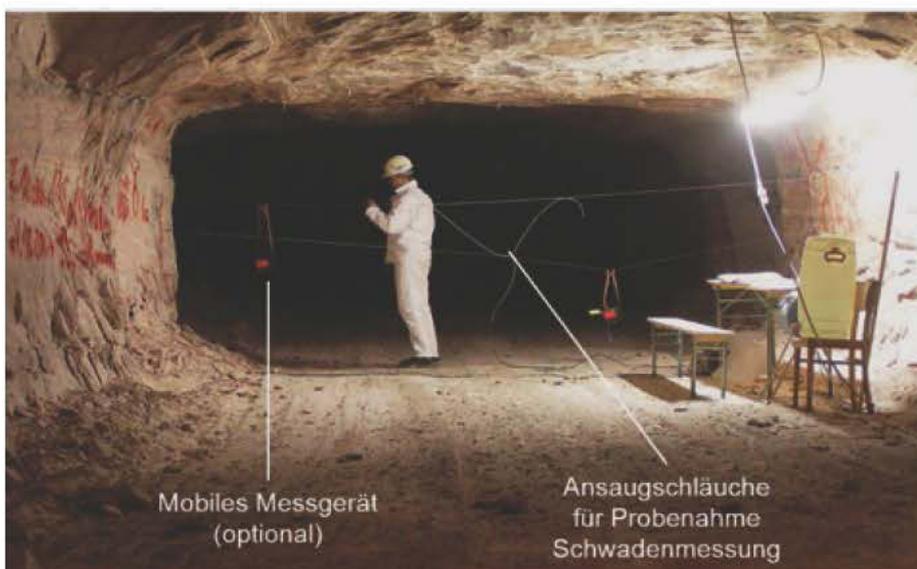


Abbildung 7: Probenahme für Gasmessungen im Querort, abwetterseitig

Die Sprengschwaden wurden kontrolliert und vollständig über die Messstelle in einem Querort geführt, die Messtechnik selbst war in der benachbarten Abbaustrecke aufgebaut. In Abbildung 6 ist das Schema

der Schwadenmessungen in der Draufsicht dargestellt, in Abbildung 7 ist die Probenahme für die Gasmessungen im Querort zu sehen.

Die gemessenen spezifischen Schwadenvolumina von ANDEX LD und dem

eingesetzten Emulsionssprengstoff sind in Tabelle 1 aufgeführt.

In diesem Einsatz konnte eindrucksvoll gezeigt werden, dass die erforderlichen deutlichen Reduktionen der toxischen Schwadenbestandteile mit Emulsionssprengstoffen gegenüber ANDEX LD erreichbar sind. Die Reduktion der Auswetterzeiten an der Messstelle unter Annahme der zukünftig anzuwendenden Arbeitsplatzgrenzwerte betrug etwa 50 %.

Ermittlung der Emissions- und Expositionsreduzierung durch Einsatz von Emulsionssprengstoffen in einem Gewinnungsrevier

In 2018 wurde ein weiterer Einsatz mit Emulsionssprengstoffen im Grubenbetrieb Hattorf-Wintershall des Werkes Werra durchgeführt. Hier war im Zusammenhang mit anderen technischen Maßnahmen aus dem K+S-Projekt Arbeitsplatzgrenzwerte (AGW) die Frage zu beantworten, ob die zuvor im Einzelstreckenvortrieb nachgewiesenen Reduzierungen der Emissionen auch im Regelbetrieb eines ganzen Reviers mit drei Gewinnungsschichten täglich realisierbar und nutzbar sind. Weiterhin war zu ermitteln, in welchem Maße die Exposition der Beschäftigten gegenüber Stickoxiden und anderen Gefahrstoffen durch den Einsatz von Emulsionssprengstoffen reduziert werden kann.

In Abbildung 8 ist ein Ausschnitt des Risswerkes dargestellt, das Versuchsrevier liefert mit ca. 6.000 t Rohsalz täglich etwa 10 % der Produktion des Grubenbetriebes Hattorf-Wintershall.

Es wurden umfangreiche Vorbereitungen getroffen, da die gesamte Sprengarbeit für fast vier Wochen vollständig von ANFO- auf Emulsionssprengstoffe umgestellt wurde. Vorab wurden in zwei bergbehördlich anerkannten eintägigen Lehrgängen

	ANDEX LD (n=3)	Emulsionssprengstoff (n=8)	Reduktion
NO _x	1,96 ± 1,05	0,33 ± 0,05	83 %
CO	12,35 ± 4,15	5,17 ± 0,51	58 %

Tabelle 1: Mittelwerte der spezifischen Schwadenvolumina mit 95% Konfidenzintervall und prozentuale Reduktion toxischer Sprengschwaden aus Messungen im Grubenbetrieb Neuhof-Ellers 2017 (n: Anzahl der Messungen)

insgesamt 15 freiwillige Sprengberechtigte qualifiziert, um die Ladearbeiten zum Herstellen von Emulsionssprengstoffen durchführen zu können. Mit zeitweise zwei Mischladegeräten wurden in Summe mehr als 60 t Emulsionssprengstoff verwendet. Die Sprengschemata wurden wiederum gegenüber ANDEX LD nicht verändert. Neben den Erfahrungen aus dem eigentlichen Einsatz in der Gewinnung mit den engagierten Sprengberechtigten wurden insbesondere wertvolle Erfahrungen zum Umschlag, der Logistik und der Lagerung der benötigten Rohstoffe und Materialien gesammelt.

Im Unterschied zum vorhergehenden Einsatz wurden Verstärkungsladungen zur besseren Initiierung der Ladesäulen eingesetzt, da es teilweise zur nicht vollständigen Umsetzung des Emulsionssprengstoffes kam. Als Gründe kommen hierbei insbesondere die An- und Abfahrvorgänge beim Ladevorgang in Betracht, da der Ladeschlauch systembedingt mit Wasser freigespült werden muss, wenn die Ladearbeiten für mehr als 15 Minuten unterbrochen werden oder abgeschlossen sind.

Die mechanischen Schlauchtreiber wurden bei diesem Einsatz nicht

verwendet, da sie noch nicht auf den Einsatz im Kali- und Steinsalzbergbau zugeschnitten waren und den Sprengberechtigten nicht wirklich hilfreich waren. Insofern waren die Ladedichten des Emulsionssprengstoffes bei gleichem Bohrlochdurchmesser höher als mit ANDEX LD.

Bereits im Rahmen der jeweils mehrwöchigen vorlaufenden Null-Messungen, der Umsetzung von wettertechnischen Optimierungen und dem Einsatz der besten seinerzeit verfügbaren Motorentechnik wurden Expositionsmessungen an den verschiedenen Arbeitsplätzen im Revier durchgeführt. Diese Messungen wurden auch in der Kombination mit dem Einsatz der vorgenannten Maßnahmen und Emulsionssprengstoff durchgeführt.

Im Ergebnis konnte mit der Auswertung der zahlreichen Messwerte und Messreihen, welche das Institut für Gefahrstoffforschung (IGF) vorgenommen hatte, gezeigt werden, dass unter den Bedingungen dieses Versuchsreviers die sichere Einhaltung der zukünftig anzuwendenden Arbeitsplatzgrenzwerte für Stickoxide nur in der Kombination aller technischen Maßnahmen möglich ist, also mit dem Einsatz von Emulsionssprengstoffen.

Dies gilt insbesondere für die Arbeitsplätze auf den mobilen Maschinen im Gewinnungsbereich, wie Fahrlader (auch Elektro-Fahrlader), Beraubemaschinen und andere.

Aus den im Abwetterbereich des Versuchsreviers ermittelten Messergebnissen kann abgeleitet werden, dass unter den Bedingungen im Versuchsrevier der Beitrag der Emissionsminderung von Stickoxiden im Vergleich zum Referenzzustand durch die beste verfügbare Motorentechnik etwa 40 % beträgt und der Beitrag aus dem Einsatz von Emulsionssprengstoffen noch einmal etwa 30 %. Die Auswetterzeiten waren stark verkürzt und die Expositionen der Beschäftigten während des Schichtverlaufes deutlich spürbar reduziert. Dies belegt eindrucksvoll, dass hier nur die Kombination der oben genannten Maßnahmen zur Zielerreichung führen kann.

[Erfordernis von zusätzlichen wettertechnischen Maßnahmen beim Einsatz von Emulsionssprengstoffen](#)

Anfang 2020 war unter den Bedingungen in einem kleineren Versuchsrevier im Werk Zielitz zu ermitteln, ob bereits durch den Einsatz der besten dort verfügbaren Motorentechnik in Kombination mit Emulsionsspreng-



Abbildung 8: Ausschnitt des Risswerkes, Revier 28, Versuchsrevier im Grubenbetrieb Hattorf-Wintershall, Werk Werra

stoffen die zukünftig anzuwendenden Arbeitsplatzgrenzwerte für Stickoxide eingehalten werden können oder zusätzliche wettertechnische Maßnahmen erforderlich sind.

Vorläufig wurden Ende 2019 entsprechende Null-Messungen beim Einsatz von ANDEX LD mit verschiedenen Emissionsklassen der mobilen Maschinen und Fahrzeuge durchgeführt. Auch hier wurden die Sprengschemata beim Einsatz der Emulsionssprengstoffe mit Anwendung der Mischladetechnologie unverändert gelassen.

Die stationären und personenbezogenen Messungen wurden wiederum mit Unterstützung des IGF gewonnen und werden derzeit ausgewertet. Der erwartete deutliche Beitrag der Emulsionssprengstoffe zur Emissionsminderung konnte auch hier gezeigt

werden, allerdings bestätigte sich erneut deutlich, dass die derzeit am Markt verfügbare Technologie noch an die Anforderungen der K+S-Bergwerke angepasst werden muss. Die Aus- und Bewertung der Messreihen ist noch abzuschließen.

Besondere Anforderungen für den Einsatz im Kali- und Steinsalzbergbau

Die Einführung von Emulsionssprengstoffen unter Tage ist bei K+S und sicherlich auch in anderen Bergwerken mit dem Erfordernis einer grundlegenden Umstellung der Sprengmittellogistik verbunden. Daher müssen, in Abhängigkeit von standortspezifischen Anforderungen, passende Konzepte für den effizienten und sicheren Transport ausgearbeitet werden. Definiert man als erste Schnitt-

stelle für den Einsatz im Grubenbetrieb die Anlieferung über Tage, so sind geeignete Konzepte für den Umschlag, die Zwischenlagerung und den Schachttransport zu entwickeln. Die Möglichkeit der vertikalen Förderung der Emulsionsmatrix über eine Schachtleitung ist ebenso zu prüfen wie der Transport in maßgeschneiderten Logistikeinheiten. Letztendlich muss für spezifische Varianten ggf. auch eine gezielte Anpassung der Produktformulierung an die Logistikkette berücksichtigt werden. Dies erfordert insbesondere eine umfassende Betrachtung im Hinblick auf die Sicherheit und die Produktqualität. Der Transport, die Lagerung und Umschlagvorgänge bis zur Befüllung der Mischladeeinheiten müssen so ausgelegt werden, dass Restmengen in Transportbehältern minimiert werden und bedarfsweise Reinigungsprozesse durchgeführt werden können. Insbesondere Verunreinigungen durch Restmengen können Kristallisationsvorgänge auslösen und damit zur Beeinträchtigung der Produktqualität führen. Grundsätzlich wird die Stabilität der Emulsionsmatrix für die Lagerung und Verwendung bei Temperaturen bis zu 50 °C vorausgesetzt.

Für das Laden der Bohrlöcher und die Sensibilisierung an der Verwendungsstelle muss zudem eine Anpassung der Mischladetechnologie erfolgen. Diese ist insbesondere durch den Einsatz in Gewinnungsbereichen mit geringen Lagerstättenmächtigkeiten begründet. Unter Berücksichtigung der entsprechenden Trägerfahrzeuge, die derzeit ausgewählt werden, sind Höhenbeschränkungen durch ein geeignetes Design zu kompensieren.

Darüber hinaus werden weitere wesentliche Anforderungen an die Mischladetechnologie gestellt. Das

Laden der Sprengbohrlöcher ist nach aktueller Auslegung gemäß Sprengstoffgesetz als Herstellung an der Verwendungsstelle zu betrachten. Vor diesem Hintergrund müssen, neben der rechtlichen Anforderung der automatischen Dokumentation der geladenen Mengen, auch Grundsätze und Messgrößen zur Qualitätssicherung festgelegt werden. Es müssen ein Höchstmaß an Sicherheit sowie eine gleichbleibend hohe Produktqualität gewährleistet sein, sodass Sprengarbeiten definiert geladen und zuverlässige Sprengergebnisse erreicht werden. Der Grad und die Güte der Sensibilisierung der Matrix bestimmen maßgeblich die sprengtechnischen Eigenschaf-

ten des Emulsionssprengstoffs. Aus diesem Grund ist eine geeignete Vorrichtung zur Unterstützung des Ladevorgangs zwingend erforderlich. Die Vorrichtung muss eine ergonomische Führung des Ladeschlauchs ermöglichen und die exakte Einstellung der Rückzugsgeschwindigkeit gewährleisten, damit insbesondere horizontale Sprengbohrlöcher mit definierten Mengen geladen werden können. Zur Vermeidung eines Dichtegradienten über die Bohrlochlänge muss die Matrix radial expandieren können, dies ist nur bei partiell gefüllten Bohrlöchern, die mittels Schlauchrückzugseinrichtung geladen werden, möglich. Zudem ist eine intelligente

Steuerungstechnik erforderlich, die Temperatureinflüsse und Dichtevorgaben berücksichtigt und für den Sprengberechtigten möglichst einfach und sicher zu bedienen ist.

Der Ladevorgang erfordert darüber hinaus eine exakte Festlegung und zeitliche Koordination der Arbeitsabläufe, da die Vermischung von Gasing-Reaktiv und Emulsionsmatrix zu einem Druckanstieg im Ladeschlauch führt. Bei längeren Betriebsunterbrechungen kann dies zu Störungen und im ungünstigsten Fall zum Bersten des Ladeschlauchs führen. Zur Vermeidung dieses Effektes muss der Ladeschlauch vor längeren Unterbrechungen freigespült werden. Der Spülvorgang ist so auszulegen, dass Rest- und Abfallmengen minimiert werden. Dies kann z. B., wie in den Einsätzen bei K+S bereits durchgeführt, durch rechtzeitiges Umstellen der Förderpumpe auf Spülwasser während des Ladens der letzten Bohrlöcher einer Sprengarbeit erreicht werden. Dabei muss allerdings auch gewährleistet sein, dass kein Spülwasser in das Bohrloch gepumpt wird, damit der Sprengstoff in seiner Zusammensetzung qualitativ nicht beeinträchtigt wird. Ein derartiger Vorgang kann nicht allein durch die Erfahrung des Sprengberechtigten wirtschaftlich und sicher gestaltet werden, es bedarf ebenso einer geeigneten technischen Unterstützung durch das Mischladegerät. Bei den anfallenden Spülmengen muss zudem die Einführung eines Recyclingkonzeptes geprüft werden.

Die saubere und exakte Dosierung ist grundsätzlich eine wesentliche Anforderung des Kali- und Steinsalzbergbaus. Bei den Ladetätigkeiten muss die Verunreinigung des Rohsalzes durch Emulsionsmatrix oder Reaktive vermieden werden. Produkte und Anwendungen in der Chemie oder



Abbildung 9: Ladearbeiten mit Emulsionssprengstoff, Mischladetechnologie

Pharmaindustrie sowie im Futter- und Lebensmittelbereich erfordern die Gewinnung hochreiner Salze, die auch durch das Sprengverfahren nicht kontaminiert werden dürfen. Ebenso müssen der sichere Umgang mit Gefahrstoffen und die Arbeitssicherheit der Mitarbeiter gewährleistet werden.

Zusammenfassung und Ausblick

Die Einhaltung der zukünftig anzuwendenden, stark reduzierten Arbeitsplatzgrenzwerte für Stickoxide stellt für den Bergbau eine große Herausforderung dar. Die K+S Gruppe setzt auch zukünftig auf die Gewinnung mit Bohr- und Sprengarbeit und hat nach eingehender Prüfung der Ergebnisse von entsprechenden Versuchseinsätzen entschieden, Emulsionssprengstoffe in allen Bergwerken der Gruppe in Deutschland einzuführen. Die Vorbereitungen werden intensiv vorangetrieben und es ist eine Vielzahl von organisatorischen, logistischen und technischen Anpassungen erforderlich, bevor die Mischladetechnologie bei K+S eingesetzt werden kann. Für die Beschäftigten werden sich die Arbeitsabläufe im Sprengwesen teilweise wesentlich ändern. Weiterhin müssen die hohen Anforderungen an die Produktqualität zur Sicherstellung der erforderlichen Emissionsreduzierung, aber auch die Anpassung der technologischen Prozesse an die Erfordernisse der K+S-Bergwerke berücksichtigt werden. Letztlich muss auch gewährleistet sein, dass durch Emulsionssprengstoffe, deren Einsatzstoffe und Restmengen keine Kontamination der Rohsalze erfolgt. Der Zeitbedarf für die Umstellung der Bergwerke ist erheblich, die K+S Gruppe ist mit MSW-Chemie einer der bedeutendsten Hersteller und mit den eigenen Berg-

werken einer der größten Verbraucher von gewerblichen Sprengstoffen in Deutschland.

Literatur

1. [Oluwoye, I., et al.](#), Atmospheric emission of NO_x from mining explosives: A critical review. *Atmospheric Environment*, 2017. 167: p. 81–96.
2. [Sapko, M.J., et al.](#), Chemical and Physical Factors that Influence NO_x Production During Blasting: Exploratory Study, in 28th Annual Conference on Explosives and Blasting Technique 2002, International Society of Explosives Engineers: Las Vegas, NV. p. 317–330.
3. [Triebel, R.](#), Neue Anforderungen für den Bergbau durch strengere Arbeitsplatzgrenzwerte. *GeoResources*, 2019 (2): p. 43–54.
4. [Dobiáš, B.](#), Emulsionen (Teil 1). *Tenside* 1978. 15(5): p. 225–232.
5. [Fiederling, N.](#), Emulsionssprengstoffe in Theorie und Praxis. *Nobel Hefte, Sprengmittel in Forschung und Praxis*, 1988. 54(4): p. 109–120.
6. [Mahadevan, E.G.](#), Emulsion Explosives, in *Ammonium Nitrate Explosives for Civil Applications*. 2013, Wiley-VCH Verlag & Co. KGaA: Weinheim. p. 113–155.
7. [Mason, T.G.](#), New fundamental concepts in emulsion rheology. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 1999. 4: p. 231–238.
8. [Mittal, K.L. and D.O. Shah](#), Adsorption and Aggregation of Surfactants in Solution. 2002: Taylor & Francis.
9. [Fiederling, N.](#), Die Entwicklung schlagwetter sicherer Emulsionssprengstoffe der Klasse I für den deutschen Steinkohlebergbau. *Nobel Hefte, Sprengmittel in Forschung und Praxis*, 1991. 57(2–4): p. 75–87.
10. [Allum, J.M., M. Cartwright, and J. Cooper](#), Variation of emulsion explosive performance parameters with water content,

in 28th International Annual Conference of ICT1997, Fraunhofer Institut für chemische Technologie: Karlsruhe. p. 1–14.

11. [Leiber, C.O.](#), Betrachtungen zu Explosions- und Detonationserscheinungen. *Journal of Occupational Accidents*, 1977. 1(2): p. 159–170.
12. [Vestre, J.](#), A method for preparing a sensitised emulsion explosive, 2003.
13. [Ganster, M.](#), Teilautomatisierung sprengtechnischer Abläufe ober- und untertage. *Berg- und Hüttenmännische Monatshefte*, 2018. 163(4): p. 135–140.
14. [Kluge, D.](#), Erste Erfahrungen mit Emulsionssprengstoffen beim Vortrieb von Gesteinstrecken auf dem Bergwerk General Blumenthal. *Nobel Hefte, Sprengmittel in Forschung und Praxis*, 1991. 57 (2–4): p. 54–60.
15. [Zawadzka-Malota](#), Testing of mining explosives with regard to the content of carbon oxides and nitrogen oxides in their detonation products. *Journal of Sustainable Mining*, 2015. 14(4): p. 173–178.
16. [Harris, M.L., J.H. Rowland, and R.J. Mainiero](#), Toxic fume comparison of a few explosives used in trench blasting, in 29th Annual Conference on Explosives and Blasting Technique 2003, International Society of Explosives Engineers: Cleveland, OH. p. 319–336.
17. [Nyberg, U., et al.](#), Short time measurements of toxic fumes from detonation of emulsion explosive, 2015, Swedish Rock Breaking Institute. p. 1–20.
18. [Ganzer, C.](#), Ergebnisse von Versuchen mit Emulsionssprengstoffen in Bergwerken der K+S Gruppe, in *Kali und Steinsalz 2005*, Kaliverein e.V. p. 26–45.
19. [Kasperski, J., Bischopink, M.](#), Verfahren zur Herstellung eines hochviskosen Emulsionssprengstoffes sowie Verfahren zum Verbringen desselben, Veröffentlichungsdatum 2005/09/07. Patent EP1571136B1.

K+S Gruppe

ABBAU DER VERSCHULDUNG – ZAHLEN ZUM GESCHÄFTSJAHR 2019

K+S wird die Operative Einheit Americas, in der das nord- und südamerikanische Salzgeschäft gebündelt ist, vollständig verkaufen. Mit einer Verkaufsvereinbarung (Signing) wird noch in diesem Jahr gerechnet. Bei der damit einhergehenden Fokussierung auf das Kerngeschäft mit mineralischen Düngemitteln und Spezialitäten wird das Unternehmen die laufenden Effizienz- und Produktivitätssteigerungen konsequent fortsetzen. Mit dem Verkauf erfolgt eine umfassende Neuausrichtung von K+S. Alle Standorte müssen nachhaltig einen positiven freien Cashflow erzielen. Hinzu kommen eine umfangreiche Restrukturierung der Organisationsstrukturen sowie eine neue Dimensionierung der Verwaltungsfunktionen mit dem Ziel einer spürbaren Kostensenkung. Ein Anteilsverkauf am neuen Kaliwerk Bethune in Kanada ist nicht geplant. Mit der Umsetzung aller Maßnahmen wird ein Abbau der Verschuldung in den nächsten zwei Jahren um deutlich mehr als 2 Mrd. € möglich.

K+S hat das operative Ergebnis (EBIT-DA) im Geschäftsjahr 2019 moderat um 6 % auf 640 Mio. € gesteigert. Der Konzernumsatz blieb 2019 bei knapp über 4 Mrd. € nahezu stabil. Trotz eingetrübter Rahmenbedingungen im zweiten Halbjahr erzielte das Unternehmen 2019 mit 140 Mio. € (2018: -206 Mio. €) erstmals seit 2013 wieder einen positiven bereinigten freien Cashflow.

ZWEI MILLIONEN BESUCHER IN DER WELT DES WEISSEN GOLDES

Das Erlebnis Bergwerk Merkers der K+S Gruppe erfreut sich auch

29 Jahre nach seiner Gründung einer unverändert großen Beliebtheit. Am 6. März 2020 fuhr der zweimillionste Besucher in das ehemalige Kalibergwerk im Wartburgkreis ein. Jährlich besuchen bis zu 80.000 Gäste das Bergwerk.

K+S VERÄUSSERT ENTSORGUNGS-TOCHTER IN DER SCHWEIZ

K+S hat die Tochtergesellschaft K+S Entsorgung (Schweiz) AG an die Thommen-Furler Gruppe mit Sitz in der Schweiz veräußert. Der Verkaufspreis liegt im unteren einstelligen Millionen-Euro-Bereich. Die Veräußerung der Gesellschaft steht im Zusammenhang mit dem Maßnahmenpaket zur raschen Wertgenerierung und Abbau der Verschuldung.

ENTLASTUNG DER UMWELT UND ZUKUNFTSSICHERUNG FÜR DIE REGION

Eine nachhaltige und zuverlässig planbare Entsorgung von Salzlösungen ist eine unerlässliche Voraussetzung für die Fortführung der Kaliproduktion im Werra-Revier. K+S plant, ab 2022 hochkonzentrierte Salzlösungen in den Altbergbau-Bereich der Grube Springen (Wartburgkreis) einzuleiten. Damit wird es möglich, nach über 90 Jahren die Versenkung in den Plattendolomit zu beenden, eine bergbauliche Altlast zu sanieren und auch bei der Entlastung der Werra weiter voranzukommen. Die Einleitung von Salzlösungen in alte Grubenbereiche, von Fachleuten als „Einstapelung“ bezeichnet, wurde von den Umweltministern der Flussgebietsgemeinschaft Weser als eine von mehreren Möglichkeiten zur Salzwasserreduzierung in ihr Maßnahmenprogramm aufgenommen. Für die Einstapelung war zunächst ein Großforschungsprojekt erforderlich, um Realisierbarkeit

und Sicherheitsaspekte des Verfahrens von Fachleuten eingehend prüfen zu lassen und geeignete Bereiche zu finden. Dabei hat sich das zum ehemaligen Bergwerk Merkers gehörende Grubenfeld Springen unter Berücksichtigung aller Umstände als am besten geeignet erwiesen. Es erfüllt alle Sicherheitsvoraussetzungen und bietet genügend Raum, um ca. 20 Jahre lang die Produktionslösungen des Werkes Werra aufzunehmen. Gleichzeitig sind die hochkonzentrierten Salzlösungen besonders geeignet, um dort für die Sanierung einer bergbaulichen Altlast aus der Zeit vor 1990 genutzt zu werden.

Personalien

K+S-Vorstandsmitglied **Mark Roberts**, dessen noch bis Ende September 2020 laufendes Mandat vom Aufsichtsrat des Unternehmens auf seinen Wunsch um drei Jahre bis Oktober 2023 verlängert wurde, wird seinen Fokus auf die Operative Einheit Americas und die mit der Umsetzung des Maßnahmenpakets erforderlichen Transaktionen richten.

Dr. Burkhard Lohr, Vorsitzender des Vorstands, wird zusätzlich die Verantwortung für die Steuerung der operativen Einheit Europe+ im Vorstand übernehmen. **Thorsten Boeckers** wird im Vorstand des Unternehmens unverändert für Finanzen zuständig sein.

Fabiola Fernandez Grund ist vom Aufsichtsrat der K+S Aktiengesellschaft als neues Mitglied in den Vorstand berufen worden. Mit der Aufnahme ihrer Tätigkeit wird sie Arbeitsdirektorin und übernimmt die Verantwortung für die Bereiche IT und der Einheit Operations and Technical Excellence Center.



Verband der Kali- und Salzindustrie e.V.

Herausgeber
Verband der Kali- und Salzindustrie e. V.
Reinhardtstraße 18A
10117 Berlin
Tel. (030) 847 10 69.0
Fax (030) 847 10 69.21
E-Mail: info.berlin@vks-kalisalz.de
www.vks-kalisalz.de