

# 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 Neuhoof-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 Gesamtückstand 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

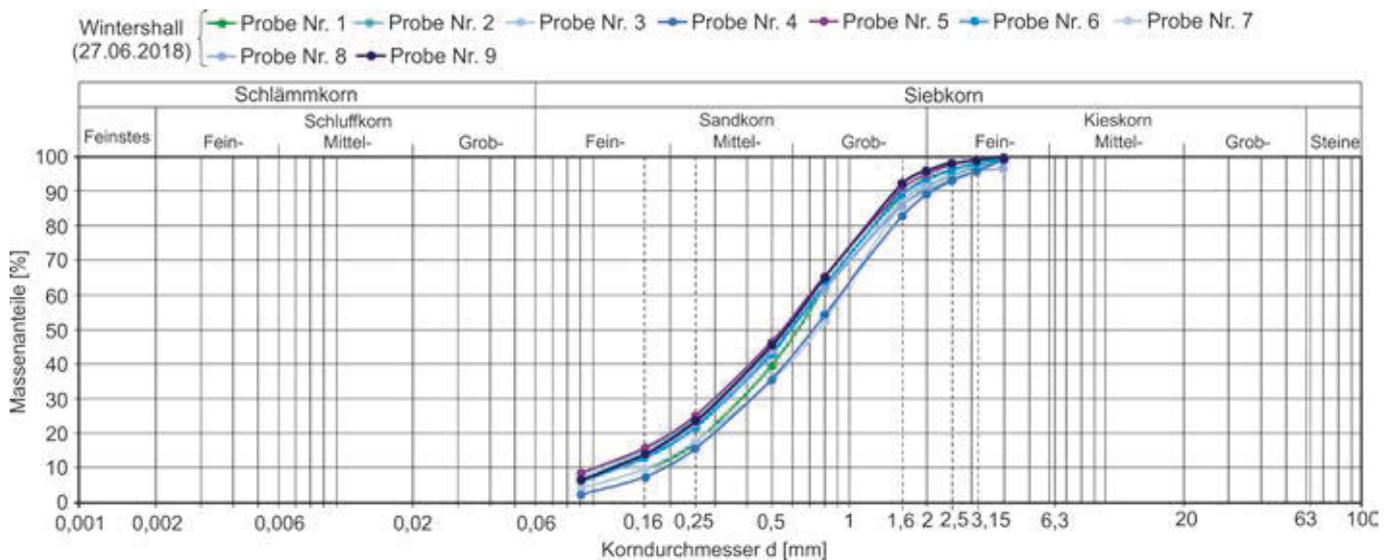


Abbildung 1: Korngößenverteilung des Rückstandsmaterials der Halde Wintershall [4]

daraus resultierend auf das Festigkeits- und Verformungsverhalten des Haldenkörpers.

Die Aufhaltung 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

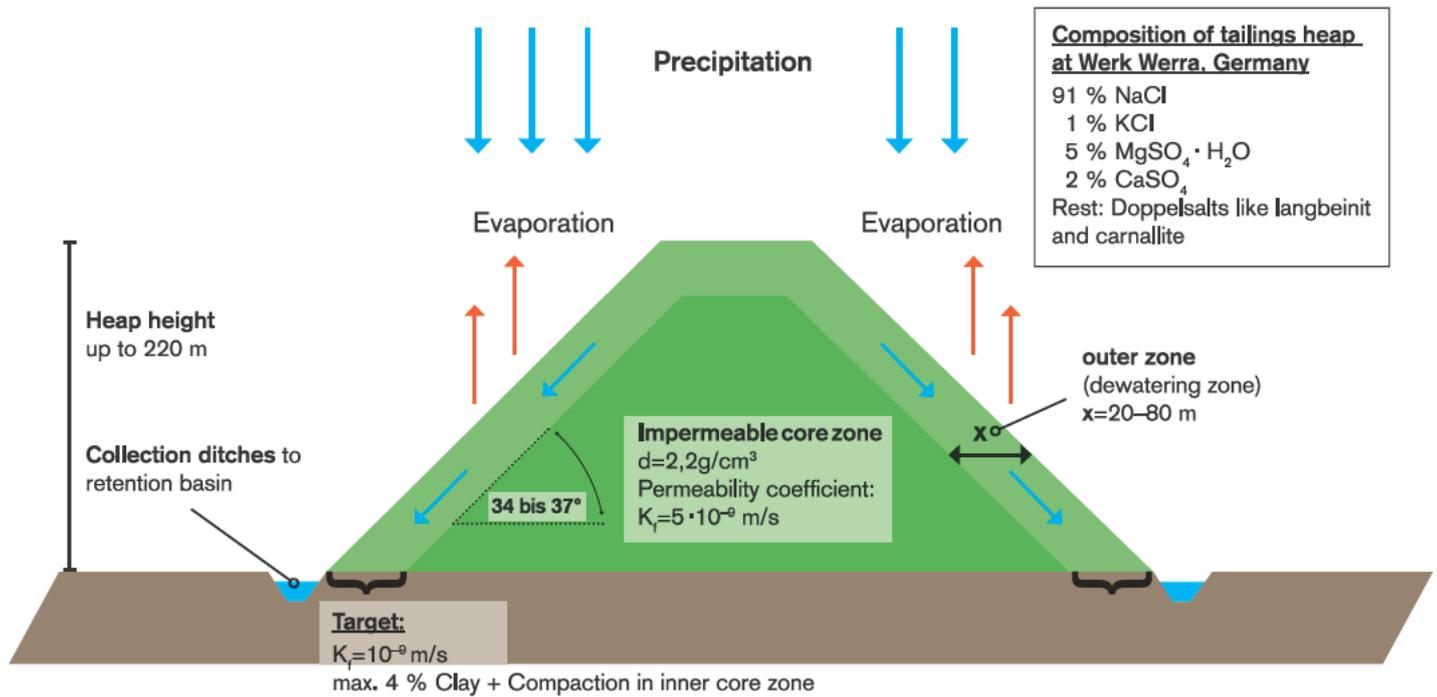


Abbildung 2: Schematischer Querschnitt durch eine Rückstandshalde, digitalisiert aus [3]

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 Kristallisationsort 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]

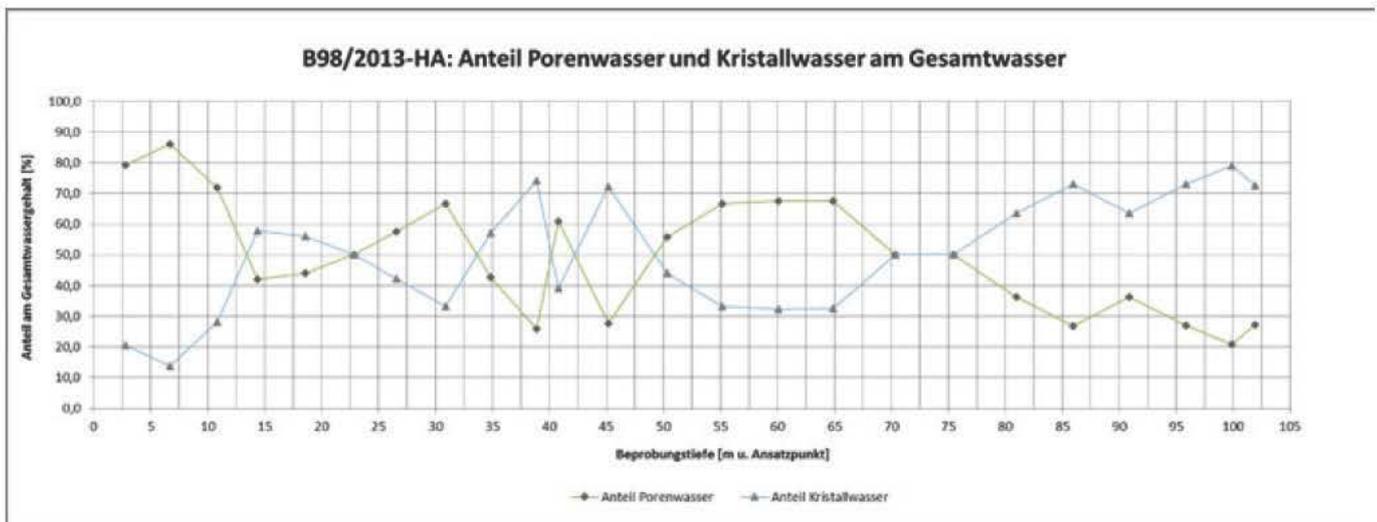


Abbildung 4: Schwankende Anteile von Poren- und Kristallwasser am Beispiel der Vertikalbohrung B98/2013-HA [1]

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/cm<sup>3</sup> 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-/ Wasser-gehalt auf die Messergebnisse der NN-Amplituden besteht. Darüber hinaus setzt sich zudem der Gesamtwassergehalt im Rückstandssalz 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<sup>2</sup>] 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/m<sup>3</sup>), als Durchlässigkeitsbeiwert  $k_f$  in m/s angegeben.

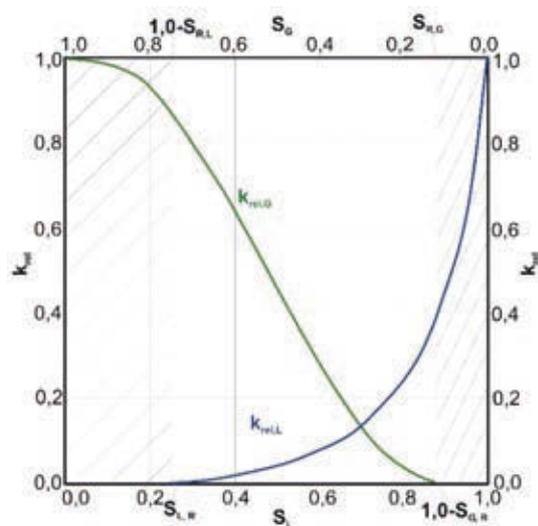
$$k_f = \frac{k \times \rho_f \times g}{\eta_f}$$

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<sup>2</sup>]) ist gleich null. Dies gilt bei Betrachtung eines vollständig gaserfüllten in gleicher Weise für die effektive Flüssigkeitspermeabilität ( $k_{eff,L}$  [m<sup>2</sup>]). 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.

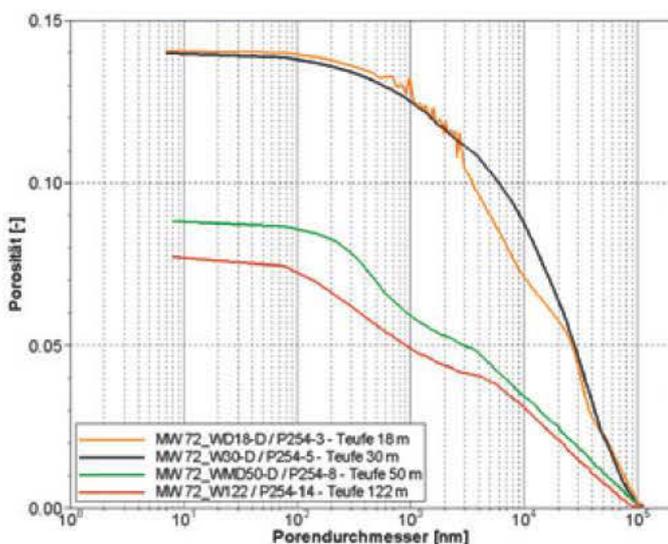


Abbildung 5: Porengrößenverteilung für Proben aus unterschiedlicher Teufe der Halde Wintershall, methodisch bedingte obere Grenze des maximalen Porendurchmesser ca. 100  $\mu$ m

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

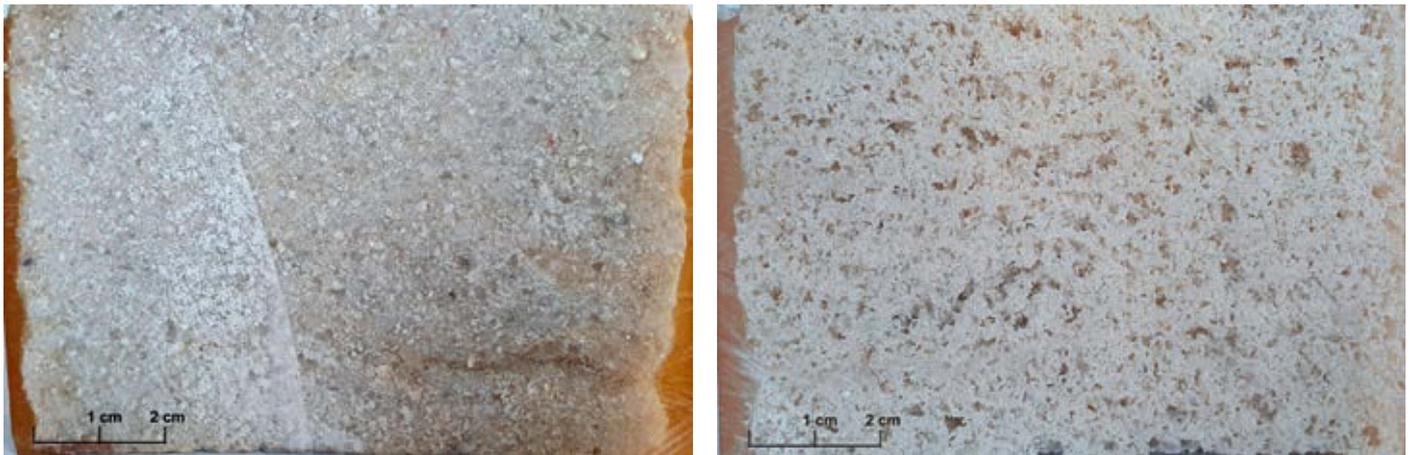


Abbildung 6: Porosität von Haldenmaterial der Halde Wintershall aus einer Teufe von ca. 8,5 m, links: Originalmaterial, Porenraum mit Epoxidharz gefüllt; rechts: Negativabbild des Porenraums nach dem Herauslösen des Salzes

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

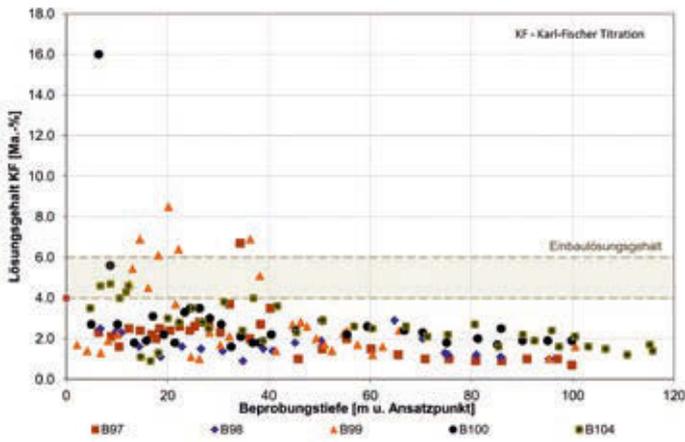


Abbildung 7: Salzlösungsgehalt in Abhängigkeit von der Beprobungstiefe (Ergebnisse K+S KALI GmbH), Halde Hattorf (B97, B98 = Vertikalbohrungen, B99, 100, 104 = Horizontalbohrungen)

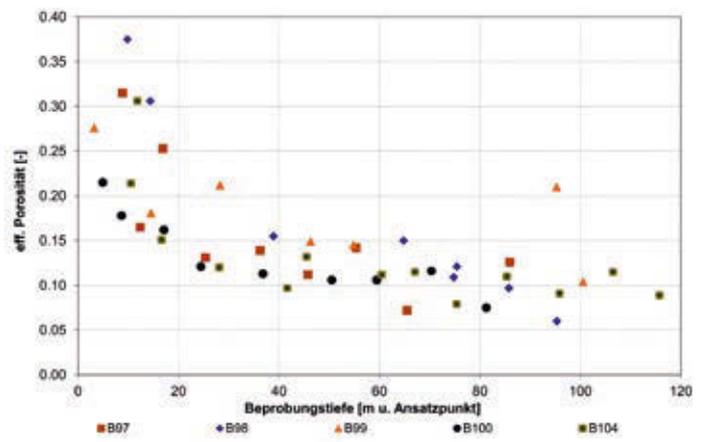


Abbildung 8: Effektive Porosität in Abhängigkeit von der Beprobungstiefe, Halde Hattorf (B97, B98 = Vertikalbohrungen, B99, 100, 104 = Horizontalbohrungen)

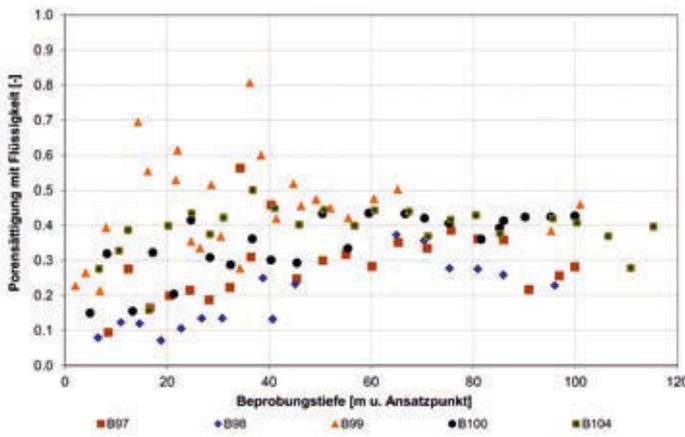


Abbildung 9: Flüssigkeitssättigung im Porenraum in Abhängigkeit von der Beprobungstiefe, Halde Hattorf (B97, B98 = Vertikalbohrungen, B99, 100, 104 = Horizontalbohrungen)

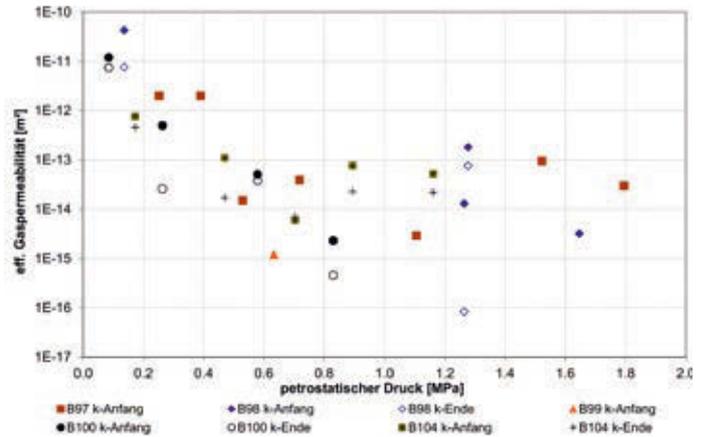


Abbildung 10: Effektive Gaspermeabilität in Abhängigkeit vom petrostatischen Druck, Halde Hattorf (B97, B98 = Vertikalbohrungen, B99, 100, 104 = Horizontalbohrungen)

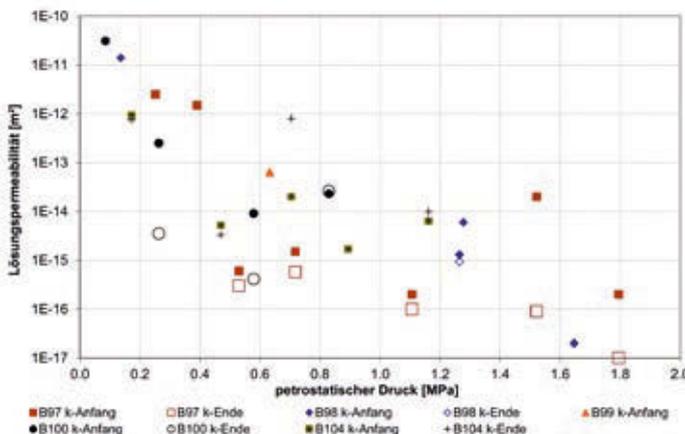


Abbildung 11: Effektive Salzlösungspermeabilität in Abhängigkeit vom petrostatischen Druck, Halde Hattorf (B97, B98 = Vertikalbohrungen, B99, 100, 104 = Horizontalbohrungen)

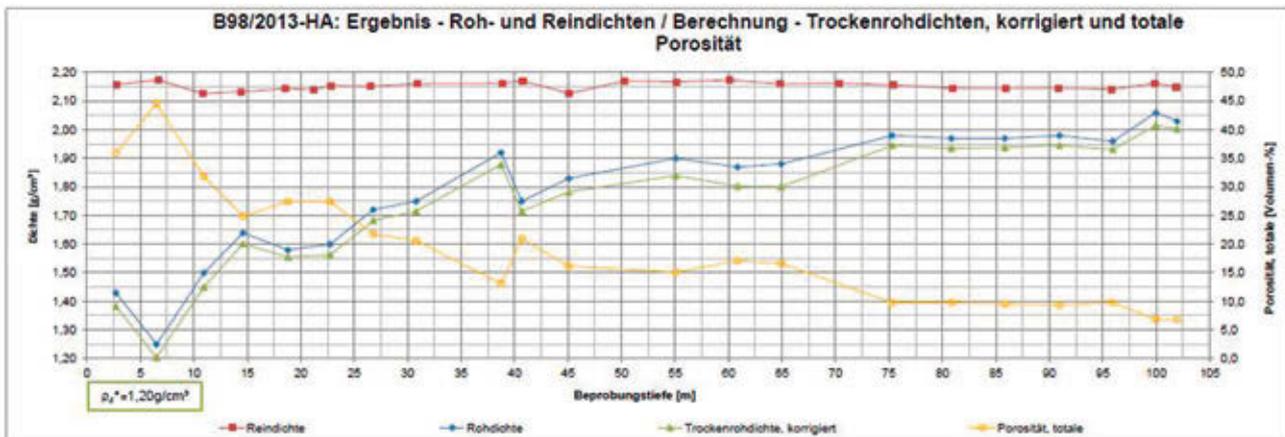


Abbildung 12: Dichteentwicklung über die Bohrteufe, exemplarisch anhand der Vertikalbohrung B 98, Halde Hattorf [1]

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

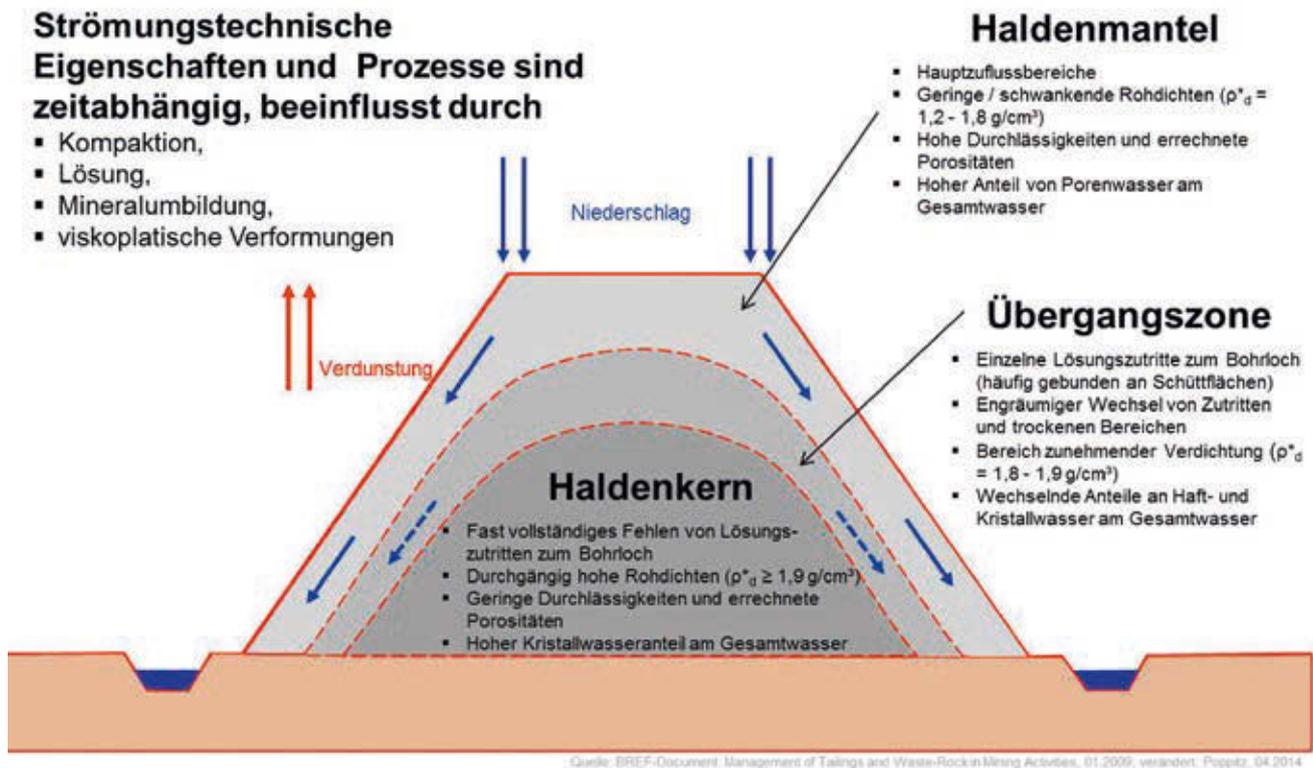


Abbildung 13: Schematische Darstellung der Modellvorstellung zum Aufbau der Strömungsräume in einem Haldenkörper

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.-%]

$\rho_L$  Salzlösungsdichte [g/cm<sup>3</sup>]

$\rho_s$  Reindichte [g/cm<sup>3</sup>]

**Trockenrohichte**

Quotient aus der Trockenmasse einer Probe und dem Volumen (Symbol  $\rho_d$ , Angabe in [g/cm<sup>3</sup>]). Berechnet aus der gemessenen Rohdichte und dem Porenlösungsgehalt (Wassergehalt, bestimmt durch Karl-Fischer-Titration, dichtekorrigiert):

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

$\rho_d^*$  Trockenrohichte [g/cm<sup>3</sup>]

$\rho$  Nassrohichte [g/cm<sup>3</sup>]

$w_L^*$  Porenlösungsgehalt [%]