

# **Nachhaltiges Rückstandsmanagement am Standort Wintershall (Haldenerweiterung Wintershall)**

**Band 3.15 der Antragsunterlage  
Haldenkörperverhalten - Auswertung der Haldenkörperbohrung  
am Standort Wintershall unter Einbeziehung der Ergebnisse für  
den Standort Hattorf**

Vorhabensträger:

Standort Wintershall  
Werk Werra  
In der Aue  
36266 Heringen



Arbeitsgruppe:

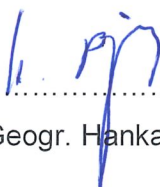
Dipl.-Ing. Christian Artschwager (WE\_F/U\_GGt)  
Dipl.-Geogr. Hanka Poppitz (WE\_F/U\_H)  
Dipl.-Geowiss. Robert Braatz (WE\_F/U\_GG)



Dipl.-Ing. Christian Artschwager



Dipl.-Geowiss. Robert Braatz



Dipl.-Geogr. Hanka Poppitz

## Impressum

Fassung vom 29.03.2018

Ansprechpartner: Hanka Poppitz

Telefon: 06620 79-2046

Fax: 06620 79-4004

E-Mail: [hanka.poppitz@k-plus-s.com](mailto:hanka.poppitz@k-plus-s.com)

Web: [www.kali-gmbh.com](http://www.kali-gmbh.com)



**Ergebnisse im Überblick:**

Zur Erweiterung und Verifizierung des vorliegenden Kenntnisstands bzgl. des Haldenkörperverhaltens wurde am Standort Wintershall in 2014 eine Horizontalbohrung in die ESTA-Rückstandshalde niedergebracht. Die Bohrung erschließt eine ehemalige Haldenoberfläche im Bereich des Erweiterungsabschnitts 1 der Rahmenbetriebsplanzulassung von 1995.

Anhand eines bereits für die Hattorfer Haldenbohrungen definierten Kriterienkatalogs wurde die Modellvorstellung zum Haldenkörperverhalten überprüft und in wesentlichen Punkten bestätigt.

In der Zusammenschau aller ausgewerteten Bohrungen und der gewonnenen Ergebnisse können die folgenden wesentlichen Erkenntnisse hervorgehoben werden:

- Im Haldenkörper werden Haldenmantel, Übergangszone und Haldenkern unterschieden.
- Das Haldenkörperverhalten und damit die Ausbildung des Haldenkerns ist zeitabhängig und wird wesentlich durch Kompaktion des Haldenkörpers, Lösungsprozesse und Mineralumwandlungen beeinflusst.
- Der Haldenkern weist aufgrund der vor genannten Prozesse geringe Porositäten und Durchlässigkeiten auf.
- Die für den Standort Hattorf getroffenen Abschätzungen zur Breite der jeweiligen Haldenzonen wurden bestätigt.
- Wasserbewegungen im Haldenkörper finden bevorzugt im Haldenmantel und bis zum Abschluss der Kompaktionsvorgänge untergeordnet auch in der Übergangszone statt.
- Strömungsprozesse finden entlang bevorzugter Wegsamkeiten statt
- Die aufgehaltete Restfeuchte wird selbst im stark verdichteten Haldenkern nicht vollständig auspresst, sondern bleibt teils als Haft-, teils als Kristallwasser gebunden.
- Horizontale Durchlässigkeiten im Haldenkörper übersteigen vertikale um ein Vielfaches. In Folge dessen kommt es im Zusammenhang mit der tiefenabhängigen Zunahme der Dichten und generellen Abnahme der Durchlässigkeiten zur Ausbildung schwebender Haldenwasserspiegel und einem Abfließen der Haldenwässer in der Haldenmantelzone.
- Überschüttete alte Haldenoberflächen (Schüttflächen) wirken zunächst als initiale Wegsamkeiten für Haldenwasser. Diese werden generell mit zunehmender Kompaktion verschlossen und haben dann keine hydraulische Wirksamkeit mehr. Die Schütthistorie und die Kubatur des Haldenkörpers beeinflussen diesen Prozess.
- Mineralumwandlungen finden im gesamten Haldenkörper statt (Neubildung von Sekundärphasen, bevorzugte Auslösung von Wertstoff-Resten und Sekundärbildungen).
- Das Retardationspotenzial des Rückstands ist nicht ausgeschöpft.

Empfehlungen zur Gestaltung des technischen Konzepts für die geplante Haldenerweiterung wurden abgeleitet. Aus geotechnischer Sicht ist der Haldenkörper für eine Überschüttung im Zuge der geplanten Haldenerweiterung geeignet.

## Inhaltsverzeichnis

1 .... Einleitung	11
1.1 Zweck und Veranlassung .....	11
1.2 Aufbau des Haldenkörpers, stoffliche Eigenschaften und Haldenkörperverhalten – bisheriger Kenntnisstand .....	12
1.2.1 Herkunft und Zusammensetzung des Rückstands	12
1.2.2 Aufhaldungsprozess	17
1.2.3 Bildung von Haldenwässern	19
1.2.4 Haldenkörperverhalten gemäß der bisherigen Kenntnislage	21
2 .... Aufgabenstellung und Planung	26
2.1 Festlegung des Bohransatzpunktes .....	27
3 .... Durchführung der Bohrarbeiten und Vorort-Untersuchungen	29
4 .... Darstellung und Diskussion der Ergebnisse	31
4.1 Ergebnisse der Vorort-Untersuchungen .....	31
4.1.1 Haldenwasser – Mengen und Vorort-Parameter (Untersuchungen während des Bohrgeschehens)	31
4.1.2 Ergebnisse der Kamerabefahrungen	34
4.1.3 Ergebnisse der geophysikalischen Bohrlochuntersuchungen	36
4.1.3.1 Bohrlochgeometrie .....	37
4.1.3.2 Korrelationsmessungen .....	38
4.1.3.2.1 Vorbemerkungen zu den Auswertungen und Interpretationen .....	38
4.1.3.2.2 Gamma-Gamma-Dichte-Log .....	39
4.1.3.2.3 Gamma-Ray-Log (GR-Log) .....	39
4.1.3.2.4 Neutron-Neutron-Log (NN-Log) .....	40
4.1.3.2.5 Temperatur-Log .....	40
4.1.3.3 Strukturuntersuchungen .....	41
4.1.3.3.1 Schüttflächen .....	41
4.1.3.3.2 Klüfte .....	43
4.1.4 Geohydraulische Bohrlochmessungen	43
4.2 Ergebnisse der Laboranalytik der beprobten Lösungen .....	47
4.2.1 Probenahme und durchgeführte Untersuchungen	47
4.2.2 Analysenergebnisse der Lösungsproben	48
4.2.2.1 Überblick .....	48

4.2.2.2	Haldenwasserzusammensetzung der Rückhaltebecken Heer- und Zinkesgraben .....	49
4.2.2.3	Horizontalbohrung B 72/2014 WI .....	50
4.3	Untersuchungen des Kernmaterials .....	53
4.3.1	Kernansprache .....	53
4.3.2	Probenahme und durchgeführte Untersuchungen .....	55
4.3.3	Ergebnisse der chemischen und mineralogischen Analytik .....	59
4.3.3.1	Chemische Analytik .....	59
4.3.3.1.1	Überblick: Hauptelemente und Nebengemengteile.....	59
4.3.3.1.2	Vergleich zu frisch geschüttetem Rückstand .....	60
4.3.3.1.3	Zusammenfassung und Vergleich zu den Ergebnissen aus Bohrungen am Standort Hattorf.....	62
4.3.3.2	Mineralogische Analytik .....	63
4.3.3.2.1	Überblick: Hauptkomponenten und Nebenbestandteile, Primär- und Sekundärphasen.....	63
4.3.3.2.2	Prozesse im Haldenkörper .....	65
4.3.3.2.3	Vergleich zu den Ergebnissen der Haldenbohrungen am Standort Hattorf 2013 .....	69
4.3.3.3	Wassergehaltsbestimmungen .....	70
4.3.3.4	Bestimmung der Haftlösungsgehalte (IBeWa) .....	72
4.3.4	Dichtebestimmung, berechnete Porositäten und Sättigungen .....	73
4.3.4.1	Ergebnisse der Dichtebestimmungen.....	73
4.3.4.2	Totale Porosität, Ergebnisse der Berechnung .....	74
4.3.4.3	Berechnete Sättigungen .....	74
4.3.4.4	Berechnete Sättigungen, bezogen auf die effektive Porosität .....	75
4.3.5	Bestimmung der Porositäten und Permeabilitäten .....	75
4.3.5.1	Vorbemerkungen.....	75
4.3.5.2	Effektive Porosität .....	76
4.3.5.3	Porengrößenverteilung .....	77
4.3.5.4	Permeabilität .....	77
4.3.5.4.1	Effektive Gaspermeabilität.....	77
4.3.5.4.2	Lösungspermeabilität.....	79
5 ....	Modellvorstellung zum Haldenkörperverhalten .....	80
5.1	Einbindung der aktuellen Ergebnisse in die bestehende Modellvorstellung .....	80
5.1.1	Zuflussmengen, Zuflussbereiche, Chemismus der Zuflüsse .....	80
5.1.2	Dichten und Porositäten, Sättigungen .....	83
5.1.3	Durchlässigkeiten/ Permeabilitäten .....	87

5.1.4	Poren- und Kristallwasseranteile am Gesamtwassergehalt, Rückstandszusammensetzung	87
5.1.5	Einfluss der Haldenkubatur und Schütthistorie	90
5.1.6	Fazit: Prüfung der Übertragbarkeit der für den Standort Hattorf entwickelten Modellvorstellung	93
5.2	Strömungsprozesse im Haldenkörper .....	96
5.3	Erkenntnisse mit Relevanz für die Gestaltung des technischen Konzepts .....	99
5.3.1	Festlegung der Breiten der Haldenzonen als Grundlage für weitere Planungen	10
	1	
5.3.2	Eignung des Rückstandskörpers als Baugrund	10
	2	
6 ....	Zusammenfassung	106
	Literaturverzeichnis	108
	Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen	111
	Glossar	112

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1	Durchschnittliche mineralogische Zusammensetzung des Gesamtückstands der Rückstandshalde IV, Wintershall /26/ .....	12
Abbildung 1-2	Rückstandshalde IV, Wintershall: jährlich aufgehaldete Rückstandsmenge im Zeitraum 1976 – 2016. ....	17
Abbildung 1-3	Modellvorstellung des Haldenkörpers, schematisch /2/ .....	23
Abbildung 3-1	Aufgezeichnete Bohrparameter der B 72/2014 WI.....	30
Abbildung 4-1	Gemessene frei auslaufende Wassermengen und Vorortparameter der B 72/2014 WI.....	33
Abbildung 4-2	Ergebnisse der hydraulischen Versuche in Bohrung B 72/2014 WI – Ausflussrate aus Intervall im Vergleich zur Summe der in den Intervallen gemessenen Zutritte zum Bohrloch (Daten aus Anlage 6 entnommen) .....	45
Abbildung 4-3	Ergebnisse der hydraulischen Versuche in Bohrung B 72/2014 WI – Anteilige Ausflüsse aus Intervall im Vergleich zur Summenkurve der prozentualen Abflüsse (Daten aus Anlage 6 entnommen) .....	46
Abbildung 5-1	Weiterentwickelte Zonierung des Haldenkörpers, schematisch.....	95
Abbildung 5-2	Angeschnittene Schüttfläche bei rd. 100 m Teufe im Kernquerschnitt, siehe Anlage 3.....	103
Abbildung 5-3	Haldenoberfläche, Draufsicht - Chloridkarst, dargestellt Salzkarren und Lösungskavitäten, Alter 10-15 Jahre /2/ .....	104
Abbildung 5-4	Haldenoberfläche Standort Hattorf, Nahaufnahme - Chloridkarst, dargestellt Salzkarren und Lösungskavitäten, Alter rd.10-15 Jahre /2/ .....	104
Abbildung 5-5	Entwicklung der Haldenoberfläche des Flächenlysimeters im Zeitraum 2013 (Errichtung) bis 2017 (Rückbau). ....	105

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1-1:	Anteile Rückstandsmenge am Gesamtrückstand nach Aufbereitungsverfahren im Vergleich der Jahre 1977, 1993 und 2014; zusätzlich Angabe des Durchschnitts der Jahre 1977 bis 2010.....	14
Tabelle 1-2:	Zusammensetzung des aufgehaldeten Rückstands der Jahre 1977, 1993, 2014 und 2016 im Vergleich. Ermittelt als Durchschnittswert anhand vorhandener Analysen einzelner Rückstandsströme.....	16
Tabelle 1-3	Durchschnittliche Zusammensetzung des Haldenwassers Rückhaltebecken „Heergraben“- Hauptbestandteile (Mittel aus den Jahren 2009 bis 2015).....	19
Tabelle 1-4	Durchschnittliche Zusammensetzung des Haldenwassers Rückhaltebecken „Zinkesgraben“- Hauptbestandteile (Mittel aus den Jahren 2009 bis 2015) .....	19
Tabelle 1-5:	Zusammensetzung der Haldenwässer in den Haldenwasserbecken Heer- und Zinkesgraben, Monatsanalyse Oktober 2014 /16/.....	20
Tabelle 1-6:	Breite von Haldenmantel und Übergangszone sowie erbohrter Haldenkernbereich/2/.....	24
Tabelle 2-1:	Schütthistorie im Bohrungsbereich .....	28
Tabelle 4-1:	Ergebnisse geohydraulische Bohrlochuntersuchungen .....	44
Tabelle 4-2:	Analytisch bestimmte Parameter und angewandte Methodik (Quelle: schriftliche Mitteilung Werkslabor WI, 05/2015).....	48
Tabelle 4-3	Ionenverhältnisse der Haldenwässer in den Becken Heergraben und Zinkesgraben, im Vergleich: Lösungen aus dem frischen Rückstand der Vorschubböschungen bzw. aus dem Haldenkernbereich(/16/, /2/ ).....	50
Tabelle 4-4:	Bei der Kernansprache erfasste Parameter .....	54
Tabelle 4-5:	Chemische Analytik: Parameter und Methodik.....	56
Tabelle 4-6:	hydraulische Laborversuche: analytisch bestimmte Parameter und angewandte Methodik .....	58
Tabelle 5-1:	Entwicklung der Dichten und Porositäten in Horizontal- und Vertikalbohrungen, Übersicht (gerundete Werte). Unterhalb der angegebenen Tiefe liegen die Werte durchgängig unter dem Kriterium der jeweiligen Spalte, sofern keine Ausnahme angegeben ist. ....	84
Tabelle 5-2:	Bereiche mit unterschiedlichen Haft- und Kristallwasseranteilen am Gesamtwassergehalt aus Haldenbohrungen an den Standorten Hattorf und Wintershall - Tiefenlage in den Horizontal- und Vertikalbohrungen (Tiefenangaben gerundet) .....	89
Tabelle 5-3:	Breite von Haldenmantel und Übergangszone sowie erbohrter Haldenkernbereich (VB= Vertikalbohrung; HB =Horizontalbohrung).....	10





## Anlagenverzeichnis

### **Anlage 1 : Kartenmaterial**

Anlage 1.1 : Übersichtslageplan Lageplan mit Bohransatzpunkt, Schnittspuren und Darstellung der Haldenentwicklung (1:2000)

Anlage 1.2: Längsschnitt Rückstandshalde Wintershall, Achse A-A (1:1000)

Anlage 1.3: Längenschnitt Rückstandshalde Wintershall entlang Brl. B72/2014 WI (1:200)

Anlage 1.4 Längsschnitt Rückstandshalde Wintershall, Achse B-B (1:2000)

### **Anlage 2: Schichtenverzeichnis**

### **Anlage 3: Bohrkernfotodokumentation**

### **Anlage 4: Kamerabefahrung**

Anlage 4.1 Beispielfotos zur Bewertung der Kamerabefahrung

Anlage 4.2 Übersichtsprofile

### **Anlage 5: Geophysikalische Bohrlochmessungen: Ergebnisbericht B72/2014-WI**

### **Anlage 6: Geohydraulische Bohrlochmessungen: Bericht Golder Associates**

### **Anlage 7: Laborergebnisse - Haldenwasser**

Anlage 7.1 : Analysenergebnisse Haldenwasser

Anlage 7.2: Schoeller-Diagramme

### **Anlage 8: Laborergebnisse - Rückstandssalz**

Anlage 8.1 : Probenahmeplan

Anlage 8.2: Prüfberichte (K+S FI/Werkslabor Neuhof-Ellers)

Anlage 8.3: Graph. Darstellung der Laborergebnisse

Anlage 8.4: Ergebnisse der mineralogischen Analytik

Anlage 8.4.1: Ergebnisse der Röntgendiffraktometrie

Anlage 8.4.2: Ergebnisse der Kristalloptischen Analytik

Anlage 8.5: Ergebnisbericht der IBeWa Ingenieurpartnerschaft für Bergbau, Wasser- und Deponietechnik Freiberg

Anlage 8.6: Graphische Darstellung der Ergebnisse der Porositätsbestimmungen

# 1 Einleitung

## 1.1 Zweck und Veranlassung

Seit Beginn der Aufschüttung von Großhalden führte die K+S KALI GmbH wiederholt Untersuchungen an Rückstandshalden durch, um die Strömungsprozesse sowie stofflichen und hydraulischen Eigenschaften des Rückstands und deren zeitabhängige Veränderung zu erkunden. Verschiedene Projekte, beispielsweise die Haldendurchörterung Bleicherode und mehrere Haldenbohrungen in die Rückstandshalde Neuhof-Ellers, in die Althalde Niedersachsen sowie die Rückstandshalden Hattorf und Zielitz sind in diesem Zusammenhang zu nennen. Am Standort Hattorf wurden in 1997/98 zwei Vertikal- und vier Horizontalbohrungen unter Leitung von Dr. Sessler (K+S Aktiengesellschaft) niedergebracht und die Ergebnisse im Rahmenbetriebsplan HA 19.99, dort Anlage A-6, dokumentiert /24/. Dennoch wurde im Rahmen der Scopingtermine zu den aktuellen Haldenerweiterungsverfahren an den Standorten Hattorf und Wintershall die weitere Untersuchung des Haldenkörpers durch Bohrungen zur Erkundung des Haldenkörperverhaltens gefordert. Im Focus der Fragestellungen standen dabei die Eigenschaften der westlichen Haldenflanke, deren Überschüttung bei der geplanten Westerweiterung der Halde erfolgen soll.

Im Zeitraum von Oktober 2013 bis Januar 2014 wurden deshalb an der ESTA-Rückstandshalde Hattorf drei Horizontal- und zwei Vertikalbohrungen niedergebracht. Die Ergebnisse wurden in einem Bericht dokumentiert, der als Band 3.17 Bestandteil der Antragsunterlage zur Haldenerweiterung Hattorf wurde /2/.

Die Halde IV am Standort Wintershall verfügt aufgrund der gemeinsam von Hattorf und Wintershall genutzten Lagerstätte, identischer Aufhaldungsverfahren und Haldentechnik über eine vergleichbare Zusammensetzung und vergleichbare Eigenschaften des Rückstands zu denjenigen am Standort Hattorf. Es ist deshalb davon auszugehen, dass die in /2/ anhand dieser Bohrungen für die Hattorfer ESTA-Rückstandshalde entwickelte Modellvorstellung auf den Standort Wintershall übertragbar ist.

Im Rahmen des Scoping-Termins zur Haldenerweiterung Wintershall (13.02.2013) bzw. in der zugehörigen Niederschrift (Az. 34/Hef 76 d 40-11-325-34/22 vom 26.02.2013, im Folgenden: Scoping-Protokoll /20/) wurde als Untersuchungsrahmen u. a. festgelegt, dass darzulegen ist, wie sich die Überschüttung der betriebenen Halde speziell im Überschüttungsbereich zur Altfläche auf die Rückstandseigenschaften und Strömungsprozesse sowie ggf. Standsicherheit der Halde auswirkt. In Bezug auf ältere Haldenflanken an der Halde Wintershall, die im Bereich des 1. Erweiterungsabschnitts der Rahmenbetriebsplanzulassung aus 1995 überschüttet wurden, gab die verfahrensführende Behörde die Empfehlung, in diesem Bereich als Erkenntnisgewinn eine Bohrung durchzuführen.

Der Empfehlung wurde gefolgt. Das Untersuchungsprogramm für diese Bohrung wurde auf Basis der Hinweise im Scoping-Protokoll /20/ und unter Berücksichtigung der am Standort Hattorf durchgeführten Untersuchungen aufgestellt und an die örtlichen Randbedingungen angepasst. Das durchgeführte Programm zielt darauf ab, den Einfluss der speziellen lokalen

Randbedingungen am Standort Wintershall, insbesondere der überschütteten „gealterten“ Haldenoberflächen, auf das in /2/ entwickelte Haldenmodell zu untersuchen.

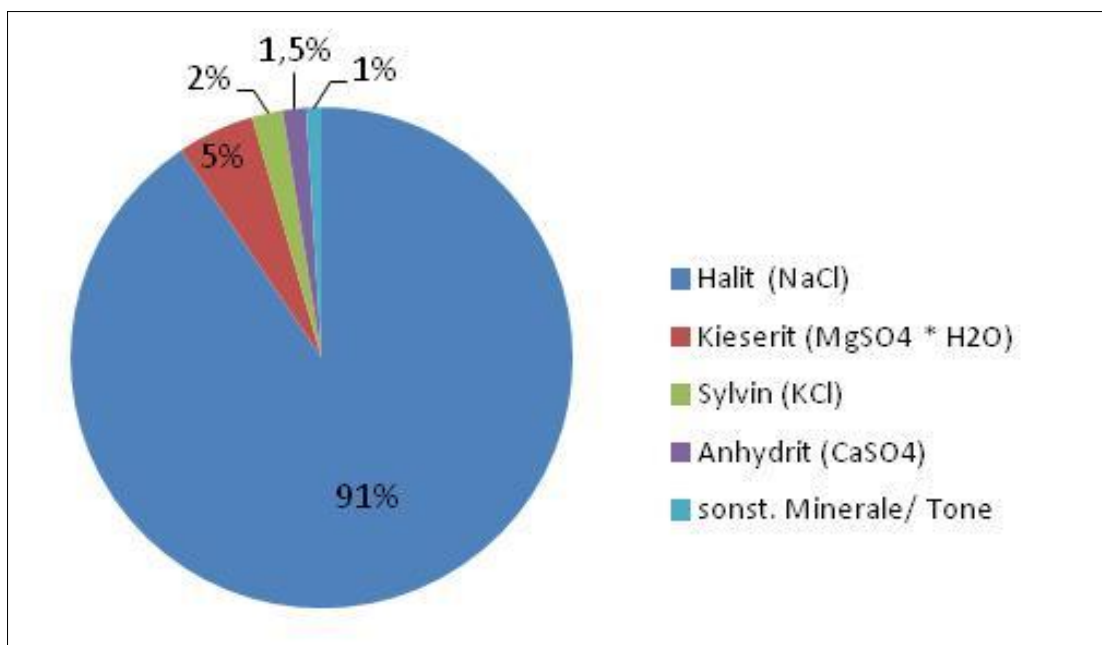
Neben den Ergebnissen der hier dokumentierten Bohrung am Standort Wintershall werden im vorliegenden Bericht auch die Ergebnisse der am Standort Hattorf in den Jahren 1997/98 und 2013/14 durchgeführten Bohrungen zur Beantwortung der behördlichen Fragestellungen herangezogen.

## 1.2 Aufbau des Haldenkörpers, stoffliche Eigenschaften und Haldenkörperverhalten – bisheriger Kenntnisstand

[WE\_F/U\_H Poppitz]

### 1.2.1 Herkunft und Zusammensetzung des Rückstands

Die bei der Weiterverarbeitung von Kalirohsalzen am Standort kontinuierlich anfallenden festen Aufbereitungsrückstände bestehen zu rund 91% aus Halit (Steinsalz) mit Beimengungen von Anhydrit und Ton sowie geringen Wertstoff-Restgehalten von Sylvin und Kieserit. Der Kieseritgehalt einer Halde hat wesentlichen Einfluss auf die stattfindenden chemisch-mineralogischen Umwandlungsprozesse. Aufgrund des Kieseritgehalts von rund 5% ist die Halde Wintershall ebenso wie die Halde Hattorf mit ähnlicher Zusammensetzung als kieseritische Steinsalzhalde zu klassifizieren. Die durchschnittliche mineralogische Zusammensetzung des Rückstands ist in Abbildung 1-1 dargestellt. Diese Aufbereitungsrückstände werden am Standort Wintershall seit 1976 (Jahr der Erstzulassung: 1975) auf der Rückstandshalde IV, Wintershall, aufgehaldet.



**Abbildung 1-1** Durchschnittliche mineralogische Zusammensetzung des Gesamtrückstands der Rückstandshalde IV, Wintershall /26/

Die Zusammensetzung der bergbaulichen Abfälle ist abhängig von der Rohsalzzusammensetzung sowie von den gewählten Aufbereitungsverfahren. Unter derzeitigen Rohsalzbedingungen fallen am Standort Wintershall jährlich durchschnittlich ca. 7,2 Mio. t<sup>1</sup> feste Rückstände aus

Elektrostatischer Aufbereitung (ESTA®)	(38% des Gesamtrückstands)
Heißverlösung	(23% des Gesamtrückstands)
Mittelkornflotation	(21% des Gesamtrückstands)
Schlammflotation	(17% des Gesamtrückstands)

an. Hinzu kommen Feststoffe aus der Reinigung von Stapelbecken (0,2% des Gesamtrückstands) sowie darüber hinaus Fege- und Reinigungssalze, die zusammen mit den Beckenreinigungsrückständen weniger als 1% des Gesamtrückstands ausmachen (siehe Band 1.1.2: Art der Abfälle und Abwässer). In Abhängigkeit vom Wertstoffgehalt des Rohsalzes kann die Rückstandsmenge schwanken (vgl. Tabelle 1-2). In den letzten Jahren stieg die Rückstandsmenge im Zusammenhang mit den Bemühungen zur Reduzierung flüssiger Rückstände. Für die Haldenerweiterung wird eine durchschnittliche Rückstandsmenge von rund 7,2 Mio. t/a erwartet.

Die Rückstände aus den einzelnen Aufbereitungsverfahren unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Körnung und ihres Feuchtegehalts; der trockene ESTA®-Rückstand wird, um Staubbildung zu vermeiden, geringfügig angefeuchtet. Die Zusammensetzung der Rückstände aus den einzelnen Aufbereitungsverfahren ist in Band 1.1.2 der Antragsunterlage dargestellt. Die Verfahren Elektrostatische Aufbereitung, Heißverlösung und Flotation kommen bereits seit Beginn der Aufhaldung der ESTA-Rückstandshalde zum Einsatz, Rückstand aus der Schlammflotation wird seit 1982 aufgehaldet. Bis 1994 wurde neben dem Grobrückstand auch ein Feinrückstand aus einem mittlerweile nicht mehr angewandten Produktionsschritt der Heißverlösung aufgehaldet. Die Anteile der einzelnen Rückstandsbestandteile am Gesamtrückstand schwankten im Aufhaldungszeitraum, wie Tabelle 1-1 zeigt; insbesondere hat der Anteil der Flotationsrückstände zugenommen, der Anteil der Heißlöserückstände war hingegen rückläufig.

Die Rückstandsströme werden gemeinsam über Haldenbandanlagen auf die ESTA-Halde IV gefördert. Eine Vermischung der Rückstände findet auf dem Haldenband (Bandübergaben), final jedoch beim Abkippen über den Absetzer statt. Das Aufhaldungsverfahren (Flankenschüttverfahren, vgl. Kap. 1.2.2) hat sich seit Beginn der Aufhaldung nicht verändert.

Zur chemischen Zusammensetzung des Gesamtrückstands zurückliegender Jahre liegen keine Analysen vor. Daher wurde die Zusammensetzung für die in Tabelle 1-2 dargestellten Beispieljahre mit Hilfe der nachfolgenden Angaben aus den Genehmigungsunterlagen sowie vorhandenen Betriebsdaten (Mengen und Analysen der Teilströme des Rückstands) rekonstruiert. Aufzeichnungen existieren ab 1994.

---

<sup>1</sup>Durchschnittliche Rückstandsmenge der Jahre 2008–2015 am Standort Wintershall beträgt 6,6 Mio. t, ausgenommen das Jahr 2009 aufgrund geringer Kapazitätsauslastung wegen der Weltwirtschaftskrise. In Folge der Rohsalzzusammensetzung hat sich die Rückstandsmenge seit 2012 stetig erhöht und wird zukünftig mit 7,2 Mio. t/a prognostiziert.

**Tabelle 1-1: Anteile Rückstandsmenge am Gesamtrückstand nach Aufbereitungsverfahren im Vergleich der Jahre 1977, 1993 und 2014; zusätzlich Angabe des Durchschnitts der Jahre 1977 bis 2010.**

	1977	1993	Durchschnitt 1977 bis 2010	2014
Elektrostatische Aufbereitung (ESTA®)	52	55	50	38
Heißverlösung	42	20	28	23
Flotation	6	25	22	38

Im Rahmenbetriebsplan vom 21.05.1974 (Erstgenehmigung der Rückstandshalde) ist die Zusammensetzung des Rückstands wie folgt beschrieben: „Das aufzuhaltende Material ist ein Gemisch von Rückstand aus der elektrostatischen Trennung (=ESTA) und Rückstand aus der Kieseritaufbereitung [...] und wird voraussichtlich folgende Eigenschaften haben:

a) ESTA-Rückstand

Korngröße < 1 mm

Mineralog. Zusammensetzung:

Ca. 93% Steinsalz (NaCl)

Ca. 2% Sylvin (KCl)

Ca. 3% Kieserit ( $\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ )

Ca. 2% Anhydrit ( $\text{CaSO}_4$ )

Der ESTA-Rückstand fällt in der Fabrik trocken an; zur Vermeidung von Verstaubung soll das Material angefeuchtet werden.

b) Geringe Mengen von Rückständen aus der Kieserit-Aufbereitung, wie sie schon bisher aufgehaldet worden sind. Diese Rückstände bestehen überwiegend aus Kieserit und Anhydrit, sind gröber als der ESTA-Rückstand und fallen feucht an.“ /12/.

Es ist also davon auszugehen, dass die mineralog. Zusammensetzung des Gesamtrückstands im Vergleich zum oben dargestellten ESTA-Rückstand höhere Kieserit- und Anhydritgehalte bei gleichzeitig geringeren Steinsalzanteilen aufwies.

Im Rahmenbetriebsplan WI 33.88 ist die durchschnittliche mineralogische Zusammensetzung des Gesamtrückstands wie folgt angegeben:

“91% Halit (NaCl)

1% Sylvin (KCl)

5% Kieserit ( $\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ )

2% Anhydrit ( $\text{CaSO}_4$ )

< 1% Langbeinit ( $K_2SO_4 \cdot 2 MgSO_4$ )

< 1% Carnallit ( $KCl \cdot MgCl_2 \cdot 6H_2O$ ).“ /13/

Der Vergleich mit Abbildung 1-1 zeigt, dass sich die mineralogische Zusammensetzung seither nur geringfügig in den Gehalten der Nebenbestandteile verändert hat.

Ergänzend wurde in 2016 eine Sonderbeprobung durchgeführt, um die chemische und mineralogische Zusammensetzung des Gesamtrückstands sowie die Rückstandsfeuchte abzubilden, die Ergebnisse der Elementanalyse sowie der Untersuchung der Feuchtegehalte zum Vergleich mit den Ergebnissen der Haldenbohrung sind in Tabelle 1-2 dargestellt. Die Phasenanalyse mittels RDA bestätigte i.W. die vorstehend dargestellte durchschnittliche mineralogische Zusammensetzung.

Demzufolge hat sich – abgesehen von höheren Magnesium- und Sulfatgehalten bei gleichzeitig geringeren Natrium- und Chloridgehalten in den Anfangsjahren der Aufhaldung – auch die durchschnittliche chemische Zusammensetzung des Rückstandsmaterials im Zuge der Aufhaldung nur geringfügig verändert, wie Tabelle 1-2 für verschiedene Betrachtungsjahre seit Beginn der Aufhaldung zeigt. Die Erhöhung der Sulfatgehalte zwischen den Analysen aus 1993 und 2014 ist hauptsächlich auf die Umstellung von Kieseritwäsche auf Mittelkornflotation in 1995/96 zurückzuführen. Durch die kontinuierliche Reduktion des Frischwassereinsatzes in der Flotation sind die Rückstandsmengen aus der Schlamm- und MKF Flotation angestiegen, und mit diesen auch der Magnesiumsulfat-Gehalt im Rückstand. Generell ist der  $K_2O$ -Gehalt des Rohsalzes im Vergleich von 1993 zu 2014 bzw. 2016 geringer, was zu entsprechend höheren Rückstandsmengen in der Flotation führt.

Seit 1995 liegen monatliche Angaben zur Zusammensetzung des Gesamtrückstands der Halde vor. Der durchschnittliche Anteil an Natriumchlorid im Rückstand liegt seit 1995 im Mittel bei rund 90%. Folglich ist von einer weitgehend homogenen chemischen Zusammensetzung des frisch geschütteten Rückstands auszugehen.

Neben den langfristigen Änderungen in den Anteilen der Aufbereitungsverfahren können auch kurzzeitige Schwankungen der Zusammensetzung des Rückstands aus betrieblichen Gründen auftreten, z. B. wenn einzelne Betriebsteile bzw. Aufbereitungsstrecken stillstehen oder z.B. bedingt durch Beimengungen von Schlämmen aus der Beckenreinigung. Bereichsweise Abweichungen der in der Bohrung B 72/2014WI ermittelten chemischen Zusammensetzung von der hier dargestellten durchschnittlichen Zusammensetzung können deshalb nicht nur alterationsbedingt auftreten, sondern auch betriebliche Ursachen haben.

Im Vorfeld der Aufbereitung wird das Rohsalz je nach Aufbereitungsverfahren in unterschiedliche Körnungen aufgemahlen, um Verwachsungen von Wertstoff und Rückstand zu trennen und so die Trennergebnisse der Aufbereitungsverfahren zu verbessern. Der entstehende Salzgrus besteht aus Rückstandspartikeln<sup>2</sup>, deren Partikelgrenze nicht notwendigerweise mit der Korngrenze der Mineralkörner übereinstimmen muss /3/, und die mehrere Mineralphasen beinhalten können. Die fein aufgemahlenen ESTA- und Flotationsrückstände nehmen den größten Anteil am Gesamtrückstand ein und weisen

---

<sup>2</sup> Korngrößenanalysen von Haldenmaterial zeigen folglich ebenso das Größenspektrum der Rückstands*partikel*, nicht zu verwechseln mit Mineralkorngrößen. Die Begriffe Korngrößenanalyse und Kornsummendigramm finden als Festlegung der DIN 18123 für das beschriebene Analyseverfahren dennoch Verwendung.

Korngrößen von unter 1,25 mm auf; der Löserückstand besitzt Korngrößen bis maximal 4 mm. Die Haupt-Kornfraktion in allen Rückstandsströmen ist Sand (2,0 bis 0,063 mm, /1/). Aufgrund der hauptsächlich durch die Nassaufbereitungsprozesse beeinflussten Restfeuchte des Gesamtrückstands von rund 4 bis 6% kann es bereits während der Aufhaltung zu Löse- und Rekristallisationsprozessen und zur Bildung von Aggregaten im Rückstandsmaterial kommen.

**Tabelle 1-2: Zusammensetzung des aufgehaldeten Rückstands der Jahre 1977, 1993, 2014 und 2016 im Vergleich.** Ermittelt als Durchschnittswert anhand vorhandener Analysen einzelner Rückstandsströme.

Parameter	1977 <sup>3</sup>	1993 <sup>4</sup>	2014 <sup>5</sup>	2016 <sup>6</sup>
Aufgehaltete Rückstandsmenge [Tt eff.]	1.289	4.184	6.941	
Natrium [%]	19	34	33,6	36,3
Kalium [%]	1	0,6	0,9	1,9
Magnesium [%]	6	0,9	1,1	1,9
Calcium [%]	3	0,6	0,4	0,6
Sulfat [%]	29	3,5	5,7	6,9
Chlorid [%]	31	53,0	52,4	52,7
Trocknungsverlust 110°C <sup>7</sup> [%]	6	5	4,8	-
Glühverlust 550°C <sup>8</sup> [%]	4	0,6	1,1	-
Porenwassergehalt [%] <sup>9</sup>	-	-	-	4,0
Trocknungsverlust 55°C [%] <sup>10</sup>	-	-	-	4,6

<sup>3</sup> Berechnet aus Angaben des RBP 1974 (/12/): ESTA-Rückstand und Rückstand aus Kieseritverarbeitung standen lt. Betriebsdaten in 1977 etwa im Verhältnis 1:1.

<sup>4</sup> Zusammensetzung berechnet aus mineralog. Zusammensetzung Trockenrückstand und Angabe von 5% Feuchte aus RBP 33.88 (/13/).

<sup>5</sup> Quelle für chemische Zusammensetzung: Band 1.1.2 der Antragsunterlage

<sup>6</sup> Daten aus Sonderbeprobung 2016 (RFA, Methode 037.06: Elementanalyse mittels wellenlängendispersivem Röntgenfluoreszenzspektrometer), Mittel aus 3 Proben) – Prüfbericht 161653 des K+S Analytik- und Forschungszentrums vom 23.06.2016, siehe Anlage 8.2, /14/.

<sup>7</sup> Die angegebenen Feuchtegehalte wurden rechnerisch aus den Analysen der Rückstandsteilströme gemittelt. Sie wurden für die Teilströme anhand von Ofentrocknung bei 110°C ermittelt und stellen somit eine konservative Annahme dar! Angegeben ist der Gehalt an H<sub>2</sub>O.

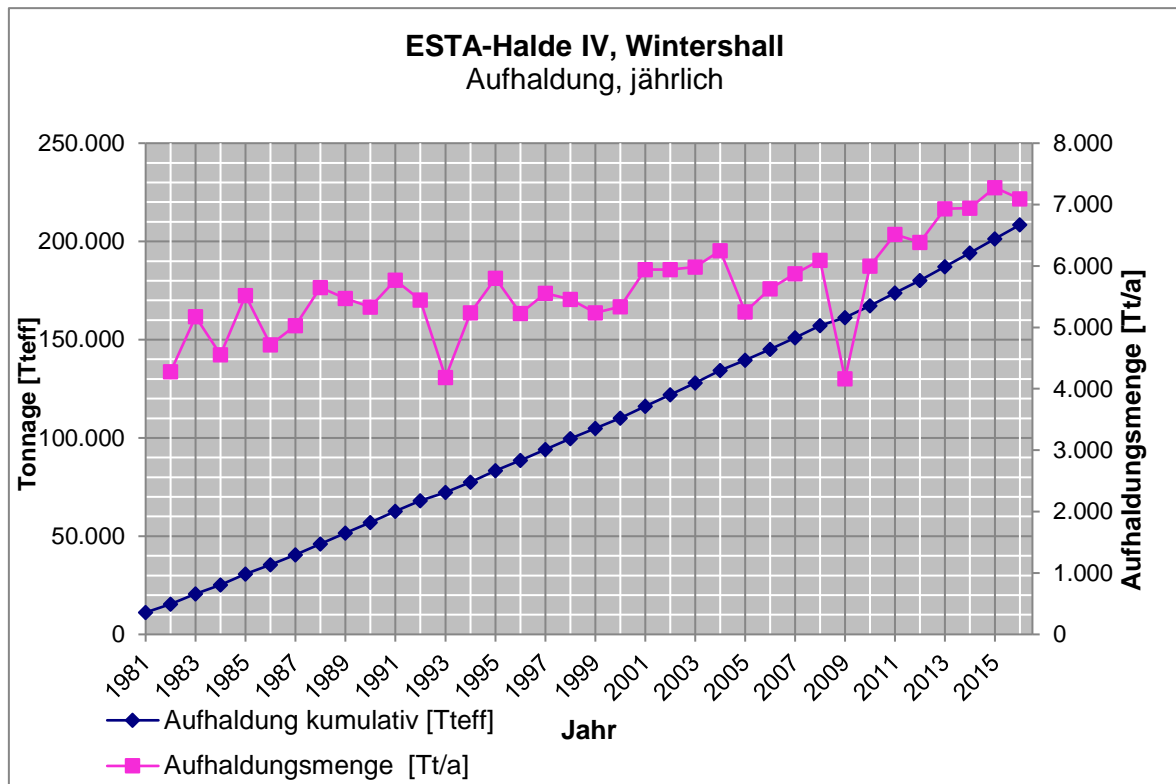
<sup>8</sup> Siehe Fußnote 6, gleiche Verfahrensweise.

<sup>9</sup> Ermittelt mittels Karl-Fischer-Titration (Methode K+S 0785.02\*), Mittel aus 3 Proben zum Vergleich mit in Haldenbohrungen ermittelten Porenwassergehalten, siehe Anlage 8.2, /14/.

<sup>10</sup> Ermittelt mittels Ofentrocknung 20h bei 55°C (Methode DIN EN 12880 (S2a) – in Anlehnung), Mittel aus 3 Proben zum Vergleich mit in Haldenbohrungen ermittelten Trocknungsverlusten, siehe Anlage 8.2, /14/.



Die jährlichen Aufhaltungsmengen sind seit Beginn der Aufschüttung der Halde IV tendenziell angestiegen, wie Abbildung 1-2 zeigt. Ein starker Anstieg ist in den Anfangsjahren der Aufhaltung von 1976 bis zum Ende der 1980er Jahre zu verzeichnen. Dieser Trend trägt den Bemühungen um die Entlastung der Vorfluter und der Umstellung auf „trockene“ Aufbereitungsverfahren Rechnung. Mit dem Anstieg der Rückstandsmengen geht eine Beschleunigung des Schüttfortschritts und der Flächenbelegung einher.



**Abbildung 1-2 Rückstandshalde IV, Wintershall: jährlich aufgehaltete Rückstandsmenge im Zeitraum 1976 – 2016.**

### 1.2.2 Aufhaltungsprozess

Die gemäß Rahmenbetriebsplan-Zulassung aus 1975 und 1995 betriebene Rückstandshalde IV ist seit 1976 kontinuierlich in Betrieb. Die Haldenauffahrung erfolgt im Flankenschüttverfahren mit dem Ziel, einen möglichst kompakten Haldenkörper aufzubauen, um ein möglichst optimales Verhältnis von Flächeninanspruchnahme zu aufgehalteter Rückstandsmenge zu erreichen und so die Angriffsfläche für die Atmosphärien und den daraus resultierenden Haldenwasseranfall möglichst klein zu halten. Der Rückstand wird rund um die Uhr über Bandanlagen zur Halde transportiert und dort im Regel-Betrieb über einen Absetzer vom Haldentop aus Vor-Kopf an die bestehende Haldenflanke angeschüttet oder auf dem Haldenplateau aufgehaldet. Der Absetzer wird dabei verschwenkt und quer zur Vorschubrichtung verrückt, so dass die Schüttung auf einer breiten Front voranschreitet bzw. einen Halbkreis nachzeichnet. Bedarfsweise wird der Rückstand auch am Rand des Haldentops abgesetzt und mittels Raupe dosiert auf die Haldenflanke geschoben. In beiden Fällen fließt der Rückstand auf der Haldenflanke bis auf den Haldenuntergrund. Während

Stillstandszeiten der ESTA® (z.B. während regelmäßiger Schachtrevisionen) werden die feuchteren Rückstände aus den Nassaufbereitungsverfahren auf das Haldentop gebracht. Um ein weites Ausfließen des Rückstands zu vermeiden, werden diese Rückstände dort verteilt und nicht über die Haldenböschung abgesetzt.

Die Schüttung der Halde Wintershall erfolgte zunächst von Südwesten nach Nordosten entlang der hessisch-thüringischen Grenze in den oberen, kesselartigen Talbereich des Heergrabens. Östlich der Halde IV ist der Heergraben als trockenes Kerbtal gekennzeichnet, und auch vor Beginn der Aufhaldung ist keine Wasserführung im Talbereich dokumentiert. Nach Genehmigung der Haldenerweiterung aus 1995 schwenkte die Vorschubrichtung der Halde unter Aussparung der Hornungskuppe im Westen nach Norden ein. Die morphologische Wasserscheide des Bornbergs wurde im Teilabschnitt 1a der 1995 genehmigten Haldenerweiterung überschritten und die Schüttung setzte sich in das ebenfalls trockene Kerbtal des Zinkesgrabens fort. Die Schüttung in diesen Bereich erfolgt im Wesentlichen seit 1997. Bis zu diesem Zeitpunkt erfolgte die Fassung der Haldenwässer vollständig im Heergraben (Einzugsgebiet rd. 51 ha), ab Überschreitung der Wasserscheide wurden die Haldenwässer zusätzlich durch ein zweites Rückhaltebecken im Zinkesgraben (Einzugsgebiet rd. 59 ha) gefasst. Die topographische Höhe der Haldenaufstandsfläche im Südteil der Halde (Einzugsgebiet Heergraben) differiert zwischen dem Haldenstützpunkt am Südwestende und dem Heergraben um ca. 140 m. Während die Böschungsoberkante der Südwestseite bei rund 405 m ü. NN liegt, beträgt die Höhe am Heergraben nur rund 265 m, die Fläche ist stark geneigt. Die Höhenunterschiede der Aufstandsfläche im Einzugsgebiet des Zinkesgrabens sind mit ca. 90 m zwischen der westlichen Flanke und dem Zinkesgraben geringer, dementsprechend fällt auch die Neigung der Aufstandsfläche geringer aus.

Die derzeit genehmigte Haldenfläche beträgt 110 ha, die Aufhaldung wird hauptsächlich in Richtung Norden bis voraussichtlich Ende 2019 (Erschöpfung der genehmigten Fläche) fortgesetzt.

Die genehmigte endgültige Haldenhöhe beträgt 520 m über NN; dies entspricht rund 110 – 260 m über Grund. Temporär können zur Vorwegnahme der Setzungs-/ Kompaktionsprozesse im Haldenkörper auch Haldenhöhen von knapp über 520 m ü. NN aufgeschüttet werden. Die größten Haldenhöhen werden im Bereich des Heergrabens erreicht, die geringste Höhe liegt im Bereich der Haldenstation im Südwesten der Halde vor. Hier befindet sich auch die Rampe auf das Haldentop mit Auffahrt und Bandanlage.

Das Rückstandsmaterial wird mit einer Schüttdichte von rund 1,3 bis 1,5 t/m<sup>3</sup> und Böschungswinkeln von 38 bis 40° aufgehaldet. Das Eigengewicht des Rückstands führt zu deren Kompaktion, so dass je nach Auflast Dichten von bis zu 2,1 t/m<sup>3</sup> erreicht werden können, und sich ein Böschungswinkel von 36 bis 38° einstellt. Der Kompaktionsprozess bedingt sowohl das Abflachen der Haldenböschungen als auch das Auftreten starker Setzungserscheinungen und stellenweisen Bildung von Setzungsrissen auf dem Haldentop. Mit Hilfe von Raupen erfolgt deshalb bedarfsweise ein Konturausgleich durch Rückverfüllung des Haldentops mit frischem Rückstand, um das genehmigte Ablagerungsvolumen möglichst vollständig bis zur maximalen Haldenhöhe auszunutzen und die Setzungsrisse zu schließen. Auch auf den Haldenböschungen erfolgt bedarfsweise ein Konturausgleich durch Anschüttung an die bestehende Flanke oder – kleinräumig - mittels Raupen im Schiebetrieb.

### 1.2.3 Bildung von Haldenwässern

Niederschlagsbedingt kommt es an der Rückstandshalde Wintershall zu Lösungserscheinungen im Rückstandssalz, zur Ausbildung einer durch Chloridkarst geprägten Oberflächenstruktur an der Haldenoberfläche (Karren, Schratten, Lösungskavitäten) und zur Bildung von Haldenwässern. Diese werden in rund um die Halde verlaufenden Haldenwasserfassungseinrichtungen (Haldenrandgräben und bereichsweise haldeninternen Entwässerungselementen) aufgefangen, in zwei Haldenwasserbecken im Heer- und Zinkesgraben gesammelt und gemäß den jeweils geltenden Genehmigungen entsorgt. Bei den Haldenwässern<sup>11</sup> handelt es sich um hochmineralisierte Lösungen, deren durchschnittliche Zusammensetzung den nachfolgenden Tabellen zu entnehmen ist:

**Tabelle 1-3      Durchschnittliche Zusammensetzung des Haldenwassers Rückhaltebecken „Heergraben“- Hauptbestandteile (Mittel aus den Jahren 2009 bis 2015)**

Parameter	Mittelwert [g/l]	Standardabweichung [g/l]
Na <sup>+</sup>	79	15
K <sup>+</sup>	20	3
Mg <sup>2+</sup>	30	9
Cl <sup>-</sup>	171	15
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	75	9

**Tabelle 1-4      Durchschnittliche Zusammensetzung des Haldenwassers Rückhaltebecken „Zinkesgraben“- Hauptbestandteile (Mittel aus den Jahren 2009 bis 2015)**

Parameter	Mittelwert [g/l]	Standardabweichung [g/l]
Na <sup>+</sup>	52	7
K <sup>+</sup>	24	3
Mg <sup>2+</sup>	48	6
Cl <sup>-</sup>	181	17
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	81	10

Die in den Haldenwasserbecken Heergraben und Zinkesgraben gefassten Haldenwässer unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Zusammensetzung und werden daher separat dargestellt.

<sup>11</sup> Trotz der Tatsache, dass es sich bei den Haldenwässern um Salzlösungen handelt, wird der Begriff „Haldenwasser“ als bergbauüblicher Begriff im Folgenden weiter verwendet.

Die Haldenwässer des Zinkesgrabens weisen im Vergleich zum Heergraben höhere Kalium-, Magnesium- und Sulfatkonzentrationen bei gleichzeitig geringeren Natriumkonzentrationen sowie in Folge dieser Zusammensetzung höhere Dichten auf, wie auch Tabelle 1-5 im direkten Vergleich für den Monat Oktober 2014 (Zeitpunkt der Durchführung der Haldenbohrung) zeigt. Ursache hierfür ist die unter der Halde befindliche Wasserscheide des Bornbergs, die zu einer räumlichen Trennung der Einzugsgebiete beider Haldenbecken und der verschiedenen alten Haldenbereiche führt (siehe Kapitel 1.2.2).

Im „jüngeren“ Schüttbereich des Zinkesgrabens wird das Haldenwasser durch das Austreten des entwässerbaren Anteils der mit aufgehaldeten anhaftenden Porenlösung („Restfeuchte“) beeinflusst. Zusätzlich werden die in geringer Menge im Rückstand vorhandenen leichtlöslichen Kalium- und Magnesiumverbindungen an der Haldenoberfläche rasch ausgewaschen und mit dem Haldenwasser abgeführt. Im Einzugsgebiet des Heergraben haben diese Prozesse im Althaldenbereich dahingegen vor längerer Zeit begonnen und haben an Intensität abgenommen bzw. sind im sickernwasserbeeinflussten Randbereich abgeschlossen (zur Bildung selektiv abgelagter Bereiche im Haldenkörper siehe Kapitel 4.3.3.1.2).

**Tabelle 1-5: Zusammensetzung der Haldenwässer in den Haldenwasserbecken Heer- und Zinkesgraben, Monatsanalyse Oktober 2014 /16/.**

Mess- stelle	Dichte	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Br <sup>-</sup>
	[g/cm <sup>3</sup> ]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]
<b>Zinkes- graben</b>	1,276	23.594	59.010	44.101	77	180.900	81.579	201	619
<b>Heer- graben</b>	1,249	16.253	85.368	23.151	124	164.990	66.530	153	296

Die Beschaffenheit der Haldenwässer inklusive der Neben- und Spurenbestandteile ist in Band 1.1.2 der Antragsunterlage ausführlich erläutert.

Die Entstehung der Haldenwässer ist insbesondere vom Niederschlagsanfall und dem bei der Aufhaltung im Rückstand verfügbaren Porenwasser abhängig; weitere Einflussfaktoren sind Evaporation und Restinfiltration in den Haldenuntergrund. Das auf die Rückstandshalde auftreffende Niederschlagswasser durchsickert den Rückstandskörper. Ein Oberflächenabfluss ist für andere (Alt-)Halden belegt, wurde jedoch an den ESTA-Rückstandshalden Hattorf und Wintershall nicht beobachtet. Bedingt durch die Löslichkeit der Rückstandssalze kommt es beim Durchsickern des Haldenkörpers zu einer Aufsatzung des Niederschlags und somit zur Volumenvergrößerung. Durch Hydratisierungsprozesse der im Rückstand enthaltenen Phasen kann es – je nach Anteil der hydratisierungsfähigen Phasen – weiterhin zur Einbindung von Niederschlagswasser kommen. Werden diese jedoch aufgelöst, so wird das eingebundene Wasser ebenfalls freigesetzt. Durch die Sickerzeiten des Wassers innerhalb des Haldenkörpers kommt es zu einem gegenüber dem Niederschlagsgeschehen stark vergleichmäßigten Anfall von Haldenwässern im Haldenwasserfassungssystem (Pufferwirkung). Der aktuelle Kenntnisstand zur Entstehung der Haldenwässer und zu deren

Einflussgrößen sowie eine Prognose der künftigen Haldenwasser- Mengenentwicklung sind der Haldenwasserbilanz (Band 1.3 der Antragsunterlage) zu entnehmen.

#### **1.2.4 Haldenkörperverhalten gemäß der bisherigen Kenntnislage**

Das Haldenkörperverhalten der ESTA-Rückstandshalde Hattorf und der Rückstandshalde Wintershall wird nach den bislang vorliegenden Erkenntnissen maßgeblich durch folgende Einflussfaktoren bestimmt:

- Stoffliche Eigenschaften des Rückstands (chemische und mineralogische Zusammensetzung, Löslichkeit der Mineralphasen, Körnungskennlinie, Rohdichte, Schüttwinkel, Porosität, Permeabilität, viskoplastisches Verformungsverhalten des Rückstands<sup>12</sup> /3/)
- Standorteigenschaften (Witterungs- und Klimabedingungen, Untergrundbeschaffenheit)
- Aufhaldungsprozess (Schüttverfahren, Rückverfüllung, Kontinuität, Homogenität des Materials, Rückstandstemperatur bei Aufhaltung)

Bedingt durch den Schüttvorgang bildet sich im Rückstandskörper während der Aufhaltung eine Primärstruktur aus, die einer Schichtung vergleichbar ist. Durch das Herunterfließen des Rückstands an der Flanke und das Schwenken des Absetzers entstehen einzelne Schüttungen, die einander überlagern, wobei ältere Rückstände von jüngeren überdeckt werden. Aus kurzzeitigen Schwankungen der Zusammensetzung (z.B. unterschiedlich hohe Beimengungen an schwer- und unlöslichen Komponenten, i.W. Ton) können Farb- und/oder Materialunterschiede resultieren, die innerhalb des Haldenkörpers als optische Inhomogenitäten auftreten. Liegt der Rückstand längere Zeit unter Atmosphäreneinfluss an der Oberfläche, kommt es aufgrund der Auflösung der löslichen Salzkomponenten zu einer Anreicherung der in geringen Anteilen vorhandenen schwer- und unlöslichen Bestandteile. Bei nachfolgender Überschüttung und Kompaktion bleiben diese Anreicherungen als dunkle Bänder in Bohrkernen erkennbar (siehe Anlage 3 und Abbildung 5-2).

Nach der Ablagerung unterliegt der Rückstand unter dem Einfluss der Atmosphären einer zeitabhängigen Veränderung durch Lösung und physikalische und chemisch-mineralogische Umwandlungsprozesse. Daraus resultiert die Ausbildung eines Sekundärgefüges.

Der bisherige Kenntnisstand zum chemisch-physikalischen Haldenkörperverhalten wurde durch die in 2013/14 am Standort Hattorf durchgeführten Haldenbohrungen bestätigt und erweitert /2/. Er wird nachfolgend kurz zusammengefasst:

Im Rahmen des Genehmigungsverfahrens zur Haldenerweiterung Hattorf wurde die ESTA-Rückstandshalde Hattorf mit Hilfe von zwei Vertikal- und drei Horizontalbohrungen in unterschiedlich alten Bereichen erkundet, um das Haldenkörperverhalten zu analysieren.

Die Bohrungen tragen die Bezeichnungen

---

<sup>12</sup> Steinsalz besitzt sowohl viskose als auch plastische Eigenschaften. Es verformt sich unter einer gewissen Beanspruchung irreversibel durch Kriechen /27//27/.

- B 97/2013 HA (Vertikalbohrung, Endteufe 100 m)
- B 98/2013 HA (Vertikalbohrung, Endteufe 102 m)
- B 99/2013 HA (Horizontalbohrung, Endteufe 101 m)
- B 100/2013 HA (Horizontalbohrung, Endteufe 100 m)
- B 104/2013 HA (Horizontalbohrung, Endteufe 117 m).

Es wurden Bohrkern gewonnen und das Kernmaterial auf seine stofflichen Eigenschaften (chemische und mineralogische Zusammensetzung, Dichten, Porositäten, und Durchlässigkeiten) untersucht. Ergänzt wurde das Untersuchungsprogramm durch Vorort-Untersuchungen und Untersuchungen der in den Bohrungen angetroffenen Haldenwässer. Zusätzlich wurden die Ergebnisse der in 1997/98 ebenfalls am Standort Hattorf durchgeführten Haldenbohrungen (jeweils eine Vertikal- und Horizontalbohrung) ausgewertet und mittels der neu gewonnenen Ergebnisse interpretiert.

Bis zur Durchführung der Bohrungen bestand die Modellvorstellung, dass sich innerhalb der Halde in Folge von Kompaktion und Rekristallisation ein gering durchlässiger Haldenkern ausbildet. Der Wasserhaushalt der Halde spielt sich in einem durchlässigeren Haldenmantel ab; dort finden Lösungs- und Umwandlungsprozesse statt. Diese Modellvorstellung wurde anhand des nachfolgend dargestellten, festgelegten Kriterienkatalogs, der sich an den Untersuchungen am Standort Hattorf aus 1998 orientierte und aufgrund zusätzlich angewandter Untersuchungsmethoden erweitert wurde, überprüft:

1. beobachtete Zuflussmengen und -bereiche/Chemismus der Zuflüsse
2. Ergebnisse der Dichte- und Porositätsbestimmung, berechnete Sättigungen
3. Durchlässigkeiten
4. Poren- und Kristallwasseranteile am Gesamtwassergehalt, Zusammensetzung des Rückstands.

Im Ergebnis wurden die oben erläuterte Modellvorstellung und das Vorhandensein eines gering durchlässigen Haldenkerns bestätigt. Um der zeitabhängigen Veränderung des Rückstandskörpers Rechnung zu tragen, wurde das Modell nach Auswertung der Haldenbohrungen um eine Übergangszone zwischen Mantel und Kern erweitert, deren Breite vom Alter des jeweiligen Rückstandsbereichs abhängig ist /2/.

Im Ergebnis der Haldenbohrungen lässt sich das Haldenkörperverhalten kieseritischer Steinsalzhalde<sup>13</sup>, zu denen die Halde Hattorf und Wintershall gehören, wie folgt charakterisieren:

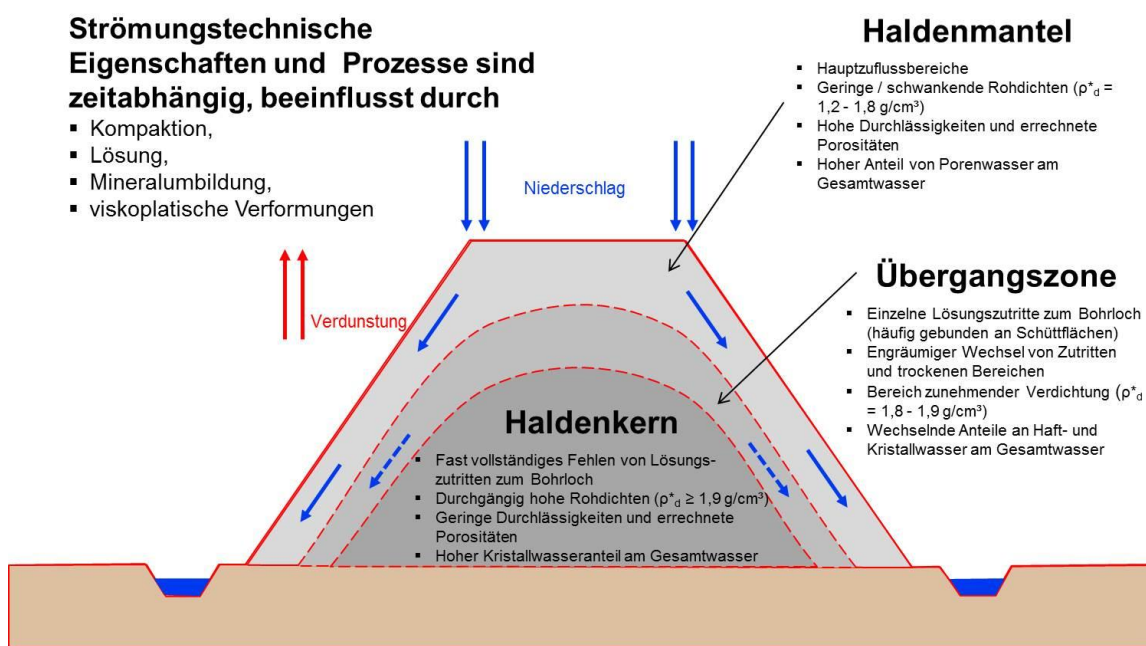
- Das Haldenkörperverhalten und damit die Ausbildung des Haldenkerns sind zeitabhängig und werden wesentlich durch Kompaktion des Haldenkörpers, Lösungsprozesse und Mineralumwandlungen beeinflusst.

---

<sup>13</sup> Rückstandshalde mit mind. 5% Kieseritanteil im Rückstand. Da der Kieseritgehalt einer Halde aufgrund des spezifischen Wasserbindevermögens der Hydratstufen den Wasserhaushalt der Halde beeinflussen kann, wird zwischen Steinsalzhalde ohne nennenswerte Kieseritanteile und kieseritischen Steinsalzhalde unterschieden.

- Wasserbewegungen im Haldenkörper finden bevorzugt im Haldenmantel und bis zum Abschluss der auflastbedingten Kompaktionsvorgänge untergeordnet auch in der Übergangszone statt.
- Der Haldenkern weist aufgrund der vorgenannten Prozesse geringe Porositäten und Durchlässigkeiten auf.
- Die aufgehaltete Restfeuchte wird selbst im stark verdichteten Haldenkern nicht vollständig ausgetragen, sondern bleibt teils als Haft-, teils als Kristallwasser gebunden.
- Horizontale Durchlässigkeiten im Haldenkörper übersteigen vertikale um ein Vielfaches. In Folge dessen kommt es im Zusammenhang mit der tiefenabhängigen Zunahme der Dichten und generellen Abnahme der Durchlässigkeiten zur Ausbildung schwebender Haldenwasserspiegel und einem Abfließen der Haldenwässer in der Haldenmantelzone.
- Überschüttete alte Haldenoberflächen (Schüttflächen) wirken zunächst als initiale Wegsamkeiten für Haldenwasser. Diese werden aber mit zunehmender Kompaktion verschlossen und haben dann keine hydraulische Wirksamkeit mehr.
- Mineralumwandlungen finden im gesamten Haldenkörper statt. Die Neubildung von Sekundärphasen wurde belegt; In Randbereichen erfolgt bevorzugte Auslösung von Wertstoff-Resten und Sekundärbildungen.

Die Charakteristika der einzelnen Zonen innerhalb des Haldenkörpers sind der nachfolgenden Abbildung 1-3 zu entnehmen.



**Abbildung 1-3 Modellvorstellung des Haldenkörpers, schematisch /2/**

Die altersabhängigen Breiten der jeweiligen Zonen wurden für die Horizontalbohrungen ausgewertet und für die Übergangs- und Haldenmantelzone jeweils eine mittlere Breite von 45 m ausgewiesen (vgl. Tabelle 1-6). Dieser Wert fand ebenso Eingang in die technische

Planung wie auch - aufgrund der Altersabhängigkeit der Zonierung - die maximal festgestellten Breiten der Zonen. Konkret wurden diese bei den Festlegungen zur Positionierung von haldeninternen Fassungs- und Entwässerungselementen im Bereich der Haldenerweiterungsfläche Hattorf im dort derzeit durchgeführten Planfeststellungsverfahren verwendet.

**Tabelle 1-6: Breite von Haldenmantel und Übergangszone sowie erbohrter Haldenkernbereich/2/.**

Bohrung Nr.	Haldenmantel			Übergangszone			Haldenkern		
	von [m]	bis [m]	Breite	von [m]	bis [m]	Breite	von [m]	bis (erbohrt) [m]	Breite (erbohrt)
B 97/2013 HA	0	<b>36</b>	36	> 36	<b>62</b>	26	> 62	100	38
B 98/2013 HA	0	<b>68</b>	68	> 68	<b>78</b>	10	> 78	102	24
B 99/2013 HA	0	<b>42</b>	42	> 42	<b>68</b>	26	> 68	101	33
B 100/2013 HA	0	<b>52</b>	52	> 52	<b>97</b>	45	> 87	100	13
B 104/2013 HA	0	<b>42</b>	42	> 42	<b>102</b>	60	> 100	117	17

Anhand der Erkenntnisse aus 1998 (/25/) sowie der durchgeführten Haldenbohrungen am Standort Hattorf (/2/) wurden die Fließrichtungen in der Halde wie folgt beschrieben:

Im Haldenkörper kommt es bereits während der Aufhaldung und unmittelbar danach aufgrund der dem Rückstand anhaftenden Prozesslösung zu Rekristallisationsprozessen, die ein Verfestigen des losen Schüttguts auslösen – eine feste Kruste entsteht innerhalb kürzester Zeit. Das auf den Haldenkörper auftreffende Niederschlagswasser versickert im Bereich des Haldentops und der Haldenflanken, ein Oberflächenabfluss hingegen ist untypisch an in Betrieb befindlichen Halden. Gealterte Haldenoberflächen sind stark zergliedert und zeigen einen typischen Chloridkarst-Formenschatz, bestehend aus Salzkarren und –schratten sowie runden Lösungskavitäten, die als bevorzugte Fließwege fungieren und die die Infiltration in die Halde begünstigen. Der Niederschlag besitzt beim Eindringen in den Haldenkörper ein hohes Lösungspotenzial, sättigt sich während der Perkolation durch den Rückstand unter Lösung des Materials zunehmend auf und trägt so stets zur Weiterentwicklung der bevorzugten Fließbahnen bei. Deren Orientierung folgt der Schwerkraft, jedoch ist die senkrechte Durchlässigkeit durch die verdichteten Bereiche im Haldeninneren mit zunehmender Tiefe immer stärker gehemmt. Die Verdichtung erfolgt in Folge auflastbedingter Kompaktions- und Setzungserscheinungen und führt zu einer annähernd oberflächenparallelen Dichtezonierung mit Dichten im Haldentiefsten, die vergleichbar zu Steinsalz in der Lagerstätte sind. Hinsichtlich der verminderten Durchlässigkeit kann auch ein Einfluss der im gesamten Haldenkörper ablaufenden Hydratisierungs- und chemischen Umwandlungsprozesse nicht ausgeschlossen werden. Die horizontalen Durchlässigkeiten übersteigen, wie geophysikalische Bohrlochmessungen zeigten, die vertikalen Durchlässigkeiten um ein Vielfaches, weshalb sich im Haldenkörper schwebende Haldenwasserspiegel auf den kompakteren Kernbereichen einstellen. Es kommt innerhalb des Haldenkörpers zu einem



seitlichen Abfließen in Bereichen mit geringerer Dichte unterhalb der Haldenböschungen. Aus dem Oberflächenbereich nachströmendes Niederschlagswasser folgt dann den bereits angelegten Fließbahnen und entwickelt diese durch Lösung weiter, so dass im Bereich unterhalb der Haldenflanken ein Netz von miteinander verbundenen Poren in einer rekristallisierten, kompakten Matrix entsteht. Die Poren stellen bevorzugte Wegsamkeiten für die Niederschlagswässer dar. Gleichzeitig verarmt der Haldenmantelbereich aufgrund der nachhaltigen Durchströmung mit Haldenwasser an leichtlöslichen Nebenbestandteilen, was anhand des Verhältnisses von Poren- zu Kristallwasser im Tiefenprofil beobachtet und mittels chemischer und mineralogischer Analytik nachgewiesen wurde. Hieraus resultieren Veränderungen der Haldenwasserzusammensetzung mit zunehmender Haldenalteration, wie sie für die Halde Wintershall in den Rückhaltebecken Heer- und Zinkesgraben beobachtet werden (siehe Kapitel 1.2.3). Aufgrund der vorstehend erläuterten Modellvorstellung ist davon auszugehen, dass die Haldenwasserzusammensetzung durch diejenigen Haldenwässer dominiert wird, die den Mantelbereich durchströmen. Der Anteil der aus tieferen Haldenbereichen zuströmenden Lösungen ist demgegenüber aufgrund der vorgenannten Charakteristika der Übergangszone, und insbesondere aufgrund der zunehmenden Verdichtung in diesem Bereich - vergleichsweise gering, wie die Zuflussmessungen in den Bohrungen am Standort Hattorf gezeigt haben. Das Vorhandensein von Kalium und Magnesium in einer dem frischen Rückstand vergleichbaren Größenordnung im Haldenkern ist ein zusätzlicher Beleg dafür, dass die Bereiche keiner nachhaltigen Durchströmung unterlagen. Somit haben die inneren Haldenbereiche, deren chemische Zusammensetzung weitgehend derjenigen des frischen Rückstands entspricht, nur geringen Einfluss auf die Zusammensetzung des entstehenden Mischwassers. Deshalb ist in der Nachbetriebsphase - mit einiger Verzögerung nach Einstellung der Beschüttung - insgesamt mit einer Abnahme der Kalium- und Magnesiumgehalte zu rechnen, selbst dann, wenn bei fortschreitender Auflösung des Haldenkörpers auch die Randbereiche des Kerns in den Einflussbereich von Lösungsprozessen gelangen.

Im Zusammenhang mit der geplanten Erweiterung der Rückstandshalde Hattorf wurden auch Aussagen zur Anschüttung der Erweiterung an den Rückstandskörper und sich daraus ergebenden Konsequenzen für das Haldenkörperverhalten getroffen. Im Hinblick auf die Frage nach der Eignung des Haldenkörpers als Baugrund wurde festgestellt, dass der bestehende Haldenkörper und insbesondere dessen Haldenflanken aus geotechnischer Sicht für eine Überschüttung im Zuge der geplanten Haldenerweiterung geeignet sind. Hinsichtlich der Frage zu den Auswirkungen der Haldenerweiterung auf den Sickerwasserabfluss im Haldenmantelbereich wurden folgende Ergebnisse abgeleitet: Durch die Anschüttung der Erweiterungsfläche an die bestehende Halde werden die ehemaligen Haldenoberflächen sukzessive dem Atmosphäreneinfluss entzogen. Anfänglich eventuell bestehende Wegsamkeiten innerhalb des Haldenkörpers werden bei zunehmender Überdeckung und Kompaktion verschlossen. Der ehemalige Haldenmantelbereich entwickelt sich in einem Zeitraum von mehreren Jahren zunächst in die Übergangszone. Diese wird dann mit zunehmender Kompaktion verkleinert und der ehemalige Randbereich wird zum Kernbereich. Die überschüttete ehemalige Oberfläche wird als Schüttfläche im Querschnitt erkennbar bleiben. Nach den Erkenntnissen der Haldenbohrungen am Standort Hattorf kommt diesen Schüttflächen jedoch keine Entfestigungs- oder Trennwirkung zu, und von einem Einfluss auf die globale Standsicherheit der Halde ist nicht auszugehen.

## 2 Aufgabenstellung und Planung

[WE\_F/U\_H Poppitz]

In der Niederschrift des Scoping-Termins (Az. 34/Hef 76 d 40-11-325-34/22 vom 26.02.2013 /20/ ), welche als Grundlage für die Erarbeitung der Antragsunterlagen zur Haldenerweiterung Wintershall dient, finden sich Festlegungen hinsichtlich Untersuchungsinhalten zu Auswirkungen des Vorhabens auf den Boden und das Grundwasser, die über den in der Tischvorlage zum Scoping durch K+S geplanten Untersuchungsumfang hinausgehen. Dies betrifft insbesondere die Erkundung der zur Überschüttung vorgesehenen Haldenflanke. Es sind konkret die folgenden Untersuchungen beschrieben:

- Beschreibung des Anfalls von Haldenwasser ( Hydratisierung, Auswirkung der Beschüttungstechnik auf den Anfall, Austrittsbereiche aus der Halde (z.B. Haldenkern, Haldenmantelbereich, etc.) (Seite 6).
- „Baugrund im weitesten Sinne ist auch die derzeitige Haldenflanke. Zum Überschneidungsbereich zwischen betriebener Halde und Haldenerweiterung sind Aussagen zu treffen. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die zu überschüttende Haldenflanke einen wasserdurchlässigen Mantelbereich hat und dass sich unlösliche Stoffe angereichert haben. Der Einfluss dieser Faktoren ist zu berücksichtigen.“ (Seite 12)
- „Es sind Angaben zur Durchlässigkeit, Zusammensetzung des heutigen Mantels und Prognosen zu seiner Veränderung bei Überschüttung und Ausbildung von Gleitflächen erforderlich; Gegenmaßnahmen sind zu beschreiben. Zur Erweiterung des Wissensstands bietet sich evtl. eine Bohrung im Bereich des Erweiterungsabschnitts 1 der Rahmenbetriebsplanzulassung von 1995 an, da dort eine Haldenflanke nachträglich überschüttet wurde.“ (Seite 12)
- „Die Haldenwasserfließrichtungen, insbesondere unter Berücksichtigung der Beschüttung im Übergangsbereich zur Altfläche, sind zu beschreiben.“ (Seite 12)
- „Die Auswirkungen der Erweiterung auf den Sickerwasserabfluss im Haldenmantelbereich sind darzustellen und es ist darzulegen, wie das in den Haldenkörper eindringende Niederschlagswasser abgeführt wird“. (Seite 14) /20/

Die im Scoping-Protokoll formulierten Fragestellungen sind im Wesentlichen identisch mit denjenigen des Scoping-Termins zur Haldenerweiterung Hattorf, die die Grundlage für das dortige Untersuchungsprogramm bildeten. Die Fragestellungen wurden bezugnehmend auf die Halde Hattorf im Untersuchungsbericht zu den dort durchgeführten Haldenbohrungen bereits beantwortet; von der grundsätzlichen Übertragbarkeit der Antworten auf den Standort Wintershall ist aufgrund der identischen Aufhaldungstechnik und des vergleichbaren Stoffinventars auszugehen. Die Erkenntnisse sind hier in Kapitel 1.2.4 „Haldenkörperverhalten“ zusammenfassend dargestellt, dort finden sich somit erste Antworten auf die obenstehenden Fragen. Dennoch folgte K+S der Empfehlung, eine zusätzliche Bohrung am Standort Wintershall niederzubringen, deren Ergebnisse im Folgenden ausgewertet werden. Im Fokus der im Scoping-Protokoll formulierten Fragestellungen stand die Untersuchung der überschütteten ehemalige Haldenoberfläche, was in der Planung des Untersuchungsprogramms berücksichtigt wurde.

## 2.1 Festlegung des Bohransatzpunktes

Bei der Wahl des Bohransatzpunktes für die geplante Haldenkörperbohrung wurde die Empfehlung des Scoping-Protokolls, eine Bohrung im Bereich des Erweiterungsabschnitts 1 der Rahmenbetriebsplanzulassung von 1995, niederzubringen, berücksichtigt.

Der im Scoping-Protokoll gegenständliche 1. Erweiterungs- bzw. Teilabschnitt der Rahmenbetriebsplanzulassung 1995 (1. TA) befindet sich im Wesentlichen als schmaler, rd. 40 bis 50 m breiter Streifen an der Nordwestseite der Halde (siehe Tagerissauszug in Anlage 1) und wurde ungefähr ab 1997 beschüttet. Die überschütteten Haldenflanken stammen ungefähr aus den Jahren 1992 bis 1994, woraus Liegezeiten vor der Überschüttung von rd. 4 bis 5 Jahren resultieren.

Unter Berücksichtigung o. g. Randbedingungen sowie der vorhandenen Unterlagen wurde die Erkundung des Haldenkörpers der Halde IV, Wintershall durch eine Horizontalbohrung an der Südostseite der Halde vorgesehen. Die Bohrung trägt die Bezeichnung B 72/2014 WI.

Der Tagerissauszug in Anlage 1.1 zeigt anhand der übereinanderliegenden Aufmaßlinien, dass auch an der Südostseite der Halde im Beschüttungsbereich des RBP 1974 eine Haldenflanke vergleichsweise lange nicht überschüttet wurde. Die ab 1991 digital vorliegenden Schüttstände wurden noch um die Schüttstände 1980, 1982, 1985 und 1988 durch Digitalisieren aus dem Kartenwerk ergänzt. Am gewählten Bohrpunkt wird in rd. 114 m Bohrtiefe die Haldenflanke aus dem Jahr 1982 erreicht, die frühestens 1992 d.h. rd. 10 Jahre später überschüttet wurde. Auch diese Überschüttung erfolgte in nur geringer Mächtigkeit, ein zweites Mal lag die Flanke für rund 4 Jahre offen, bevor in 1996/97 die weitere Beschüttung bis zur heutigen Endkontur erfolgte. Dieser Bohrpunkt war für die Bohrung B 72/2014 WI damit hinsichtlich der Untersuchungsziele, insbesondere der Fragestellung, wie sich eine Überschüttung auf die strömungstechnischen Eigenschaften des Rückstands und Prozesse im Haldenkörper auswirkt, aus Sicht von K+S geeignet, zumal er sich auch im unmittelbaren Bereich der geplanten Haldenerweiterung befindet. Die Bohrstelle konnte haldenseitig vom Haldenrandgraben eingerichtet werden, so dass der Werksverkehr Richtung Übergabestation nur gering beeinflusst wurde.

Die Lage und Anordnung der Bohrung ist dem Übersichtslageplan in Anlage 1.1 sowie dem Längsschnitt A-A im Maßstab 1 : 1000 (Anlage 1.2), und dem Bohrungslängsschnitt im Maßstab 1 : 200 (Anlage 1.3) zu entnehmen, welchem die Schnittpunkte mit den Aufmaßen ehemaliger Haldenflanken zu entnehmen sind. Anlage 1.4 enthält ergänzend einen Längsschnitt durch die Rückstandshalde (Schnitt B-B) im Maßstab 1:2000.

Die Bohrtiefe wurde zunächst mit 125 - 130 m so gewählt, dass die alte Haldenoberfläche, welche im 1. Teilabschnitt der Erweiterung überschüttet wurde, sicher erreicht und Erkenntnisse über die Beschaffenheit des Materials hinter der Schüttgrenze gewonnen werden können. Auch technische Randbedingungen wurden bei der Wahl der Bohrtiefe berücksichtigt; so war diese u.a. auch durch die Dimensionierung des Kompressors begrenzt. Erschwerend kam das Einbringen des Kernrohres hinzu, das nicht, wie bei Vertikalbohrungen, im Freifall zu realisieren ist. Probleme ergaben sich im Zuge der Umsetzung der Bohrung immer wieder, insbesondere aufgrund des Luftspüldrucks (vgl. Kapitel 3). Die tatsächliche Endtiefe von 131 m wurde teilweise mit 2 Großkompressoren erreicht, um den notwendigen Luftspüldruck zu gewährleisten.

Die Schütthistorie der Bohrung ist in der nachfolgenden Tabelle 2-1 aufgeführt. Grundlage dieser Zusammenstellung sind hinsichtlich der Teufenbereiche die Bohrkernansprache und geophysikalischen Strukturuntersuchungen (siehe Kap. 4.3.1 und 4.1.3). Die Alterszuordnung resultiert aus den Darstellungen der Schüttstände im Tageriss (Anlage 1.1) sowie im Längs- und Längenschnitt in den Anlagen 1.2 und 1.3. Insgesamt wurde in der Bohrung Rückstand mit einem Ablagerungsalter von rund 33 bis 19 Jahren aus der Althalde sowie Rückstand aus der 1. Erweiterung nach 1995 mit einem Alter von rund 19 bis 17 Jahren erschlossen.

**Tabelle 2-1: Schütthistorie im Bohrungsbereich**

<b>Teufenbereich in der Bohrung [m]</b>	<b>ungefährer Schüttzeitraum</b>	<b>Alter [a]</b>
131,0 bis 114,3	(1981) bis 1982	33 – 32
114,3 bis 114,0 - Schüttgrenze *)	1982 bis 1991	32 - 23
114,0 bis 105,1	bis 1992	23 - 22
105,3 bis 105,1 - Schüttfläche *)		
105,3 bis 100,5		
100,5 bis 99,8 - Schüttgrenze *)	1992 bis 1995	22 – 19
99,7 bis 45,0	bis 1996	19 – 18
45,0 bis 0,0	bis 1997	18 - 17

\*) gemäß Bohrkernansprache und Strukturuntersuchungen

Die Bohrung wurde durch einen Sonderbetriebsplan (WI 04/14, DVS-Nr.: 3002810, „Werk Werra, Standort Wintershall – Umsetzung eines nachhaltigen Rückstandsmanagements (RM-WI); Untersuchung des Haldenkörpers der Halde IV – Bohrung B 72/2014 WI“) im hier dargestellten Umfang am 13.06.2014 beantragt /15/ und mit Datum vom 02.07.2014 durch das Regierungspräsidium Kassel, Dezernat 34, ohne Nebenbestimmungen genehmigt (AZ 34/Hef-76 d 40-11-325-34/42) /21/.

### 3 Durchführung der Bohrarbeiten und Vorort-Untersuchungen

[WE\_F/U\_GG Braatz]

Die Bohrung B 72/2014 WI wurde als horizontale Rotationskernbohrung mit Luftspülung im Seilkernverfahren niedergebracht. Der Bohrdurchmesser lag bei 146 mm (SK6L-Kernbohrgestänge). Die Entnahme von durchgehenden Proben mit einem Durchmesser von 101 mm erfolgte mittels Seilkernrohr gemäß der Entnahmekategorien A und B nach DIN EN ISO 22475-1 (Bohrungen zur Erhaltung einer guten Kernqualität mit Kernrohr entnommen) im PVC-Liner. Zum Nachweis der Wasserführung bzw. Wasserfreiheit wurde ein Trockenbohrverfahren mit Luftspülung eingesetzt, um möglichst unveränderte, nicht durch Bohrspülung beeinflusste Bohrkerne für weitere Laboruntersuchungen zu erhalten und das Auftreten von Flüssigkeiten im Haldenkörper sicher feststellen zu können. Dazu wurde am Bohrlochmund ein Standrohr gesetzt und der Spalt zwischen Standrohr und Haldensalz einzementiert, um ein Entweichen der zirkulierenden Luftspülung über diesen Spalt zu verhindern.

Die Bohrung und die Bohrlochuntersuchungen wurden zwischen dem 30.09.2014 und dem 10.12.2014 durchgeführt. Die Bohrdokumentation erfolgte gemäß DIN EN ISO 22475-1.

Folgende Untersuchungen wurden vor Ort durchgeführt:

- Beobachtung und Dokumentation von Bohrparametern sowie Zuflüssen während der Bohrung,
- während des Bohrgeschehens regelmäßige Messung und Probenahme des aus der Bohrung austretenden Haldenwassers (Unterscheidung nach Standrohr und Bohr-/Kerngestänge; Menge sowie vor Ort-Parameter Temperatur und Leitfähigkeit),
- Kamerabefahrungen (vgl. Kap.4.1.2),
- geophysikalische Bohrlochmessungen (vgl. Kap. 4.1.3),
- geohydraulische Bohrlochuntersuchungen (vgl. Kap. 4.1.4)

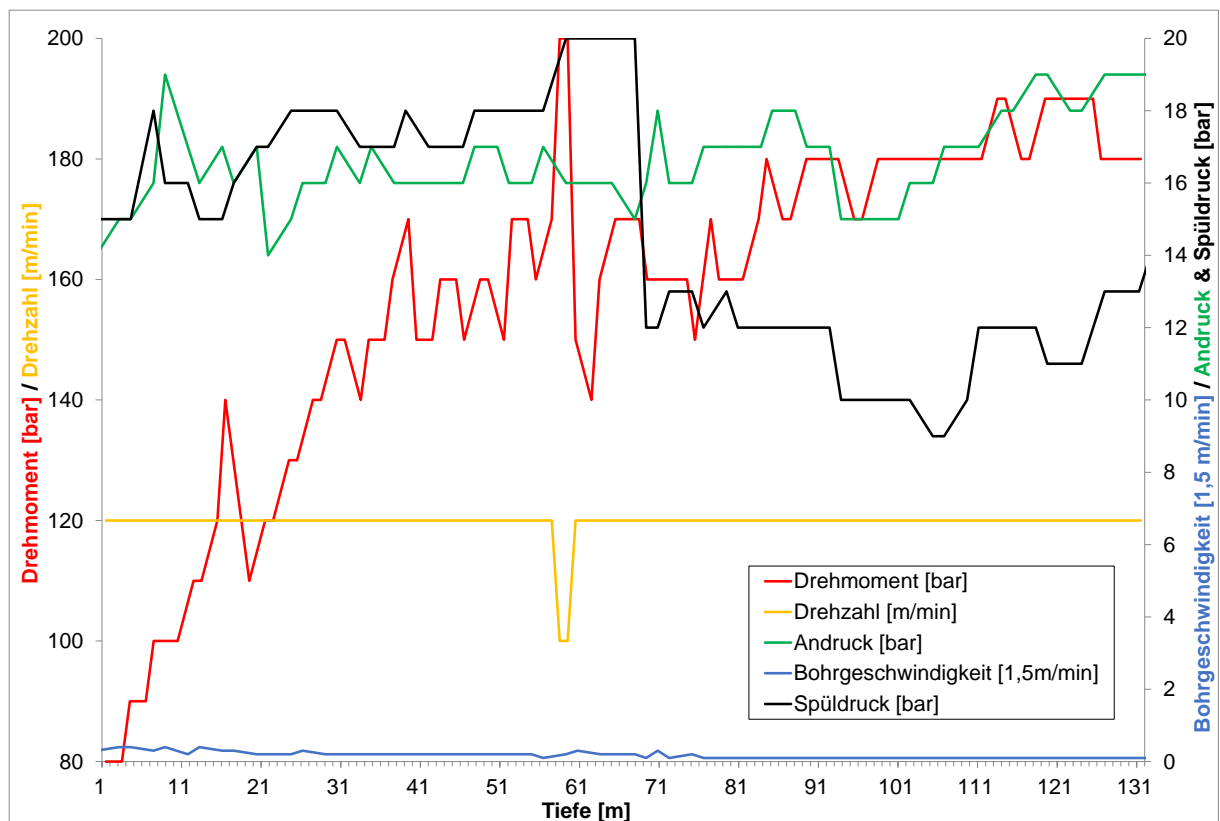
Zusätzlich erfolgte im Zuge der Auslaufmessungen an der Horizontalbohrung B 72/2014 WI eine regelmäßige Entnahme von Haldenwasserproben zur Laboranalyse (vgl. Kap. 4.1.1).

Die Bohrung wurde am 01.10.2014 mit ca. + 6° ansteigend mit Seilkerngestänge mit 146 mm Durchmesser begonnen. Nachfolgend wurde 4,4 m die Bohrung auf 219 mm Durchmesser aufgeweitet und ein Standrohr mit 178 mm Durchmesser gesetzt. Vor jedem Wochenende wurde das Kernrohrgestänge komplett, über Nacht nur wenige Meter, ausgebaut, um ein Festsetzen bzw. „Anbacken“ des Kernrohrgestänges zu vermeiden.

Bei 45,0 m Teufe wurde am 13.10.2014 beim Bohrkronenwechsel ein Defekt am Bohrkopflager festgestellt. Nach längerer Arbeitsunterbrechung und Reparatur des Bohrkopfes wurden die Bohrarbeiten am 23.10.2014 wieder fortgesetzt. Am 24.10.2014 kam es bei einer Bohrtiefe von 59,0 m zum Druckabfall der Luftspülung (von 20 auf 12 bar) und damit zu vermindertem Austrag von Bohrklein, was zu einem Festgehen des Bohrgestänges führte. Das Seilkerngestänge konnte jedoch unter ständigem Drehen geborgen werden. Am 27.10.2014 wurde das Standrohr freigedreht, gezogen und nach entsprechendem Überbohren der Bohrung bis 15,4 m Tiefe verlängert und abgedichtet. In der Kamerabefahrung vom 28.10.2014 konnte keine Ursache für den Druckabfall in der kompakten Bohrlochwandung gefunden werden, im Bereich von 58,5 m wurde aber in der Kamerabefahrung am 14.11. sowie in der Kernansprache eine Schüttfläche identifiziert.

Am 30.10.2014 wurden die Arbeiten aufgrund eines Kompressordefektes bei einer Tiefe von 74,0 m unterbrochen. Mithilfe eines neuen Kompressors (und zeitweise unter Zuhilfenahme des zweiten reparierten Kompressors) konnte vom 03.11.2014 bis zum 12.11.2014 die Endtiefe der Bohrung von 131 m erreicht werden.

Während der Bohrarbeiten wurden die Bohrparameter Drehmoment des Kraftdrehkopfes [bar], Drehzahl der Bohrspindel [1,5m/min], Bohrandruck [bar], Bohrgeschwindigkeit [m/min], Spülungsdruck [bar] meterweise mit der Teufe [m] aufgezeichnet (siehe Abbildung 3-1).



**Abbildung 3-1**      **Aufgezeichnete Bohrparameter der B 72/2014 WI**

## 4 Darstellung und Diskussion der Ergebnisse

### 4.1 Ergebnisse der Vorort-Untersuchungen

#### 4.1.1 Haldenwasser – Mengen und Vorort-Parameter (Untersuchungen während des Bohrgeschehens)

[WE\_F/U\_GG Braatz]

Während der Bohrarbeiten wurden, sofern ein Auslauf aus dem Bohrloch zu verzeichnen war, Messungen der Haldenwassermenge sowie der vor Ort-Parameter Temperatur und Leitfähigkeit durchgeführt und parallel Haldenwasserproben zur Analyse entnommen. Bei den Mengenmessungen wurde der Auslauf aus dem Standrohr und dem Bohrgestänge gesondert erfasst. Das Bohrgestänge (im Ringraum nicht abgedichtet und daher umläufig) mit der Bohrkrone wurde dazu mindestens um 1,0 m vom Bohrlochtiefsten gezogen. Bei dem konstant ansteigenden Bohrloch sind daher Ausläufe aus dem Bohrgestänge auf im Wesentlichen auf lokale Bohrlochzuflüsse im Nahbereich des Bohrlochtiefsten zurückzuführen. Der Auslauf aus dem Standrohr repräsentiert dahingegen einen Summenparameter der Bohrlochzuflüsse bis zur jeweiligen Bohrungstiefe. Kumuliert werden beide Messwerte (Auslauf aus Standrohr und Bohrgestänge) im Folgenden als Auslauf aus dem Bohrloch bezeichnet.

In der Bohrung B 72/2014 WI wurden Wasserzutritte in das Bohrloch ab ca. 15 m festgestellt. Bis zur Bohrungsendteufe wurden Auslaufmengen aus dem Bohrloch zwischen < 1 l/min und max. 3 l/min gemessen. In Abbildung 4-1 sind die Ausläufe aus dem Bohrloch über das Standrohr und aus dem Bohrgestänge (im Wesentlichen Bohrlochtiefstes) über die Teufe aufgetragen. Im Trend ist ein leichter Anstieg der Auslaufmenge aus dem Bohrloch zu verzeichnen. Die lokalen Schwankungen, insbesondere auch die Unterschiede der Messwerte am Ende eines Tages Beginn der Bohrarbeiten am Folgetag, machen jedoch auch den Einfluss des Bohrprozesses (Einbringen von Luftspülung unter Druck) auf die Strömungsprozesse im Nahbereich der Bohrung deutlich.

Ausflüsse aus dem Bohrgestänge wurden lediglich in einer Bohrteufe von 59,0 m sowie im Teufenbereich 104,0 bis 108,5 m festgestellt. Bei der oberen Bohrteufe ist zu berücksichtigen, dass hier das Bohrgestänge bis 21,0 m gezogen war und der Messwert damit nicht als lokaler Zufluss in der Bohrteufe von 59,0 m bewertet werden kann. Der untere Bereich lässt sich mit drei Messindikationen eindeutig als lokaler Zuflusshorizont charakterisieren. Dies wurde u.a. auch durch die geohydraulischen Bohrlochmessungen bestätigt (vgl. Kap.4.1.4).

Die bei der Probenahme gemessenen Temperaturen (T) des Haldenwassers liegen zwischen rd. 12 und 22 °C, im Mittel bei 16 °C (siehe Abbildung 4-1). Es ist davon auszugehen, dass diese durch die kühlere Außenluft, verstärkt durch die Wärmeleitfähigkeit des Bohrgestänges bzw. Standrohres, ggf. aber auch durch eine Wärmeentwicklung beim Bohrprozess beeinflusst sind. Die Temperaturverhältnisse des Haldenwassers im unberührten Haldenkörper dürften dennoch am ehesten die oberen Peak-Werte in der Temperaturkurve widerspiegeln (Messwerte am Ende der täglichen Bohrarbeiten).

Neben der Temperatur wurde im Zuge der Haldenwasserprobenahme während des Bohrgeschehens auch die spezifische elektrische Leitfähigkeit (L<sub>r</sub>) als Vorort-Parameter gemessen. Die Einmessung erfolgte mit einem Handgerät durch die ausführende Bohrfirma.

Mit Ausnahme weniger Messwerte bis in eine Teufe von rd. 56,0 m (23 bis 57 mS/cm) schwankt die spezifische elektrische Leitfähigkeit des auslaufenden Haldenwassers überwiegend in einem Bereich von 70 bis 90 mS/cm.

Nach Beendigung der Bohrarbeiten am 14.11.2014 wurde eine Kamerabefahrung und anschließend eine Messung der Haldenwassermenge sowie der Vorort-Parameter (2,3 l/min, 170 mS/cm, 14 °C) durch K+S durchgeführt. Die Größenordnung der gemessenen spezifischen elektrischen Leitfähigkeit von 170 mS/cm bestätigte sich auch nachfolgend in den im Zusammenhang mit hydraulischen Bohrlochversuchen durchgeführten Haldenwasseruntersuchungen (siehe Kap.4.1.4 und 4.2.2.3). Es wird davon ausgegangen, dass die Leitfähigkeits-Messwerte seitens der Bohrfirma durch einen Defekt des Messgerätes oder eine falsche Kalibrierung beeinflusst und lediglich für eine qualitative Bewertung zu verwenden sind. Die realen Leitfähigkeiten dürften rd. 90 bis 110 mS/cm über den Messwerten liegen. Die gemessenen pH-Werte liegen zwischen 6,2 und 7,1 und stimmen mit den in der Laboranalyse ermittelten Werten von 5,9 bis 6,8 gut überein.



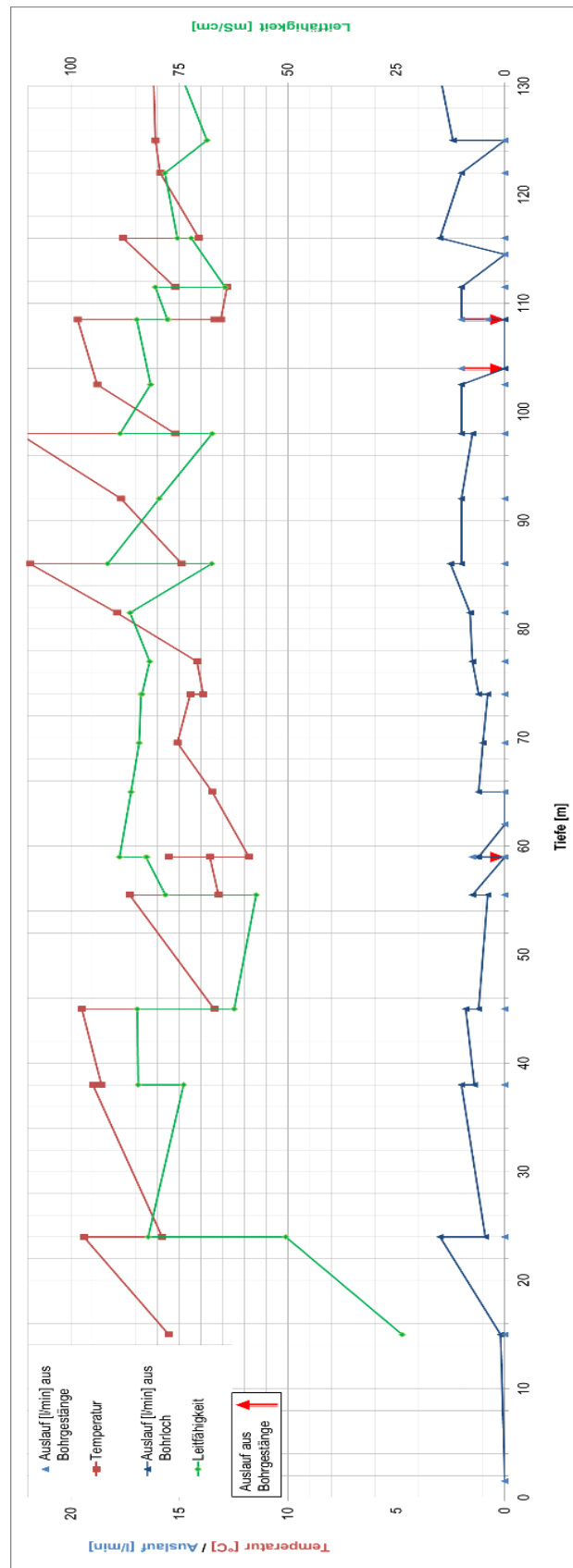


Abbildung 4-1

**Gemessene frei auslaufende Wassermengen und Vorortparameter der B 72/2014 WI**

### 4.1.2 Ergebnisse der Kamerabefahrungen

[WE\_F/U\_H Poppitz]

In der Bohrung wurden zwei Kamerabefahrungen durch die Firma Faecal Entsorgungstechnik Ruhl GmbH & Co. KG durchgeführt. Die erste Befahrung am 28.10.2014 fand während einer Unterbrechung der Bohrarbeiten aufgrund von Druckverlusten der Luftspülung statt und erreichte die bis dahin anliegende Bohrtiefe von 59,0 m. Es konnte in der durchgehend kompakten Bohrlochwandung keine Ursache für den Druckverlust erkannt werden, im Bereich von 58,5 m wurde aber in der Kamerabefahrung am 14.11.2014 sowie in der Kernansprache eine Schüttfläche identifiziert. Am 14.11.2014 wurde das zuvor auf freie Zugänglichkeit getestete Bohrloch erneut befahren (Check-Trip, Ein- und Ausbau des Seilkernrohrgestänges bis auf Endtiefe von 131 m). Bei 113,7 m musste die Kamerabefahrung beendet werden, da ein abgebrochenes Kernstück die Weiterfahrt des Kamerawagens versperrte.

Anhand der Videoaufzeichnung der Befahrung aus Haldenbohrungen in Hattorf wurde durch K+S eine Systematik zur Auswertung aller Bohrungen im Rückstandssalz anhand von Vergleichsbildern erstellt und bei der Bohrung B 72/2014 WI zur Auswertung herangezogen. Diese sowie die vergleichende graphische Darstellung der Ergebnisse beider Kamerabefahrungen in der B 72/2014 WI sind in Anlage 4 enthalten. An dieser Stelle ist darauf hinzuweisen, dass die Auswertung der Kamerabefahrungen sich bevorzugt auf qualitative Hinweise bezieht; eine quantitative Aussage über zufließende Wassermengen ist ohne Berücksichtigung bzw. einen Abgleich mit den gemessenen Auslaufmengen nicht zu treffen. Im Falle der Bohrung B 72/2014 WI unterschied sich der optische Eindruck über die Menge der dem Bohrloch zutretenden Wässer insbesondere in den haldenrandnahen Bereichen von den in den Packertests gewonnenen Erkenntnissen über Zuflussmengen. Eine mögliche Ursache wird in der Beeinflussung der Bohrlochwände durch den Bohrprozess insbesondere im randnahen Bereich gesehen - hier liegen die größten Porositäten bei gleichzeitig geringster Festigkeit des Materials vor. Weitere mögliche Einflüsse sind die Bildung von Kristallisaten im randnahen Temperaturschwankungsbereich sowie das „Ausblasen“ des Bohrlochs unmittelbar vor der Kamerabefahrung zur Entfernung von Bohrklein im Bohrloch.

Die Ergebnisse der Kamerabefahrungen an den Standorten Hattorf und Wintershall können wie folgt zusammengefasst werden:

- Hinsichtlich des generellen Erscheinungsbildes in der Kamerabefahrung und der beobachteten Charakteristika sind die Bohrungen am Standort Hattorf und Wintershall vergleichbar. Lediglich die Farbe der Bohrlochwandungen unterschied sich: die Bohrlochwände der B 72/2014 WI waren mit braunen Ablagerungen bedeckt, was das Erkennen von überschütteten alten Haldenoberflächen (in Hattorf i.d.R. identifizierbar über Farbunterschiede) erschwerte.
- Wasserzutritte in den Bohrungen sind jeweils nicht auf einen einzelnen, konkreten Tiefenbereich zurückzuführen, sondern auf mehrere Bohrlochabschnitte, die sich mit trockenen, massiven Bohrlochbereichen abwechseln. Der Wechsel fand häufig engräumig innerhalb kurzer Bohrlochabschnitte statt.
- Wasserzutritte erfolgten in den Bohrungen hauptsächlich über (Makro-) Poren. Wasserzutrittsbereiche waren außerdem gekennzeichnet durch wellige

Bohrlochwände oder Ausbrüche, aus Poren austretenden Schaum, Tropfstellen an der Bohrlochdecke in Horizontalbohrungen.

- In den Horizontalbohrungen wurden häufig und verteilt über alle Tiefenbereiche auch Schaumbildungen an Bohrlochwänden und Decke beobachtet, aus welchen kein erkennbarer Wasserabfluss erfolgte. Hierbei handelte es sich offenbar um Zutritte geringer Wasser- und Luftmengen aus dem luftgefüllten Porenraum der ungesättigten Bereiche des Haldenkörpers. Sie sind Indiz für die im Haldenkörper stattfindenden Strömungsprozesse in einem Zwei-Phasen-System bestehend aus Haldenwasser und Luft, die insbesondere durch die äußeren klimatischen Einwirkungen und Kompaktionsprozesse des Rückstands selbst beeinflusst werden. Strömt Luft über die feuchten Bohrlochwände in das Bohrloch aus, kommt es offenbar zu Schaumbildung. Das Vorhandensein von Schaumstellen ohne erkennbaren Lösungszufluss wurde deshalb nicht als Indiz für einen Wasserzutritt gewertet. Traten Tropfstellen hinzu, oder fand aus der Schaumstelle ein erkennbarer Lösungszufluss statt, wurde der Bereich als Zutrittsbereich erfasst.
- In den Bohrungen wurden Schüttflächen beobachtet – überschüttete alte Haldenoberflächen, die in den Kamerabefahrungen als millimeter- bis zentimeterbreite flache bis zur Tiefe (Horizontalbohrungen) hin geneigte dunkle Bänder erkennbar waren. Die Erkennbarkeit von Schüttflächen in der Bohrung B72/2014 in der Kamerabefahrung war durch die dunkle Färbung der Bohrlochwände erschwert; es ist daher zu erwarten, dass weitere, nicht beobachtete Schüttflächen vorhanden waren. Die in der Bohrung identifizierten Schüttflächen sind in Anlage 4.2 eingetragen. Bestätigt wurde das Vorhandensein einer markanten Schüttfläche mit Farbwechsel des Rückstands bei rund 100,3 m Teufe. Eine weitere deutlich erkennbare Schüttfläche lag bei rund 54,9 – 55,2 m (bestätigt in beiden Kamerabefahrungen).
- Die beobachteten Wasserzutrittsbereiche sind in allen Bohrungen in Hattorf und Wintershall häufig, aber nicht zwingend, lokal eng begrenzt an Schüttflächen gebunden. Die Zutritte traten dabei entweder ober- oder unterhalb der Schüttfläche auf, häufig auch direkt an der Fläche selbst. In der Bohrung B 72/2014-WI bei 100,3 m Teufe wurde eine markante Schüttfläche erkannt, deren Verlauf durch Schaumstellen und Wasserzutritte an der Bohrlochwand nachgezeichnet wird (Kamerabefahrung am 14.11.2014). Es schließt sich ein Zutrittsbereich von 100,4 bis 104,2 m an. Die Schüttfläche wurde auch in der Kernansprache bestätigt (vgl. Anlage 2). Möglicherweise waren auch im Bereich weiterer Lösungszutritte zu den Bohrungen, in B 72/2014 WI beispielsweise bei 77,4 bis 78 m Schüttfläche(n) vorhanden, die jedoch in den Kamerabefahrungen nicht erkannt wurden. Grundsätzlich ist jedoch nicht an jeder identifizierten Schüttfläche auch ein Lösungszutritt zu beobachten, wie beispielsweise in B 72/2014 WI im Bereich von 50,2 m oder 58,5 m Teufe oder bei 114,1 m (Schüttfläche identifiziert in Kernansprache, in Kamerabefahrung trockenes Bohrloch, s. unten). Die Trennflächenerfassung der Geophysikalischen Bohrlochmessungen weist jedenfalls deutlich mehr Schüttflächen aus, als in der Kamerabefahrung erkannt wurden (vgl. Anlage 4.2). Auch in der Kernansprache wurden mehr Schüttflächen als in der Kamerabefahrung verzeichnet (vgl. Anlage 2);

und auch sie korrespondieren teilweise mit in der Kamerabefahrung beobachteten Wasserzutrittsbereichen (z.B. bei 31,2 m Teufe).

- Ab rund 113,5 m wurde in Bohrung B 72/2014 WI kein Wasser mehr auf der Bohrlochsohle festgestellt, das Bohrlochtiefste war offenbar frei von Lösungszutritten.
- Im Vergleich zu den in Hattorf beispielsweise in Bohrung B 99/2013 HA beobachteten Lösungszutritten sind die Zutritte in der Bohrung B 72/2014 WI deutlich schwächer und wenig nachhaltig ausgebildet. Die visuell festgestellten Haupt-Zutrittsbereiche, erkennbar an vermehrten aktiven Schaumstellen, lagen bei 77,4 bis 78,0 m und von 100,4 bis 104,2 m (vgl. Anlage 4.2). Der Zutrittsbereich bei 77,4 bis 78,0 m wurde in den einige Tage später durchgeführten Packertests aber nicht als relevanter Zutritt bestätigt (Test 4: 0,1 l/min, siehe Kapitel 4.1.4); Der Zutritt bei 100,4 bis 104,2 m hingegen wies im Packertest (Test 2) mit 0,9 l/min die zweithöchste Zutrittsmenge aus. Bei den weiteren festgestellten Zutritten handelt es sich um Schaum- und Tropfstellen mit noch geringerer Intensität, oft ohne erkennbaren Lösungszutritt zum Bohrloch. Zudem ist zwischen den beiden Befahrungen am 28.10.2014 und dem 14.11.2014 eine deutliche Abnahme in der Intensität der Schaum- und Tropfstellen ersichtlich (siehe Anlage 4.2): Am 28.10. aufgefundene Tropfstellen wurden nicht bestätigt, der von beiden Kamerabefahrungen erschlossene Bereich war am 14.11. überwiegend trocken, die Schaum- bzw. Tropfstellen waren offenbar nicht nachhaltig. Der bei den Packertests identifizierte stärkste Zutrittsbereich zwischen rd. 15 und 35 m Teufe ist in der Kamerabefahrung nicht als Haupt-Zutrittsbereich identifiziert, mit Ausnahme von Tropfstellen im Bereich von rd. 22 m und unterhalb von 30 m Teufe. Auch bei den Bohrarbeiten war keine derartige Beobachtung gemacht worden. An dieser Stelle sei nochmals auf die eingangs erläuterten Probleme bei der quantitativen Einschätzung der Lösungszutritte hingewiesen. Zudem erfolgten die Packertests im vorderen Bohrlochbereich rd. 2 Wochen nach der letzten Kamerabefahrung und der Beendigung der Bohrarbeiten am 12.11.; eine zwischenzeitliche Veränderung der Fließwege im Sinne der Einstellung eines stationären Zustands ist anzunehmen .
- Mit Ausnahme bohrbedingter Aufweitungen wurden in Bohrung B 72/2014 WI keine offenen Klüfte im gesamten Bohrloch festgestellt; auch konnte lediglich eine makroskopisch erkennbare Pore bei 57,4 m beobachtet werden. In Bohrung B 99/2013 HA am Standort Hattorf wurden 2 geringmächtige Bereiche mit umlaufenden Ausbrüchen und daran gebundenen Wasserzutritten beobachtet, offene Klüfte wurden darüber hinaus auch in Hattorf nicht festgestellt.

#### **4.1.3 Ergebnisse der geophysikalischen Bohrlochuntersuchungen**

[WE\_F/U\_GGt Artschwager / WE\_F/U\_H Poppitz]

Durch die Firma BLM GmbH wurden in der Bohrung geophysikalische Bohrlochuntersuchungen durchgeführt. Die Ergebnisse der geophysikalischen

Bohrlochuntersuchungen liegen in Form eines gesonderten Auswerteberichtes als Anlage 5 diesem Bericht bei.

Das Untersuchungsprogramm umfasste:

- Gamma-Ray-Log (GR),
- Gamma-Gamma-Dichte-Log (GG.D),
- Neutron-Neutron-Log (NN, INN),
- Kaliber-Log (CAL),
- Bohrlochverlaufs-Log (BA),
- Temperatur-Log (TMP),
- Optischer und/ oder akustischer Bohrlochscanner (OBI, ABF).

Die eingesetzten Messverfahren sowie die jeweiligen Abläufe zum Messprogramm sind detailliert im Auswertebericht beschrieben. Die Messergebnisse wurden hier mit den thematischen Schwerpunkten

- Bohrlochgeometrie,
- Korrelationsmessungen und
- Strukturuntersuchungen

ausgewertet und interpretiert. Als Grundlage für die korrelative Auswertung der geophysikalischen Messergebnisse wurden die an der Haldenbohrung laborativ ermittelten Werte des Kaliumgehalts (GR-Log), die Gesamtwasser- und Lösungsgehalte, die Anteile des Natriums und Chlorids (NN-Log) und die Nassrohdichten (GG.D-Log) verwendet.

In den folgenden Kapiteln werden zu den gleichen thematischen Schwerpunkten die Untersuchungsergebnisse im Hinblick auf die verfahrensrelevanten Fragestellungen zusammenfassend bewertet.

#### **4.1.3.1 Bohrlochgeometrie**

Die Bohrung B 72/2014 WI wurde mit einem SK6L-Kernbohrgestänge mit einem Außendurchmesser der Bohrkrone von 146 mm abgeteuft. Die Bohrlochverlaufsmessung zeigt, dass die Bohrung entsprechend der Planung annähernd richtungsstabil mit Azimuten um 325 °, d.h. nach Nordwest, abgeteuft wurde. Sie steigt dabei relativ gleichmäßig mit rd. 6 ° zur Horizontalen an (Schwankung 5,7 bis 6,6 °).

Die Messung des Bohrlochkalibers erfolgte mit einem 4-Arm-Messsystem. Die Summenmittelkurve des Kalibers ist in Anlage 2 des Auswerteberichts dargestellt. In einer Teufe von 15,1 m unter Ansatzpunkt (AP) wurde das Ende der Schutzverrohrung nachgewiesen. Deren Innendurchmesser ist durch Krustenbildungen unregelmäßig, teils um max. rd. 8 cm verringert. Die Messendteufe des Bohrlochkalibers liegt bei 130,8 m.

Wie erwartet, ist mit der Teufe eine zunehmende Maßhaltigkeit der Bohrung und abnehmende Ausbruchsneigung an der Bohrlochwandung festzustellen. Die Zone stärkster Ausbrüche an der Bohrlochwandung mit Kalibern bis rd. 160...180 mm reicht bis in Tiefen von 26,0...27,0 m unter Ansatzpunkt (AP). Bis zur Teufe von rd. 32,1 m unter AP nimmt die stärkere

Ausbruchsneigung mit mittleren Kalibern von rd. 160 auf 150 mm ab. Das folgende Bohrloch ist durchweg maßhaltig und zeigt nur vereinzelt geringe ( $\leq 155$  mm) bis sehr geringe ( $\leq 150$  mm) Ausbrüche. Weitere Abstufungen im Umfang der Ausbrüche mit jeweils abnehmendem Trend sind in Teufenzonen bis bzw. ab rd. 44,0 m, 58,0 m und 112,0 m zu erkennen.

Vergleichbar zu den Untersuchungsergebnissen an den Hattorfer Haldenbohrungen /2/ ist die Zone stärkerer Ausbruchserscheinungen bis 32,1 m in einer Teufe beendet, in der die Laboruntersuchungen Nassrohdichten, ausgehend von rd.  $1,4 \text{ t/m}^3$  an der Haldenoberfläche, Werte von  $> 1,90 \text{ g/cm}^3$  erreicht haben. Auch die folgenden Teufenzonen zum Bohrlochkaliber ab rd. 44,0 m und ab rd. 112,0 m spiegeln sich im Kurvenverlauf der Nassrohdichten (Anlage 7.3) wieder. Ab rd. 44,0 m Teufe steigt die mittlere Nassrohdichte auf einen Wert rd.  $1,95 \text{ t/m}^3$ , unterhalb 112,0 m Teufe betragen die Nassrohdichten 1,96 bis  $2,02 \text{ t/m}^3$ . Die Kaliberkontur ist damit ein qualitativer Anzeiger für die Kornbindung/ Festigkeit des Rückstandsalkalies.

Die Zonen mit stärkeren Bohrlochausbrüchen und in der Tendenz auch die übrigen Abstufungen der Kalibererweiterungen korrelieren des Weiteren mit dem in der Bohrkerndokumentation ausgehaltenen Maß und Umfang der feuchten Anteile sowie mit dem anhand der Laboruntersuchungen festgestellten teufenabhängigen Verlauf der Lösungsgehalte. Beispielhaft seien hierzu die Teufen 32,1 und rd. 44,0 m genannt, unterhalb derer die Lösungsgehalte auf Werte rd.  $\leq 6,0 \%$  bzw. überwiegend  $\leq 4,0 \%$  fallen. In der Zone stärkster Ausbruchserscheinungen vom Rohrschuh in 15,1 m bis 32,1 m unter AP betragen die Lösungsgehalte rd. 7,0 bis 12,0 %.

Lokale Kalibererweiterungen im mm-Bereich im sonst maßhaltigen Bohrprofil sind teilweise mit Zonen verbunden, in denen mit der Bohrkerndokumentation, aber auch mit den geophysikalischen Strukturuntersuchungen Besonderheiten im Gefüge des Haldenkörpers, wie z.B. ehemalige Haldenoberflächen, poröse bzw. kavernöse Strukturen oder Unstetigkeiten in der Raumfüllung festgestellt wurden.

#### **4.1.3.2 Korrelationsmessungen**

##### **4.1.3.2.1 Vorbemerkungen zu den Auswertungen und Interpretationen**

Auszug Auswertebericht zur B 72/2014 WI (Anlage 5.1), Kap. 4.2; S. 8 ff):

*„... Im gewachsenen Gebirge korrelieren i. A. die Messungen der natürlichen Gammastrahlung, der Dichte und des Neutron-Neutron-Logs miteinander. Hier sind sie weitgehend unkorreliert. Die Ursachen dafür ergeben sich aus den unter Pkt. 3.1 geschilderten Verfahrensprinzipien und den jeweils dominanten Einflussgrößen je Messverfahren. Im Falle des Gamma-Ray-Logs ist das der Einfluss des  $^{40}\text{K}$ -Isotops auf den Messwert. Demgegenüber bestimmen der NaCl- und der Wasser- bzw. Wasserstoffgehalt wesentlich die Amplitudenhöhe des NN-Logs. Im Dichte-Log fällt diese Rolle der die Lagerungsdichte des Schüttgutes maßgeblich bestimmenden Kompaktion im Haldenmaterial zu.*

*Diese Einflussgrößen treten im hier geschütteten Material unabhängig voneinander auf. Insofern herrscht die o.g. Unkorreliertheit, und es müssen die jeweiligen, auf Anlage 2 dargestellten Messkurven einzeln betrachtet und bewertet werden.“*

*„... Dem NN-Log werden neben den Wasser- auch die Natrium- und Chloridgehalte gegenübergestellt. Das berücksichtigt den Sachverhalt, dass bekanntermaßen im reinen NaCl auf Grund der dort erhöhten freien Weglängen der von der verwendeten Strahlungsquelle ausgesandten schnellen Neutronen und ihrer dadurch erst sehr späten Abbremsung auf thermisches Niveau am Detektor sehr viele thermische Neutronen gezählt werden. Infolgedessen werden im Steinsalz sehr hohe NN-Amplituden registriert. Dem steht die frühe Abbremsung der Neutronen bei vorhandenem Wasserstoff in der Messsondenumgebung gegenüber, was zu stark verminderten Zählraten thermischer Neutronen und daher zu herabgesetzten Messwerten führt. Beide Effekte überlagern sich hier, wobei je nach Dominanz des einen oder anderen Einflusses die Korrelation zwischen der NN-Amplitude und z.B. dem Wassergehalt gut oder weniger gut ausgeprägt ist. ...“*

#### 4.1.3.2.2 Gamma-Gamma-Dichte-Log

Mit dem Gamma-Gamma-Dichte-Log kann die Dichte des Haldenkörpers vom Rohrschuh der Schutzverrohrung in 15,1 bis zur Messendteufe in 130,2 m unter AP bewertet werden. Die auf Grundlage einer Eichung indirekt bestimmten Dichten stimmen im Verlauf/Trend gut mit den laborativ ermittelten Nassrohdichten (Anlage 7.3) überein. Der Lufteinfluss im Bohrloch bewirkt überwiegend eine um rd. 0,1...0,2 g/cm<sup>3</sup> verminderte Messwertanzeige. Die Messkurve zeigt die mit der Tiefe zunehmende Dichte im Haldenkörper.

#### 4.1.3.2.3 Gamma-Ray-Log (GR-Log)

Wie in Anlage 5.1 ausgeführt, wurden aufgrund der kaum vorhandenen natürlichen Strahlung des Hauptbestandteils Steinsalz insgesamt ausgesprochen niedrige GR-Werte gemessen. Erwartungsgemäß wurde eine Korrelation zwischen dem in Spuren vorhandenen Kalium und den Ergebnissen des GR-Log festgestellt. Anlage 2 zeigt die laborativ ermittelten Kaliumgehalte neben den Ergebnissen des GR-Log. Hier können i.W. die folgenden Bereiche unterschieden werden: bis rd. 44 m liegen niedrige GR-Werte vor, die langsam und kontinuierlich ansteigen. Unterhalb von 44 m Teufe sind die Werte – korrelierend mit den Kaliumgehalten – deutlich erhöht, und schwanken stärker, wobei die höchsten Werte mit den höchsten Kaliumgehalten zusammenfallen. Eine deutliche „Depression“ bei rd. 50 – 54 m korreliert mit den in diesem Bereich in der Kamerabefahrung und der Kernansprache beobachteten Schüttflächen bei 50,2 und 54,9 – 55,2 m. Unterhalb von rd. 100 m Teufe sinken die GR-Werte ab, auf ein gegenüber dem Randbereich oberhalb 44 m nur wenig erhöhtes Niveau. Auch die Kaliumgehalte sind hier reduziert. Ein erneuter Anstieg ist dann unterhalb von 120 m Teufe zu verzeichnen. Die bevorzugte Auswaschung der Kalium-Restgehalte im Bereich der Oberfläche bzw. von überschütteten ehemaligen Oberflächen kann auch anhand des GR-Log nachvollzogen werden.

#### 4.1.3.2.4 Neutron-Neutron-Log (NN-Log)

Das wesentliche Untersuchungsziel für das Neutron-Neutron-Log war, stärker durchfeuchtete von weniger durchfeuchteten/ feuchten Bohrungsabschnitten abzugrenzen und ggf. besonders wasserwegsame Zonen zu detektieren. Hierbei bestehen verfahrensbedingt die folgenden Schwierigkeiten:

- Gegenläufiger Einfluss von NaCl- und Wasser-/ Lösungsgehalt bzw. Feuchte auf die Messergebnisse (siehe Kapitel 4.1.3.2.1 Vorbemerkungen),
- Der Gesamtwassergehalt im Rückstandssalz setzt sich aus Poren- und Kristallwasser zusammen. Nur das Porenwasser beeinflusst die Durchfeuchtung. Gesamt- und Porenwassergehalt wurden laborativ ermittelt, der Kristallwassergehalt als Differenz von Gesamt- und Porenwassergehalt rechnerisch ermittelt (vgl. Kapitel 4.3.3.3). Die relativen Anteile von Poren- und Kristallwasser am Gesamtwassergehalt können erheblich zwischen rd. 10 und 90% schwanken.

Entsprechend den obigen Vorbemerkungen werden verminderte Amplituden im NN-Log durch erhöhte Wasserstoff- bzw. Wasser-/ Lösungsgehalte und/oder verminderte NaCl-Gehalte hervorgerufen, erhöhte Amplituden durch die entsprechend gegenläufigen Trends.

Die Summen von Natrium- und Chlorid-Gehalten betragen bis rd. 10,0 m unter AP rd. 97,5 %. Unterhalb nehmen sie bis etwa 40,0 m unter AP auf Werte um 90,0 % mit mittlerer Schwankungsbreite von rd.  $\pm 5$  % ab (mit einzelnen Außreißern hin zu geringeren Gehalten bei 75 und 125 m Tiefe. Übereinstimmend zum Auswertebericht BLM kann kein korrelativer Zusammenhang zwischen den Gehalts- und NN-Messwerten abgeleitet werden.

Dies betrifft ebenso die Wasser-/ Lösungsgehalte, zu denen sich die NN-Messwerte gemäß den physikalischen Grundlagen des Messprinzips im umgekehrt proportionalen Verhältnis ergeben müssten. Entsprechende Verhältnisse zeigen sich selbst im Trend nicht, teilweise ist dieser sogar gegenläufig.

#### 4.1.3.2.5 Temperatur-Log

Temperatur-Logs können in der Lage sein, sowohl Wasserbewegungen außerhalb einer luftgefüllten Bohrung als auch Fluidzutritte in eine Fluid gefüllte Bohrung zu erkennen. Messtechnische Voraussetzung hierfür ist, dass am Messebeginn der Temperatúrausgleich zwischen Messsonde und Messumgebung abgewartet wird und dass der Messvorgang möglichst kontinuierlich in einer der Trägheit der Messsonde angepassten Geschwindigkeit erfolgt.

Zur Aufzeichnung des Temperatur-Logs in einer Horizontalbohrungen ist die Messsonde an einem aus einzelnen Segmenten bestehenden Gestänge befestigt. Insbesondere beim Einfahren der Messsonde ist der Messvorgang diskontinuierlich, da er zum Anbau der einzelnen Gestängesegmente unterbrochen werden muss. In Verbindung mit der Trägheit des Temperatursensors führt dies zu messbedingten Indikationen in der Messkurve.

In der Bohrung B 72/2014 WI wurde das Temperatur-Log beim Ein- und Ausfahren der Messsonde aufgezeichnet. Im Auswertebericht wird trotz der messbedingten Indikationen nur auf die Einfahrmessung Bezug genommen, da die Ausfahrkurve infolge der höheren



Messgeschwindigkeit und Trägheit des Temperatursensors zu einer messtechnischen „Verschleppung“ der höheren Temperaturen von innen nach außen führte.

Bis zum Rohrschuh der Schutzverrohrung in 15,1 m Teufe ist der Temperaturverlauf deutlich von der Außentemperatur beeinflusst und erreicht einen Wert von 16,5 °C. Bis zur Teufe von rd. 47,0 m steigt die Temperatur nur gering auf rd. 17,7 °C an. Im folgenden Teufenbereich bis rd. 83,0 m unter AP besteht mit 0,086 °C/m ein rd. 2,5-fach größerer Temperaturgradient als in dem Teufenbereich bis rd. 47,0 m unter AP. Die Temperatur steigt auf rd. 20,8 °C an. Im letzten Abschnitt bis zur Messendteufe in 130,8 m unter AP steigt die Temperatur auf einen max. Wert von 22,8 °C, woraus ein mittlerer Temperaturgradient von 0,074 °C/m resultiert. Das Temperaturniveau in der Bohrung entsprach dabei in etwa demjenigen der B 99/2013 HA, in welcher das Temperatur-Log eine Spanne zwischen 16,7 und 22,9 °C aufzeichnete.

Übereinstimmend zum Resümee im Auswertebericht (Anlage 5), können aus der Temperaturkurve keine Wasserbewegungen oder Fluidzutritte abgeleitet werden. Abhängigkeiten zu anderen Messparametern der geophysikalischen Bohrlochuntersuchungen oder auch Laboruntersuchungen am Kernmaterial sind nicht erkennbar.

#### **4.1.3.3 Strukturuntersuchungen**

Die Strukturuntersuchungen erfolgten mit einem optischen Bohrlochscanner (OPTV). Aufgrund der eingeschränkten Erkennbarkeit der Strukturen vor dem oft monochromen Hintergrund wird im BLM-Auswertebericht kein Anspruch auf die Erfassung des vollständigen Trennflächeninventars erhoben. Die sichtbaren Trennflächen wurden in der vorliegenden Auswertung in Abhängigkeit ihrer Erkennbarkeit wie folgt unterteilt:

- „Schüttflächen bzw. -grenzen“ – bezeichnet die zumeist +/- parallel zueinander verlaufenden Grenzen, die infolge von Ablagerungszyklen oder/und Materialunterschieden im Schüttgut entstanden sind und gewissermaßen Schichtgrenzen innerhalb der Halde darstellen,
- „Kluft“ – bezeichnet die in der Bohrlochwand überwiegend offenen, in der Regel gut erkennbaren Klüfte oder/und entlang von Kluftstrukturen angeordnete Löcher, Poren o. ä.,
- „Kluft unsicher“ – bezeichnet kluftartige Strukturen bzw. überwiegend geschlossene Klüfte, die nur teilweise oder sehr schlecht erkennbar sind.

Die Ausdehnung bzw. der Öffnungs-/ Durchtrennungsgrad der Klüfte von der Bohrlochwand in den Haldenkörper hinein kann nicht bewertet werden.

##### **4.1.3.3.1 Schüttflächen**

Mit Hilfe geophysikalischer Strukturuntersuchungen wurde in allen Bohrungen eine hohe Anzahl an Schütt- bzw. ehemaligen Haldenoberflächen festgestellt. Diese Anzahl ist jeweils deutlich höher als die, die im Rahmen der Bohrkernokumentation überwiegend als dünne, dunkler gefärbte Bänder/ Schlieren festgestellt wurde. Es wird daher davon ausgegangen, dass es sich bei den festgestellten Schüttflächen bzw. -grenzen im hohen Maße um

Gefügeelemente handelt, die primär mit der Aufhaldung im Rückstandsmaterial eingepreßt wurden. Die Anzahl ist in der Größenordnung mit jener vergleichbar, die an den Haldenbohrungen in HA /2/ dokumentiert wurde.

Die Trennflächenhäufigkeit der Schüttflächen variiert zwischen 0 und max. 5 je Meter. Bis 30,0 m Teufe konnten mit dem optischen Bohrlochscanner keine Schüttflächen ausgehalten werden. Dies deckt sich mit dem Bereich starker Kaliberausbrüche (siehe Kap.4.1.3.1). Die Häufigkeitsverteilung erreicht im Teufenbereich 50 bis 60 m mit 29 je Dekameter das Maximum und nimmt bis 30 m bzw. 80 m auf Werte von 11/15 bzw. 18/16 je Dekameter ab. Bis zur Messendteufe schwankt die Trennflächenhäufigkeit der Schüttflächen zwischen 4 und 7 je Dekameter.

Einfallrichtung und –winkel spiegeln in ihren Trends/ Mittelwerten und Häufigkeitsverteilungen die lokale Schütthistorie und Entwicklung der Haldenböschungsoberfläche wider. Die Schwankungen beider Parameter zeigen eine kleinräumige Differenziertheit der Haldenoberfläche, die neben der Konturierung beim Schüttprozess auch durch nachfolgende Verformungsprozesse im Rückstandssalz beeinflusst/ hervorgerufen sein dürfte.

Der Großteil der Schüttflächen (rd. 80 %) fällt mit einem Winkel kleiner als der Schüttwinkel bei der Aufhaldung, d.h. rd.  $< 38...40^\circ$ , ein. Der mittlere Einfallwinkel beträgt  $34,5^\circ$ . Gemäß Anlage 5 sind auch Schüttflächen mit Einfallwinkeln  $>40^\circ$  bis max.  $51^\circ$  ausgehalten worden. Diese konzentrieren sich im Wesentlichen auf die Teufenbereiche um rd. 39 m, 52 m, 78 m und 100,0 m unter AP. Mit Ausnahme des Teufenbereiches um rd. 78 m sind die Einfallwinkel  $>40^\circ$  überwiegend dort ausgebildet, wo starke Wechsel der Anteile an Kristall- und Porenwasser erfolgen. Des Weiteren deutet sich an, dass die in den Strukturuntersuchungen BLM ausgewiesenen Schüttflächen mit Einfallwinkeln  $>40^\circ$  im Dezimeter- bis Meterbereich mit Tiefenbereichen übereinstimmen, in denen die Kurvenverläufe in den Diagrammdarstellungen der laborativ bestimmten Dichten vergleichsweise starke Krümmungen aufweisen. Die entsprechenden Dichte und Feuchteunterschiede sind damit ggf. Anzeiger für den Einfluss der Lösungs-/ Strömungs- und Verformungsprozesse auf die Gefüge-/ Strukturausbildung im Haldenkörper nach seiner Schüttung.

Anhand der in Anlage 1.1 dargestellten Haldenentwicklung (Jahresstände Böschungskrone und –fuß der Halde) wurden die daraus resultierenden schematischen Böschungskonturen in die Schnittdarstellungen in Anlage 1.2 und 1.3 übertragen. Daraus lassen sich innerhalb der Haldenbohrung ungefähr die in der Tabelle 2-1 zusammengefassten Schüttalter abgrenzen.

Auf Grundlage der in Anlage 1.1 dargestellten Haldenentwicklung sowie der Teufen-Schüttalter-Zuordnung gemäß Tabelle 2-1 bestand im erkundeten Haldenabschnitt von der Bohrungsendteufe bis rd. 114,0 m eine südöstliche Schüttrichtung (Azimut rd.  $130...135^\circ$ ). Diese schwenkte bis rd. 100,0 m Teufe auf rd.  $145...150^\circ$  ein. In der folgenden Schüttphase veränderte sich das Böschungseinfallen mit Fortentwicklung der Halde nach Nordosten in südsüdöstliche Richtung mit einer Spanne des Azimuts um rd.  $150...160^\circ$ .

Der o. g. grundsätzliche Trend wird auch mit den Messergebnissen der Strukturuntersuchungen abgebildet. Die Häufigkeitsverteilung der Einfallrichtung zeigt mit einer Anzahl von 24 das Maximum im Bereich  $150$  bis  $160^\circ$ . In Richtung kleinerer Werte (min.  $110^\circ$ ) sowie größerer Werte (max.  $210^\circ$ ) nimmt die Häufigkeit relativ gleichmäßig ab. Der

Mittelwert über die vollständige Bohrung beträgt 153,3 °. Im unteren und damit älteren Bohrungsabschnitt ab Teufen von rd. 90 m deuten sich im Trend leicht größere gemessene Einfallrichtungen im Vergleich zu den oben beschriebenen an. Dies könnte mit der lokalen Morphologie des Haldenuntergrunds (Talrandlage des oberen Heergrabens) und der damit von der Böschungsrichtung abweichenden Richtung der stärksten Mächtigkeitszunahme der Halde nach Nord bis Nordnordwest sowie der daraus resultierenden unterschiedlichen, lastbedingten Haldenkompaktion, in Zusammenhang gebracht werden.

#### 4.1.3.3.2 Klüfte

Mit den Strukturuntersuchungen wurden insgesamt 19 Gefügeelemente als Kluft ausgehalten, von denen jedoch aufgrund der eingeschränkten Erkennbarkeit 18 Gefügeelemente nur als „unsicher“ gekennzeichnet sind. Auf deren Bewertung wird im Folgenden verzichtet.

Es verbleibt damit lediglich eine sicher aushaltbare Kluft in rd. 115,8 m Teufe, die mit einem flachen Einfallwinkel von 15 ° ungefähr in Böschungsrichtung mit 139 ° einfällt. Diese Beobachtung wurde in der Kernaufnahme insofern bestätigt (vgl. Kap. 4.3.1 und Anlage 2), als dass es sich demnach nicht um eine Kluft, sondern ebenfalls um eine Schüttfläche handelte (in der Kernaufnahme bei 115,4-116,6 m dokumentiert), wie bereits anhand des Einfallswinkels in Böschungsfallrichtung vermutet.

### 4.1.4 Geohydraulische Bohrlochmessungen

[WE\_F/U\_GGt Artschwager/ WE\_F/U\_H Poppitz]

In komplexer Betrachtung der in Kap. 4.1 vorgestellten vor Ort-Untersuchungen und erster, während des Bohrgeschehens gewonnener Ergebnisse der Laboruntersuchungen, insbesondere zu den Wasser-/ Lösungsgehalten, deutete sich an, dass über die Teufe des Bohrlochs eine Differenzierung der Haldenwasserführung (Menge und Chemismus) bzw. – zutritte in das Bohrloch besteht. Um diese Teufenabhängigkeit zu untersuchen und detailliertere Bewertungsgrundlagen zu den strömungstechnischen Prozessen zu erhalten, wurde die Golder Associates GmbH, Niederlassung Celle, mit der Durchführung von geohydraulischen Bohrlochversuchen beauftragt. Die Bohrlochversuche wurden im Zeitraum vom 19. bis 27.11.2014 als Packertest in Single- bzw. Doppelpackerkonfiguration mit folgender Aufgabenstellung ausgeführt:

- Bestimmung der Ausflussmenge aus dem gesamten Bohrloch,
- Bestimmung der Ausflussmenge aus dem offenen Bohrloch nach Setzen des vorderen Packers,
- Bestimmung der Ausflussmenge aus dem Packerintervall,
- Probenahme Haldenwasser aus dem Packerintervall und Bestimmung der vor Ort-Parameter.

Der Bohrlochbericht der Golder Associates GmbH ist als Anlage 6 beigelegt. In der folgenden Tabelle sind die Ergebnisse der Ausfluss-/ Zuflussmessungen sortiert nach der Teufe zusammengestellt.

**Tabelle 4-1: Ergebnisse geohydraulische Bohrlochuntersuchungen**

Packertest		Ausflussrate [l/min]		
Nr.	Testintervall [m]	Intervall	freies Bohrloch bis zum vorderen Packer	gesamtes Bohrloch
8	15,1 – 35,1	1,2	nicht bestimmt **)	4,0
6	45,4 – 55,4	0,0*)	1,0	2,4
7	55,0 – 65,4	< 0,002	1,0	2,4
5	65,0 – 75,4	0,1	1,0	1,8 – 2,0
4	75,0 – 85,4	0,1	1,2	1,8 – 2,0
3	85,0 – 95,4	0,14	1,2 – 1,3	1,8 – 2,0
2	95,0 – 105,4	0,9	1,2	2,0 – 2,5
1	105,0 – 115,4	0,2	1,8	2,0 – 2,5

\*) Beobachtungszeit 2 Stunden

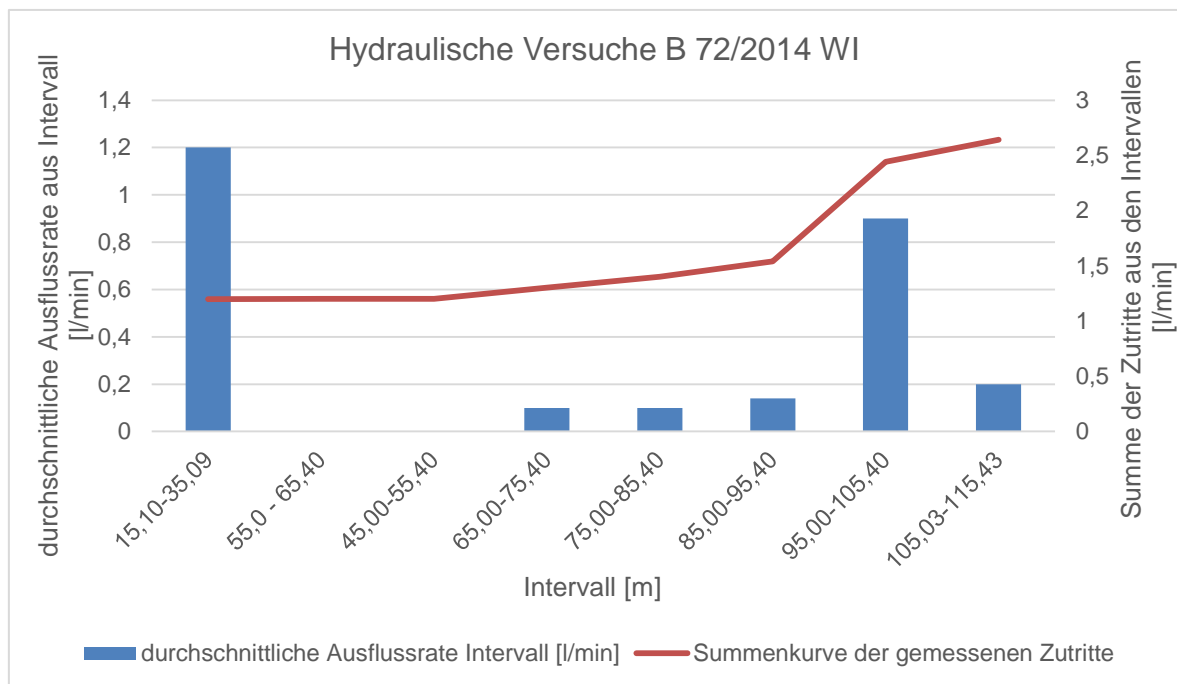
\*\*) vorderer Packer sitzt im Standrohr

Der Test Nr. 8 verfügt über eine Intervalllänge von rd. 20,0 m und beginnt noch rd. 0,30 m innerhalb der Schutzverrohrung. Die übrigen Tests Nr. 1 bis 7 wurden mit Intervalllängen von rd. 10,4 m gefahren, wobei sich jeweils eine Überlappungslänge von 0,4 m ergibt. Mit Ausnahme der Teufenbereiche rd. 35,1 bis 45,0 m und unterhalb 115,4 m wurde das Bohrloch vollständig getestet. In den letztgenannten Teufenbereichen wurde auf Grund nicht feststellbarer Zuflüsse in den Kamerabefahrungen (siehe folgendes Kapitel) sowie unter Berücksichtigung des geplanten Projektablaufes auf entsprechende Untersuchungen verzichtet.

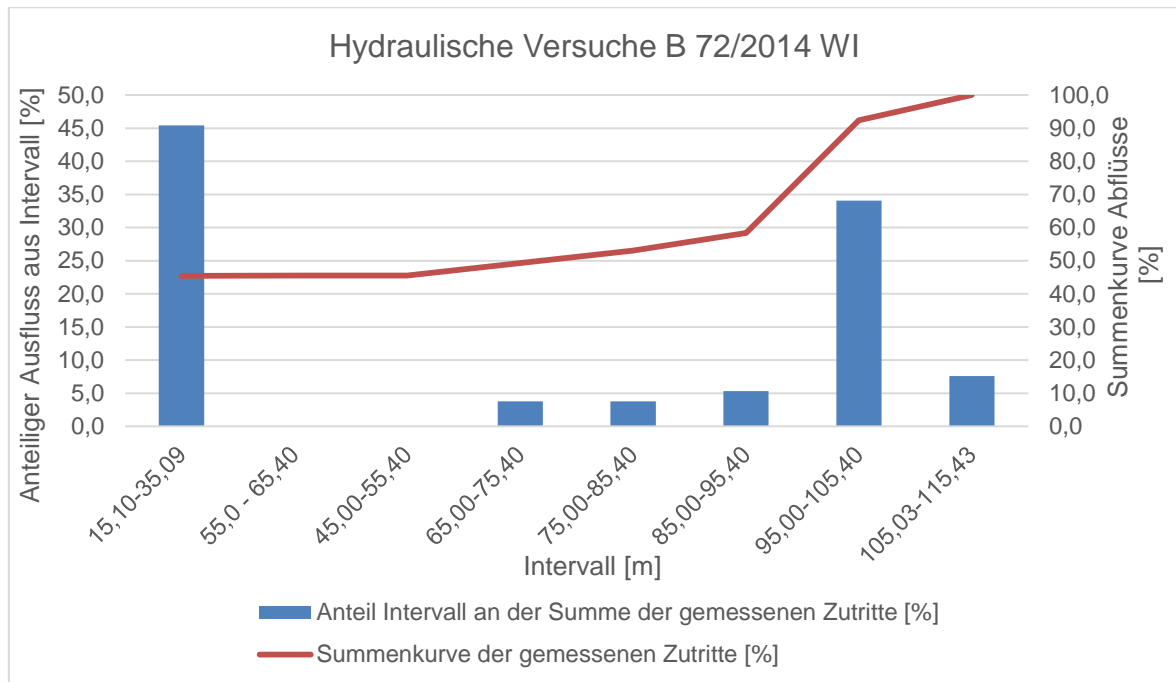
Im Sinne einer Plausibilitätskontrolle der Testergebnisse kann geprüft werden, ob die Summe der Ausflussraten der nacheinander geschalteten Tests sowie des jeweils freien Bohrlochs vom vorderen Packer bis zum Bohrlochmund der zugehörigen Ausflussrate des gesamten Bohrloches entspricht (Beispiel zum Test 3: „Intervall Test 1 bis 3“ ( $0,2 + 0,9 + 0,14 = 1,24$ ) + „freies Bohrloch bis vorderer Packer“ (1,2 bis 1,3) = 2,24 bis 2,34 > „gesamtes Bohrloch“ (1,8 – 2,0)). Bei dieser Betrachtungsweise ergeben sich ausgehend vom tiefsten bis zum vordersten Test rechnerisch für das gesamte Bohrloch aufsummierte Ausflussraten von rd. 2,00 bis 2,65 l/min. Der gemessene Schwankungsbereich der Ausflussraten für das gesamte Bohrloch liegt überwiegend in vergleichbarer Größenordnung (1,8 bis 2,5 l/min). Nur im Test 8 war die Ausflussrate für das gesamte Bohrloch mit 4,0 l/min deutlich höher. Kongruent dazu ergibt sich im Test 8 mit 2,65 l/min auch die größte rechnerische Ausflussrate für das gesamte Bohrloch. Unter Berücksichtigung der tatsächlichen Überlappung der Testintervalle, der über die Zeit nicht konstanten Gesamtabflüsse (1,8 – 4,0 l/min) sowie ggf. nicht ausschließbarer versuchstechnischer Einflüsse können die Testergebnisse für eine Betrachtung der teufenabhängigen Ausflussraten als plausibel bewertet werden.

In den folgenden beiden Abbildungen sind die Intervall-Ausflussraten als Menge und Prozentanteil des gesamten Bohrlochabflusses über die Bohrteufe aufgetragen. Die Balkendarstellung entspricht dabei dem Teufenbereich der Untersuchungsintervalle. Zusätzlich wird jeweils eine Summenkurve der Ausflussraten gezeigt.

In beiden Abbildungen ist erkennbar, dass die Zutrittsmengen sich insbesondere auf den Bereich des Tests 8 im Teufenbereich 15,10 – 35,09 m sowie den Bereich des Tests 2 mit Teufen von 95,00 -105,40 m konzentrieren.



**Abbildung 4-2 Ergebnisse der hydraulischen Versuche in Bohrung B 72/2014 WI – Ausflussrate aus Intervall im Vergleich zur Summe der in den Intervallen gemessenen Zutritte zum Bohrloch (Daten aus Anlage 6 entnommen)**



**Abbildung 4-3 Ergebnisse der hydraulischen Versuche in Bohrung B 72/2014 WI – Anteilige Ausflüsse aus Intervall im Vergleich zur Summenkurve der prozentualen Abflüsse (Daten aus Anlage 6 entnommen)**

Die im Zuge der hydraulischen Bohrlochmessungen in der Bohrung B 72/2014 WI gemessenen Ausflussraten für das gesamte Bohrloch mit überwiegend 1,8 bis 2,5 l/min stimmen gut mit den am Ende der Bohrarbeiten ermittelten überein (Größenordnung 2,0 bis 3,0 l/min, siehe Kapitel 4.1.1).

Ausflüsse aus dem Bohrgestänge waren gemäß Kapitel 4.1.1 lediglich in einer Bohrteufe von 59,0 m sowie im Teufenbereich 104,0 bis 108,5 m festgestellt worden, der obere Zutrittsbereich kann jedoch aufgrund des zu diesem Zeitpunkt teilweise ausgebauten Bohrgestänges nicht als lokaler Zufluss gewertet werden. Der Bereich in rund 59,0 m Teufe wurde in den Packertests ebenfalls nicht als Zuflusshorizont erkannt (Test 7, < 0,002 l/min). Der Zutritt bei 104,0 – 108,5 m Teufe hingegen wurde durch Test 2 (0,9 l/min) bestätigt.

In den am Standort Hattorf durchgeführten horizontalen Haldenbohrungen B 99, B 100 und B 104/2013 HA /2/ wurden bei Bohrtiefen von 100 bis 117 m Ausflussraten aus dem gesamten Bohrloch von max. rd. 10,0 bis 20,0 l/min gemessen, wobei die größten Ausflussraten in der längsten und im frischesten Schüttbereich angeordneten Bohrung B 104/2013 HA festgestellt wurden. Der Mittelwert von fiktiven, auf die gesamte Bohrlänge gleichmäßig verteilten (relativen) Ausflussraten würde in den drei Hattorfer Haldenbohrungen rd. 0,15 l/(min•m) betragen. Die entsprechende, auf die Bohrtiefe bezogene mittlere Ausflussrate liegt in der Bohrung B 72/2014 WI in einer Größenordnung von rd. 0,02 l/(min•m) und damit nur bei rd. 13 % der Hattorfer Verhältnisse. Die deutlich geringere Ausflussrate wird, ohne konkreten quantitativen Nachweis, im Wesentlichen auf die kleinere Größe des hydrologischen Einzugsgebietes (in Verbindung mit den sich ausbildenden lokalen Wegsamkeiten im Haldenkörper, die von den örtlichen Gegebenheiten, der Exposition und der Kubatur, dem Alter des Haldenbereichs und der Überdeckungshöhe beeinflusst werden) zurückgeführt.

Gemäß Kap. 4.1.1.1 wurde ein Auslauf von Haldenwasser erstmalig in einer Bohrteufe von 15,0 m festgestellt und aus bohrtechnischen Gründen die Verrohrung bis zu einer Teufe von 15,1 m geführt. Der Intervall beim Test 8 von rd. 15,1 bis 35,1 m Teufe hat mit einer Auslaufmenge von 1,20 l/min bereits rd. 45 % der Gesamtauslaufmenge in der Bohrung B 72/2014 WI ergeben. Dies entspricht in der Größenordnung den in /2/ ermittelten Relationen. Allerdings erreicht die relative Ausflussrate des Testintervalls mit rd. 0,06 l/(min•m) nur rd. 40 % der mittleren relativen Ausflussrate der Hattorfer Haldenbohrungen. Der weitere Verlauf der Summenkurve verändert sich bis zur Teufe von 65,4 m mit den Ergebnissen der Tests Nr. 6 und 7 nicht. Erst die folgenden Tests Nr. 5, 4 und 3 bis zur Teufe von 95,4 m lassen die Summenkurve mit Intervallbeträgen von 0,1 bzw. 0,14 l/min bzw. rd. 4/ 5 % geringfügig auf gesamt 58 % der Gesamtauslaufmenge ansteigen.

Der Intervallbereich des folgenden Tests Nr. 2 von 95,0 bis 105,4 m Teufe liefert mit 0,9 l/min rd. 1/3 der Gesamtauslaufmenge und führt zu einem Anstieg der Summenkurve auf rd. 92 %. Nach den Ergebnissen der vor Ort-Untersuchungen und Kernansprache ist davon auszugehen, dass der Großteil der mit dem Tests Nr. 2 festgestellten Haldenwassermenge erst hinter einer markanten Schüttfläche/ alten Haldenoberfläche in einer Teufe um 99,8 m dem Testintervall zugetreten ist. Dies ist nach den Ergebnissen der Hattorfer Haldenbohrungen /2/ unerwartet. Demnach hätte man das Erreichen des Haldenkerns im Teufenbereich rd. von 60 bis 80 m prognostizieren können. Wie in Kapitel 5.1.5 dargestellt, steht diese Beobachtung im Zusammenhang mit Schütthistorie und Geometrie des Haldenkörpers im durch die Bohrung erschlossenen Bereich. Die angeschnittene Schüttzone steht demnach aufgrund ihrer geringen Überdeckung hydraulisch mit der unter der Haldenrampe Haldenwasser führenden Haldenmantelzone in Verbindung. Dies erklärt das unerwartete Ergebnis im Test 2 der hydraulischen Bohrlochuntersuchungen.

Der sich im folgenden Teufenbereich von 105,0 bis 115,4 m anschließende Test Nr. 1 untersucht im Großteil ebenfalls die zum Test Nr. 2 beschriebene Schüttzone. Die Ausflussrate ist mit 0,2 l/min bzw. 7,6 % der Gesamtauslaufmenge bereits wieder deutlich vermindert. Wie zuvor beschrieben, endet der relevante Ausflussbereich aus dem Bohrloch in einer Teufe von rd. 113,4 m. Unterhalb dieser Teufe wurde mit der Kamerabefahrung kein abfließendes Wasser auf der Bohrlochsohle beobachtet.

## **4.2 Ergebnisse der Laboranalytik der beprobten Lösungen**

[WE\_F/U\_H Poppitz]

### **4.2.1 Probenahme und durchgeführte Untersuchungen**

Während der Bohrarbeiten wurden, sofern ein Auslauf aus dem Bohrloch zu verzeichnen war, Auslaufmessungen der Haldenwassermenge sowie der vor Ort-Parameter Temperatur und Leitfähigkeit durchgeführt und parallel Haldenwasserproben zur Analyse entnommen. Die Analytik der Lösungen erfolgte im K+S-Werkslabor am Standort Wintershall. Der analysierte Parameterumfang ist in Tabelle 4-2 dargestellt.

**Tabelle 4-2: Analytisch bestimmte Parameter und angewandte Methodik** (Quelle: schriftliche Mitteilung Werkslabor WI, 05/2015)

Parameter	Methode	Prüfverfahren
Na <sup>+</sup>	Multielementanalytik mittels ICP	DIN EN ISO 11885 E22
K <sup>+</sup>	Multielementanalytik mittels ICP	DIN EN ISO 11885 E22
Mg <sup>2+</sup>	Multielementanalytik mittels ICP	DIN EN ISO 11885 E22
Ca <sup>2+</sup>	Multielementanalytik mittels ICP	DIN EN ISO 11885 E22
Cl <sup>-</sup>	Potentiometrische Titration	DIN 38405 D1 (Coulometrische Bestimmung)
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Multielementanalytik mittels ICP	DIN EN ISO 11885 E22
Br <sup>-</sup>	Titrimetrische Bestimmung von Brom	Standortinterne Methode (Brom)
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Bestimmung der Säurekapazität zum pH 4,3	DIN 38409 H7
Dichte (25°C)	Gravimetrische Messung	Standortinterne Methode (Dichtebestimmung mit Dichtemessgerät DMA48)
Leitfähigkeit (25°C)	Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit	DIN EN 27888
pH-Wert	Potentiometrische Messung	DIN EN ISO 10523 C5

Beim Versuch der Umrechnung der analytisch bestimmten Ionen in die Verbindungen CaSO<sub>4</sub>, MgSO<sub>4</sub>, MgCl<sub>2</sub>, KCl und NaCl wurde durch das Labor festgestellt, dass der üblicherweise eingesetzte Algorithmus auf Basis der Löslichkeiten der Salze nicht zum Ausweisen der Verbindungen geeignet ist, da die Ionenbilanz nicht aufging. Dies ist nach Auskunft des Labors auf das Vorhandensein von Natriumsulfat-Phasen zurückzuführen. Diese wurden auch in der Röntgendiffraktometrie und der Kristalloptischen Analyse (Phasenanalysen) der Rückstandsproben als vorhandene oder wahrscheinlich vorhandenen Nebenbestandteile über weite Bohrlochbereiche identifiziert (Astrakanit, untergeordnet Glauberit und Eugsterit, letzterer deutlich in 20 bzw. 28 m Tiefe in der Kristalloptik nachgewiesen; vgl. Anlage 8.4.1 und 8.4.2).

## 4.2.2 Analyseergebnisse der Lösungsproben

### 4.2.2.1 Überblick

Wie in Kapitel 4.1.1 und 4.2.1 dargestellt, wurden im Laufe des Bohrvorgangs regelmäßig Proben aus dem Bohrgestänge entnommen, die konkreten Teufenbereichen zuzuordnen sind. Zusätzlich wurde der Auslauf aus dem Standrohr erfasst.



Die Prüfberichte der untersuchten Lösungen sind in Anlage 7.1 enthalten. Zusätzlich wurden zur Auswertung der teufenabhängigen Veränderungen der Haldenwasserzusammensetzung Schoeller-Diagramme erstellt, welche zum Vergleich auch die Haldenwasserzusammensetzung der Rückhaltebecken Heergraben und Zinkesgraben gemäß der Monatsprobe Oktober 2014 enthalten. Die Zusammensetzung der Haldenwässer /16/ zeigt Tabelle 1-5 (im Schoeller-Diagramm sind Äquivalentkonzentrationen dargestellt).

#### **4.2.2.2 Haldenwasserzusammensetzung der Rückhaltebecken Heer- und Zinkesgraben**

Wie in Kapitel 1.2.3 erläutert, werden die Haldenwässer der Halde IV in den Rückhaltebecken Heer- und Zinkesgraben gefasst. Die Einzugsgebiete der Becken sind durch die unter der Halde befindliche morphologisch Wasserscheide des Bornbergs voneinander getrennt. Dies führt zu unterschiedlichen Zusammensetzungen der in den beiden Becken gesammelten Haldenwässern: Die Haldenwässer des Zinkesgrabens weisen im Vergleich zum Heergraben höhere Kalium-, Magnesium- und Sulfatkonzentrationen bei gleichzeitig geringeren Natriumkonzentrationen sowie in Folge dieser Zusammensetzung höhere Dichten auf, wie Tabelle 1-5 zeigt.

Die Zusammensetzung der Haldenwässer im Becken Heergraben ist charakteristisch für den Althaldenbereich, in dem die in Kapitel 1.2.4 vorgestellte Zonierung bereits ausgebildet ist. Die Einzugsgebiete der Becken bzw. der Haldenrandgräben sind in der Anlage 8 des Bandes 1.1 der Antragsunterlage (dort Kapitel 7) abgebildet. Demnach entwässert die gesamte Westseite der Halde in den Zinkesgraben, zusätzlich der nördliche Teil der östlichen Haldenflanke jenseits des Bornbergs. In den Heergraben hingegen werden lediglich die Wässer von der Ostseite der Halde zwischen Haldenstützpunkt und Bornberg abgeleitet. Die Beschüttung im Einzugsgebiet des Heergrabens südlich der Wasserscheide erfolgte bis ca. 1999 ... 2000, lediglich an der Ostseite der Halde auch kleinflächig bis einschließlich 2014.

Im Zinkesgraben hingegen vermischt sich aktuell der Einfluss gealterter Haldenbereiche (insbesondere auf der Haldenwestseite) mit demjenigen der Vorschubböschung. Für die Vorschubböschung sind folgende Prozesse charakteristisch:

- Vorhandensein von leichtlöslichen Wertstoff-Restgehalten in oberflächennahen Bereichen,
- Chemisch-mineralogische Umwandlungsprozesse unter Entstehung und Ausfuhr von Magnesiumchlorid-Lösung,
- gravitativer Austrag des entwässerbaren Anteils der mit aufgehaldeten Restfeuchte.
- Setzungsprozesse und Differentiation der Rückstandszusammensetzung unter Herausbildung der in Kapitel 1.2.4 vorgestellten Zonierung.

Im Einzugsbereich des Heergrabens sind die oben genannten Prozesse bereits weitgehend abgeschlossen. Mit weiterer Haldenalteration werden diese Prozesse auch im Einzugsbereich des Zinkesgrabens voranschreiten und die dort gefassten Lösungen werden sich in ihrer Zusammensetzung entsprechend verändern.

Die Zusammensetzung der Haldenwässer in den jeweiligen Becken schwankt im Jahresverlauf geringfügig. Charakteristisch und weitgehend konstant sind hingegen die Ionenverhältnisse in den jeweiligen Becken. Diese sind in Tabelle 4-3 dargestellt.

Im Rahmen der Haldenbohrungen am Standort Hattorf wurde festgestellt, dass die Haldenwasserzusammensetzung der Haldenkernbereiche derjenigen der Wässer aus relativ jungen Haldenbereichen ähnelt, insbesondere im Hinblick auf die dort anzutreffenden hohen Magnesiumgehalte. Die hohen Magnesiumgehalte der Lösungen aus dem Haldenkern zeigen in Kombination mit den angetroffenen geringen Zuflussmengen, dass dieser Bereich offenbar nicht nachhaltig von Haldenwässern durchströmt wurde, was zu einer Verarmung an Magnesium geführt hätte. Zum Vergleich mit den Becken Heergraben und Zinkesgraben sind daher in Tabelle 4-3 auch typische Ionenverhältnisse von Lösungen aus dem Kernbereich der Bohrung B 99/2013 HA bzw. aus dem Randbereich der Bohrung B 100/2013 HA und B 104/2013 HA aufgeführt. Beide Lösungen sind weitgehend unbeeinflusst durch das Niederschlagsgeschehen und zeigen vergleichbare Charakteristika.

**Tabelle 4-3 Ionenverhältnisse der Haldenwässer in den Becken Heergraben und Zinkesgraben, im Vergleich: Lösungen aus dem frischen Rückstand der Vorschubböschungen bzw. aus dem Haldenkernbereich(/16/, /2/)**

	Haldenwasser Heergraben	Haldenwasser Zinkesgraben	Lösungen aus frisch geschüttetem Rückstand bzw. aus Haldenkernbereichen
Na : K = 1:	0,1 – 0,3	0,4 – 0,6	0,7 oder größer
Na : Mg = 1:	0,1 – 0,3	0,5 - 1	1 oder größer
Ca : Mg = 1:	< 400	> 400	1500 oder größer
Magnesiumgehalt	10 – 30 g/l	40 – 50 g/l	> 50 g/l
Einstufung	Althaldenbereich (überwiegend)	Mischwasser Althaldenbereich + Vorschubböschung / Haldenkernbereich	Lösungen aus frisch geschüttetem Rückstand bzw. aus Haldenkernbereichen

#### 4.2.2.3 Horizontalbohrung B 72/2014 WI

Insgesamt ähnelt die chemische Zusammensetzung aller in der Horizontalbohrung entnommenen Proben derjenigen des Haldenwassers der Becken in ihrer Größenordnung, mit der Einschränkung, dass auch innerhalb der Bohrung in verschiedenen Teufen offenbar alterationsbedingte Unterschiede insbesondere in der Höhe der Natrium- und Magnesiumkonzentrationen festzustellen sind.

##### *Analysenergebnisse der während des Bohrvorgangs entnommenen Proben*

Die Dichte der Lösungen schwankt zwischen 1,241 g/cm<sup>3</sup> (Teufe bis 15 m) und 1,293 g/cm<sup>3</sup> (Tiefe bis 98 m). Generell ist mit zunehmender Bohrtiefe ein Anstieg der Dichten zu verzeichnen. In den randnahen Bereichen und bis oberhalb von 86 m liegen die Dichten im

Mittel bei unter 1,26 g/cm<sup>3</sup>. Die höchsten Dichten von 1,290 bzw. 1,293 g/cm<sup>3</sup>, korrespondierend mit den höchsten Magnesiumgehalten in der Lösung, wurden im Teufenbereich bis 86 m und bis 98,0 m beobachtet. Unterhalb 98,0 m lagen die Dichten bei rund 1,270 g/cm<sup>3</sup> und damit in vergleichbarer Größenordnung zu den Haldenwässern des Beckens Zinkesgraben (Analyse Oktober 2014: 1,276 g/cm<sup>3</sup>, vgl. Tabelle 1-5).

Die Gesamtmineralisation der untersuchten Lösungen in der Bohrung liegt zwischen 362 g/l (Teufe bis 15 m) und 405 g/l (Teufe bis 86 m) und mit einem Mittelwert von rd. 383 g/l.

Die Gesamtmineralisation der Becken Heer- und Zinkesgraben betrug im gleichen Zeitraum 357 g/l bzw. 389 g/l.

Aus den Schoeller-Diagrammen (Anlage 7.2, Abb. 1 und 2) ist ersichtlich, dass die Magnesiumkonzentrationen mit zunehmender Tiefe ansteigen, was bereits durch die Dichteentwicklung und die Höhe der Gesamtmineralisation angedeutet wurde. Auch die Kalium-Konzentrationen steigen mit zunehmender Tiefe an, ebenso die Konzentrationen an Sulfat. Die Natrium-Konzentrationen in den Proben hingegen nehmen mit zunehmender Tiefe ab. Hinsichtlich der Calcium-Konzentrationen sind keine teufenabhängigen Veränderungen feststellbar. Die Höhe der Bromidgehalte korrespondieren mit der Höhe der Magnesiumgehalte, mit den höchsten Gehalten in Test 3, 85-95 m Teufe: 61,5 g/l Mg<sup>2+</sup>, 865 mg/l Br. Brom tritt in allen chloridischen Salzen als diadocher Ersatz für Chloridionen im Kristallgitter auf und ist daher im Rohsalz enthalten und entsprechend auch im Rückstand anzutreffen. Da die Gehalte hier (bei ubiquitär vorhandenem Natriumchlorid) offenbar mit dem Magnesiumgehalt korrespondieren, ist davon auszugehen, dass die an der Vorschubböschung austretende, aus dem Produktionsprozess der Nassaufbereitung dem Rückstand anhaftende Magnesiumchloridlösung Ursache für die erhöhten Gehalte an einigen Proben ist. Bromid reichert sich im Produktionsprozess ebenso wie Magnesium in der Prozesslösung (und damit in der anhaftenden Feuchte) an. Auch im Becken Zinkesgraben werden gegenüber dem Heergraben erhöhte Bromidgehalte beobachtet.

Anhand der Ionenverhältnisse in den Lösungen, der Dichten und Konzentrationen an Wertstoff-Restgehalten, insbesondere Magnesium, konnten am Standort Hattorf verschiedene Lösungstypen ausgehalten werden, die verschiedenen Tiefenbereichen der Bohrungen zuzuordnen waren. In Bezug auf die Bohrung B 72/2014 WI ist grundsätzlich festzustellen, dass die hier angetroffenen Lösungen im Gegensatz zu denen der Horizontalbohrungen am Standort Hattorf weniger differenziert sind. Ursache hierfür sind einerseits das Ablagerungsalter, andererseits die Schütthistorie und die Lage des beprobten Bereichs: während in Hattorf eine kontinuierliche Beschüttung in eine Haupt-Vorschubrichtung vorgenommen wurde, hatte der in Wintershall durch die Bohrung B 72/2014 WI erschlossene Bereich eine wechselnde Schütthistorie, wodurch die Oberfläche nach einiger Ablagerungszeit immer wieder relativ geringmächtig überdeckt wurde, so dass die ausbildende Zonierung von anderen Einflüssen überlagert wird. Dennoch erfolgt ein Abgleich mit den am Standort Hattorf charakterisierten Lösungstypen, um Aufschluss über die Haldenwasserbeeinflussung einzelner Bohrungsbereiche zu bekommen.

Der überwiegende Teil der analysierten Proben entspricht dem für den Standort Hattorf beschriebenen 1. Lösungstyp:

Der 1. Lösungstyp ähnelt hinsichtlich der Zusammensetzungen und Ionenverhältnisse den Haldenwässern des Beckens Heergraben mit hohen Natrium- und vergleichsweise geringen Magnesiumgehalten, und ist hinsichtlich seiner Charakteristika typisch für Althaldenbereiche. Diese Lösungen sind in ihren ionaren Zusammensetzungen im Schoeller-Diagramm für Bohrung B 72/2014 WI in dunkelblauen Farben dargestellt und entstammen dem Tiefenbereich 0 bis rd. 81,5 m, wobei zur Teufe hin ein Anstieg der Magnesium-Konzentrationen zu beobachten ist. Die Lösungen haben ein mittleres Verhältnis von Natrium zu Magnesium von kleiner 1:0,2 und Magnesium-Konzentrationen von durchschnittlich 18 g/l. Der Anstieg der Magnesium-Konzentrationen korrespondiert dabei mit den in den Packertests ermittelten geringen bis nicht vorhandenen Wasserzutritten zum Bohrloch (0 – 0,1 l/min im Bereich 45,4 bis 85,4 m; vgl. Tabelle 4-1).

Zur Tiefe hin schließt sich bei rd. 86 m bis 102 m ein Bereich mit erhöhten Natrium- zu Kalium-Verhältnissen von rd. 1:0,4 bis 1:0,7 und Natrium- zu Magnesium-Verhältnissen von rd. 1: 0,7 bis 1: 1,4 an. Gegenüber dem 1. Lösungstyp sind hier erhöhte Magnesiumgehalte von durchschnittlich rund 46 g/l anzutreffen. Dieser Bereich entspricht hinsichtlich seiner Charakteristika dem Haldenwasser des Beckens Zinkesgraben (vgl. Tabelle 4-3) und ist als Mischwasser zwischen lösungsbeeinflussten Althaldenbereichen und dem gering beeinflussten Haldenkernbereich zu beschreiben. Auffällig ist in diesem Zusammenhang die am 05.11.2014 entnommene Probe aus dem Tiefenbereich bis 98 m mit einer Dichte von 1,293 g/cm<sup>3</sup>, einem hohen Magnesiumgehalt von 55,4 g und einem Verhältnis von Natrium zu Magnesium von 1:1,42. Die Zusammensetzung dieser Probe ist vergleichbar mit den Proben aus den Haldenkernbereichen der Bohrung B 99/2013 HA. Sie entspricht dem für den Standort Hattorf beschriebenen 2. Lösungstyp (= Lösungen aus Haldenkernbereichen). Dies korrespondiert mit den gemessenen geringen Zutrittsmengen aus den Packertests (Test 3: 0,14 l/min Zufluss aus Intervall, siehe Tabelle 4-1). Anhand der sonstigen Untersuchungen ist aber davon auszugehen, dass die Grenze zwischen den Lösungstypen durch die in Kamerabefahrung und Schichtenverzeichnis ausgehaltene Schüttfläche bei rund 100 m markiert wird, mit dem dahinter liegenden stärkeren Zufluss (Test 2: 0,9 l/min Zufluss aus dem Intervall) und den geringeren Zuflüssen oberhalb von 100 m Teufe.

Auffällig ist insbesondere für den Bereich zwischen 86 und rd. 100 m Teufe, dass die Lösungszusammensetzungen der Proben aus dem gleichen Teufenbereich am Abend und am darauffolgenden Morgen voneinander abweichen. Während die Proben am Abend nach Abschluss der Bohrungen erhöhte Magnesiumgehalte von 40 bis 50 g/l aufweisen (und demzufolge höhere Na : Mg-Verhältnisse), liegen Magnesiumgehalte der am Morgen entnommenen Proben bei unter 30 g/l (Beispiel: 05.11.2014, 17 Uhr, Tiefe bis 98 m: 55,4 g/l Mg<sup>2+</sup>; 06.11.2014, 09:30 Uhr, Tiefe bis 98 m: 29,8 g/l Mg<sup>2+</sup>) – über Nacht ist also offenbar nach Erschließung des Tiefenbereichs bereits eine Veränderung zumindest des bohrlochnahen Bereichs eingetreten.

Unterhalb von rund 108 m bis zur Endteufe der Bohrung sind die Lösungen wiederum dem vorstehend beschriebenen 1. Lösungstyp zuzuordnen, jedoch zeigen sie gegenüber den Lösungen aus randnahen Bereichen leicht erhöhte Magnesiumgehalte von im Mittel 31 g/l und daher auch ein Verhältnis von Natrium zu Magnesium von 1: 0,3 bis 0,4. Offenbar steht im Teufenbereich unterhalb von 108 m eine größere Menge an Wertstoff-Resten, insbesondere Magnesium, zur Lösung zur Verfügung und wurde aufgrund der geringen

Lösungsbewegungen in diesen Bereichen nicht herausgelöst (Test 1: 0,2 l/min aus Intervall lt. Tabelle 4-3; trockenes Bohrloch unterhalb 113,4 m).

#### *Analysenergebnisse der während der Packertests entnommenen Proben*

Die Analysenergebnisse der Packertests stützen grundsätzlich die vorstehend beschriebenen Ergebnisse. Die Teufenbereiche bei rd. 15 – 35 m (Test 8) und rd. 95 – 105 m (Test 2) sowie rd. 105 – 115 m (Test 1) entsprechen hinsichtlich ihrer Charakteristika dem Althaldenbereich, wobei die Zusammensetzung der Wässer aus Test 2 durch die Lösungszutritte von unterhalb 100 m geprägt sein dürfte, da der Testbereich einen gemäß Kamerabefahrung und Beobachtung der Wasserzutritte zum Bohrloch augenscheinlich trockenen Bereich oberhalb von rd. 100 m und einen deutlichen Zutrittsbereich unterhalb von 100 m Bohrteufe gemeinsam erschließt.

Für den Teufenbereich zwischen 35 und 55 m liegt kein Analysenergebnis aus Packertests vor, da der Test 6 im Bereich 45-55 m keinen Ausfluss aus dem Intervall lieferte. Der Bereich war auch in den Kamerabefahrungen weitestgehend frei von Lösungszutritten. Der Bereich bei rd. 55 – 65 m (Test 7) und besonders der Bereich bei rd. 85 – 95 m (Test 3) sind mit hohen Magnesiumkonzentrationen und auffällig abweichenden Ionenverhältnissen eher dem Haldenkernbereich zuzurechnen. In den letztgenannten beiden Bereichen waren die Zuflussmessungen zum Intervall sehr gering. Der im Test 5 erschlossene Bereich bei rd. 65 – 85 m zeigt die Charakteristika eines Mischwassers.

### **4.3 Untersuchungen des Kernmaterials**

#### **4.3.1 Kernansprache**

[WE\_F/U\_H Poppitz]

Im Bohrkernlager Oberzella der K+S KALI GmbH erfolgten arbeitstäglich die Kernansprache sowie die Probenentnahme aus den Haldenbohrkernen. Die Schichtenverzeichnisse und Fotodokumentationen der Bohrungen sind in den Anlagen 2 und 3 enthalten. Beobachtete Besonderheiten sind in den zugehörigen Bildüberschriften beschrieben. Die Benennung und Beschreibung des erbohrten Rückstandssalzes im Rahmen der Kernansprache erfolgte im Wesentlichen unter Bezug auf DIN 4022 und DIN EN ISO 14689-1: 2004-04 vergleichbar zu Fels bzw. Festgestein. Folgende Parameter/Eigenschaften wurden im Zuge der Kernansprache erfasst:

**Tabelle 4-4: Bei der Kernansprache erfasste Parameter**

Parameter	Grundlage	Ausprägung
Kerngewinn	Ausmessen	0 bis maximal 1 m
Kernmarschlänge	Ausmessen	0 bis maximal 1,5 m
RQD-Index	/19/, Ausmessen	$RQD [\%] = \frac{\sum \text{Länge der Kernstücke} > 10 \text{ cm}}{\text{Kernmarschlänge}} * 100\%$
Probenform	DIN 4022, visuelle Erfassung	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ A (Kernstücke mit vollständig erhaltener Mantelfläche beliebiger Länge und Zerteilung)</li> <li>▪ B (Kernstücke mit nur teilweise erhaltener Mantelfläche)</li> <li>▪ C (Kernstücke, die nicht mehr zu einem Zylinder zusammengefügt werden können)</li> <li>▪ D (kleinstes Bohrgut, wie z.B. Grus und Feines &lt; 0,6 mm).</li> </ul>
Stückigkeit	/19/, Ausmessen	Unterteilung der Stücke in: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ großstückig (&gt;10 cm),</li> <li>▪ stückig (10-6 cm) und</li> <li>▪ kleinstückig (6-2 cm).</li> </ul>
Körnigkeit	DIN EN ISO 14689-1 : 2004-04, NA.2, Visuelle Erfassung	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Vollkörnig (Zusammensetzung aus erkennbaren Einzelkörnern gleicher oder unterschiedlicher Korngröße)</li> <li>▪ teilkörnig (Einzelkörner in einer einheitlichen und nicht als körnig zu erkennenden Grundmasse)</li> <li>▪ nichtkörnig (keine Unterscheidung von Körnern möglich)</li> </ul>
Salzbeschreibung	Visuelle Erfassung	Erkennbarkeit von Einsprenglingen, Lagen, Bändern
Farbe	Visuelle Erfassung	
Kornbindung	DIN EN ISO 14689-1 : 2004-04; NA.5; Ritzen/Abreiben	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ schlecht (Abreiben von Gesteinsteilchen mit dem Finger leicht möglich)</li> <li>▪ mäßig (Gesteinsprobe mit Stahlnagel oder Messerspitze leicht ritzbar)</li> <li>▪ gut (Gesteinsprobe mit Stahlnagel oder Messerspitze schwer ritzbar)</li> </ul>

		<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ sehr gut (Gesteinsprobe mit Stahlnagel oder Messerspitze nicht ritzbar)</li> </ul>
Festigkeit	/19/; Fingerprobe	Unterteilung der Proben mit schlechter Kornbindung in: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ absandend (Abreiben von Gesteinsteilchen mit dem Finger möglich)</li> <li>▪ brüchig (Kanten mit dem Finger abzubrechen)</li> <li>▪ entfestigt (mit Finger zerdrückbar)</li> </ul>
Porosität	Visuelle Erfassung	Erfassung von makroskopisch erkennbaren Poren, Löchern oder Klüften
Wassergehalt	Fingerprobe	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ trocken (Material klebt nicht und haftet nicht am Finger, leicht zerreibbar)</li> <li>▪ erdfeucht (Material ist leicht klebrig und haftet teilweise am Finger)</li> <li>▪ feucht (Material ist klebrig, verklumpt, haftet am Finger)</li> <li>▪ wassergesättigt (Material ist sichtbar nass (verfärbt, glänzt nass) und klumpig, Finger sind nach Berührung nass)</li> <li>▪ nass (Material ist wassergesättigt, Wasser ist sichtbar und steht im Liner)</li> </ul>
Bemerkung	Visuelle Erfassung	Erfassung von Auffälligkeiten, Bohrbedingte Veränderungen, Schüttflächen

#### 4.3.2 Probenahme und durchgeführte Untersuchungen

[WE\_F/U\_H Poppitz]

Das gewonnene Bohrkernmaterial wurde, verschlossen in 1m-Linern, in das Kernlager der K+S KALI GmbH in Oberzella transportiert. Dort wurden die Liner unmittelbar vor der Kernansprache und Beprobung geöffnet und anschließend wieder verschlossen und in Folie eingeschweißt. Die weitere Lagerung erfolgt im Bohrkernlager Oberzella.

Die Beprobung des Kernmaterials aller Bohrungen erfolgte im Zuge der Kernansprache nach einem vorab festgelegten Raster, um ein Tiefenprofil der Eigenschaften jeder Bohrung zu erhalten. Sofern während der Kernansprache Besonderheiten angetroffen wurden, erfolgte die Entnahme zusätzlicher Proben.

Alle Proben zur chemischen Analytik wurden in dichtschießende Schraubdosens verpackt und arbeitstäglich dem K+S Forschungsinstitut zur Analyse übergeben. Der durchgeführte Analysenumfang ist in Tabelle 4-5 dargestellt, die Prüfberichte sind in Anlage 8.2 enthalten.

**Tabelle 4-5: Chemische Analytik: Parameter und Methodik**

Parameter	Methode	Prüfverfahren
Nassrohddichte	Tauchwägung	DIN 18125-1*
Reindichte	Heliumpyknometer	K+S 0400.231*
Trocknungsverlust (bei 55°C)	Ofentrocknung	DIN EN 12880 (S2a) A)
Trocknungsverlust (bei 105°C)	Ofentrocknung	DIN EN 12880 (S2a)
Glühverlust (bei 550°C)	Ofentrocknung	DIN EN 12879 (S3a)
Gesamtwassergehalt <sup>14</sup>	Ofentrocknung, Bezug auf Trockenmasse	DIN EN 12879 (S3)
Wassergehalt n KF	Karl-Fischer-Titration	K+S 0785.02*
Natrium	Multiementanalytik (ICP-OES)	K+S 0905.01
Kalium	Multiementanalytik (ICP-OES), bei Gehalten < 0,5% ergänzende Analytik mittels DIN EN ISO 11885	K+S 0905.01  DIN EN ISO 11885
Magnesium	Multiementanalytik (ICP-OES), bei Gehalten < 0,2% ergänzende Analytik mittels DIN EN ISO 11885	K+S 0905.01  DIN EN ISO 11885
Calcium	Multiementanalytik (ICP-OES)	K+S 0905.01
Sulfat	Multiementanalytik (ICP-OES)	K+S 0905.01
Chlorid	Titration	DIN 38405-D 1-2
Phasenanalyse	Röntgendiffraktometrie	K+S 0043.01*

<sup>14</sup> Die Trocknungsverluste beziehen sich für alle Trocknungsstufen, sowie für den Glühverlust auf die Originalsubstanz. „Gesamtwassergehalt“ (DIN EN 12879 (S3): Abweichend und in Abstimmung mit dem Auftraggeber wurde für diesen Parameter die Masse des Verlusts auf die Masse des Glhrckstands bezogen.



Parameter	Methode	Prüfverfahren
Elementanalyse	Röntgenfluoreszenzanalyse	K+S 0370.06*

A): in Anlehnung

\*: nicht akkreditiertes Verfahren

Die Bestimmung des Wassergehalts nach dem Karl-Fischer-Verfahren erfolgte durch Titration in Dioxan. Zur Bewertung der Lösungsgehalte wurde eine Dichte-/Massekorrektur der so durch das Karl-Fischer-Verfahren ermittelten Wassergehalte durchgeführt sowie der Bezug zur Trockenmasse hergestellt. Die Vorgehensweise ist im Glossar beschrieben. Die bestimmten Trocknungsverluste bei 55°C, und 105°C sowie der Glühverlust bei 550°C beziehen sich jeweils auf die Feuchtmasse der Ausgangsprobe. Die Trocknung bei verschiedenen Trocknungsstufen (55°C, 105°C) wurde durchgeführt, um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu denjenigen der Haldenbohrungen am Standort Hattorf aus 1997/1998 und 2013/14 sowie zu den für frischen Rückstand ermittelten Rückstandsfeuchten zu erreichen. Sie wurden jedoch aufgrund des beobachteten Einflusses der durch RDA und Kristalloptik nachgewiesenen kristallwasserhaltigen Phasen (Abspaltung von Kristallwasser auch bei niedrigen Temperaturen, Einbindung von Wasser bei Auskristallisation kristallwasserhaltiger Phasen während des Eintrocknens der Porenlösung) nicht für weiterführende Berechnungen verwendet (vgl. dazu Anlage 8.4 – Ergebnisse der mineralogischen Analysen).

Der Gesamtwassergehalt der Proben mit Bezug zur Trockenmasse wurde im K+S Forschungsinstitut anhand der Glühverlustbestimmung berechnet.

Weiterhin wurden anhand der gemessenen Nassrohdichten und Reindichten sowie der Porenlösungsgehalte die Trockenrohdichten, Porositäten und Sättigungsbeiwerte gemäß der im Glossar beschriebenen Formeln errechnet. Zuvor wurde die am feuchten Probenkörper bestimmte Reindichte korrigiert, indem das Volumen der enthaltenen gesättigten Lösung von der analytisch bestimmten Reindichte abgezogen wurde.

Zur Durchführung von kristalloptischen Analysen und zur Bestimmung der quantitativen mineralogischen Zusammensetzung wurde weiteres Probenmaterial aus der Bohrung entnommen und dem Werkslabor Neuhoof-Ellers übergeben, wo die Analytik im Zeitraum 12/2014 bis 03/2015 erfolgte. Die Probenauswahl zur Kristalloptik orientierte sich an den Kristallwassergehalten des Probenmaterials und erfolgte verteilt über den gesamten Kernmarsch. Aus dem Randbereich der Bohrung, wo geringe Kalium- und Magnesiumgehalte vorlagen und Poren- und Gesamtwassergehalte nahezu identisch waren, wurde kein Probenmaterial zur Kristalloptik entnommen, da hier die Zuordnung der Elemente zu den Phasen eindeutig war. Für die Kristalloptik wurde bergfeuchtes Probenmaterial verwendet, um einer Verfälschung bei Trocknung der Proben vorzubeugen. Begleitend zur Kristalloptik wurde vom gleichen Probenmaterial zur Berechnung der quantitativen mineralogischen Zusammensetzung erneut eine ICP-Analyse im Werkslabor Neuhoof-Ellers durchgeführt (ICP-OES, KS 0905.01), deren Ergebnisse nach Auskunft des Labors mit den Ergebnissen des Forschungsinstituts (Anlage 8.2) gut übereinstimmten.

Trotz des angewendeten Bohrverfahrens mit Seilkernrohr und Luftspülung zeigten sich in der Horizontalbohrung stellenweise bohrtechnisch bedingte Lösungsbeeinflussungen der

Bohrkerne (vgl. Kapitel 4.3.1). Entsprechend beeinflusste Proben sind in allen Diagrammen und Darstellungen farbig gekennzeichnet.

Durch die IBeWa Ingenieurpartnerschaft für Bergbau, Wasser- und Deponietechnik Freiberg wurden am Bohrkernmaterial im Zeitraum 11/2014 bis 05/2015 Porositäts- und Permeabilitätsbestimmungen durchgeführt. Probenauswahl, -entnahme und Versand an IBeWa erfolgte durch die K+S KALI GmbH. Zielstellung der Probenauswahl war eine möglichst gleichmäßige Verteilung über die Teufe und repräsentative Beprobung des Rückstands mit unterschiedlichen Eigenschaften. Zur Untersuchung der Porosität und Permeabilität (Gas- und Flüssigkeitspermeabilität) wurden 10 jeweils 1 bis 2 m lange Bohrungsabschnitte ausgewählt und die vollständigen Liner an IBeWa übergeben. Die Beprobung im Detail erfolgte durch IBeWa nach Eignung der Kernabschnitte für die einzelnen Versuche und ist im zugehörigen Ergebnisbericht (Anlage 8.5) dokumentiert. Die salzgesättigte Versuchslösung für die Bestimmung der effektiven Lösungspermeabilität und des Haftwassergehaltes wurde von IBeWa mit Kernmaterial aus den Linern benachbart zu den untersuchten Proben hergestellt. Der Untersuchungsumfang der hydraulischen Laborversuche ist in der folgenden Tabelle 4-6 dargestellt.

**Tabelle 4-6:           hydraulische Laborversuche: analytisch bestimmte Parameter und angewandte Methodik**

Parameter	Proben	Methoden	Prüfverfahren
Effektive Porosität	Rückstand, bergfeucht	Gasentspannungsversuch	
Effektive Gaspermeabilität	Rückstand, bergfeucht	Stationärer Gasdurchströmungsversuch in Triaxialzelle	Versuchsaufbau im Konzept nach DIN 18130
Effektive Lösungspermeabilität	Rückstand, aufgesättigt	Stationärer Durchströmungsversuch in Triaxialzelle	in Anlehnung an DIN 18130
Haftlösungsgehalt	Rückstand, aufgesättigt, aus Lösungspermeabilitätsversuchen	Lagerung im Exsikkator über Gleichgewichtslösung, Überwachung Masseverlust bis zur Massekonstanz	
Porengrößenverteilung	Rückstand, bergfeucht aus Haftlösungsversuchen	Quecksilberporosimetrie	Quecksilberinjektionsversuch nach DIN 66133

Begleitend bzw. vorbereitend zu den in Tabelle 4-6 genannten Untersuchungen wurden durch IBeWa aus dem übergebenen Kernmaterial salzgesättigte Versuchslösungen hergestellt, die bei der Ermittlung der Lösungspemeabilität zum Einsatz kamen bzw. bei der Ermittlung der Haftlösungsgehalte als Gleichgewichtslösungen. Diese wurden auf ihre Dichte, chemische Zusammensetzung und dynamische Viskosität untersucht. Ergänzend wurden auch die Versuchsergebnisse aus Laborversuchen im Werk Werra einbezogen. Die nach dem Haftlösungsversuch ausgebauten Proben wurden zur weiteren Analytik geteilt und teils zur Quecksilberporosimetrie, teilweise an das K+S Forschungsinstitut (heute: Analytik- und Forschungszentrum, AFZ) zur Bestimmung der Wassergehalte (Karl Fischer, Trocknungsverluste) übergeben. Die Analysenergebnisse des Forschungsinstituts flossen in die Bewertung der IBeWa ein. Die Ergebnisse sind in Kapitel 4.3.5 zusammengefasst.

### **4.3.3 Ergebnisse der chemischen und mineralogischen Analytik**

[WE\_F/U\_H Poppitz]

Die Analysenergebnisse der chemischen und mineralogischen Analytik (Prüfberichte) sind in Anlage 8.2 enthalten. Weiterhin enthält Anlage 8.3 folgende graphische Darstellungen:

- teufenabhängige Verteilung der Haupt- und Nebenelementgehalte (incl. Summenkurve der Natrium- und Chloridgehalte zur Auswertung des NN-Log, vgl. Kapitel 4.1.3.2.4),
- Veränderungen der Haupt- und Nebengemengteile im Vergleich zu frischem Rückstand (Spiderdiagramme)
- Darstellung der ermittelten Poren- und Gesamtwassergehalte sowie der Ergebnisse der Ofentrocknung bei 55°C und 105°C zum Vergleich mit den Ergebnissen aus 1997/98 und mit der Feuchte des aufgehaldeten Rückstands
- tiefenabhängige Verteilung der Porenlösungs- und Kristallwasseranteile der Proben jeder Bohrung
- Rein- und Rohdichten sowie errechnete totale Porositäten im Tiefenprofil
- Errechnete Sättigungen im Tiefenprofil, zum Vergleich aufgetragen: totale Porositäten und Lösungsgehalte.

Im Folgenden werden unter Bezugnahme auf diese Darstellungen die wichtigsten Ergebnisse mit Blick auf das zu erstellende hydrodynamische Modell des Haldenkörpers erläutert.

Die Ergebnisse der chemischen Analytik sind, wie vorstehend unter 4.1.3.2 beschrieben, auch in die Auswertung der geophysikalischen Bohrlochmessungen eingeflossen, sie wurden zu diesem Zweck im Dezember 2014 an BLM übergeben (vgl. auch Anlage 5).

#### **4.3.3.1 Chemische Analytik**

##### **4.3.3.1.1 Überblick: Hauptelemente und Nebengemengteile**

Die tiefenabhängige Verteilung der Hauptelemente und Nebengemengteile für alle Bohrungen ist in Anlage 8.3 dargestellt. Die nachfolgend genannten Prozentangaben beziehen sich auf die Trockenanalytik, d. h. die anhaftende Feuchte ist darin nicht berücksichtigt.

Als Hauptelemente in allen Proben der Bohrungen wurden Natrium und Chlorid mit Elementgehalten von im Mittel rund 36 bzw. rund 55 % am Gesamtelementgehalt identifiziert. Als Nebengemengteile mit tiefenabhängig schwankenden Anteilen treten Sulfat und Calcium sowie Wertstoff-Restgehalte von Kalium und Magnesium auf. Die Nebenbestandteile machen dabei in Summe rd. 1,9 % bis maximal 15,5 % des Rückstands aus. Weiterhin enthielten einzelne Proben geringe Mengen an Silicium (< 1 % des Gesamtelementgehalts im Feststoff), was auf das Vorhandensein von Quarz und Tonmineralen im Rohsalz und Rückstand zurückzuführen ist. Weitere Nebengemengteile als die hier genannten wurden durch die Röntgenfluoreszenzanalyse nicht detektiert (vgl. Anlage 8.2).

#### 4.3.3.1.2 Vergleich zu frisch geschüttetem Rückstand

Tabelle 1-2 zeigt zum Vergleich die Zusammensetzung des frisch geschütteten Rückstands für verschiedene Betrachtungsjahre. Wie in Kapitel 1.2 dargestellt, schwankt die durchschnittliche Zusammensetzung der aufgehaldeten Rückstände seit Beginn der Aufhaldung nur geringfügig, so dass von einer weitgehend homogenen chemischen Zusammensetzung des frisch geschütteten Rückstands auszugehen ist. Einzige Ausnahme bilden die Sulfatgehalte, die im Zeitraum zwischen den Analysen 1993 und 2014 angestiegen sind; wie vorstehend beschrieben, ist dies auf eine Anpassung des Produktionsprozesses zurückzuführen. Da das von der Bohrung durchteufte Material im Wesentlichen vor dieser Umstellung abgelagert wurde, werden zu Vergleichszwecken die Ergebnisse der Analytik aus 1993 herangezogen (vgl. Tabelle 1-2). Der frisch geschüttete Rückstand liegt mit Natrium- und Chloridgehalten von 34 und 53 % jeweils leicht unter den Mittelwerten aus den Analysen der Haldenbohrungen, insgesamt ist eine leichte Anreicherung an beiden Hauptgemengteilen feststellbar, die räumlich innerhalb der Bohrung differenziert ausgeprägt sind (siehe dazu nachfolgend).

Weiterhin enthielt der frisch aufgehaldete Rückstand Wertstoff-Restgehalte von rund 0,6 % Kalium sowie rund 0,9 % Magnesium, sowie einen Sulfatanteil von rd. 3,5 %. Wie bereits am Standort Hattorf beobachtet, ist auch hier eine deutliche Verringerung der Kalium- und Magnesiumgehalte im randnahen Bereich der Bohrung festzustellen<sup>15</sup>, mit der auch eine Verringerung der Sulfatgehalte einhergeht. Gleichzeitig erfolgte dort eine relative Anreicherung von Natrium und Chlorid sowie Calcium. Diese Beobachtung ist auf das Entfernen der leichtlöslichen magnesium- und kaliumhaltigen Phasen in den Bereichen mit stärkster Haldenwasserführung zurückzuführen. Die in den Bohrungen angetroffenen Sickerwässer sowie die in den Haldenwasserbecken gesammelten Haldenwässer sind an Kalium und Magnesium untersättigt, und so stets aufnahmefähig für die leichtlöslichen Phasen. Auch Natriumchlorid unterliegt, sofern noch keine Sättigung der Wässer vorliegt, der Lösung, jedoch führt das Vorhandensein in großer Menge und damit der unbegrenzte Nachschub zu einer prozentualen Anreicherung im Residuum relativ zum Gesamtelementgehalt. Die Löslichkeit des Calciumsulfats hingegen ist im Vergleich zu den anderen anwesenden Phasen eher gering, weshalb im randnahen Bereich keine Abreicherung festgestellt wurde, und in den

---

<sup>15</sup> Zur Ermittlung der Kalium- und Magnesiumgehalte in den randnah entnommenen Proben wurde eine ergänzende ICP-Analytik (DIN EN 11885) mit abgesenkter BG erforderlich, da die Methode K+S 0905.01 Bestimmungsgrenzen von 0,5% (K) bzw. 0,2% (Mg) vorgibt, und so bis 28 m Teufe kein Magnesium und bis 41 m Teufe kein Kalium nachgewiesen werden konnte. Die Analysenergebnisse wurden für die nachfolgende Auswertung kombiniert.

Hattorfer Horizontalbohrungen eine relative Anreicherung gegenüber der ursprünglichen Rückstandszusammensetzung zu beobachten war. Demzufolge kann auch das Verhältnis von Calcium zu Kalium und Magnesium zur Beschreibung randnaher Bereiche herangezogen werden: Während es im frischen Rückstand und in weiten Teilen der Bohrung bei 1 : 2 und darüber liegt, und in den Haldenbohrungen am Standort Hattorf auch teils deutlich darüber, ist im randnahen Bereich der B 72/2014 WI ebenso wie in den Hattorfer Bohrungen der Calciumanteil zwei- bis sechsmal so hoch wie die Wertstoff-Restgehalte (Calcium zu Kalium+Magnesium im Verhältnis 2:1 bis 6:1 oberhalb von 16 m Bohrteufe). Auffällig in Bohrung B 72/2014 WI ist in dieser Hinsicht auch der Bereich unterhalb von 102 m bis ca. 120 m Teufe mit niedrigeren Verhältnissen von Calcium zu Kalium und Magnesium.

Die Breite des haldenrandnahen Bereichs der Bohrung, in dem die Wertstoff-Restgehalte in Folge der Lösung durch Haldenwasser selektiv deutlich vermindert sind, beträgt in B 72/2014 WI rund 28 bis 30 m. In diesem Bereich konnten Restgehalte nur mit deutlich verfeinerter, ergänzender Analytik nachgewiesen werden. Die Angabe von mindestens rd. 28 m ist dabei konservativ; Kalium konnte mittels ICP-OES oberhalb von 41 m Bohrtiefe nicht nachgewiesen werden.

Am Standort Hattorf konnte anhand der Bohrungen gezeigt werden, dass das Phänomen zeit- bzw. – im Hinblick auf die Rückstandsablagerung - altersabhängig ist. Die Bohrung B 72/2014 WI entspricht hinsichtlich des Ablagerungsalters des Rückstands im Randbereich von rd. 17 Jahren dabei der Bohrung B 99/2013 HA. Der selektiv an Wertstoffgehalten entfrachtete Bereich betrug dort jedoch nur rd. 12 m /2/. Neben dem reinen Ablagerungsalter spielt hier auch der Beschüttungsprozess eine Rolle: das häufige Überschütten eines Bereiches mit geringmächtigen Schüttscheiben und zwischenzeitlichen Beschüttungspausen, während derer der Rückstand den Atmosphärien ausgesetzt ist, begünstigt offenbar die Entwicklung eines breiten, selektiv entfrachteten Randbereichs gegenüber der kontinuierlichen Beschüttung in eine Haupt-Vorschubrichtung. Auch zwischen Vertikal- und Horizontalbohrungen war in Hattorf ein Unterschied ersichtlich: die Lösungsprozesse sind im Bereich des Haldentops tiefgreifender, die abgelagerte Alterationszone breiter. Gleiches ist auch in Wintershall zu erwarten. Im Mittel der Hattorfer Horizontalbohrungen ist von einem Wachstum dieses Randbereichs von rd. 1 m pro Jahr auszugehen; in Bohrung B 72/2014 WI betrüge der jährliche Zuwachs im Mittel über 1,5 m/a. Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass der selektiv entfrachtete Bereich breiter als der durch Bohrungen aufgeschlossene ist, da zur Schaffung der Bohransatzpunkte Einschnitte in die Halde erstellt wurden, und der Bereich der verfestigten Kruste sowie der oberflächennahe Bereich direkt darunter deshalb nicht mit untersucht wurde (ca. 2 - 4 m horizontaler Abstand).

Generell steigen zum Bohrlochtiefsten hin die Gehalte der Nebengemengteile Kalium, Sulfat und Magnesium sukzessive an, bis Werte erreicht oder überschritten werden, die denen des frisch geschütteten Rückstands entsprechen. Im Bereich von rd. 52 bis rd. 102 m übersteigen die Kaliumgehalte den für frischen Rückstand angegebenen Gehalt teils deutlich (mit bis zu 2% bei rd. 62 m). In diesen Bereichen fand offenbar im Gegensatz zum randnahen Bereich keine nachhaltige Durchsickerung mit ungesättigten Lösungen statt, die zur Entfernung der leichtlöslichen Komponenten geführt hätte. Anreicherungen, die über den Gehalt im frischen Rückstand hinausgehen, können theoretisch auch probenahme- bzw. analysebedingt in Einzelproben auftreten; da diese aber in vielen Proben über weite Bereiche auftreten, ist davon

auszugehen, dass vertikale bzw. laterale Verlagerungsprozesse und die Neubildung und relative Anreicherung von Doppelsalzen wie Leonit eine Rolle spielen. Die Löslichkeit der Sekundärphasen bleibt hinter derjenigen von Kieserit und Sylvin (primärer Mineralbestand) zurück.

Eine Ausnahme von diesem generellen Trend bildet der Bereich zwischen rd. 100 m bis rd. 120 m, welcher durch markante Schüttflächen bei rd. 100 m und 114 m gekennzeichnet ist (vgl. Anlage 2 und 3) und in welchem diskret an enge Teufenabschnitte begrenzte Sickerwasserzutritte in der Kamerabefahrung beobachtet (Kap. 4.1.2) und durch die Packertests bestätigt wurden (Kap. 4.1.4). Hier sinken die Kalium- und Magnesiumgehalte unter die für frischen Rückstand angegebenen Werte (insbesondere bei 115 - 120 m Teufe). Ausschlaggebend für die Festlegung des Bohransatzpunktes war das Ziel der Durchteufung einer ehemaligen Haldenoberfläche, welche über einen längeren Zeitraum freigelegen hatte (vgl. Kap. 2.1). Diese ehemalige Oberfläche der Althalde aus der Genehmigung 1974 (und der oberflächennahe Randbereich) werden bei rund 100 m Teufe angetroffen; und die chemischen Rückstandscharakteristika ähneln jenen des Randbereichs mit selektiver Entfernung von Wertstoff-Resten, geringeren Sulfatanteilen und gegenüber benachbarten Bereichen erhöhten Natrium-, Chlorid- und Calciumanteilen, wenn auch in abgeschwächter Form und kleinräumig. Zur Interpretation dieser Feststellung im Kontext zu Schütthistorie und Kubatur des Haldenkörpers wird auf Kapitel 5.1.5 verwiesen. Eine weitere ehemalige Oberfläche mit rd. 10 Jahren Offenlagerungszeit wurde bei rd. 114 m Teufe erreicht (siehe Kapitel 2.1), sie ist im Gegensatz zu der erstgenannten hinsichtlich der Zusammensetzung nicht auffällig; schon nach wenigen Bohrm Metern steigen die Nebenelementgehalte wieder deutlich an. Entsprechend ist auch unterhalb 114 m Teufe in der Kamerabefahrung kein Sickerwasserzutritt mehr feststellbar (vgl. Kapitel 4.1.2).

#### 4.3.3.1.3 Zusammenfassung und Vergleich zu den Ergebnissen aus Bohrungen am Standort Hattorf

Die Analytik aus Bohrung B 72/2014 WI bestätigt die für den Standort Hattorf gefundenen Erkenntnisse grundsätzlich. Jedoch unterscheidet sich die Halde IV am Standort Wintershall hinsichtlich der Geometrie des Haldenkörpers und der Ablagerungshistorie von der ESTA-Halde Hattorf.

Der Rückstand unterliegt generell im Haldenkörper chemischen Lösungs-/Verlagerungsprozessen, die zeitabhängig zu Veränderungen führen. Diese alterationsbedingte Veränderung des Rückstands im Vergleich zu frisch geschüttetem Material ist anhand des Spiderdiagramms in Anlage 8.3 gut zu erkennen (Darstellung der Proben vom Bohrlochmund zum Bohrlochtiefsten hin in heller werdenden Farben). Bei Betrachtung der gegen frischen Rückstand normierten Elementgehalte aus den Bohrungen in Hattorf und Wintershall fallen die folgenden Entwicklungen auf:

- oberflächennahe Verarmung an Magnesium und Kalium
- gleichzeitige oberflächennahe Anreicherung an Natrium und Chlorid

- bereichsweise starke Anreicherung von Magnesium, Sulfat und seltener Kalium in einzelnen Proben.
- kaum Einfluss der Ablagerungsdauer auf den Calciumgehalt (ggf. leichte Anreicherung im Randbereich)
- Vergrößerung der Amplitude der Elementkonzentrationen gegenüber dem frischen Rückstand mit zunehmender Alterung des Rückstands, die für den Standort Hattorf im Vergleich der Bohrungen B 99, 100 und 104/2013 HA deutlich wurde
- Ablauf der vorstehenden An- und Abreicherungsprozesse im Zeitraum mehrerer Jahre.
- Chemische Lösungs- und Verlagerungsprozesse sind zeitabhängig und variierten je nach Lage im Haldenkörper. Für Wintershall wird im Vergleich zu Hattorf außerdem deutlich, dass auch die Schütthistorie Einfluss auf die Entwicklung der Zonierung nimmt.

Die zeitabhängigen Veränderungen des Rückstands im Haldenkörper werden im Folgenden als Alterung bzw. Alteration bezeichnet.

Auffällig, da nicht zu der generellen Beschreibung der teufenabhängigen Zonierung passend, ist der Bereich zwischen rd. 102 und 120 m Teufe, der gemäß der Ergebnisse aus Kamerabefahrung und Packertests lösungsbeeinflusst ist. Hier überprägt offenbar ein anderer Prozess kleinräumig die altersabhängige Zonierung. Zur Interpretation dieser Beobachtung unter Berücksichtigung der Schütthistorie und Haldenkubatur siehe Kapitel 5.1.5.

#### **4.3.3.2 Mineralogische Analytik**

##### **4.3.3.2.1 Überblick: Hauptkomponenten und Nebenbestandteile, Primär- und Sekundärphasen**

Die Röntgendiffraktometrie (im Folgenden: RDA) wurde an 30 Proben, verteilt über den gesamten Kernmarsch, durchgeführt. Die Ergebnisse sind Anlage 8.4.1 zu entnehmen. Zusätzlich wurden an ausgewählten Proben kristalloptische Analysen durch das Werkslabor Neuhoof-Ellers durchgeführt, deren Ergebnisse in Anlage 8.4.2 dargestellt sind. Die Ergebnisse der zugehörigen ICP-Analysen sind ebenfalls dem Prüfbericht in Anlage 8.4.2 zu entnehmen. Die Mineralogische Analytik und die Auswertung orientieren sich methodisch zu Vergleichszwecken an der Auswertung der Haldenbohrungen in Hattorf (Band 3.17 der Antragsunterlage RBP 04/09 HA, /2/).

Abbildung 1-1 zeigt zum Vergleich die durchschnittliche mineralogische Zusammensetzung des frisch geschütteten Gesamtrückstands. Wie bereits in Kapitel 1.2 erläutert, unterlag diese in der Schütthistorie der Halde nur geringen Schwankungen. Carnallit wird in Abbildung 1-1 nicht separat ausgewiesen, sondern ist in der Zusammenfassung der sonstigen Phasen (1%) enthalten. Im Juni 2016 wurde im Rahmen einer Sonderbeprobung eine ergänzende mineralogische (RDA) und chemische Analytik (Röntgenfluoreszenzanalyse) des auf die Halde IV verbrachten frischen Rückstandsmaterials durchgeführt, um Vergleichsdaten zur Auswertung der Haldenbohrung zu gewinnen. Die Ergebnisse sind in Anlage 8.4.1 dargestellt. Die in Abbildung 1-1 dargestellte Zusammensetzung wird bestätigt, Carnallit und Hexahydrat (Umwandlungsprodukt des Kieserits, und damit hinsichtlich der Zusammensetzung dem

Kieserit zuzurechnen) wurden ebenfalls als wahrscheinlich im Rückstand enthaltene Nebenbestandteile (= Primärbestand) ausgewiesen.

Die RDA weist als Hauptkomponente aller untersuchten Proben aus der Haldenbohrung Halit aus; gemäß der Kristalloptik liegt dieser mit Gehalten zwischen 74,70% (72\_WMD125, Teufe 125,65 m) und 90,78% (72\_WMD105, Teufe 105,05 m) vor. Im Mittel aller Bohrungen lag der Halitgehalt bei rund 86,35%<sup>16</sup>.

Der selektiv abgelagerte Randbereich oberhalb einer Tiefe von rund 16 m wurde nicht kristalloptisch untersucht, (vgl. dazu auch Kapitel 4.3.3), es ist aber davon auszugehen, dass die Halitgehalte dort aufgrund der relativen Anreicherung noch höher lagen, wie die Natrium-Chlorid-Summenkurve in Anlage 8.3 mit einem Maximum bei 97,5% (4,68 m) verdeutlicht. Wie vorstehend in Kapitel 4.3.3.1.2 dargestellt, wurde der Krustenbereich zur Errichtung des Bohrplatzes abgetragen, der selektiv abgelagerte Bereich umfasst also eine größere Breite, als durch die Beprobungen darstellbar.

Von den primär im Rückstand enthaltenen Phasen wurden weiterhin durch Kristalloptik und Röntgendiffraktometrie als Nebenbestandteile Anhydrit ( $\text{CaSO}_4$ , 0,03 – 2,33%) und Sylvin ( $\text{KCl}$ , 0,50 – 2,27%) nachgewiesen. Die in Einzelproben auftretenden Phasen Langbeinit und Dolomit sind ebenfalls dem Primärbestand des Rückstands zuzurechnen.

Kieserit konnte röntgendiffraktometrisch lediglich in einer Probe als wahrscheinlich vorhandener Nebenbestandteil oder Spur ausgewiesen werden (72\_WMD36, 36,73 m). Die in 2016 durchgeführte Vergleichsbeprobung des frischen Rückstands legt nahe, dass der Kieserit bereits bei der Aufhaltung teilweise hydratisiert vorliegt (Hexahydrat als wahrscheinlicher Nebenbestandteil), auch, da er unter den an der Halde herrschenden Bedingungen metastabil ist. Die in der Ergebnistabelle der kristalloptischen Analysen angegebenen Kieserit-Restgehalte sind aus der chemischen Analyse berechnet. Die kristalloptische Analytik weist neben dem berechneten Kieseritgehalt<sup>17</sup> auch optisch identifizierten Epsomit in den Proben 72\_WMD65 (2,07%) und 72\_WMD100 (0,29%) und in 72\_WMD125 (4,21%) aus. Kieserit ist bei Temperaturen über 68°C stabil, unterhalb geht er in Hexahydrat und schließlich Epsomit über. Dessen Stabilitätsbereich liegt gemäß /23/ zwischen 1,8 und 48°C; die Temperaturen im Haldenkörper begünstigen also das Auftreten der Hydratphase Epsomit gegenüber dem Kieserit (siehe Kapitel 4.1.3.2.5). In der RDA wurden hingegen keinerlei Hydratphasen des Kieserits nachgewiesen, was möglicherweise auf die Probenvorbereitung und Analytik zurückzuführen ist (geringe Probenmenge, mörsern). Kieserit ist in den Bohrproben gegenüber dem frischen Rückstand abgereichert: Sowohl die berechneten Kieseritgehalte als auch der kristalloptisch nachgewiesene Epsomitgehalt liegen unter dem Kieseritgehalt des frischen Rückstands von rund 5% (vgl. Abbildung 1-1). Probe WMD 125 nähert sich mit 4,21% Epsomitgehalt dabei dem Primärgehalt an und liegt

---

<sup>16</sup> Alle Prozentangaben in diesem Kapitel beziehen sich auf die Ergebnisse der kristalloptischen Analyse und Berechnung durch das Werk Neuhoof-Ellers. Die zugehörigen Prüfberichte sind in Anlage 8.4 enthalten.

<sup>17</sup> Der Kieseritgehalt wurde durch das Labor Neuhoof-Ellers berechnet, jedoch ist die Analytik nicht laugenfrei gerechnet, d.h. um die Lösungszusammensetzung korrigiert, da diese im Körper stark variiert. Die Kristalloptik wird an der feuchten Probe durchgeführt, um trocknungsbedingte Mineralumwandlungen zu vermeiden. Die ICP-Analytik, die zum Rückrechnen verwendet wird, erfolgt jedoch nach Auskunft des Werklabors Neuhoof-Ellers nach vorheriger Trocknung – allerdings bei niedrigen Temperaturen von rd. 40°C. Ein trocknungsbedingtes Ausfallen von Kieserit aus der magnesium- und sulfathaltigen anhaftenden Lösung ist nicht vollständig auszuschließen.



diesbezüglich deutlich über den anderen Proben. Hinzu tritt hier auch der Astrakanit als Magnesiumhaltige Sekundärphase, so dass laterale Verlagerungsprozesse hier eine Rolle spielen dürften (siehe unten).

Im zu betrachtenden System einer kieseritischen Steinsalzhalde stehen – mit Ausnahme des selektiv abgelaugten Randbereichs - alle Komponenten des hexären Systems für Umbildungsreaktionen zur Verfügung. Entsprechend vielfältig sind die angetroffenen Mineralphasen im Rückstand. So belegt die Röntgendiffraktometrie weiterhin das Vorhandensein von verschiedenen Sekundärbildungen wie Gips ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), Polyhalit ( $\text{K}_2\text{MgCa}_2(\text{SO}_4)_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), Leonit ( $\text{K}_2\text{Mg}(\text{SO}_4) \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ), Astrakanit ( $\text{Na}_2\text{Mg}(\text{SO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ), Eugsterit ( $\text{Na}_4\text{Ca}(\text{SO}_4)_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) und Kainit ( $\text{KMg}[\text{Cl}|\text{SO}_4] \cdot 2,75 \text{ H}_2\text{O}$ ; Einzelnachweis) sowie Glauberit ( $\text{Na}_2\text{Ca}(\text{SO}_4)_2$ ; Einzelnachweis) und Bassanit ( $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5 \text{ H}_2\text{O}$ ).

Das Vorkommen dieser Phasen im Rückstand wurde durch die Kristalloptik bestätigt. Zusätzlich wurden hier auch der vorstehend angesprochene Epsomit sowie in einer Probe Spuren von Schönit ( $\text{K}_2\text{Mg}(\text{SO}_4)_2 \cdot 6 \text{ H}_2\text{O}$ ; 0,1%, metastabil bei 25°C) identifiziert.

Polyhalit zeigt sich in fast allen Proben mit geringen Mengenanteilen von 0,28 bis 0,75%, er fehlt jedoch im Randbereich oberhalb von rd. 20 m Teufe.

Die größten Mengenanteile unter den Nebenbestandteilen nehmen in den kristalloptisch untersuchten Proben die kristallwasserhaltigen Sekundärphasen Astrakanit (max. 14,01% 125,65 m), Eugsterit (4,81%, 28,33 m) und Epsomit<sup>18</sup> (4,21%, 125,65 m) ein.

Die Summe der Sekundärphasen liegt lt. Kristalloptik zwischen rd. 0,5 % (105,05 m) und rd. 19% (125,65 m), wobei die Extremwerte räumlich in direkter Nachbarschaft liegen. Dies zeigt, dass der Anteil der auftretenden Sekundärphasen durch Lösungs- und Fließprozesse in der Halde gesteuert wird (siehe Kapitel 4.3.3.2.2).

#### 4.3.3.2.2 Prozesse im Haldenkörper

Die mineralogische Zusammensetzung variiert in Abhängigkeit von Probenahmetiefe, Temperatur und Wasser- bzw. Lösungsbeeinflussung der Bohrlochbereiche.

Der Vergleich mit dem frisch geschütteten Rückstand erlaubt eine Aussage zu den stattfindenden Alterationsprozessen in der Halde. Im Folgenden werden die anhand der RDA-Ergebnisse nachweisbar stattgefundenen Prozesse erläutert:

Prinzipiell folgt die Alteration des Rückstands dem folgenden Schema:

1. Hydratisierung
2. Bildung von Doppelsalzen über die Lösungsphase, einschließlich Entstehung von  $\text{MgCl}_2$ -Lösung als Reaktionsprodukt, und Abfließen der Lösung
3. Lösungsprozesse des gesamten Rückstands in Abhängigkeit von der Löslichkeit der Phasen im Kontakt mit Niederschlagswässern bzw. ungesättigten Lösungen (wobei

---

<sup>18</sup> Die Umbildung von Kieserit zu Epsomit geschieht gemäß /11/ innerhalb von Stunden. Folglich muss selbst im Haldenkern Kieserit nicht als solcher vorliegen, sondern kann als Epsomit angesprochen werden. Auch durch die Probenvorbereitung wird das Auftreten von Hydratphasen begünstigt, da die Wasseraufnahme laut /11/ durch Mörsern beschleunigt wird. Bei der Umwandlung zu Epsomit wird das im Kieserit stark gebundene Kristallwasser zu schwach gebundenem Kristallwasser im Epsomit.

selbst im austretenden Haldenwasser eine Sättigung an den Nebenbestandteilen des Rückstands nicht erreicht wird, d.h. es besteht theoretisch weiteres Lösepotenzial an diesen Phasen)

4. Umlagerungs- und Fällungsprozesse entlang der Sickerstrecke, bei Wechsel der Umgebungsbedingungen, insbesondere im Randbereich unter dem Einfluss des Temperaturgradienten bzw. Temperatursprungs im Bereich der Kruste oder beim Austritt des Haldenwassers aus dem Haldenkörper

Hierbei ist zu beachten, dass die vorgenannten Prozesse sich im Haldenkörper gegenseitig überlagern und beeinflussen. Die jeweilige Zusammensetzung der Sekundärbildungen ist dabei abhängig von den Umgebungsbedingungen. Wesentliche Einflussfaktoren sind dabei die Temperatur und der Magnesiumgehalt. Letzterer ist begrenzender Faktor für die Bildung von Sekundärphasen wie Astrakanit und Leonit, während Natrium und Chlorid im Überfluss zur Verfügung stehen. Kainit wurde nur in einer einzigen Probe identifiziert. Er bildet sich bei Anwesenheit von ausreichend  $\text{MgSO}_4$  aus Carnallit; dieser tritt jedoch ebenfalls nur untergeordnet auf.

Die Reaktions- bzw. Alterationsgeschwindigkeit ist abhängig von deren langsamstem Teilprozess, der Hydratisierung. Die Erhaltung einer Phase im Alterationsprozess ist abhängig von Löslichkeit, Temperatur (Stabilität), Vorhandensein von Reaktionspartnern, aber auch von ihrer Verteilung bzw. des Aufschlussgrades / der einer Reaktion zugänglichen Oberfläche im Rückstand (z.B. Einschlüsse von Sylvin in Halit).

Bei dem überwiegenden Teil des Rückstandsinventars und den Sekundärphasen handelt es sich um leichtlösliche Salze, so dass Anreicherungszone sich durch Verlagerungsprozesse rasch verschieben können. Die Umgebungsbedingungen wechseln innerhalb des Haldenkörpers bereichsweise, teils kleinräumig, insbesondere im temperaturbeeinflussten Randbereich (vgl. Kap. 4.1.3.2.5) oder aber im Bereich markanter Schüttflächen und Lösungszutritte (vgl. Kap. 4.3.3 und 4.1.2). Die Aushaltung der im Rahmen der Haldenbohrungen am Standort Hattorf ausgewiesenen Zonierung wird jedoch grundsätzlich auch durch die mineralogische Zusammensetzung in B 72/2014 WI gestützt.

Letztlich erlaubt die angetroffene Vergesellschaftung von Mineralphasen Aussagen über die Sickerwasserbewegungen im Haldenkörper. Beispielsweise fehlen leichtlösliche Sekundärbildungen bei nachhaltigem Kontakt mit dem an Magnesium und Kalium stets untersättigten Haldensickerwasser. Das Vorliegen von Gips in relevanten Größenordnungen hingegen markiert Bereiche, die lange den Atmosphären zugänglich waren. Die teufenabhängige mineralogische Analyse eignet sich also zur Verifizierung der anderen Untersuchungsverfahren. Erfahrungsgemäß treten die in der Kernansprache identifizierten Schüttflächen auch hinsichtlich ihrer mineralogischen „Signatur“ deutlich hervor. Diese entspricht derjenigen der aktuellen Randbereiche.

Der anhand der chemischen Analysen nachgewiesene, selektiv an Wertstoff-Restgehalten entfrachtete oberflächennahe Bereich (vgl. Kap. 4.3.3) wird auch durch die qualitative Phasenanalyse (RDA) bestätigt. Oberhalb von rund 16 m Teufe treten neben der Hauptkomponente Halit lediglich Anhydrit und seine Hydrate auf, sowie in Einzelproben Polyhalit und Glauberit bzw. Eugsterit, beides Ca-Na-haltige Doppelsalze. Erste kaliumhaltige

Phasen treten unterhalb von 16 m Teufe hinzu (Sylvin, Polyhalit); allerdings wurde, wie in Kapitel 604.3.3.1.2 ausgeführt, Kalium mittels ICP-OES oberhalb von 41 m Bohrtiefe nicht nachgewiesen, hier dürften also nur geringe Mengen der o.g. kaliumhaltigen Phasen anwesend sein. Magnesiumhaltige Phasen treten erst unterhalb von 36 m Teufe auf. Eugsterit wird hier von Astrakanit und Leonit abgelöst. Die Kalium- Lösungsfront bleibt also hinter der Magnesium-Lösungsfront zurück.

Der im Randbereich als Nebengemengteil identifizierte Gips entstand durch Hydratisierung aus Anhydrit. Gemäß /7/ setzt die Anwesenheit gesättigter NaCl-Lösung die Umwandlungstemperatur von ca. 42°C auf 18°C herab. Folglich wird die Gipsbildung bei den Temperatur im Haldenkörper begünstigt: diese liegt in einer Tiefe von 47 bei 17,7 °C, und steigt zur Teufe hin bis auf 22°C an (Vgl. Kap. 4.1.3.2.5). Die Hydratisierung kann über die Lösungsphase erfolgen, oder über die Zwischenstufe Bassanit – beide Prozesse sind im Haldenkörper grundsätzlich vorstellbar, und der in Probe WMD 4-2 angetroffene Bassanit zeigt eine stufenweise Umwandlung an. Die Umbildung ist aber langwierig und die Vergipsung offenbar nicht abgeschlossen – beide Phasen kommen nebeneinander vor. Neben dem Randbereich wurde Gips in relevanter Menge auch in Probe WMD 100 identifiziert. Der Bereich war offenbar lange Zeit dem Atmosphäreneinfluss zugänglich. Wie bereits in Kapitel 4.3.3.1 dargestellt, handelt es sich bei dem Bereich offenbar um die ehemalige Oberfläche der Althalde, die nach längerer Ablagerungsdauer bei der Haldenerweiterung 1995 überschüttet wurde. Ein Einfluss der Gipsbildung auf die Verfestigung des Rückstands ist aufgrund des insgesamt geringen Anhydritgehaltes im Primärückstand nicht zu erwarten.

Zur Tiefe hin treten Leonit und Astrakanit als typische Sekundärbildungen auf. Gemäß Tafel 20 in /6/ haben beide einen ähnlichen Stabilitätsbereich. Die Stabilität von Leonit wird dabei bei höheren Magnesiumchlorid-Gehalten zu tieferen Bereichen hin verschoben. Leonit entsteht bei Umsetzung der Sylvin-Restgehalte mit  $MgCl_2$ -Lösung. Das gleichzeitige Auftreten von Sylvin und Leonit im Tiefenbereich zwischen rd. 50 – 70 m (Proben WMD 50-70) zeigt, dass die Umwandlung in diesem Bereich noch nicht abgeschlossen ist, trotz einer Lagerungsdauer des Bereichs von rund 18 Jahren. Möglich ist jedoch auch eine Erhaltung von Sylvin-Resten als Einschlüsse in Halit; dies wurde verschiedentlich in Dünnschliff-Untersuchungen von Rückstand des Standorts Hattorf beobachtet. Eine andere mögliche Erklärung für die verzögerte Umwandlung ist das Fehlen oder der Mangel an einer Lösungsphase in dem Bereich, der sich durch Sättigungen von 50% und geringer sowie vergleichsweise niedrige Haftwassergehalte auszeichnet (überwiegend um oder unter 2%, Ausnahme: WMD 75). Unterhalb von rd. 80 m bis 95 m hingegen tritt nur noch Leonit auf, in diesem Bereich ist die Umsetzung abgeschlossen. Wäre weiterer Sylvin vorhanden, würde sich die Umsetzung zu Arcanit ( $K_2SO_4$ ) fortsetzen, vergleichbar dem zur Produktion von Kaliumsulfat eingesetzten Leonit-Verfahren. Die Umsetzung ist jedoch begrenzt durch die geringen Sylvin-Anteile.

Die Sekundärphasen Astrakanit, Leonit und Kainit sind wasserhaltig, der Primärbestand des Rückstands weist hingegen mit Ausnahme des gering wasserhaltigen Kieserits ( $MgSO_4 \cdot H_2O$ ) von dem nur in Spuren vorhandenen Carnallit ( $KMgCl_3 \cdot 6 H_2O$ ) keine stark wasserhaltigen Phasen auf. Ein erhöhter Anteil an Sekundärphasen wird bereits durch einen erhöhten Anteil des Kristallwassers am Gesamtwasser angekündigt, umgekehrt zeigen selektiv abgelagerte Randbereiche nur geringe Kristallwasseranteile (vgl. Kap. 4.3.3.3).

Als Nebenprodukt der oben genannten Umsetzungsreaktionen (Bildung von Natriumsulfat und sulfatischen Kalimineralen) entsteht Magnesiumchlorid-haltige Lösung, deren Vorhandensein als Indikator für Umbildungsprozesse im Haldenkörper angesehen werden kann /18/. Diese Magnesiumchlorid-Lösung findet sich in den RDA-Analysen trocknungsbedingt in Form von Bischofit wieder. Bischofit wurde in allen kristalloptisch begutachteten Proben ohne eindeutige Tiefenabhängigkeit angetroffen. Die bei den Umsetzprozessen entstehende Magnesiumchlorid-Lösung fließt aus dem Haldenkörper ab; entsprechend weisen die Haldenwässer frischer Schüttbereiche höhere Magnesiumgehalte auf als diejenigen aus länger abgelagerten Bereichen.

Polyhalit kommt mit Ausnahme des Randbereichs oberhalb von rd. 20 m Teufe im gesamten Tiefenbereich vor und kann damit als „Durchläufer“ bezeichnet werden. Das Mineral entsteht gemäß /28/ bei Temperaturen von unter 30°C aus Anhydrit bzw. Gips und magnesium-, kalium-, und sulfathaltiger Lösung, was sein Fehlen im selektiv abgelagten Randbereich erklärt.

Auch Astrakanit tritt als „Durchläufer“ im Bereich zwischen 36 und 91 m Tiefe auf, ebenso zwischen 120 m und der erreichten Endtiefe. Astrakanit entsteht durch Hydratisierung von Kieserit und anschließende Doppelsalzbildung über die Lösungsphase – die Hydrate des Kieserits werden aufgelöst, Astrakanit wird ausgefällt. Die ebenfalls entstehende  $MgCl_2$ -Lösung fließt ab. Astrakanit ist eine Vorstufe der Natriumsulfat-Bildung, die selbst nicht nachgewiesen werden konnte. Der Astrakanit-Gehalt ist gemäß /23/ dort am höchsten, wo alles  $MgSO_4$  umgesetzt ist, und die  $NaSO_4$ -Bildung beginnt. Schon die Ergebnisse der Trocknung ließen bei den Proben WMD 50 und WMD 65 hohe Anteile an Sekundärphasen vermuten; die kristalloptische Analyse ergab dort jeweils über 5% Astrakanit. Gleiches gilt für die Probe WMD 125 mit 14% Astrakanit. Der berechnete Kieseritgehalt war in diesen Proben entsprechend niedrig, das  $MgSO_4$  ist hier vollständig umgesetzt. Ausgehend von rd. 7% Nebenbestandteilen exklusive Anhydrit und Ton zeigen die hohen Astrakanitgehalte auch einen Verlagerungsprozess im Rückstandskörper an.

Eine Unterbrechung erfährt diese Zonierung in dem Bereich zwischen rd. 100 m und ca. 115 m, welcher durch zwei deutliche Schüttflächen bei rd. 100 m und rd. 114 m begrenzt ist. Insbesondere der Bereich bei 100 und 105 m ähnelt den Proben aus dem Randbereich – es fehlen neben Kieserit und Sylvinit auch Sekundärphasen mit Ausnahme des ubiquitären Polyhalits sowie Gips, der hier neben Anhydrit steht und Gehalte von 2,7% in Probe WMD100 (100,15 m) erreicht. Diese Beobachtungen sprechen für die durch die Schüttfläche markierte alte Oberfläche, die offenbar lange dem Atmosphäreneinfluss ausgesetzt war. Die Probe WMD105 (105,05 m) wurde als Vergleichsprobe zu WMD20 (20,83 m) ausgewählt, letztere erschließt den Randbereich unter der selektiv abgelagten Fläche. Beide Proben wiesen eine ähnliche Signatur hinsichtlich des Verhältnisses von Haftwasser zu Gesamtwasser auf – sie zeigten einen hohen Haftwasseranteil bei insgesamt geringem Gesamtwassergehalt, daher waren wenig wasserhaltige Sekundärphasen zu erwarten. Die daraus abgeleitete Erwartung, dass der Bereich bei 105 m selektiv abgelagert ist, wurde durch die mineralogische Analyse (und die chemische Analytik, siehe Kap. 604.3.3.1.2) bestätigt: Beide Proben beinhalten Anhydrit und Polyhalit, sowie Spuren von Sylvinit, weitere Sekundärphasen fehlen. Eugsterit fehlt in 105m Tiefe, der (berechnete) Sylvinit- und Kieseritgehalt liegt hier hingegen höher, was im Zusammenhang mit den Wasserzutritten im Bereich dieser Schüttfläche stehen dürfte (vgl. Kapitel 4.2.2.3), die höhere Magnesiumgehalte im Vergleich zu den Wässern des

Randbereichs aufwiesen. Magnesiumhaltige Sekundärphasen wurden in diesem Bereich nicht angesprochen, daher liegt eine Beeinflussung durch Lösung (auskristallisiert als Bischofit bzw. berechnet) nahe. Unterhalb der Schüttfläche bei 114 ist, trotz längerer Offenlagerungszeit (siehe Kapitel 2.1), hingegen nur ein kleinräumiger Einfluss der ehemaligen Oberfläche sichtbar (Vorkommen von Eugsterit in WMD 115, siehe Anlage 8.4.1), bereits bei rd. 120 m Tiefe tritt wiederum Astrakanit hinzu (siehe dazu auch die Ausführungen zu dessen Erhaltung im nachfolgenden Kapitel).

#### 4.3.3.2.3 Vergleich zu den Ergebnissen der Haldenbohrungen am Standort Hattorf 2013

Im Vergleich zu der mineralogischen Zusammensetzung der in 2013 am Standort Hattorf geteuten Haldenbohrungen fehlen hier die Phasen Syngenit, Thenardit, Schönit und D`Ansit. Die Abwesenheit des Syngenit, der in HA insbesondere in Vertikalbohrung B 98/2013 HA auftrat, zeugt von höheren Magnesiumgehalten in dem durch die Bohrung erschlossenen Bereich. Eugsterit, der im Randbereich der Bohrung B 72/2014 WI (oberhalb 36 m) und auch unterhalb einer Schüttfläche bei rund 115 m identifiziert wurde, ist auch aus Hattorf bekannt (Randbereiche B 100/2013 HA), und tritt in alterierten, an magnesiumhaltigen Phasen abgereicherten Randbereichen auf. In natürlichen Vorkommen ist Eugsterit assoziiert mit Thenardit und Halit und entsteht durch Evaporation aus nichtalkalinen Lösungen /30/. Gemäß /30/ ist die Herstellung von Eugsterit unter Laborbedingungen bei 60°C problemlos möglich, doch es ist keine synthetische Herstellung von Eugsterit bei Raumtemperatur gelungen, weshalb davon auszugehen ist, dass er an der Halde metastabil vorliegt und sich evtl. bei hohen Temperaturen an der Haldenoberfläche (ähnlich dem Thenardit) bildet, oder aber schon beim Aufhaldungsprozess vor Abkühlung des Rückstands.

Polyhalit als „Durchläufer“ trat sowohl in Hattorf als auch in Wintershall in allen Bohrungen auf. Auch Astrakanit wurde an beiden Standorten angetroffen, in Hattorf in allen Bohrungen mit Ausnahme der B 100/2013 HA. Das aufgrund der häufig beobachteten winterlichen Glaubersalzbildung erwartete Natriumsulfat (Thenardit / Mirabilit) wurde jedoch in Wintershall selbst nicht, in Hattorf nur in Einzelproben nachgewiesen. Die Umbildung gelangte also faktisch nicht zum Abschluss. Das Vorhandensein des Astrakanit deutet auf einen Kontakt des Rückstands mit den Atmosphären hin, gleichzeitig hätte sich dieser aufgrund der fortgesetzten Reaktion und letztlich aufgrund der Löslichkeit des Natriumsulfats nicht erhalten, stünde der Bereich im ständigen Kontakt mit Sickerwasser. Eine nachhaltige Durchströmung des Bereichs mit Sickerwässern ist also nicht anzunehmen. Möglich ist, dass der Bereich durch wiederholte Übersättigung der jeweiligen Oberfläche geprägt ist.

Selektiv an Nebenbestandteilen und Sekundärbildungen mit Ausnahme von Gips abgelaugte Bereiche wurden in Hattorf ebenso angetroffen wie in Wintershall. Bohrung B 72/2014 WI zeigt einen aus mineralogischer Sicht stark alterierten Bereich bis oberhalb von 16 m, danach treten zuerst Kalium-, dann magnesiumhaltige Phasen hinzu. Die chemische Analytik bestätigt diese Beobachtung. Der Bereich ist vergleichbar mit dem selektiv abgelaugten Bereich der Horizontalbohrung B 99/2013 HA, die einen Haldenbereich mit einer ähnlich langen Lagerungszeit von rund 17-18 Jahren erschließt. Die dort beobachtete Ablaugungszone war rund 12 m breit (vgl. auch 4.3.3.1.2 und 4.3.3.1.3).

Aufgrund des weitgehend identischen Stoffinventars der beiden Halden sind die vorstehend beschriebenen Prozesse charakteristisch für beide Standorte. An der Halde Wintershall ist der

Einfluss der Magnesiumkomponente trotz des relativ langen Ablagerungszeitraums des Rückstands im Vergleich zu ähnlich alten Bereichen, die in Hattorf untersucht wurden, höher. Bereichsweise steht dies im Zusammenhang mit der bzw. den „aktiven“ Schüttflächen im Tiefenbereich um rund 100 m, über welche magnesiumreiche Wässer dem Rückstand zutreten (vgl. Kapitel 4.2.2.3). Die mineralogischen Analysen zeigen jedoch auch, dass dieser Einfluss räumlich sehr begrenzt ist: Bereiche mit hohen und geringen Anteilen an Sekundärphasen liegen unmittelbar nebeneinander (siehe Kapitel 4.3.3.1.1)

#### **4.3.3.3 Wassergehaltsbestimmungen**

Die Lösungsgehalte, die anhand der durch Karl-Fischer-Titration ermittelten Porenwassergehalte errechnet wurden, liegen im unmittelbaren Randbereich der Bohrung bis rd. 5 m Teufe unter bzw. bei 2%, um dann im Bereich zwischen rd. 8 m bis etwa 40 m stark anzusteigen und auf hohem Niveau zu schwanken (siehe Anlage 8.3, S. 2). Hier wird ein Maximalwert von 11,8% bei rd. 25 m Teufe erreicht. Ab rd. 42 m Teufe bewegen sich die Werte mit wenigen Ausnahmen zwischen 2 und 4% und schwanken nur geringfügig bis zur Endteufe, ein Verlauf, der in ähnlicher Art auch in den Haldenbohrungen am Standort Hattorf beschrieben wurde /2/. Eine Ausnahme bildet auch hier der Bereich zwischen rd. 100 m und 110 m Teufe unterhalb der markanten Schüttfläche bei 99,7 m Teufe, wo Lösungsgehalte zwischen 4,4 und 5,4 % ermittelt wurden. Unterhalb von 110 m Teufe liegen die Lösungsgehalte wiederum bei rd. 3%. Weitere Ausnahmen mit höheren Lösungsgehalten in Einzelproben traten im Bereich der in der Kernansprache identifizierten Schüttflächen unterhalb von 50 m und 75 m auf (Probe WMD52: 5,16%; Probe WMD75: 4,57%).

Für den Vergleich zur Feuchte des frisch aufgehaldeten Rückstands können die Ergebnisse der Sonderbeprobung 2016 herangezogen werden (vgl. Anlage 8.2). Im Mittel der Dreifachbestimmung mittels Karl-Fischer-Titration ergab sich dort ein Wassergehalt nach Karl Fischer (in Prüfbericht 161653 in der Anlage 8.2 ausgewiesen als „Haftwassergehalt“) von 4%. Wie aus Anlage 8.3 hervorgeht, liegen die in der Bohrung durch Karl-Fischer-Titration bestimmten Wassergehalte ab rd. 42 m Teufe durchgehend unterhalb von 4 %. Über weite Strecken in der Bohrung wurden Wassergehalte von rd. 1,5 – 2,5 % ermittelt, auch in den stark verdichteten Bereichen im Bohrlochtiefsten unterhalb von 110 m Teufe. Die Wassergehalte von rd. 2% entsprechen einem Lösungsgehalt von rd. 3%, wie aus den Diagrammen in Anlage 8.3, S. 2 ersichtlich ist. Es ist davon auszugehen, dass dieser Anteil der dem Rückstand anhaftenden Feuchte gegen die Schwerkraft gehalten wird und im Haldenkörper verbleibt. Auch für die Bohrungen am Standort Hattorf wurde nachgewiesen, dass selbst in Haldenkernbereichen ein Anteil von Restfeuchte am Rückstand verbleibt, der nicht gravitativ entwässerbar ist, und in ähnlicher Größenordnung liegt wie der für den Standort Wintershall ausgewiesene.

In den randnahen Bereichen übersteigen die Wassergehalte die initiale Rückstandsfeuchte (bestimmt durch Trocknung bei 105°C) von 4-6 % teilweise und wechseln sich dabei kleinräumig mit gering feuchten Bereichen ab, wie auch bereits in den Bohrungen am Standort Hattorf festgestellt (Beispiel: Restfeuchte 4,5 % bei rd. 22,35 m Teufe, 7,4 % bei 24,63 m). Die kleinräumigen Schwankungen korrespondieren häufig mit Schüttflächen und beobachteten Haldenwasserzutritten (vgl. Kapitel 4.1).

Zum Vergleich zu den Ergebnissen der Hattorfer Haldenbohrungen und der üblichen Analysenmethodik zur Schnellerfassung der Rückstandsfeuchten im Betrieb erfolgt ergänzend eine Betrachtung der analytisch durch Ofentrocknung bei 55°C bzw. 105°C ermittelten Wassergehalte. Die üblicherweise durch Ofentrocknung bei 105°C ermittelten Wassergehalte des frisch aufgehaldeten Rückstands liegen nach Werksangaben bei rund 4-6% (vgl. auch Tabelle 1-2). Sowohl dieser Wert als auch die Trocknungsergebnisse der analysierten Bohrkernproben stellen aufgrund der in Kap. 4.3.2 diskutierten Einflüsse der Analysenmethode eine konservative Annahme dar. Deshalb wurden für alle weiteren Berechnungen die durch Karl-Fischer-Titration ermittelten Porenwassergehalte verwendet.

Die durch Ofentrocknung bei 55°C ermittelten Wassergehalte liegen unterhalb von 28 m Teufe durchgehend unter 6%, unterhalb von rd. 42 m Teufe bis auf wenige Ausnahmen im Bereich der vorstehend erwähnten Schüttflächen unter 4%.

Der Vergleich von Ofentrocknung bei 55°C zu Karl-Fischer-Titration zeigt, dass die durch Trocknung ermittelten Werte den Haftwassergehalt grundsätzlich überschätzen, und teils deutlich von den Wassergehalten nach Karl Fischer abweichen, vermutlich aufgrund des Einflusses kristallwasserhaltiger Phasen. Dies gilt umso mehr für den Trocknungsverlust bei 105°C; die Methode kann insofern als konservativ gelten, wenn es um die Bewertung der anhaftenden Feuchte im Aufhaldungsprozess geht. Erwartungsgemäß ist die Abweichung zwischen den Ergebnissen der Karl-Fischer-Titration und der Ofentrocknung bei 105°C gering im Randbereich, wo kaum kristallwasserhaltige Phasen auftreten (minimale Abweichung 0,2% in Probe WMD8 bei 8,93 m Teufe). In Bereichen im Haldeninneren, für die die Kristalloptik und RDA ein vermehrtes Auftreten kristallwasserhaltiger Phasen belegen, ist die Abweichung hingegen hoch (maximale Abweichung 4,9% in Probe WD127 bei 127,35 m, benachbarte Proben mit Astrakanit als Nebenbestandteil, vgl. Anlage 8.4.1 und 8.4.2).

In SESSLER (1998) wurde erstmals das Verhältnis von Poren- und Kristallwassergehalten als Kriterium zur Abgrenzung von Mantel- und Kernbereich der Halde herangezogen. Demnach liegt der Haftwassergehalt<sup>19</sup> „im Vergleich aller Proben aus dem Mantel etwa zwei- bis dreimal so hoch wie der Haftwassergehalt der Proben aus dem Haldenkern“; ein ähnliches Verhältnis wurde auch für die Halde Neuhof gefunden /25/. Diese Methode fand auch im Rahmen der Haldenbohrungen am Standort Hattorf Anwendung, und wird für die Bohrung B 72/2014 WI ebenfalls herangezogen: Wie in Anlage 8.3, Seite 2, im Diagramm „Anteil Poren- und Kristallwasser am Gesamtwasser“ dargestellt, ist - analog zu den Beobachtungen am Standort Hattorf - auch in Bohrung B 72/2014 WI ein randlicher Bereich mit hohen Porenwasseranteilen<sup>20</sup> am Gesamtwasser feststellbar (bis rd. 38 m), gefolgt von einem Übergangsbereich mit wechselnden Anteilen von Poren- zu Kristallwasser oberhalb von rd. 58 m sowie zum Bohrlochtiefsten hin einem Bereich mit durchgehend hohen Kristallwasseranteilen unterhalb von rd. 58 m. Wie auch im Rahmen anderer Untersuchungen festgestellt, weicht der Bereich unterhalb der Schüttfläche bei rd. 100 m von dieser generellen Zonierung ab: zwischen rd. 100 m und 110 m schließt sich ein weiterer Bereich mit hohem

---

<sup>19</sup> Haftwassergehalt ist hier ein Synonym für Porenwasser (Bestimmung erfolgte durch Trocknung bei 60°C und Abzug des Epsomit-Gehalts, erfasst wurden also das Haft- bzw. Adsorptionswasser sowie das freie Wasser in den Poren. Vgl. Glossar)

<sup>20</sup> Verwendet wurden für diese Berechnung die Porenwasseranteile mit Bezug zur Feuchtmasse, analog zu den Auswertungen von SESSLER aus 1998 /25/.

Poren- und geringem Kristallwassergehalt an, gefolgt von einem weiteren Bereich schwankender Poren- und Kristallwassergehalte unterhalb von rd. 110 m bis oberhalb von 122 m. Die Schüttfläche bei 114 m spielt hier, trotz längerer Offenlagerungszeit, kaum eine Rolle - ab rd. 122 m liegen wiederum durchgehend hohe Kristallwasseranteile vor. Die Zonierung innerhalb der Bohrung wiederholt sich folglich kleinräumig unterhalb der markanten Schüttfläche bei rd. 100 m Teufe. Die Kamerabefahrung und die Packertests haben für diesen Bereich Lösungszutritte ausgewiesen. Zur Interpretation dieser Beobachtung wird auf Kapitel 5.1.5 verwiesen.

#### **4.3.3.4 Bestimmung der Haftlösungsgehalte (IBeWa)**

Ergänzend zu den von K+S durchgeführten Betrachtungen zu den Wassergehalten im Haldenkörper wurden durch IBeWa an den ausgebauten Proben aus der Lösungspermeabilitätsbestimmung (s. Kapitel 4.3.5.4.2) Untersuchungen zum Haftlösungsgehalt durchgeführt, deren Ergebnisse in Anlage 8.5 dargestellt sind. Die für das Prozessverständnis der Fließprozesse im Haldenkörper wesentlichen Ergebnisse werden hier nachfolgend zusammengefasst:

Die sieben Proben, die für die Bestimmung der Haftlösungsgehalte verwendet wurden, sind über den gesamten Kernmarsch verteilt (siehe Anlage 8.1 und 8.5). Die Proben wurden, wie in Anlage 8.5. beschrieben, zur Einstellung eines thermodynamischen Gleichgewichts im Exsikkator über Gleichgewichtslösungen gelagert, die aus benachbarten Kernbereichen hergestellt wurden. Dabei wurde zeitabhängig die Masseänderung überwacht.

Nach Abschluss der Lösungspermeabilitätsbestimmungen war davon auszugehen, dass die Proben im Bereich der strömungsrelevanten Wegsamkeiten gesättigt waren, jedoch stellte sich heraus, dass nicht der gesamte Porenraum gesättigt war, obwohl ein stationärer Strömungsvorgang dokumentiert wurde. Dies bestätigt nach Auffassung der IBeWa die bereits für den Standort Hattorf getroffene Aussage /2/, dass die Strömung über bevorzugte Wegsamkeiten erfolgt.

Drei der sieben untersuchten Proben zeigten eine Massenzunahme im Versuch, die auf die Hydratisierung des Probenbestands zurückgeführt wird; was bedeutet, dass vor dem Versuch hier keine Hydratphasen bestanden, und somit kein Kontakt mit Lösungen bestanden haben kann, der zur Hydratisierung geführt hätte. Vier der Proben hingegen zeigten einen Masseverlust, der auf die gravitative Entwässerung eines Teils der aus den Lösungspermeabilitätsversuchen enthaltenen Lösungen hinwies.

Für die Beurteilung des Wasseraufnahme- bzw. Wasserhaltevermögens gegen die Schwerkraft ist dabei das Verhältnis vom sich einstellenden Haftlösungsgehalt zum initialen Lösungsgehalt (Probe vor der Aufsättigung im Lösungspermeabilitätsversuch) entscheidend. Im Ergebnis der Versuche zeigten alle Proben einen höheren Haftlösungsgehalt gegenüber dem initialem Lösungsgehalt, der durch Karl-Fischer-Titration ermittelt wurde (siehe Kap. 4.3.3.3). Lt. Ergebnisbericht in Anlage 8.5 liegt das Verhältnis bei 0 bis 2,7 (siehe Anlage 8.5, dort Abb. 4-16), die Spannbreite wird dabei von einer Vielzahl von Einflussgrößen, wie der Heterogenität des Materials, zurückgeführt. Grundsätzlich wird jedoch festgehalten, dass die Erhöhung der Haftlösungsgehalte im Versuch darauf schließen lässt, dass die Proben



nicht durch den Sickerprozess beeinflusst wurden, denn sie können gravitativ im Porenraum mehr Lösung „anhaften“, als initial darin enthalten war. Sie besitzen also ein Retardations- bzw. Speichervermögen, das über das initial ausgeschöpfte hinausgeht. Auch dieses Ergebnis ist ein Indiz für die in /2/ beschriebenen bevorzugten Wegsamkeiten, die für die Fließprozesse maßgeblich sind. Einige der untersuchten Proben stammt aus den Bereichen, in denen die stärksten Lösungszutritte zum Bohrloch verzeichnet wurden, sowohl aus dem Randbereich (18 bzw. 30 m Teufe) als auch dem Teufenbereich um 100 m. Selbst hier ist offenbar keine flächige Durchströmung gegeben.

#### 4.3.4 Dichtebestimmung, berechnete Porositäten und Sättigungen

[WE\_F/U\_H Poppitz]

Die Tiefenprofile der Dichten, Porositäten und Sättigungen sind in Anlage 8.3 enthalten. Die Ergebnisse werden nachfolgend kurz beschrieben.

##### 4.3.4.1 Ergebnisse der Dichtebestimmungen

Die im Heliumpyknometer an den bergfeuchten Rückstandsproben bestimmten **Reindichten** wurden um den enthaltenen Lösungsanteil korrigiert, indem das Volumen der enthaltenen gesättigten Lösung von der analytisch bestimmten Reindichte abgezogen wurde. Die so ermittelten korrigierten Reindichten des Rückstands liegen in allen Proben zwischen 2,0 g/cm<sup>3</sup> (rd. 24 m) und 2,15 g/cm<sup>3</sup> (rd. 115 m). Schwankungen der Reindichten innerhalb des angegebenen Wertebereichs treten über die gesamte Tiefe auf. Auffällig in der Diagrammdarstellung in Anlage 8.3 ist der Bereich zwischen rd. 12 und 40 m Tiefe mit etwas verringerten Reindichten, was möglicherweise auf die auftretenden Mineralphasen zurückzuführen ist (z.B. wurde Eugsterit in Kristalloptik und RDA für diesen Bereich ausgewiesen). Die ermittelten Reindichten entsprechen in der Größenordnung den Ergebnissen der Hattorfer Haldenbohrungen (2,04-2,26 g/cm<sup>3</sup>) /2/.

Die **Trockenrohdichten** wurden gemäß der Angaben im Glossar aus den Nassrohdichten ermittelt und dichtekorrigiert. Sie liegen in allen Bohrungen zwischen 1,41 g/cm<sup>3</sup> am Rand der Bohrung und 1,96 g/cm<sup>3</sup> (rd. 125 m). Die von IBeWa im Zuge der Laborversuche zur Porosität und Permeabilität ermittelten Trockenrohdichten sind vergleichbar zu den durch das K+S Forschungsinstitut bestimmten und erreichen Werte bis max. 2,01 g/cm<sup>3</sup>.

Wie auch bereits für die Horizontalbohrungen am Standort Hattorf beschrieben, weist der Randbereich der Bohrung B 72/2014 WI geringe und schwankende Rohdichten auf, gefolgt von einem starken Anstieg zur Tiefe hin. Ab rund 40...42 m Tiefe schwankt die dichtekorrigierte Trockenrohndichte in einem engen Wertebereich zwischen rd. 1,8 und 1,95 g/cm<sup>3</sup>, mit einzelnen Ausreißern.

Für die Hattorfer Horizontalbohrungen wurden in den Randbereichen der Bohrungen B 100 und B 104/2013 HA) noch geringere Rohdichten beschrieben, gleichzeitig wurde erkannt, dass die Entwicklung der Trockenrohdichten und die Dichteentwicklung im Haldenkörper altersabhängig sind, wobei in frischerem Rückstand höhere Porositäten und entsprechend geringere Trockenrohdichten auftraten /2/. Die Ablagerungsdauer des Rückstands im

Randbereich der B 72/2014 WI ist mit rd. 17-18 Jahren größer als bei den vorgenannten Hattorfer Bohrungen, was diesem Prozessverständnis entspricht.

#### 4.3.4.2 Totale Porosität, Ergebnisse der Berechnung

Bei der Bewertung der Porositäten wird hier zunächst auf die totale Porosität Bezug genommen, da für den Standort Hattorf gezeigt werden konnte, dass für die totale und effektive Porosität im Grundsatz die gleichen Abhängigkeiten zur Teufe und Trockenrohdichte bestehen (/2/). Die totale Porosität des Rückstands ist aber kein Maß für dessen Permeabilität. Entscheidend sind der Grad der Porenverbindungen sowie die Porengrößenverteilung innerhalb des Haldenkörpers, deshalb wurden durch die IBeWa Ingenieurpartnerschaft zusätzliche Untersuchungen zur effektiven Porosität und Permeabilität durchgeführt, deren Ergebnisse im Kap. 4.3.5.3 erläutert und in Anlage 8.6 zusammenfassend mit den Ergebnissen des K+S Forschungsinstituts dargestellt sind.

Die berechnete **totale Porosität** der Proben verhält sich bei den nahezu gleichbleibend hohen Reindichten antiproportional zu den Trockenrohdichten, was bereits für den Standort Hattorf beschrieben wurde (/2/). Entsprechend sind auch hier randlich hohe und schwankende Porositäten zu verzeichnen, die bis rund 40 m zunächst stark abnehmen. Porositäten liegen zwischen 34,98% am Rand der Bohrung und 7,45% bei rund 50 m Teufe. Unterhalb 40 ... 45 m Teufe schwankt die totale Porosität in einem engen Wertebereich von rd. 10 bis 15 Prozent, mit einzelnen Ausreißern hin zu geringfügig höheren Porositäten bei 75, 100 und 107,8 m Teufe, die wahrscheinlich auf benachbarte Schüttflächen zurückzuführen sind. Beispielsweise wurden in Kamerabefahrung und Kernansprache bei 75,10 m und 99,7-100,5 m Schüttflächen identifiziert. Andere Schüttflächen, wie die bei 114 m durchteufte, 10 Jahre lang offen liegende ehemalige Oberfläche, waren diesbezüglich unauffällig. Unterhalb von 110 m Teufe bewegen sich die Werte um 10% totale Porosität.

Mehrfachbeprobungen bei K+S sowie IBeWa haben gezeigt, dass kleinräumige Schwankungen der Porosität im gesamten Kernmarsch zu erwarten sind (vgl. Kapitel 4.3.5.3).

#### 4.3.4.3 Berechnete Sättigungen

Die **Sättigung** des Porenraums wurde anhand der vorliegenden Messwerte ebenfalls ermittelt. Sie ist abhängig von Roh- und Reindichte sowie dem Lösungsgehalt des Porenraums und der Dichte der Porenlösung. In Bereichen mit vergleichbarer Feuchte ist eine Zunahme der Sättigungen auf die Verdichtung des Materials zurückzuführen.

Die maximal ermittelte Sättigung, ausgedrückt als Sättigungsbeiwert in Höhe von 64,11% bei rd. 105 m Teufe liegt in einem lösungsbeeinflussten Bereich hinter einer markanten Schüttfläche, wie in der Kamerabefahrung zu erkennen war. Sie ist geringer als in den Haldenbohrungen am Standort Hattorf festgestellt (80,64% in B 99/2013 HA, 36,2 m).

Bei der angetroffenen maximalen Sättigung handelt es sich um einen Einzelwert. 100% Sättigung und damit ein geschlossener Kapillarsaum wurden in keiner Probe nachgewiesen, ebenso wenig wie zuvor am Standort Hattorf. Im Randbereich treten sehr geringe Sättigungen < 10% bei hohen Porositäten auf, zur Tiefe hin steigt die Sättigung zunächst auf bis zu rd. 60% an. Im Bereich unterhalb von 40...45 m Tiefe nehmen die Schwankungen der Sättigung ab und bewegen sich zwischen 30% und 50%. Das Material ist folglich nach DACHROTH (2002)

als feucht bis sehr feucht, zwischen 50 und 60% als naß zu charakterisieren /5/. In unmittelbarer räumlicher Nähe zur Probe 72WMD105 (105 m) mit der höchsten Sättigung treten geringe Sättigungen von rd. 25% in den Proben 72WMD110 (110 m) und 72WMD115 (115 m) auf, was wiederum für den kleinräumigen Wechsel der Bedingungen bzw. die Ausbildung bevorzugter Wegsamkeiten spricht.

#### **4.3.4.4 Berechnete Sättigungen, bezogen auf die effektive Porosität**

Aufbauend auf den durch IBeWa im Zuge der Porositäts- und Permeabilitätsbestimmungen ermittelten effektiven Porositäten an Rückstandsproben wurde ergänzend die Sättigung mit Bezug zur effektiven Porosität berechnet und in Anlage 8.6 dargestellt. Auch hier wurde in keiner Probe eine Sättigung von 100% und damit ein geschlossener Kapillarsaum festgestellt. Die maximal ermittelte Sättigung liegt hier bei rund 91% in einer Probe aus rd. 30 m Teufe, die sonstigen ermittelten Werte liegen zwischen 16% und 67%.

In der vergleichenden Darstellung zu Trockenrohddichte und Porosität in Anlage 8.6 zeigt sich, dass höhere Sättigungen erwartungsgemäß tendenziell bei höheren Dichten und reduzierten Porositäten auftreten. Diese Beobachtung bestätigt die in Anlage 8.5 durch IBeWa formulierte Erwartung steigender Kapillarkräfte mit abnehmenden Porositäten und einer Verschiebung der Anteile der Porenfraktionen von Makro- zu Meso- und Mikroporen (vgl. auch Kap. 4.3.5.3). Jedoch zeigt sich, dass auch im lösungsbeeinflussten Haldenmantelbereich (bei geringeren Dichten) und im visuell lösungsbeeinflussten Bereich (Kamerabefahrungen) unmittelbar hinter einer Schüttfläche erhöhte Sättigungen ermittelt wurden, korrespondierend mit den dort häufig beobachteten Lösungszutritten (siehe Kapitel 4.1.2).

#### **4.3.5 Bestimmung der Porositäten und Permeabilitäten**

[WE\_F/U\_H Poppitz / WE\_F/U\_GGt Artschwager]

##### **4.3.5.1 Vorbemerkungen**

Durch die IBeWa wurden laborative Bestimmungen der effektiven Porosität und Permeabilität des Rückstands durchgeführt. Der entsprechende Abschlussbericht der Laborversuche ist als Anlage 8.5 beigelegt. Die eigenen graphischen Darstellungen/ Auswertungen der Untersuchungsergebnisse in Zusammenschau mit Ergebnissen der K+S KALI GmbH enthält Anlage 8.6.

Im Abschlussbericht IBEWA sind die Grundlagen und Durchführung des Versuchsprogramms sowie die Untersuchungsergebnisse detailliert beschrieben und ausgewertet. In einem Glossar und in der Anlage 1 sind die zum Verständnis der Ausführungen erforderlichen fachlichen Grundlagen/ Begriffe und allgemeinen Vorstellungen zu den Strömungsprozessen in einem porösen Material (analog auch Rückstand im Haldenkörper) erläutert. Die folgenden Ausführungen können sich daher auf eine Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse konzentrieren.

#### 4.3.5.2 Effektive Porosität

Die effektive Porosität  $n_{eff}$  kennzeichnet gemäß dem angefügten Glossar den am Strömungsprozess beteiligten, d.h. den für ein Fluid im Betrachtungsmaßstab durchlässigen Porenraum. Sie wurde von IBEWA im Labor an Rückstands-Kernproben mittels Gasentspannungsversuch und Auftriebswägung direkt ermittelt. Im Vergleich dazu ist die totale oder Gesamtporosität  $n_t$  eine Rechengröße, die gemäß der Gleichung

$$n_t = \frac{V_p}{V_{ges}} = 1 - \frac{\rho_d}{\rho_s}$$

von der Rein- und Trockenrohddichte abhängt, wobei im vorliegenden Fall eine korrigierte Trockenrohddichte eingesetzt wird (siehe Glossar in Anlage 8.5). Gemäß der Bestimmungsgleichung

$$n_{eff} = n_t - n_x - n_{HL}$$

( $n_x$  = geschlossene Porosität;  $n_{HL}$  = Haftlöseporosität)

muss für den Fall, dass an einer Probe sowohl die effektive Porosität als auch die Rein- und Trockenrohddichte bestimmt werden, theoretisch gelten

$$n_{eff} \leq n_t.$$

Die ermittelten effektiven Porositäten sind in Anlage 8.6 in drei Diagrammen graphisch dargestellt. In den beiden ersten Diagrammen erfolgt jeweils eine Gegenüberstellung mit den vom K+S Forschungsinstitut ermittelten Dichten und Wasser-/ Lösungsgehalten sowie den damit berechneten totalen Porositäten/ Sättigungsbeiwerten in Bezug zur Teufe. Im dritten Diagramm werden die Porositäten in Abhängigkeit zur Trockenrohddichte dargestellt.

Zur Veranschaulichung des Trends ist zu der effektiven Porositäten die Trendlinie, deren Formel und das Bestimmtheitsmaß mit angegeben worden. Die lineare Trendlinie ergab in der Auswertung mit Microsoft-Excel 2010 das größte Bestimmtheitsmaß.

#### *Abhängigkeit zur Teufe - $n_{eff} = f(t)$*

Analog zur totalen Porosität ist im Trend auch eine Abnahme der effektiven Porosität mit der Teufe festzustellen (logarithmisch, Bestimmtheitsmaß 0,24). Die kleinste effektive Porosität wurde analog zur totalen im Teufenbereich 48,0 ... 50,0 m ermittelt und beträgt  $n_{eff} = 5,0 \%$ . Im folgenden Bohrabschnitt bis zur Bohrendteufe schwanken die effektiven Porositäten im Bereich  $n_{eff} \approx 8 \dots 18 \%$ ; ohne zwei Werte in Teufen von 100,6 und 115,1 m verringert sich der vorgenannte Schwankungsbereich auf einen max. Wert von  $n_{eff} \approx 12 \%$ , was sich mit den Ergebnissen der Hattorfer Haldenbohrungen deckt.

Die effektiven Porositäten sind im Wesentlichen, übereinstimmend zu dem theoretischen Zusammenhang, kleiner als totalen Porositäten. Das Verhältnis effektiver zu totaler Porosität  $n_{eff}/n_t$  liegt damit unter 1. Eine Abhängigkeit des Verhältnisses vom petrostatischen Druck und damit indirekt auch zur Teufe ist nicht zu erkennen. Beide Parameter werden offensichtlich durch den petrostatischen Druck, d.h. die Überlagerungsspannung, gleichermaßen beeinflusst.

Bei den beiden vorstehend angegebenen Werten ist das Verhältnis  $n_{\text{eff}}/n_t > 1$ , obwohl sich die Entnahmetiefen der Proben für die Bestimmung von effektiver und totaler Porosität jeweils nur um wenige Dezimeter unterscheiden. Beide Probenahmebereiche liegen innerhalb bzw. im Nahbereich der beobachteten Schüttzonen bei 100 m und 114 m. Dies deutet darauf hin, dass insbesondere in oberflächennahen Zonen, sowohl aktuell als auch ehemals, das Porengefüge lokal stark variiert, was auf eine aktuelle oder ehemalige Lösungsbeeinflussung hinweist.

Die Diagrammdarstellung der effektiven Porosität in Abhängigkeit zur Trockendichte [korrigiert], in Anlage 8.6 zeigt mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,62 (linear) den im Grundsatz erwarteten Trend einer Abnahme der effektiven Porosität mit zunehmender Trockendichte. Das Bestimmtheitsmaß ist mit den in den Horizontalbohrungen B 100 und 104/2013 HA /2/ festgestellten vergleichbar.

Neben der Abhängigkeit zur Teufe ist im Abschlussbericht IBEWA (Anlage 8.5) auch ein Vergleich mit der im Probenbereich herrschenden Normal-/ Überlagerungsspannung (petrostatischer Druck) vorgenommen worden. Im Grundsatz zeigt sich auch hier der gleiche Trend abnehmender Porositäten mit zunehmendem petrostatischen Druck, wiederum mit Ausnahme der beiden og. Proben. Als vermutete Ursache für die Reduzierung der effektiven Porosität mit zunehmendem petrostatischen Druck nennt IBeWa die Kompaktion des Porenraumes, sowie das Verschließen des Porenraumes durch Kristallisationsprozesse.

#### **4.3.5.3 Porengrößenverteilung**

Mittels Quecksilberporosimetrie wurde durch IBeWa an dem bergfeuchten Rückstand aus den in Anlage 8.5 beschriebenen Haftlösungsversuchen die Porengrößenverteilung ermittelt; die Ergebnisse sind in Abbildung 4-7 der Anlage 8.5 dargestellt. In den dortigen Abbildungen 4-8 und 4-9 werden die Porenfraktionen gegen den petrostatischen Druck aufgetragen, was eine Reduzierung der Makroporosität (Porenradius >1900 nm) mit zunehmender Tiefe bestätigt. Bei insgesamt reduzierter Porosität erhöht sich der Anteil an Meso- und Mikroporen (Porenradius <1900 nm). Wie auch in Anlage 8.5 ausgeführt wird, ist davon auszugehen, „dass die Strömungsprozesse im Haldenmaterial mit großer Wahrscheinlichkeit an die Makroporosität gebunden sind, während in den Mikro- und Mesoporen maßgeblich die chemischen Wechselwirkungen zwischen der Flüssigkeit und dem Feststoff stattfinden“.

#### **4.3.5.4 Permeabilität**

##### **4.3.5.4.1 Effektive Gaspermeabilität**

Die Bestimmung der effektiven Gaspermeabilität erfolgte an den bergfeuchten Kernproben des Rückstands. Die effektive Gaspermeabilität ermöglicht damit eine Beurteilung des Permeabilitätsniveaus des Rückstands für den realen Sättigungszustand (mit Lösung) im Haldenkörper.

Die Höhe des Manteldrucks für die triaxiale Einspannung der Probekörper wurde auf Grundlage einer Abschätzung des petrostatischen Drucks in der Entnahmetiefe der jeweiligen Probe vorgegeben, um die in-Situ-Einspannung des Materials nachzubilden. Da das Verhalten zeitabhängig ist, wurden die Permeabilitätsuntersuchungen nach Angaben von IBeWa in Wiederholungen über eine längere Einspanndauer durchgeführt, und in der Regel der Endwert angegeben. Aus den Hattorfer Auswertungen ist bekannt, dass die effektive Gaspermeabilität mit zunehmender Einspanndauer sinkt, was auf das Verformungs- und Kompaktionsverhalten unter dem Einfluss der Einspannung zurückgeführt wurde /2/. Geht man davon aus, dass bei der Entnahme der Bohrkerne eine mechanische Entspannung des Materials stattgefunden hat, kommt der angegebene Endwert nach längerer Einspanndauer somit dem in-Situ-Wert am nächsten, und die ermittelte Spannweite der Permeabilitäten wird daher im Vergleich zu den realen „Einspann-/ Spannungsverhältnissen“ im Haldenkörper als maximaler Permeabilitätsbereich interpretiert.

Die effektive Gaspermeabilität der untersuchten Haldenproben liegt im Bereich von  $k_{G,eff} = 3,4 \times 10^{-16} \text{ m}^2$  bis  $3,3 \times 10^{-10} \text{ m}^2$  und sinkt, mit Ausnahme einiger nachfolgend anzusprechender „Ausreißer“ grundsätzlich mit zunehmender Bohrtiefe und überlagernder Mächtigkeit des Haldenkörpers (4 m bis max. rd. 65-70 m Überdeckung), was den teufenabhängigen Porositätsergebnissen einerseits, und andererseits dem Prozessverständnis von der Kompaktion des Rückstands unter zunehmender Auflast entspricht.

Unerwartet hohe Permeabilitäten wurden in den Proben der Kernabschnitte 72W30 (P254-5/1, Tiefe rd. 30 m), 72WMD\_70-D (P254-9/1, Tiefe rd. 70 m) und 72W122 (P254-14/1, Tiefe rd. 122 m) festgestellt. Die aus diesem Grund ergänzend in unmittelbar benachbarten Bereichen durchgeführten Zusatzbeprobungen wichen in den Ergebnissen der Gas- und Lösungspereabilität deutlich von diesen ab, was die bereits im vorherigen Kapitel angedeutete kleinräumige Heterogenität unterstreicht (vgl. Anlage 8.5, Abbildung 4-18 und 4-19). Innerhalb kleinräumiger Maßstäbe (Probenabmessungen  $0,1 \times 0,11 \text{ m}$ , zylindrisch) kommt es offenbar zu deutlichen Permeabilitätsschwankungen. Diese Beobachtung der IBeWa deckt sich mit den in der Kamerabefahrung gemachten Beobachtungen der Wasserführung an bevorzugten Wegsamkeiten. Für die Gesamtpereabilität des Haldenkörpers ist dabei nicht nur die räumliche Ausdehnung der Bereiche gleicher Permeabilität relevant, sondern auch die Lage der unterschiedlichen Bereiche zueinander bzw. zur Strömungsrichtung der Lösung (Schichtung senkrecht oder parallel zur Strömung). Auch hier spielen das Schüttregime bzw. die Offenlagerungszeit ehemaliger Oberflächen folglich eine Rolle, wie von IBeWa festgestellt.

Die Auswertung der Gaspermeabilitäten in Bezug auf die Sättigungen und die totale Porosität des Rückstands in Abbildung 4-20 der Anlage 8.5 zeigt – wie auch bereits für die Hattorfer Proben ermittelt - dass die Gaspermeabilitäten im höher permeablen Bereich nicht signifikant durch diese beiden Parameter beeinflusst werden. Die Gaspermeabilitäten können daher als aussagekräftig für das Permeabilitätsniveau im Haldenmaterial angesehen werden. Bei geringen Permeabilitäten hingegen nimmt die effektive Gaspermeabilität mit Zunahme der Porenraumsättigung erwartungsgemäß ab (vgl. Anlage 8.5, Ergebniszusammenfassung Kapitel 5).

Beobachtungen der IBeWa im Zuge des Laborprogramms bestätigen die bereits für den Standort Hattorf im Ergebnisbericht zu den dortigen Haldenbohrungen beschriebene Ausbildung bevorzugter Wegsamkeiten /2/. IBeWa kommt in Anlage 8.5 zu dem Schluss, dass

diese schwer vorhersagbaren Wegsamkeiten dazu führen, dass „eine Korrelation von [totaler] Porosität und Permeabilität, wie sie sonst für poröse Materialien vielfach möglich ist, für die Haldenmaterialien nicht repräsentativ ist“.

#### 4.3.5.4.2 Lösungspemeabilität

Die Lösungspemeabilität des gesättigten Materials stellt die maximale Durchlässigkeit des porösen Materials gegenüber einer strömenden Flüssigkeit dar und wird als dessen absolute Permeabilität angesehen.

Die ermittelten Lösungspemeabilitäten liegen im Bereich  $< 1 \times 10^{-17} \text{ m}^2$  bis  $1,4 \times 10^{-11} \text{ m}^2$ , was einer Spannbreite der Durchlässigkeitsbeiwerte von  $< 7,5 \times 10^{-11}$  bis  $1,1 \times 10^{-4} \text{ m/s}$  entspricht. Grundsätzlich wurde auch hier eine Abnahme mit zunehmendem petrostatischen Druck festgestellt, mit den Einschränkungen, die vorstehend für die Gaspermeabilität erläutert wurden, und die auf kleinräumige, lokale Wegsamkeiten zurückgeführt werden.

Abbildung 4-19 der Anlage 8.5 zeigt die effektiven Gas- und Lösungspemeabilitäten im Vergleich. Die Lösungspemeabilitäten liegen mit Ausnahme von Probe 72\_W122 (P254-14) deutlich unter den ermittelten Gaspermeabilitäten, was sich mit den Ergebnissen der Hattorfer Proben deckt, und durch IBeWa auf die unvollständige Sättigung der Proben zurückgeführt wird. Eine vollständige Probensättigung wurde für keine Probe festgestellt (vgl. Anlage 8.5, Abbildung 4-14).

Auch in den Versuchen zur Lösungspemeabilität wurde der Einfluss lokaler Wegsamkeiten (bzw. der Schließung selbiger durch Kristallisationsprozesse) auf die Strömungsprozesse beobachtet. An den Kernproben wurden lokale Auflösungen beobachtet, trotz der Verwendung einer aus dem unmittelbar benachbarten Bereich zur jeweiligen Probe hergestellten Versuchslösung; weiterhin kam es bei einer Probe (72\_W122,P254-14) zu einer gegenüber der Gaspermeabilität deutlich um 7 Zehnerpotenzen verringerten Lösungspemeabilität, was durch IBeWa auf das Verschließen einer bevorzugten Wegsamkeit zurückgeführt wird, und die Grenzen der Permeabilitätsbestimmung in Rückstandssalz aufzeigt.

Auf Grundlage der im Abschlussbericht IBEWA dargestellten grundsätzlichen Abhängigkeit der Permeabilität von der Sättigung mit Flüssigkeit (Lösung) ist zu schlussfolgern, dass die effektiven Lösungspemeabilitäten unter den realen Haldenbedingungen mit Sättigungen  $S_r \ll 1,0$  und mit den langzeitigen Kompaktions-/ Kriechprozessen kleiner sind. Mit den absoluten Lösungspemeabilitäten werden Zeitmaßstäbe von Strömungsprozessen in einer Halde konservativ abgeschätzt. Real erfolgen die Strömungsprozesse langsamer. Gleichlautende Ergebnisse wurden auch im Ergebnisbericht zu den Hattorfer Haldenbohrungen dokumentiert. Die dort bestimmten Lösungspemeabilitäten lagen ebenfalls im Bereich von  $k_L = < 1 \times 10^{-17}$  bis  $1,4 \times 10^{-11}$ , so dass – konservativ abgeschätzt - von Durchlässigkeitsbeiwerten in gleicher Größenordnung für die Halden in Hattorf und Wintershall auszugehen ist.

## **5 Modellvorstellung zum Haldenkörperverhalten**

### **5.1 Einbindung der aktuellen Ergebnisse in die bestehende Modellvorstellung**

Auf Basis der in Kapitel 4 vorgestellten Ergebnisse wurde die in 1998 anhand von Haldenbohrungen entwickelte und in 2014 mit Hilfe der am Standort Hattorf durchgeführten Bohrungen weiterentwickelte Modellvorstellung zur Zonierung der Halde (vgl. Kapitel 1.2.4) auf ihre Übertragbarkeit auf den Standort Wintershall hin überprüft.

Das für die Bohrungen am Standort Hattorf entwickelte Untersuchungsprogramm wurde übernommen, um eine Vergleichbarkeit der Bohrergebnisse zu gewährleisten. Wie auch im Falle der Bohrungen am Standort Hattorf stützt sich die Auswertung daher auf eine breite Datengrundlage hinsichtlich der verschiedenen angewandten Methoden. Der weiteren Beurteilung des Haldenkörperverhaltens liegt angesichts der hohen Datendichte aus den Bohrungen am Standort Hattorf sowie der Bohrung in Wintershall das umfangreichste Analytikprogramm zu Grunde, das bislang an Rückstandshalden durchgeführt wurde.

Auch hinsichtlich der Auswertung der Bohrungen wurde der zur Festlegung der Zonierung des Haldenkörpers am Standort Hattorf entwickelte Kriterienkatalog übernommen (vgl. Kapitel 1.2.4 und /2/):

1. beobachtete Zuflussmengen und -bereiche/Chemismus der Zuflüsse
2. Ergebnisse der Dichte- und Porositätsbestimmung, berechnete Sättigungen
3. Durchlässigkeiten
4. Poren- und Kristallwasseranteile am Gesamtwassergehalt, Zusammensetzung des Rückstands.

Die für die Beurteilung relevanten Fakten sind nachfolgend zusammengestellt.

#### **5.1.1 Zuflussmengen, Zuflussbereiche, Chemismus der Zuflüsse**

[WE\_F/U\_H Poppitz]

Anhand der Zuflussmengenmessung sowie anhand der geohydraulischen Bohrlochuntersuchungen (Packertests) können die Zuflusscharakteristika in der Bohrung B 72/2014 WI wie folgt beschrieben werden:

- Wasserzutritte zum Bohrloch ab ca. 15,0 m Teufe
- Der in der Kamerabefahrung visuell festgestellte Haupt-Zutrittsbereich bei 77,4 – 78 m bestätigte sich weder in den Packertests (Test 4: 75,0 – 85,4 m = 0,1 l/min Ausfluss aus dem Intervall) noch in der der Auswertung der Zutritte zum Bohrgestänge während des Bohrgeschehens.
- Haupt-Zutrittsbereiche gemäß der Packertests:
  - 15,10 – 35,09 m (Test 8): 1,2 l/min Ausfluss aus dem Intervall, rd. 45% der Gesamt-Auslaufmenge



- 95,00 – 105,4 m (Test 2): 0,9 l/min Ausfluss aus dem Intervall, rd. 33% der Gesamt-Auslaufmenge
- Im Bereich des vorgenannten Packertests 2 wurde ein lokaler Zuflusshorizont im Bereich um rd. 104 – 108,5 m Tiefe auch im Rahmen der Zuflussmessungen beim Bohrgeschehen identifiziert (bestätigt anhand mehrerer Messindikationen). Der Wasserzutritt befindet sich im Bereich unmittelbar unterhalb einer markanten Schüttfläche, die in Kernansprache (99,7 – 100,5 m) und Kamerabefahrung (rd. 100,3 m) ausgehalten werden konnte. Die Schüttfläche wurde durch Schaumstellen und Wasserzutritte an der Bohrlochwand nachgezeichnet, und es schließt sich der erwähnte Zutrittsbereich an (gemäß Kamerabefahrung im Bereich 100,4-104,2 m, vollständig erfasst durch Test 2).
- Ab rd. 113,5 m Teufe wurde gemäß Kamerabefahrung kein Wasser auf der Bohrlochsohle festgestellt, das Bohrlochtiefste war offenbar frei von Lösungszutritten. Dies korrespondiert mit den Ergebnissen der Packertests (Test 1: 105,3-115,43 m = 0,2 l/min Ausfluss aus dem Intervall)

Im Vergleich zu den am Standort Hattorf in Bohrungen beobachteten Lösungszutritten waren die Zutritte in Bohrung B 72/2014 WI deutlich schwächer und weniger nachhaltig ausgebildet. Während in den Bohrungen am Standort Hattorf bei Bohrtiefen zwischen 100 bis 117 m Ausflussraten aus dem gesamten Bohrloch von rd. 10 bis 20 l/min gemessen wurden, lag die Gesamt-Auslaufmenge aus dem Bohrloch der B 72/2014 WI bei lediglich 2,5 bis 4 l/min. Der Mittelwert von fiktiven, auf die gesamte Bohrlänge gleichmäßig verteilten (relativen) Ausflussraten würde in den drei Hattorfer Haldenbohrungen rd. 0,15 l/(min\*m) betragen. Die entsprechende, auf die Bohrtiefe bezogene mittlere Ausflussrate liegt in der Bohrung B 72/2014 WI in einer Größenordnung von rd. 0,02 l/(min\*m) und damit nur bei rd. 13 % der Hattorfer Verhältnisse. Die deutlich geringere Ausflussrate wird gemäß Kapitel 4.1.4 ohne konkreten quantitativen Nachweis, im Wesentlichen auf die kleinere Größe des hydrologischen Einzugsgebietes in Verbindung mit den sich ausbildenden lokalen Wegsamkeiten im Haldenkörper, die von den örtlichen Gegebenheiten, der Exposition und der Kubatur, dem Alter des Haldenbereichs und Überdeckungshöhe beeinflusst werden, zurückgeführt. Dies ist bei der Beurteilung der visuellen Ergebnisse aus der Kamerabefahrung zu berücksichtigen.

Die nachfolgenden weiteren Erkenntnisse zu Strömungsprozessen im Haldenkörper waren bereits aus den Kamerabefahrungen am Standort Hattorf abgeleitet und wurden für den Standort Wintershall ebenso bestätigt:

- Wasserzutritte in den Bohrungen sind jeweils nicht auf einen einzelnen, konkreten Tiefenbereich zurückzuführen, sondern auf mehrere Bohrlochabschnitte, die sich mit trockenen, massiven Bohrlochbereichen abwechseln. Der Wechsel fand häufig engräumig innerhalb kurzer Bohrlochabschnitte statt.
- Wasserzutritte erfolgten in der Bohrung hauptsächlich über (Makro-) Poren.
- Zutritte sind häufig an Schüttflächen bzw. Inhomogenitäten im Haldenkörper gebunden
- Beobachtete Schaumstellen markieren Luftzutritte zum Bohrloch. Diese können als Indiz für in Folge der Kompaktion unter Druck stehende Luft gewertet werden.

Im Unterschied zu den Bohrungen am Standort Hattorf, wo unterhalb von 50 – 85 m Teufe (je nach Alter der Bohrung) kein Lösungszutritt angetroffen wurde, wurde in der Bohrung B727/2014-WI ein Lösungszutritt im Bereich unterhalb von 100,4 m Teufe festgestellt. Diese Beobachtung wird, wie in Kapitel 5.1.5 dargestellt wird, der Tatsache zugeschrieben, dass die Schüttfläche hydraulisch mit der unter der Haldenrampe Haldenwasser führenden Mantelzone in Verbindung steht (vgl. Kapitel 5.1.55.1.6).

Aus der langjährig durchgeführten Beprobung und Analytik der Wässer in den Becken Heer- und Zinkesgraben ist bekannt, dass diese sich hinsichtlich ihrer Kalium-, Magnesium-, Bromid- und Sulfatkonzentrationen unterscheiden, was auf das jeweilige Einzugsgebiet der Becken und das Alter der darin befindlichen Bereiche zurückzuführen ist. So sind erhöhte Magnesium- und Kaliumkonzentrationen auf den Einzugsbereich der Vorschubböschung zurückzuführen. Im Zuge der Auswertung der Haldenbohrungen am Standort Hattorf wurde festgestellt, dass die beprobten Haldenwässer aus den Horizontalbohrungen ähnliche Unterschiede aufweisen, und – insbesondere im Fall der ältesten Bohrung B 99/2013 HA auch eine Unterscheidung von Lösungstypen innerhalb der Bohrung möglich war. Für den Randbereich (bis etwa 33 m) war dort anhand der geringeren Frachten an leicht löslichem Magnesium und Kalium bei gleichzeitig erhöhtem Lösungspotenzial für Natrium zu erkennen, dass diese Elemente im Herkunftsbereich nicht mehr für eine Lösung zur Verfügung stehen, d.h. schon weitgehend entfernt wurden. Im Vergleich dazu zeigten die Lösungen in tieferen Bohrlochbereichen unterhalb von 46 m höhere Kalium- und Magnesiumfrachten. In Kombination mit den verringerten Zuflussmengen aus tieferen Bohrlochbereichen konnte geschlussfolgert werden, dass diese offenbar einem Bereich entstammen, in dem noch Wertstoff-Restgehalte für die Lösung zur Verfügung stehen, und der somit nicht nachhaltig durchströmt wurde.

Für die Bohrung B 72/2014 lässt sich die Zonierung anhand des Chemismus der beprobten Wässer und unter Berücksichtigung der vorstehend beschriebenen Zuflussmengen sowie der vorstehend beschriebenen Erfahrungen aus den Hattorfer Bohrungen wie folgt beschreiben: Im Randbereich der Bohrung wurden zunächst Lösungen mit geringen Natrium- und Kaliumgehalten erbohrt (bis rd. 35 m), was in der Zusammenschau mit den hohen Zuflussmengen für den nachhaltig lösungsbeeinflussten Haldenmantelbereich spricht. Die Wässer ähneln jenen des Heergrabens. Unterhalb von 35 m bis oberhalb von rd 100 m Teufe nehmen die Kalium- und Magnesiumgehalte sukzessive zu, die Analytik ähnelt zunächst jener des Zinkesgrabens; ein Höhepunkt der Konzentrationen an Magnesium und Kalium wird im Tiefenbereich bei rd. 98 m erreicht – hier sind die Werte eindeutig mit jenen des Haldenkernbereichs aus Hattorf vergleichbar. Ergänzend zu berücksichtigen sind die geringen Zuflussraten des Bereichs. Der Einfluss des vorstehend erwähnten Lösungszutritts unterhalb der Schüttfläche bei rd. 100 m zeigt sich auch im Chemismus der Lösungen; hier entsprechen die Zusammensetzungen wiederum denen des Randbereichs der Bohrung, jedoch mit gegenüber dem randnahen Bereich leicht erhöhten Magnesiumgehalten und einem erhöhten Verhältnis von Natrium zu Magnesium von 1: 0,3 bis 0,4. Daraus ist zu schließen, dass im Teufenbereich unterhalb von 108 m eine größere Menge an Wertstoff-Resten zur Lösung zur Verfügung steht, welche aufgrund der geringen Lösungsbewegungen in diesen Bereichen nicht herausgelöst wurde.

### 5.1.2 Dichten und Porositäten, Sättigungen

[WE\_F/U\_H Poppitz]

Die grundsätzliche Vorstellung zur Dichteentwicklung wurde für den Standort Hattorf wie folgt dargestellt /2/: Im Aufhaldungsprozess wird zunächst warmer, frischer Rückstand als loses Haufwerk mit enggestufter Körnung (Hauptkornfraktion Sand) geschüttet. Insbesondere die initial dem warm aufgehaldeten Rückstand anhaftende, gesättigte Haftlösung führt zur initialen Bildung von Krusten und Aggregaten und einer zwischen diesen Aggregaten eingebundenen Totporosität. Der Modellvorstellung zu Folge verändert sich das Rückstandsgefüge durch Kompaktion, Lösungs- und Rekristallisationsprozesse. Potentielle Wegsamkeiten, die primär nach der Aufhaldung im Schütt- und Schichtungsgefüge vorhanden sind oder sekundär durch Lösungsprozesse entstehen (z.B. im Bereich von überschütteten ehemaligen Oberflächen), werden bei zunehmender Kompaktion des Materials durch Unterbrechung der Porenverbindungen eingeengt/ verschlossen, so dass die Perkolation von Lösungen durch das Material behindert wird. Gleichzeitig kommt es lösungsbedingt zur Herausbildung bevorzugter Sickerwege im Haldenkörper. In den Rückstandskörper eindringende Niederschlagswässer sickern ein und folgen dann dem Weg des geringsten hydraulischen Widerstands. Wird die Wegsamkeit nach unten (bzw. an Flankenbereichen nach innen) durch verdichtete Bereiche verringert, fließt die Lösung seitlich in Bereichen mit geringerer Dichte ab. Die Tiefenprofile der Dichten geben deshalb Aufschluss über die Verteilung möglicher Wegsamkeiten im Haldenkörper.

Wie bereits für den Standort Hattorf beschrieben, wurde auch für die Bohrung B 72/2014 WI der nachfolgende Verlauf der Dichteentwicklung mit zunehmender Teufe bestätigt: der Randbereich der Bohrung weist geringere und schwankende Trockenrohdichten auf, gefolgt von einem Anstieg zur Tiefe hin. Ab rd. 40 – 42 m Tiefe schwankt die Trockenrohdichte in einem engen Wertebereich zwischen rd. 1,8 g/cm<sup>3</sup> und 1,95 g/cm<sup>3</sup> mit einzelnen Ausreißern. Werte von 2,0 g/cm<sup>3</sup> und darüber wurden nur in Laborversuchen der IBeWa ermittelt. Die vorstehend beschriebene Dichteentwicklung wird auch durch die Ergebnisse des Gamma-Gamma-Dichte-Log bestätigt.

Im Zuge der Hattorfer Untersuchungen wurden festgestellt, dass die Dichteentwicklung abhängig von der Überdeckung, aber auch dem Alter des Bereichs ist; wobei in frischem Rückstand bzw. in Randbereichen höhere Porositäten und entsprechend geringere Dichten auftraten. Die B 72/2014 WI reiht sich mit einem Ablagerungsalter des Randbereichs von rd. 17 bis 18 Jahren und einem maximalen Alter von 32 bis 33 Jahren im Bohrlochtiefsten in dieses Prozessverständnis ein, nachstehend wird jedoch gezeigt, dass auch die Schütthistorie einen Einfluss auf die Entwicklung hat. Im Bohrlochtiefsten liegt, wie vorstehend beschrieben, die vertikale Überdeckung mit Rückstand bei rd. 70 m, korrespondierend mit einer Dichte von 1,95 g/cm<sup>3</sup>. Gleiche Werte wurden bei gleicher Überdeckung in Bohrung B 99/2013 HA ermittelt (Überdeckung im Bohrlochtiefsten dort ebenfalls rd. 70 m).

Der Trend zunehmender Dichten wird in den Randbereichen der Bohrungen lokal im Meter- bis Dekameter-Bereich durch Schwankungen/ Unstetigkeiten unterbrochen, die in der Schütthistorie/ Unterbrechung des Schüttfortschritts oder den vor beschriebenen Lösungs- und Rekristallisationsprozessen begründet sind.

Wie die Diagramme in Anlage 8.3 zeigen, verlaufen die Kurven von Nass- und Trockenrohdichte für Bohrung B 727/2014 WI ebenso wie für alle Hattorfer Bohrungen nahezu parallel zueinander. Die Dichtedifferenzen liegen unterhalb von rd. 42 m im Bereich 0,05 bis 0,10 g/cm<sup>3</sup>. Dies ist in den geringen Schwankungen der Lösungsgehalte begründet. Oberhalb von rd. 42 m sind die Differenzen z.T. höher, korrespondierend mit den dort erhöhten Lösungszutritten (z.B. Packertest Nr. 8: 1,2 l/min Auslauf aus Intervall).

Die Entwicklung der totalen Porosität verhält sich bei nur geringfügig schwankenden Reindichten grundsätzlich – wie auch bereits für den Standort Hattorf gezeigt – entgegengesetzt zur Dichteentwicklung: in B 72/2014 WI wurden randlich höhere und schwankende totale Porositäten ermittelt, mit einem Maximum von rd. 35% am Rand der Bohrung. Die minimal erreichte Porosität liegt bei rd. 7,5% bei rd. 50 m Teufe. Zur Tiefe hin nimmt die totale Porosität zunächst bis rd. 40...45 m ab und schwankt dann in einem engen Wertebereich zwischen rd. 10 und 15%. Unterhalb von 110 m liegt die totale Porosität um 10%. Einzelne Ausreißer hin zu höheren Porositäten sind wahrscheinlich an Schüttflächen gebunden, die jedoch nicht notwendigerweise mit einer Wasserführung einhergehen, wie für die Bereiche um rd. 75 und 100 m gezeigt wurde.

Die Entwicklung der Dichten und totalen Porosität in den einzelnen Bohrprofilen für die Standorte Hattorf und Wintershall ist in Tabelle 5-1 dargestellt. Dargestellt wurden die Schwellenwerte der Dichteentwicklung 1,8 g/cm<sup>3</sup>, 1,9 g/cm<sup>3</sup> und 2,0 g/cm<sup>3</sup> sowie Bereiche mit Porositäten kleiner oder gleich 20% und kleiner oder gleich 10%.

**Tabelle 5-1: Entwicklung der Dichten und Porositäten in Horizontal- und Vertikalbohrungen, Übersicht (gerundete Werte).** Unterhalb der angegebenen Tiefe liegen die Werte durchgängig unter dem Kriterium der jeweiligen Spalte, sofern keine Ausnahme angegeben ist.

Bohrung Nr.	Trockenrohdichte $\rho^*_d$			Totale Porosität $n_t$	
	$\geq 1,8 \text{ g/cm}^3$	$\geq 1,9 \text{ g/cm}^3$	$\geq 2,0 \text{ g/cm}^3$	$\leq 20\%$	$\leq 10\%$
B 97/2013 HA	> 36 m	> 65 m	> 70 m (Ausnahme: 90,85 m; 96,85 m)	> 36 m	> 65 m
B 98/2013 HA	> 55 m	> 75 m	> 100 m	> 41 m	> 75 m
B 99/2013 HA	> 41m (und 0 – 8 m)	> 65 m	95,23 m (Einzelprobe)	> 0m (Ausnahme: 14,3 m und 22,05 m)	> 65 m
B 100/2013 HA	> 50 m	> 90 m	-	> 17 m	> 90 m
B 104/2013 HA	> 46 m	> 106 m (Ausnahme: 110,83 m)	-	> 16 m	> 106 m
B 72/2014 WI	> 30 m	> 113 m	-	> 27 m	> 124 m (Ausnahme 127,35 m)

Die Kompaktion des Rückstands ist altersabhängig, läuft im Zeitraum von Jahren ab und ist offenbar am Beispiel der Hattorfer Bohrungen im Bereich der Horizontalbohrungen B 100 und

B 104 nach 7 bzw. 8 Jahren noch nicht abgeschlossen, wie an dem weniger differenzierten Profil der Bohrung B 104/2013 HA, als „jüngstes“ im Vergleich mit den anderen Bohrprofilen, ersichtlich ist. Diese Feststellung betrifft nicht nur die Dichten, Porositäten und Sättigungen, sondern auch die chemischen Zusammensetzungen des Kernmaterials und die Zusammensetzungen der dort gewonnenen Lösungen /2/.

Die Bohrungen B 99/2013 HA und B 72/2014 WI sind hinsichtlich ihres Alters in den randnahen Bereichen vergleichbar (B 99/2013 HA – Alter des randnahen Bereichs 17a; B 72/2014 WI – Alter des randnahen Bereichs rd. 17-18a), und auch hinsichtlich der überlagernden Rückstandsmächtigkeit in den tiefsten Bereichen. Dennoch weichen die Ergebnisse voneinander ab, in der Art, dass in B 99/2013 HA in geringerer Entfernung vom Randbereich höhere Dichten und geringere Porositäten erreicht werden, bzw. die Verdichtung insgesamt auf einem höheren Niveau zu liegen scheint (die Porosität liegt unterhalb von 65 m durchgehend <10%).

Die totale Porosität ist zur Bewertung der Wegsamkeit/ Durchlässigkeit für Fluide nur teilweise geeignet, da sie die Porengrößen und –verteilung sowie den Grad der Porenverbindungen nicht abbildet. Aussagekräftiger ist hierfür die effektive Porosität, die das fluiddurchlässige Porenvolumen am Gesamtvolumen charakterisiert. Ergänzend zu den errechneten Porositäten wurden daher effektive Porositäten durch die IBeWa im Gasentspannungsversuch direkt ermittelt. Diese sind in Anlage 8.6 zum Vergleich mit der totalen Porosität und den korrigierten Trockenrohdichten ergänzend dargestellt. Auch hier ist der vorstehend beschriebene Trend der Abnahme zur Teufe hin festzustellen. Die Größenordnung der ermittelten effektiven Porositäten deckt sich dabei mit jenen der Hattorfer Haldenbohrungen. Die Abhängigkeit der Porosität vom petrostatischen Überlagerungsdruck gilt dabei gleichermaßen für die totale wie die effektive Porosität. Die Reduzierung der Porositäten mit zunehmendem Überlagerungsdruck wird dabei durch IBeWa sowie die Verfasser gleichermaßen auf die Kompaktion des Porenraums im Zusammenspiel mit Kristallisationsprozessen, die zu einem Verschließen der Poren führen, zurückgeführt. Die mittels Quecksilberporosimetrie durch IBeWa ermittelte Porengrößenverteilung zeigt, dass mit zunehmender Reduzierung der Porosität auch eine Verschiebung von Makro- hin zu Meso- und Mikroporen stattfindet.

Im Wesentlichen liegen die laborativ ermittelten effektiven Porositäten niedriger als die totalen Porositäten. Eine Ausnahme stellen 2 Einzelwerte bei rd 100 und 115 m Teufe dar. Obwohl die Entnahmeteufen der Proben sich nur um wenige Dezimeter unterscheiden, liegt hier die effektive Porosität höher als die totale. Beide Probenahmebereiche liegen innerhalb bzw. im Nahbereich der beobachteten Schüttzonen bei 100 m und 114 m. Dies deutet, wie in Kapitel 4.3.5.4 erläutert, darauf hin, dass insbesondere in oberflächennahen Zonen, sowohl aktuell als auch ehemals, das Porengefüge lokal stark variiert, was auf eine aktuelle oder ehemalige Lösungsbeeinflussung hinweist.

Eine erhöhte effektive Porosität (oder Permeabilität) allein hingegen ist kein Indiz für eine tatsächliche bzw. aktuelle Lösungsbeeinflussung. Für die Beurteilung der Lösungsbeeinflussung eines Bereichs können zusätzlich die errechneten Sättigungen herangezogen werden: Trotz starker Verdichtung der Bereiche im Bohrlochtiefsten wurde in keiner Probe der Bohrung B 72/2014 WI eine Sättigung von 100 % errechnet, die einer vollständigen Füllung des Porenraums mit Haldenwasser entspräche. Selbst in stark

verdichteten Kernbereichen der Halde mit sehr geringer Porosität und Dichten, die denjenigen des Salzes in der Lagerstätte nahe kommen, liegt also kein durchgehender Haldenwasserspiegel (Einstau) vor. Diese Beobachtung wurde auch für den Standort Hattorf gemacht. In B 72/2014 WI traten unmittelbar am Haldenrand zunächst sehr geringe Sättigungen auf, die im Randbereich bis rd. 40...45 m Teufe auf Werte um rd. 60% ansteigen, und im Bereich unterhalb rd. 40...45 m Teufe wieder abnehmen und geringfügig zwischen rd. 30 und 50% schwanken.

Höhere Sättigungen sind tendenziell bei höheren Dichten und reduzierten Porositäten zu erwarten. Die maximalen Sättigungen wurden jedoch in Hattorf wie in Wintershall nicht im Bohrlochtiefsten bei geringer Porosität und maximaler Dichte ermittelt, sondern jeweils in lösungsbeeinflussten Bereichen. Die höchste, überhaupt errechnete Sättigung trat am Standort Hattorf in B 99/2013 HA bei 36,2 m Teufe auf; für B 72/2014 WI lag die höchste errechnete Sättigung hingegen bei lediglich rd. 64%, ebenfalls in einem lösungsbeeinflussten Bereich in rd. 105 m Teufe hinter der bereits beschriebenen markanten Schüttfläche bei rd. 100 m und im Bereich des lt. Packertests zweitstärksten Lösungszutritts. In Bereichen, in denen in der Kamerabefahrung keine Lösungszutritte zu erkennen waren, wurden auch niedrigere Sättigungen festgestellt. Der Wechsel zwischen Bereichen mit hohen und geringen Sättigungen erfolgt kleinräumig, was für die kleinräumige Ausbildung bevorzugter Wegsamkeiten spricht.

Als konservative Annahme wurde ergänzend zu den vorstehend beschriebenen Berechnungen auch die Sättigung, bezogen auf die effektive Porosität, berechnet und dargestellt. Auch hier wurde kein geschlossener Kapillarsaum nachgewiesen; die maximale Sättigung lag wiederum im lösungsbeeinflussten Randbereich (91%, rd. 30 m Teufe); die übrigen Werte lagen zwischen 16 und 67%.

Gemäß der Ausführungen der IBeWa in Anlage 8.5 ist zu beachten, dass im Porenraum des Haldenkörpers ein Zweiphasensystem vorliegt: Wie vorstehend geschildert, wurde durch die Bohrungen im Haldenkörper kein gesättigter Bereich nachgewiesen, d.h. die Poren sind teils lösungs-, teils luftgefüllt. Mit Ausnahme des Randbereichs der B 72/2014 WI und des vorstehend beschriebenen Einzelwerts im Bereich der Schüttfläche unterhalb 100 m liegen die errechneten Sättigungsbeiwerte aus Probenmaterial der Bohrung überwiegend unter oder bei 50%. Gleiches gilt auch für die anhand der Hattorfer Haldenbohrungen errechneten Sättigungen /7/, /2/. Die Sättigung des Porenraumes hat Einfluss auf dessen Permeabilität, wie in Abbildung A 5-1 der Anlage 8.5 dargestellt ist. Der Abbildung ist zu entnehmen, dass unterhalb einer Sättigung von rund 50% die relative Lösungspermeabilität gering ist, d. h. es finden keine oder nur untergeordnet Strömungsprozesse statt, auch wenn in Laboruntersuchungen am Probenmaterial ein geringer Anteil an freier Lösung im Porenraum nachgewiesen wurde.

In den Untersuchungen der IBeWa zum Haftlösungsgehalt von gleichmäßig über den Kernmarsch verteilten Proben wurde ergänzend gezeigt, dass deren Retardationsvermögen nicht aufgebraucht wurde und bereichsweise über einen Massenzuwachs der Proben eine Hydratisierung indirekt dokumentiert werden konnte. Beide Beobachtungen legen nahe, dass die Bereiche, aus denen die Proben stammen, nicht am Strömungsprozess teilgenommen haben (vgl. Kap. 4.3.3.4). Dies wiederum spricht die bereits für den Standort Hattorf

aufgestellte These der Ausbildung bevorzugter Wegsamkeiten, auf denen Fließprozesse maßgeblich stattfinden /2/.

### 5.1.3 Durchlässigkeiten/ Permeabilitäten

[WE\_F/U\_H Poppitz]

Nach den Ausführungen im Kapitel 4.3.5 zu den hydraulischen Laboruntersuchungen und wie bereits zuvor für den Standort Hattorf beschrieben, nehmen die effektive Gas- und absolute Lösungspermeabilität im Trend mit der Teufe bzw. dem petrostatischen Druck ab; mit Ausnahme einzelner Ausreißer.

Die durch IBeWa ermittelten Lösungspermeabilitäten liegen im Bereich von  $< 1 \times 10^{-17} \text{ m}^2$  bis  $1,4 \times 10^{-11} \text{ m}^2$ , was einer Spannbreite der Durchlässigkeitsbeiwerte von  $< 7,5 \times 10^{-11}$  bis  $1,1 \times 10^{-4} \text{ m/s}$  entspricht. Dies entspricht den für die Halde Hattorf ermittelten Werten, so dass in der Größenordnung von vergleichbaren Durchlässigkeiten beider Halden auszugehen ist.

Eine Korrelation von totaler Porosität zur Permeabilität kann im Ergebnis der Laborversuche der IBeWa nicht ausgehalten werden. Der Grund hierfür liegt in der kleinräumigen Heterogenität der Porosität, die offenbar auch zu deutlichen Schwankungen in der Permeabilität führt. Daher ist für die Gesamtpermeabilität aus Sicht der IBeWa nicht nur die räumliche Ausdehnung von Bereichen gleicher Permeabilität, sondern auch die Lage der Bereiche zueinander (Vorhandensein dichter Zwischenlagen), sowie zur Strömungsrichtung (Schichtung parallel oder orthogonal zur Strömung) ausschlaggebend. Dabei ist relevant, dass die Laborversuche an der Horizontalbohrung B 72/2014 WI längs zur Bohrachse, und damit orthogonal zum Schichtungs-/ Schüttungsgefüge und somit auch zu den Fließwegen im Haldenkörper durchgeführt wurden. Zusammengefasst haben das Schüttregime in Kombination mit der Offenlagerungszeit ehemaliger Oberflächen und die so entstehenden Schüttflächen offenbar einen Einfluss auf das System, wie in Anlage 8.5 festgestellt wird. Dies ist für die Wasserwegsamkeiten im Haldenkörper dann relevant, wenn für diese Bereiche weiterhin eine Anbindung an den atmosphärenbeeinflussten Randbereich besteht (siehe dazu Kapitel 5.1.5.)

Eine Abhängigkeit der Lösungspermeabilität von der Sättigung des Porenraums konnte grundsätzlich gezeigt werden. Daher ist gemäß Anlage 8.5 zu schlussfolgern, dass die Lösungspermeabilitäten, aufgrund der realen Sättigungen, die durchgehend unter 100% lagen, in der Realität kleiner als die laborativ ermittelten sind und Strömungsprozesse entsprechend langsamer ablaufen.

### 5.1.4 Poren- und Kristallwasseranteile am Gesamtwassergehalt, Rückstandszusammensetzung

[WE\_F/U\_H Poppitz]

Wie bereits in Kapitel 4.3.3.3 erläutert, können die Poren- und Kristallwassergehalte ebenfalls zur Abgrenzung von Zonen unterschiedlicher Durchströmung herangezogen werden, und gleichzeitig geben diese einen Überblick über die teufenabhängigen Veränderungen der

mineralogischen Zusammensetzung. Das Verhältnis von Porenwasser zu Kristallwasser wurde bereits zur Interpretation der Bohrungen aus 1998 herangezogen, und ebenfalls zur Auswertung der Bohrungen am Standort Hattorf verwendet. Die Porenwassergehalte im Haldenmantel sind lt. Sessler (1998) rund zwei- bis dreimal so hoch wie im Haldenkern, wo sich der Haldenwasseranteil deutlich unter 25% bewegt /25/. In Kapitel 4.3.3.3 wurde für die Bohrung B 72/2014 WI wie zuvor auch schon für die Hattorfer Bohrungen gezeigt, dass die Randbereiche der Bohrungen hohe Porenwasseranteile am Gesamtwassergehalt aufweisen, gefolgt von einem unterschiedlich breiten Übergangsbereich mit wechselnden Verhältnissen von Poren- zu Kristallwasser sowie zum Bohrlochtiefsten hin einem Bereich mit durchgehend hohen Kristallwasseranteilen. Die bereits für den Standort Hattorf zusammengestellte Zonierung anhand der Kristall- und Porenwasseranteile wurde um die Ergebnisse aus B 72/2014 WI ergänzt und ist in Tabelle 5-2 dargestellt.

Der durch Bohrung B 72/2014 WI erschlossene Bereich zeichnet sich durch eine wechselhafte Schüttgeschichte aus, bei welcher, wie vorstehend beschrieben, häufig eine geringmächtige Überschüttung ein und des selben Bereichs vorgenommen wurde und Oberflächen teils lange freilagen, bevor sie überschüttet wurden. Dies war ein Auswahlkriterium für den Bohrplatz. Wie auch schon durch andere Untersuchungen belegt, zeigt sich der Einfluss dieser Schüttgeschichte auch in den Ergebnissen der chemischen und mineralogischen Analytik, und dementsprechend auch im Tiefenprofil der Kristall- und Porenwassergehalte (vgl. Kapitel 5.1.5). Für B 72/2014 WI wird in Tabelle 5-2 eine zweite Zone mit hohen Porenwasseranteilen am Gesamtwassergehalt ausgewiesen, jedoch sind die Zonen deutlich schmaler, und schon bei rd. 122 m überwiegen wiederum die Kristallwasseranteile deutlich die Porenwasseranteile. Auch die Gipsbildung in dem Bereich unterhalb der Schüttfläche deutet darauf hin, dass es sich um eine ehemalige Oberfläche handelt (siehe Kapitel 4.3.3.2). Wie vorstehend dargestellt und in Kapitel 5.1.5 näher erläutert, wird diese Beobachtung auf eine einzelne hydraulisch mit der Haldenmantelzone unter der Haldenrampe in Verbindung stehende ehemalige Oberfläche zurückgeführt, was einen kubatur- bzw. durch die Schüttgeschichte bedingten Sonderfall darstellt.

Dass die in Tabelle 5-2 dargestellte Zonierung altersabhängig ist, wurde bereits für den Standort Hattorf gezeigt. In den Bohrungen B 97 und B 99/2013 HA, die die ältesten untersuchten Haldenbereiche erschließen, ist die Zonierung besonders ausgeprägt. In der Zone mit durchgehend hohen Kristallwasseranteilen wurde in allen untersuchten Bohrungen überwiegend ein Verhältnis von Kristallwasser zu Porenwasser von rund 2:1 oder darüber vorgefunden.

Die Bildung von Sekundärphasen wurde wie zuvor auch für den Standort Hattorf für Bohrung B 72/2014 WI anhand von Kristalloptik und RDA-Analytik nachgewiesen. Im Vergleich zu den Bohrungen am Standort Hattorf traten aufgrund der am Standort Wintershall leicht erhöhten Magnesium-Gehalte im Rückstand andere Sekundärphasen auf (Abwesenheit der in Hattorf nachgewiesenen Phasen Schönit und Syngenit).



**Tabelle 5-2: Bereiche mit unterschiedlichen Haft- und Kristallwasseranteilen am Gesamtwassergehalt aus Haldenbohrungen an den Standorten Hattorf und Wintershall - Tiefenlage in den Horizontal- und Vertikalbohrungen (Tiefenangaben gerundet)**

Bohrung Nr.	Bereich mit hohen Porenwasseranteilen			Übergangszone: Wechselnde Anteile von Poren- und Kristallwasser			Bereich mit hohen Kristallwasseranteilen		
	von [m]	bis [m]	Breite	von [m]	bis [m]	Breite	von [m]	bis (erbohrt) [m]	Breite (erbohrt)
B 72/2014 WI	0	<b>38</b>	38	>38	<b>58</b>	20	> 58	100	42
	100	<b>110</b>	10	>110	<b>122</b>	12	>120	131	11
B 97/2013 HA	0	<b>41,3</b>	41,3	> 41,3	<b>60,1</b>	18,8	> 60,1	100	39,9
B 98/2013 HA	0	<b>10,9</b>	10,9	> 10,9	<b>81,0</b>	70,1	> 81,0	102	21
B 99/2013 HA	0	<b>18,2</b>	18,2	> 18,2	<b>65,5</b>	47,3	> 65,5	101	35,5
B 100/2013 HA	0	<b>4,9</b>	4,9	> 4,9	<b>55,4</b>	50,5	> 55,4	100*	44,6
B 104/2013 HA	0	<b>6,7</b>	6,7	> 6,7	<b>100,5</b>	93,8	> 100,5	117	16,5

\* Ausnahme: 85,85 m (ehemalige Haldenoberfläche)

Bereits die Trocknungsergebnisse hatten auf einen bereichsweise hohen Anteil kristallwasserhaltiger Phasen schließen lassen. Die beobachteten bereichsweise auftretenden hohen Kristallwassergehalte sind auf die Bildung von Hydratphasen von Kieserit und Anhydrit sowie kristallwasserhaltige Sekundärbildungen im Rückstand zurückzuführen. Während der Primärbestand des Rückstands mit Ausnahme der Restgehalte an Kieserit und Carnallit keine kristallwasserhaltigen Phasen umfasst, wurden anhand von Kristalloptik und RDA-Analytik in den Bohrungen kristallwasserhaltige Phasen nachgewiesen (siehe Kapitel 4.3.3.2). Die größten Mengenanteile unter den Sekundärphasen nehmen dabei die kristallwasserhaltigen Mineralie Astrakanit, Epsomit und untergeordnet Eugsterit ein.

Die Erhaltung von löslichen Sekundärphasen wie Astrakanit gibt dabei einen Hinweis darauf, dass in dem betreffenden Bereich kein permanenter, nachhaltiger Sickerwasserkontakt bestanden haben kann. Entsprechend korrespondieren Bereiche mit einem hohen Anteil an Sekundärphasen mit den anhand der Packertests ausgewiesenen gering wasserführenden Bereichen. Im Umkehrschluss fehlen in den Bereichen mit stärkerer Wasserführung oberhalb von rd. 35...36 m und bei rd. 100 m Teufe die kristallwasserhaltigen Sekundärphasen, mit Ausnahme des im Randbereich auftretenden Calcium-Natrium-Doppelsalzes Eugsterit.

Ein Großteil der kristallwasserhaltigen Phasen ist leicht löslich und wird bei nachhaltiger Durchströmung mit an Magnesium und Kalium untersättigter Haldensickerlösung gelöst. Es entsteht ein selektiv entfrachteter Bereich, der in Kapitel 4.3.3.1.2 ausführlich beschrieben wurde. Dieser selektiv an Sekundärphasen abgereicherte oberflächennahe Randbereich, der auch für den Standort Hattorf bereits beobachtet wurde, wurde auch für Bohrung B 72/2014 WI durch chemische und mineralogische Untersuchungen bestätigt; und auch das GR-Log (Kap. 4.1.3.2.3) zeigt die Auswaschung kaliumhaltiger Phasen im Randbereich bzw. im Bereich ehemaliger Oberflächen an. Die mineralogische Analytik zeigt, dass in diesem Bereich

nur Gips (bzw. Bassanit) und Eugsterit neben dem ubiquitären Halit vorlagen. Gleichzeitig sind, wie in Kapitel 4.3.3.3 und Anlage 8 gezeigt, die absoluten Porenwassergehalte höher als in tieferen Bohrlochbereichen, was auf die Sickerwasserbeeinflussung zurückzuführen ist. Entsprechend hoch ist der Porenwasseranteil am Gesamtwasser. Auch das Verhältnis von Poren- zu Kristallwassergehalten bestätigt demnach das Vorhandensein einer aufgrund der Haldenwasserführung selektiv an Wertstoff-Restgehalten (und deren Sekundärbildungen) verarmten Zone an der Haldenoberfläche, welche anhand der Ergebnisse der chemischen Analytik nachgewiesen wurde.

In tieferen Bohrlochbereichen aller Bohrungen an den Standorten Hattorf und Wintershall hingegen ist das Auftreten von kristallwasserhaltigen Phasen auch durch die mineralogische Analytik in relevanten Mengenanteilen belegt (vgl. Kapitel 4.3.3.2). Demzufolge können in tieferen Bohrlochbereichen keine nachhaltigen Sickerwasserbewegungen stattfinden, die Lösungsprozesse sowie eine Erhöhung der Porenwasseranteile am Gesamtwassergehalt zur Folge hätten. Entsprechend sind auch die absoluten Porenwassergehalte mit rd 2 % deutlich geringer als in randnahen Bereichen, und geringer als bei der initialen Aufhaldung (rd. 4% Porenwassergehalt, ermittelt durch Karl-Fischer-Titration). Das in die Sekundärphasen eingebundene Kristallwasser selbst nimmt bis zur Auflösung des Minerals nicht am Wasserhaushalt teil.

Eine bereichsweise festgestellte Anreicherung magnesiumhaltiger Sekundärphasen über den initialen Gehalt hinaus gibt auch Aufschluss über die stattgefundenen Verlagerungsprozesse, die durch Lösung und Fällung bei einem Wechsel der Umgebungsbedingungen, insbesondere der Temperatur, charakterisiert werden können.

Auch für die Bohrung B 72/2014 WI kann das Verhältnis von Poren- zu Kristallwasser als Kriterium zur Abgrenzung von Haldenmantel und –kern verwendet werden. Hierbei ist gemäß der Erfahrungen am Standort Hattorf zu beachten, dass die anhand dieses Verhältnisses festgestellte Zonierung sich offenbar zeitabhängig verändert und der Übergangsbereich mit zunehmendem Alter des Rückstands abnimmt. Die Breite der Mantelzone wird jedoch allein durch Betrachtung des Verhältnisses von Poren- zu Kristallwasser unterschätzt. Hohe Porenwassergehalte markieren den selektiv entfrachteten Bereich (bis rd. 38 m), es folgt ein Übergangsbereich mit wechselnden Anteilen von Poren- zu Kristallwasser oberhalb von rd. 58 m, sowie unterhalb zum Bohrlochtiefsten hin einem Bereich mit durchgehend hohen Kristallwasseranteilen.

### **5.1.5 Einfluss der Haldenkubatur und Schütthistorie**

[WE\_F/U\_H Poppitz]

Wie eingangs in Kapitel 1.2.4 erläutert, ist gemäß den Erkenntnissen der Bohrungen am Standort Hattorf die Zonierung des Haldenkörpers altersabhängig. Bei Überschüttung einer ehemaligen Oberfläche entwickelt sich der ehemalige Haldenmantelbereich in einem Zeitraum von mehreren Jahren zunächst in die Übergangszone. Diese wird dann mit zunehmender Kompaktion verkleinert, der Haldenkern wächst und der ehemalige Randbereich wird so sukzessive zum Kernbereich. Die überschüttete ehemalige Oberfläche wird als Schüttfläche im Querschnitt erkennbar bleiben. Nach den Erkenntnissen der Haldenbohrungen am Standort

Hattorf, die auch in Kapitel 5.3.2 aufgegriffen werden, kommt diesen Schüttflächen jedoch keine Entfestigungs- oder Trennwirkung zu, und von einem Einfluss der ehemaligen Oberflächen auf die globale Standsicherheit der Halde ist nicht auszugehen. Die Schütthistorie am Standort Hattorf ist aufgrund des kontinuierlichen Schüttfortschritts in eine Vorschubrichtung nicht vergleichbar zu derjenigen am Standort Wintershall.

Im Ergebnis der Auswertung der Haldenbohrung B 72/2014 WI wird deutlich, dass die sich ausbildende Zonierung auch durch die Schütthistorie bzw. die Kubatur der Halde beeinflusst wird. Während in Hattorf eine kontinuierliche Beschüttung in eine Haupt-Vorschubrichtung vorgenommen wurde, hatte der in Wintershall durch die Bohrung B 72/2014 WI erschlossene Bereich eine wechselnde Schütthistorie, insbesondere im Zeitraum 1982-1996 mit mehrmaliger Überschüttung ehemaliger Oberflächen nach längerer Liegezeit.

Dieser lediglich rund 25 m breite Bereich innerhalb der Halde ist über den oben genannten langen Zeitraum entstanden. Im Bohrlochabschnitt zwischen rund 100 und 125 m werden zwei alte Haldenoberflächen bei rd. 114 und 100 m durchteuft, die längere Zeit ohne Überschüttung an der Oberfläche freilagen. Wie aus Anlage 1.2 und Kapitel 2.1 ersichtlich, handelt es sich bei der ehemaligen Oberfläche bei rd. 114 m Tiefe um eine Oberfläche, die zwischen 1982 und 1991/92 bestand, und dann geringmächtig überschüttet wurde. Die zweite Schüttfläche bei rd. 100 m stellt eine Oberfläche dar, die rund 4 Jahre bis zu ihrer Überschüttung in 1996 bestand. Im Zeitraum der jeweiligen Offenlage (rd. 10 bzw. 4 Jahre) liefen dort die in Kapitel 1.2.4 beschriebenen Verkarstungsprozesse ab, es bildeten sich bevorzugte Wegsamkeiten und ein selektiv entfrachteter Bereich heraus und an der Haldenoberfläche reicherten sich unlösliche Bestandteile an. An beiden Schüttflächen wurden erhöhte effektive Porositäten und Permeabilitäten festgestellt, jedoch wies nur die Schüttfläche bei rd. 100 m Teufe eine Wasserführung gemäß der Packertests auf; unterhalb von 113 m und damit auch im Bereich der Schüttfläche bei 114 m war hingegen keine Wasserführung zu verzeichnen. In den verschiedenen Untersuchungen ist die Schüttfläche bei rd. 100 m Teufe als Inhomogenität in allen durchgeführten Untersuchungen zu Tage getreten, und der sich zur Teufe hin anschließende Bereich zeigt vergleichbare Charakteristika zum Haldenrandbereich, einschließlich einer in den Packertests nachgewiesenen verstärkten Wasserführung. Der Chemismus der Haldenwässer lässt darauf schließen, dass hier Wegsamkeiten innerhalb einer ehemaligen Haldenmantelzone bestehen (vgl. Kapitel 4.2.2.3). Die Schüttfläche bei 114 m Teufe, die eine längere Offenlagerungszeit aufwies, trat hingegen weniger prominent hervor.

Wie aus Anlage 1.2 ersichtlich, läuft die Schüttfläche bei rd. 100 m Bohrteufe im Bereich der Rampe mit Bandanlage und Haldenzufahrt an der Haldenoberfläche aus. Die Anlage 1.2 enthält einen Nordwest-Südost-orientierten Längsschnitt durch die Halde im Bereich der Haldenbohrung B 72/2014 WI, der die Bandtrasse zum Haldentop quert. In diesen Schnitt wurden zusätzlich die ehemaligen Haldenoberflächen der Jahre 1982, 1988, 1991, 1992 und 2011 gemäß der eingemessenen Haldenfußpunkte und Plateaukanten projiziert. Wie dort dargestellt ist, wurde die Halde im Bereich der Auffahrt bzw. der Bandtrasse zum Haldentop seit 1988 nur geringfügig um rd. 15-20 m erhöht. Zwischen 1982 und 1988 war die Höhe der Halde mit ca. 460 m ü. NN in diesem Bereich unverändert, dann folgte bis ca. 1991 die Erhöhung auf rd. 475 m ü. NN. Bis heute (im Schnitt ist die Oberfläche 04.2011 dargestellt, die ab 1997 bestand) liegt die Oberfläche in diesem Bereich bei 475 m ü. NN. Die ehemalige Oberfläche der Jahre 1991/1992 wurde lediglich horizontal nach Südosten überkippt, es

erfolgte jedoch im Bereich der Bandanlage keine vertikale Überdeckung aufgrund der dort platzierten Haldeninfrastruktur.

Es ist nach /2/ davon auszugehen, dass in diesem Teufenbereich unter der Rampe die Haldenmantelzone mit einer Haldenwasserführung besteht. Die im Höhenniveau des Haldenrandes in relativ großer horizontaler Teufe im Haldeninneren angeschnittene Schüttzone, die durch B 72/2014 WI bei rd. 100 m erschlossen ist, steht damit immer noch hydraulisch mit der unter der Haldenrampe Haldenwasser führenden Haldenmantelzone in Verbindung. Dies erklärt, warum die Zone in den Packertests als haldenwasserführend erkannt wurde. Anhand der Zuflussmessungen und Packertests sowie der Kamerabefahrung wird jedoch auch deutlich, dass der Einflussbereich dieser Schüttfläche gering ist – schon im Test 1 bei 105,0 – 115,4 m wurden lediglich 0,2 l/min Auslauf im Intervall gemessen, bei 113,5 m Teufe war in der Kamerabefahrung bereits kein Wasserzutritt zum Bohrloch mehr feststellbar und die Bohrlochsohle trocken. Die zweite ehemalige Oberfläche bei rd. 114 m Tiefe, die ebenfalls markant in der Kernansprache zu Tage trat und deutlich länger dem Atmosphäreneinfluss ausgesetzt war, zeigt sich also nicht als wasserführend, wie vorstehend beschrieben. Wie aus Anlage 1.2 hervorgeht und oben beschrieben wurde, ist diese zur Haldenrampe hin von rund 15-20 m Rückstand überdeckt. Diese Überdeckung hat offenbar dazu geführt, dass die ehemals vorhandenen Wegsamkeiten verschlossen wurden. Wie eingangs beschrieben, sind beide Schüttflächen durch leicht erhöhte effektive Porositäten und Permeabilitäten gekennzeichnet, was auf die ehemaligen Oberflächen zurückgeht, das Beispiel zeigt jedoch, dass dies nicht zwingend auch mit einer Wasserführung einhergeht. Nicht alle ehemaligen Oberflächen, die längere Zeit offen lagen, zeigen sich also als langfristig wasserführend.

Es ist davon auszugehen, dass bei weiterer Überdeckung im Bereich des Haldentops aufgrund der generell üblichen Restverfüllung die in diesem Bereich vorhandenen Wegsamkeiten an ehemaligen Schüttoberflächen bereits in Folge auflastbedingter Kompaktions- und Setzungserscheinungen verschlossen worden wären. Andere Schüttflächen innerhalb der Bohrung traten nicht in der gleichen Deutlichkeit zu Tage und hatten offenbar keinen Einfluss auf das hydrologische Verhalten und die Zonierung des Haldenkörpers.

In den am Standort Hattorf durchgeführten Bohrungen wurden ebenso wie in B 72/2014 WI zahlreiche weitere Schüttflächen angetroffen, die für die Fließprozesse im Haldenkörper keine vergleichbare Relevanz zeigten, da sie in Folge der Kompaktion verschlossen wurden.

Dennoch wurde den in B 72/2014 WI gemachten Beobachtungen in der nachfolgenden Ausweisung der Breiten der Haldenzonen Rechnung getragen, indem die Ausweisung einer zweiten Haldenmantel- bzw. Übergangszone in der Bohrung erfolgte, wie Kapitel 5.3.1 zu entnehmen ist.

Die an den Haldenmantelbereich unterhalb des Haldentops angebundene Schüttfläche, die in B 72/2014 WI bei rd. 100 m Teufe angetroffen wurde, ist offenbar aufgrund ihrer geringen Überdeckung weiterhin wasserwegsam. Es ist davon auszugehen, dass die auf der Schüttfläche entlang fließenden Lösungen dieser bis zum Fußpunkt innerhalb der Halde folgen und dort - aufgrund der hohen Dichten innerhalb des Haldenkernbereichs – den Haldenkern auf der Haldenbasis umströmen. Die Generalneigung des Urgeländes in diesem Bereich ist auf die Tiefenlinie des Heergrabens hin gerichtet, so dass der Austritt der über die ehemalige Haldenoberfläche zutretenden Lösungen im Bereich des Heergrabens zu erwarten ist. Dies

wird auch deutlich bei Betrachtung des Verlaufs der ehemaligen Haldenoberfläche in Anlage 1.1. Die Anlage 1.4 verdeutlicht aber auch, dass die Überdeckung der Schüttfläche und damit die Auflast auf dieser nach Nordosten hin zunimmt. Der an die Haldenoberfläche angeschlossene Bereich beschränkt sich also auf den durch die Bohrung erschlossenen südwestlichen Teil der ehemaligen Oberfläche, der sich in der vorstehend beschriebenen Randlage und unter dem Haldentop befindet. Wie der vorstehend angeführte Vergleich mit anderen ehemaligen Oberflächen gezeigt hat, führt eine größere Überdeckung zum Verschluss der Wegsamkeiten, so dass die ehemalige Oberfläche im zentralen Bereich der Halde nicht mehr wirksam sein dürfte.

Eine zum Bereich des Heergrabens vergleichbare morphologische Situation besteht am Standort Hattorf auch im Taltiefsten des ehemaligen Kreuzgrabens, der von der Bestandshalde überschüttet wurde. Auch hier wurde in 2017 bei Bauarbeiten Haldensickerwasser oberflächennah aufgeschlossen. Aufgrund der dort andersartigen Schütthistorie mit kontinuierlichem Vortrieb in eine Hauptrichtung (s. oben) mögen aber andere Gründe ursächlich für die Herkunft der Sickerwässer in diesem Bereich sein.

#### **5.1.6 Fazit: Prüfung der Übertragbarkeit der für den Standort Hattorf entwickelten Modellvorstellung**

[WE\_F/U\_H Poppitz]

Die im Ergebnis der Auswertung der Haldenbohrungen für den Standort Hattorf weiterentwickelte Modellvorstellung zur Zonierung des Haldenkörpers konnte grundsätzlich bestätigt werden. Wie auch am Standort Hattorf, lässt sich die Zonierung des Haldenkörpers anhand der o.g. Kriterien wie folgt beschreiben:

In den randnahen Bereichen des Haldenkörpers ist eine **Haldenmantelzone** ausgeprägt, die durch folgende Charakteristika gekennzeichnet ist:

- nachhaltig durchströmter Bereich (belegt durch Beobachtung der Hauptzuflussbereiche und Zuflussmessungen, Packertests: größte mit Messungen belegte Abflussmengen aus diesem Bereich)
- Geringe und schwankende Nass- und Trockenrohdichte ( $\rho_d^* = 1,2 - 1,8 \text{ g/cm}^3$ ), starker Anstieg zur Tiefe hin bei gleichzeitig abnehmenden totalen Porositäten
- vergleichsweise große Werte zu den Durchlässigkeiten (ermittelt in Laborversuchen und hydrodynamischen Messungen) und errechneten Porositäten sowie Änderungen/Verringerungen mit der Tiefe
- hohe Anteile von Porenwasser am Gesamtwasser, geringe Kristallwasseranteile, weitgehende Entfernung kristallwasserhaltiger Phasen durch Lösungsprozesse bei gleichzeitiger relativer Anreicherung von Halit und Anhydrit/Gips, überwiegend hohe Porenwassergehalte.
- Auch im Haldenmantel finden Strömungsprozesse nicht flächig, sondern entlang bevorzugter Wegsamkeiten statt, die sich im löslichen Rückstand sukzessive unter Niederschlagseinfluss ausbilden.

Zwischen dem Mantelbereich, der am Wasserhaushalt der Halde teilnimmt, und dem Haldenkern, in welchem nahezu keine Wasserfließbewegungen stattfinden, befindet sich eine

**Übergangszone**, in welcher vereinzelte Lösungszutritte auftreten, die jedoch überwiegend wenig ergiebig sind und geringe Mengenanteile an den gemessenen Gesamt-Abflüssen einnehmen. Lösungsbeeinflusste Bereiche wechseln sich 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 ohne erkennbaren Abfluss im Bereich der Übergangszone, kann ebenfalls als Indiz für die zunehmende Kompaktion gewertet werden (vgl. Kapitel 4.1.2). Von den Untersuchungen am Standort Hattorf ist ferner bekannt, dass die Breite der Übergangszone altersabhängig ist /2/.

Im Porenraum der Übergangszone liegen ungesättigte Verhältnisse vor. Wasserfließbewegungen und Lösungszutritte sind in der Übergangszone bereits im Wesentlichen an ehemalige Schüttoberflächen, d.h. an besondere Wegsamkeiten gebunden. Mit zunehmender Kompaktion, erkennbar anhand der steigenden Rohdichten, werden diese Wegsamkeiten für Lösungen verschlossen, der verdichtete Kernbereich wächst nach außen hin und die Breite der Übergangszone nimmt mit zunehmendem Alter des Schüttbereichs ab. Die Übergangszone kann zusammenfassend durch folgende Merkmale beschrieben werden:

- Auftreten einzelner Lösungszutritte zum Bohrloch in durch Abflussmessungen festgestellten geringen Mengen, Zutritte sind häufig gebunden an Inhomogenitäten (Schüttflächen), nicht nachhaltig;
- Engräumiger Wechsel von Zutrittsbereichen und visuell trockenen Bereichen (in der Kamerabefahrung erkennbar);
- mittlere Trockenrohdsichten zwischen 1,8 und 1,9 g/cm<sup>3</sup>, totale Porositäten zwischen 10 und 20% und Sättigungsbeiwerte um 0,35 bis 0,45, Bereich zunehmender Verdichtung;
- Lösungsspermeabilität überwiegend im Bereich  $10^{-16}$  bis  $10^{-14}$  m<sup>2</sup> (Durchlässigkeitsbeiwert  $10^{-9}$  bis  $10^{-7}$  m/s)
- schwankende Poren- und Kristallwasseranteile am Gesamtwassergehalt;

An diese Übergangszone schließt sich zum Haldeninneren der **Haldenkernbereich** an. Der **Haldenkern** ist charakterisiert durch:

- fast vollständiges Fehlen von Wasserzutritten zum Bohrloch und Fließbewegungen
- durchgängig hohe Rohdichten (Trockenrohdsichte  $\rho_d^* > 1,9$  g/cm<sup>3</sup>, bereichsweise  $> 2,0$  g/cm<sup>3</sup>)
- geringe Durchlässigkeiten (Lösungsspermeabilität überwiegend im Bereich  $10^{-17}$  bis  $10^{-16}$  m<sup>2</sup>/ Durchlässigkeitsbeiwert  $10^{-10}$  bis  $10^{-9}$  m/s) und errechnete totale Porositäten unter 10%
- hoher Anteil von Kristallwasser am Gesamtwassergehalt und gleichzeitig geringe absolute Porenwassergehalte von unter 4% in Horizontalbohrungen und unter 2% in Vertikalbohrungen; Vorhandensein von MgSO<sub>4</sub>-Hydraten und kristallwasserhaltigen Sekundärbildungen.

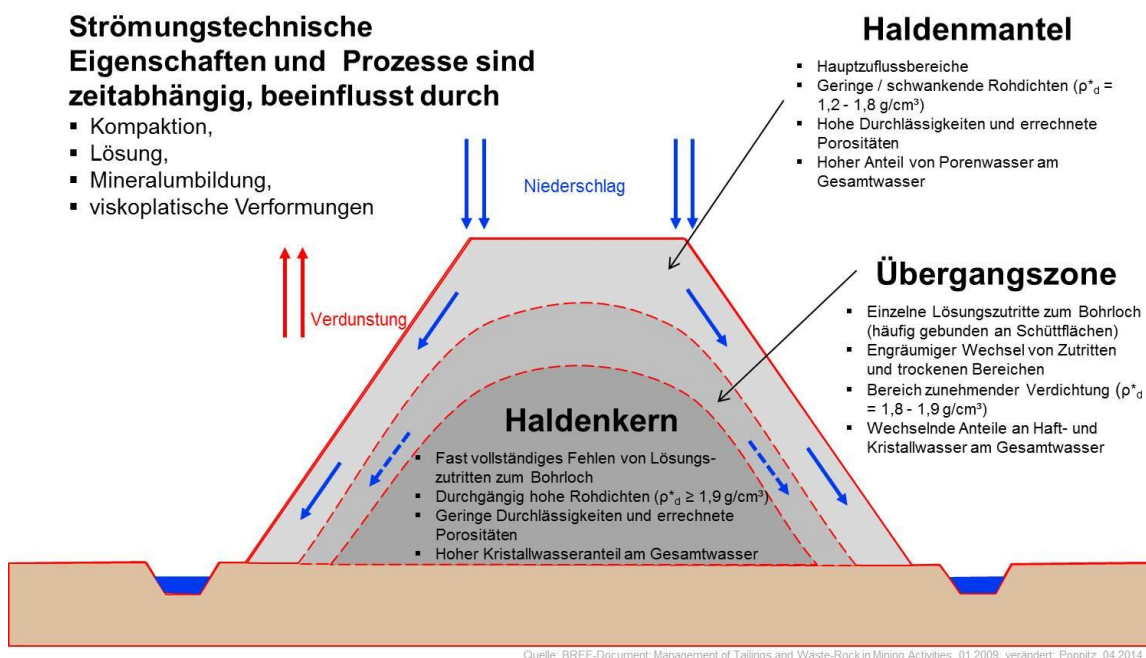
Die für den Haldenkern ermittelten Durchlässigkeiten entsprechen dabei in ihrer Größenordnung den Erfahrungen aus anderen Haldenbohrungen, beispielsweise am Standort Zielitz, oder aus der Haldendurchörterung Bleicherode. Die Durchlässigkeiten des Rückstands im Kern der Halde Bleicherode wurden im Abschlussbericht mit  $4 \cdot 10^{-10}$  bis  $2,4 \cdot 10^{-8}$  m/s als gering durchlässig charakterisiert. /17/

Die hier vorgestellte Zonierung ist altersabhängig. Durch die hier ebenfalls berücksichtigte Untersuchung verschieden alter Bereiche im Rahmen der Haldenbohrungen am Standort Hattorf konnte bereits gezeigt werden, dass sich die Zonierung mit zunehmender Alteration des Haldenkörpers verändert. Als Ursachen für diese Veränderung wurden im Rahmen der Untersuchungen in Hattorf

- Kompaktion,
- Lösungsprozesse und
- Mineralumwandlungen

identifiziert. Bei dem Rückstandskörper handelt es sich also nicht um einen homogenen, monolithischen Körper, vielmehr variieren die Charakteristika des Rückstands lage- und zeitabhängig /2/.

Das nachfolgend dargestellte Modell, entwickelt für den Standort Hattorf, besitzt also auch für den Standort Wintershall Gültigkeit.



**Abbildung 5-1 Weiterentwickelte Zonierung des Haldenkörpers, schematisch**

Die in Kapitel 5.1.5 diskutierte Schüttfläche bei rd. 100 m Teufe, unterhalb derer eine Wasserführung festgestellt wurde, widerspricht der grundsätzlichen Ausbildung der vorstehend beschriebenen Zonierung nicht. Ursächlich für das Phänomen ist, wie in Kapitel 5.1.5 erläutert wird, das Zusammenspiel von Haldenkubatur und Schütthistorie, insbesondere ist hier die Lage unterhalb der Haldenauffahrt relevant. Entsprechende Hinweise für das technische Konzept werden in Kapitel 5.3 abgeleitet.

Für den Standort Hattorf lag in Ergänzung zur Auswertung der Haldenbohrungen ein Kompaktionsmodell des IfG vor, auf Basis dessen Dichteplots erstellt wurden und mit den Ergebnissen der Bohrungen verglichen wurden /2/. Die Ergebnisse der Hattorfer Haldenbohrungen passen sich sehr gut in die Dichteentwicklung des Kompaktionsmodells ein. Das Kompaktionsmodell des IfG bildet die spannungsbedingte Zunahme der Dichten des

Rückstands im Haldenkörper im relevanten Betrachtungsmaßstab zutreffend ab. Andere, die Entwicklung der Dichte signifikant beeinflussende Faktoren, wie z.B. Lösungs- und Anreicherungsprozesse, insbesondere bei verschiedenen Schüttphasen wie in den Vertikalbohrungen, können hingegen modelltechnisch nicht berücksichtigt werden. Die tatsächliche Dichteentwicklung in der B 72/2014 WI wird durch die spezielle Lage im südlichen Randbereich (Eck- bzw. Kurvenbereich) der Halde und auf die Haldenkubatur sowie die Schütthistorie beeinflusst. Hier wird ersichtlich, dass zusätzlich zu der altersabhängigen Kompaktion auch die Lage innerhalb des Haldenkörpers im Zusammenspiel mit der Kubatur und der Schütthistorie eine Rolle bei der Kompaktion und Ausbildung der haldeninternen Zonierung eine Rolle spielen: Während der von der Bohrung B 99/2013 HA erschlossene Bereich innerhalb eines Zeitraums von lediglich rd. 4 Jahren geschüttet wurde (/2/), betrug der Schüttzeitraum im Bereich von B 72/2014 WI 16 Jahre, teils mit längeren Unterbrechungen und – wie an den zahlreichen, deutlich ausgeprägten Schüttflächen zu erkennen ist – häufig in geringmächtiger Überdeckung bei der jeweiligen Überschüttung des Bereichs. Offenbar unterstützt ein kontinuierlicher Schüttfortschritt in eine Haupt-Vorschubrichtung, wie es im Bereich der Bohrungen am Standort Hattorf der Fall ist, die rasche Ausbildung der Haldenzonierung. Für die geplante Haldenerweiterung ist ebenfalls eine kontinuierliche Beschüttung in eine Haupt-Vorschubrichtung vorgesehen. Im Unterschied zur vorliegenden Situation erfolgt die Beschüttung über 2 Bermen. Da die Kompaktion im Haldenkörper im Wesentlichen durch die lastbedingten Spannungen und damit durch die Schütthöhe beeinflusst wird, wurde für den Standort Hattorf ergänzend ausgewertet, inwiefern sich das auf die Dichteentwicklung auswirkt. Es wurde gezeigt, dass der Abstand zwischen Dichtegrenze und Haldenrand sich in beiden Fällen (volle und halbe Aufhaldungshöhe) asymptotisch einem Abstand der Dichtegrenze zum Haldenrand von rd. 10 m annähert. D.h., die Kernzone der Halde „wächst“ auf Kosten der Übergangszone und später der Mantelzone, deren Breite immer geringer wird. Zusammenfassend wurde für den Standort Hattorf festgestellt, dass die an der Althalde mit Feld- und Laboruntersuchungen sowie rechnerisch ermittelten Dichteverläufe/-entwicklungen auf die künftige Haldenerweiterung übertragen werden können. Dies gilt, aufgrund des vergleichbaren geplanten Schüttregimes, auch für die Erweiterung am Standort Wintershall.

## **5.2 Strömungsprozesse im Haldenkörper**

[WE\_F/U\_H Poppitz]

Anhand der Erkenntnisse aus 1998 (/25/) sowie der am Standort Hattorf durchgeführten Haldenbohrungen konnten die Fließrichtungen in der Halde beschrieben werden. Die Prozessbeschreibung hat auch für den Standort Wintershall Bestand und wurde daher nachfolgend übernommen und ergänzt.

Im Haldenkörper kommt es bereits während der Aufhaldung und unmittelbar danach aufgrund der dem Rückstand anhaftenden Prozesslösung zu Rekristallisationsprozessen, die ein Verfestigen des losen Schüttguts auslösen – eine feste Kruste entsteht innerhalb kürzester Zeit. Ein Oberflächenabfluss wird an der Halde Hattorf dennoch nicht beobachtet, sondern das auf den Haldenkörper auftreffende Niederschlagswasser versickert im Bereich des Haldentops und der Haldenflanken. Gealterte Haldenoberflächen sind stark zergliedert und zeigen einen



typischen Chloridkarst-Formenschatz, bestehend aus Salzkarren und -schratten sowie runden Lösungskavitäten, die als bevorzugte Fließwege fungieren und somit die Infiltration in die Halde begünstigen. Der Niederschlag besitzt beim Eindringen in den Haldenkörper ein hohes Lösungspotenzial, sättigt sich während der Perkolation durch den Rückstand unter Lösung des Materials zunehmend auf und trägt so stets zur Weiterentwicklung der bevorzugten Fließbahnen bei. Deren Orientierung folgt der Schwerkraft, jedoch ist die senkrechte Durchlässigkeit durch die verdichteten Bereiche im Haldeninneren mit zunehmender Tiefe immer stärker gehemmt. Die Verdichtung erfolgt in Folge auflastbedingter Kompaktions- und Setzungserscheinungen und führt, wie für den Standort Hattorf gezeigt, zu einer annähernd oberflächenparallelen Dichtezonierung mit Dichten im Haldentiefsten, die vergleichbar zu Steinsalz in der Lagerstätte sind. Im Hinblick auf die verminderte Durchlässigkeit kann auch ein Einfluss der im gesamten Haldenkörper insbesondere in der Anfangsphase nach Schüttung ablaufenden Hydratisierungs- und chemischen Umwandlungsprozesse nicht ausgeschlossen werden. Die horizontalen Durchlässigkeiten übersteigen, wie die geophysikalischen Bohrlochmessungen am Standort Hattorf zeigten und wie zuvor bereits für die Halde Zielitz festgestellt wurde, die vertikalen Durchlässigkeiten um ein Vielfaches, weshalb sich im Haldenkörper schwebende Haldenwasserspiegel auf den kompakteren Kernbereichen einstellen. Es kommt innerhalb des Haldenkörpers zu einem seitlichen Abfließen in Bereichen mit geringerer Dichte unterhalb der Haldenböschungen. Aus dem Oberflächenbereich nachströmendes Niederschlagswasser folgt dann den bereits angelegten Fließbahnen und entwickelt diese durch Lösung weiter, so dass im Bereich unterhalb der Haldenflanken ein Netz von miteinander verbundenen Poren in einer rekristallisierten, kompakten Matrix entsteht. Die Poren stellen bevorzugte Wegsamkeiten für die Niederschlagswässer dar. Gleichzeitig verarmt der Haldenmantelbereich aufgrund der nachhaltigen Durchströmung mit Haldenwasser an leichtlöslichen Nebenbestandteilen, was anhand des Verhältnisses von Haft- zu Kristallwasser im Tiefenprofil beobachtet und mittels chemischer und mineralogischer Analytik nachgewiesen wurde. Hieraus resultieren die sowohl in B 99/2013 HA beobachteten als auch in Kapitel 4.2.2.2 für die Rückhaltebecken Heer- und Zinkesgraben beschriebenen Veränderungen der Haldenwasserzusammensetzung mit zunehmender Haldenalteration:

Das im jeweiligen Haldenbecken gesammelte Haldenwasser ist ein Mischwasser aus allen Haldenbereichen. Aufgrund der hier erläuterten Modellvorstellung ist davon auszugehen, dass die Haldenwasserzusammensetzung durch diejenigen Haldenwässer dominiert wird, die den Mantelbereich durchströmen. Der Anteil der aus tieferen Haldenbereichen zuströmenden Lösungen ist demgegenüber aufgrund der vorgenannten Charakteristika der Übergangszone, und insbesondere aufgrund der zunehmenden Verdichtung in diesem Bereich - vergleichsweise gering, wie die Zuflussmessungen in den Bohrungen gezeigt haben. Das Vorhandensein von Kalium und Magnesium in einer dem frischen Rückstand vergleichbaren Größenordnung im Haldenkern ist ein zusätzlicher Beleg dafür, dass die Bereiche keiner nachhaltigen Durchströmung unterlagen. Somit haben die inneren Haldenbereiche, deren chemische Zusammensetzung weitgehend derjenigen des frischen Rückstands entspricht, nur geringen Einfluss auf die Zusammensetzung des entstehenden Mischwassers. Deshalb ist in der Nachbetriebsphase - mit einiger Verzögerung nach Einstellung der Beschüttung - insgesamt mit einer Abnahme der Kalium- und Magnesiumgehalte zu rechnen, selbst dann, wenn bei fortschreitender Auflösung des Haldenkörpers auch die Randbereiche des Kerns in den Einflussbereich von Lösungsprozessen gelangen.

Die Verdichtung des Haldenkörpers, insbesondere der Kernbereiche, ist jedoch zeitabhängig, wie die Untersuchungen am Standort Hattorf zeigen konnten. In Bohrung B 100 und B 104/2013 HA war die Verdichtung nach ca. 7 bis 8 Jahren noch nicht abgeschlossen. Bis zum Erreichen hoher Verdichtungsgrade und Abschluss der Setzungserscheinungen fungieren durch die Aufschüttung bedingte Inhomogenitäten im Haldenkörper, wie überschüttete ehemalige Haldenoberflächen (Schüttflächen) in der Übergangszone zwischen dem sich herausbildenden Haldenmantel und dem zunehmend dichteren, wachsenden Kernbereich ebenfalls als kleinräumige Zonen erhöhter Wegsamkeit, die sich mit trockenen, massiven Bereichen abwechseln. Im Bereich der Schüttflächen kann z.B. eine erhöhte Porosität aufgrund des ehemaligen Atmosphäreneinflusses vorliegen, Porenverbindungen können initial ausgebildet sein. Ein Teil der von der Oberfläche des Haldenkörpers eindringenden Wässer folgt diesen Zonen und wird in zunehmender Tiefe in die weniger dichten Randbereiche abgedrängt. Diese Wegsamkeiten werden erst bei zunehmender Kompaktion des Haldenkörpers im Ablauf der Zeit endgültig verschlossen bzw. durch weitere Überdeckung dem Atmosphäreneinfluss entzogen. Anhand der Bohrung B 72/2014 WI wurde gezeigt, dass bei geringer vertikaler und horizontaler Überdeckung der Auflastdruck nicht ausreicht, um die Wegsamkeiten zu verschließen, so dass aus dem Mantelbereich des Haldentops weiterhin nachhaltig Lösung zutreten und - insbesondere im Bereich der Schüttfläche - als bevorzugter Wegsamkeit strömen kann. Eine nachhaltige Wasserbeeinflussung wird dabei u.a. durch das Verhältnis von Poren- zu Kristallwasser angezeigt, aber auch durch eine selektive Abreicherung an Wertstoff-Restbestandteilen. Im Falle der B 72/2014 WI wurde sie darüber hinaus auch durch Packertests nachgewiesen. Gleichzeitig zeigte sich jedoch auch, dass dieser Befund auf die spezielle Kubatur und fehlende Überdeckung zurückgeht, da benachbarte Schüttflächen mit nur geringer Überdeckung bereits nicht als Wegsamkeit fungieren.

Bei Anschüttung der Haldenerweiterung an die bestehende Halde läuft der oben beschriebene grundsätzliche Verdichtungsprozess an den ehemaligen Haldenoberflächen ab. Durch Anschüttung werden die ehemaligen Oberflächen sukzessive dem Atmosphäreneinfluss entzogen. Anfänglich können die ehemaligen Haldenoberflächen aufgrund der dort erfolgten Anreicherung an unlöslichen Bestandteilen und der Ausbildung von bevorzugten Fließwegen als Wegsamkeiten innerhalb des Haldenkörpers fungieren, jedoch werden diese bei zunehmender Überdeckung und Kompaktion verschlossen, sofern eine kontinuierliche Beschüttung erfolgt und die Überdeckung nicht nur geringmächtig bleibt. Dieser Prozess nimmt einen Zeitraum von mehreren Jahren in Anspruch, währenddessen sich der ehemalige Haldenmantelbereich zunächst in die Übergangszone entwickelt. Parallel laufen auch Hydratisierungsprozesse und die Ausbildung initialer Wegsamkeiten im frisch geschütteten Rückstand ab. Daher ist nicht mit einem nachhaltigen Wasseraustritt aus der Vorschubböschung zu rechnen. Dies deckt sich mit Beobachtungen an den Halden Hattorf und Wintershall, denen zu Folge kein relevanter Haldenwasseranfall an der frischen Vorschubböschung feststellbar ist (vgl. auch /23/). Der gravitativ entwässerbare Anteil der mit aufgehaldeten Restfeuchte wird gleichwohl freigesetzt und beeinflusst die Haldenwasserzusammensetzung, wie vorstehend beschrieben.

Die Übergangszone wird mit zunehmender Kompaktion verkleinert und der ehemalige Randbereich wird dann zum Kernbereich. Wie für den Standort Hattorf gezeigt, entwickelt sich der Kernbereich mit Dichten  $>1,9...2,0 \text{ g/cm}^3$  ausgehend von der Althalde in den

Haldenerweiterungsbereich fort und umfasst wenige Jahre nach Erreichen der Erweiterungsgrenze den Großteil der Haldengrundfläche /2/. Bei Entwicklung eines technischen Konzepts zur Ableitung der Haldenwässer ist daher insbesondere der Haldenmantelbereich zu berücksichtigen, in welchem sich der Hauptteil der Wegsamkeiten im Haldenkörper befindet.

Grundsätzlich ist hinsichtlich des Haldenwasseranfalls eine Vergleichmäßigung gegenüber dem Niederschlagsgeschehen feststellbar – auch in anhaltenden Trockenperioden erfolgt ein Haldenwasseraustritt aus dem Haldenkörper, bei starken Niederschlägen wird der Anfall jedoch gepuffert und die Abgabe des Haldenwassers wird verzögert. Letzterer Effekt wird – abhängig vom Anteil offen liegender Vorfeldflächen – jedoch überlagert vom unmittelbar erfolgenden Abfluss der Vorfeldbereiche. Das Phänomen der Pufferung ist teilweise durch die vorstehend beschriebenen Prozesse der Ausbildung von Wegsamkeiten und der Hydratisierung insbesondere an der Vorschubböschung erklärbar, jedoch spielen auch die langen Sickerwege bei den ermittelten Durchlässigkeiten von  $10^{-4}$  bis  $10^{-6}$  m/s im Haldenmantelbereich eine Rolle: beispielsweise dauert bei einer Sickerstrecke von 200 m die Passage durch den Haldenkörper unter Annahme einer Durchlässigkeit von  $10^{-6}$  m/s rund 6 Jahre. Bevorzugte Wegsamkeiten können den Sickerprozess beschleunigen, die Sickerstrecken im Haldenkörper können jedoch auch erheblich länger sein, sodass von einer Verweildauer des Haldenwassers im Haldenkörper von wenigen Monaten bis zu 10 Jahren ausgegangen werden kann.

Die vorstehend dargestellte These bevorzugter Wegsamkeiten im Haldenkörper wurde im vorliegenden Bericht durch verschiedene Beobachtungen zur mineralogischen Zusammensetzung und zu Hydratisierungsprozessen, aber auch zu den Haftlösungsgehalten bestätigt. So wurde u.a. gezeigt, dass das Retardationspotenzial des Rückstands in verschiedenen, über den gesamten Kernmarsch verteilten Proben, nicht ausgeschöpft wurde, und die betreffenden Bereiche somit nicht am Strömungsprozess teilgenommen haben.

### **5.3 Erkenntnisse mit Relevanz für die Gestaltung des technischen Konzepts**

Für die geplante Haldenerweiterung lassen sich aus den vorstehenden Erkenntnissen die folgenden Hinweise zur Gestaltung des technischen Konzepts ableiten:

Ein kontinuierlicher Vortrieb in eine Haupt-Schüttrichtung begünstigt die Ausbildung des Haldenkerns und ist daher anzustreben. Weiterhin begünstigt eine Überdeckung in ausreichender Mächtigkeit die Kompaktion und damit ebenfalls die Ausbildung des Haldenkerns. In Bohrungen am Standort Hattorf wurden bereits bei rd. 25 – 30 m Überdeckung über der Bohrung durchgehend hohe Rohdichten von rd.  $1,9 \text{ g/cm}^3$  und darüber erreicht. Das Vorhandensein eines dichten Haldenkerns auch für flache Haldenbereiche (im Bereich der geplanten Berme) wurde darüber hinaus u.a. auch an der rd. 90 m hohen Halde Niedersachsen in Wathlingen durch Bohrungen bestätigt /14/. Bei einer Schütthöhe von rd. 90-100 m ist damit sicher von der Ausbildung eines Haldenkerns auszugehen.

Bei der Überschüttung alter Haldenoberflächen, die über einen längeren Zeitraum bestanden und zur Oberfläche hin nur geringfügig überdeckt werden, kann bis zum Verschluss der Schüttflächen durch Kompaktion über die Anordnung eines zusätzlichen

Entwässerungselements am Haldenfuß die Entwässerung dergestalt unterstützt werden, dass Haldenlösungen, die sich entlang der Schüttfläche bewegen und im Haldenfußbereich austreten, nach außen abgeführt werden. Dies gilt insbesondere für Bereiche, in denen aufgrund der Geländeneigung keine Entwässerung im freien Gefälle nach außen zum Haldenrandgraben erfolgen kann, und für Haldenbereiche, in denen die ehemalige Oberfläche im Bereich des Haldentops keine oder nur eine geringe Überdeckung erfährt. Für den Standort Hattorf ist an der Westflanke der bestehenden Halde, die im Zuge der dortigen Erweiterung der Halde überkippt wird, die Erstellung eines solchen Elements durch Umbau des derzeit bestehenden Haldenrandgrabens vorgesehen. Analog dazu kann auch in Wintershall der bestehende Haldenrandgraben für die Entwässerung genutzt werden.

Wie vorstehend beschrieben, ist hinsichtlich der Entwässerungswirkung insbesondere dem Haldenmantelbereich im Endzustand Aufmerksamkeit zu widmen, da die Gegensätze zwischen dem entwässerungswirksamen und dem nicht am Fließgeschehen teilnehmenden Bereichen mit zunehmender Ablagerungsdauer steigen, und sich das Abflussgeschehen zunehmend auf die äußeren Mantelbereiche konzentriert. Dabei ist bei der Anlage von Entwässerungselementen im endgültigen Haldenrandbereich zu beachten, dass es in diesem Bereich auch zu temperaturbedingten Einflüssen auf die Stabilitätsbereiche der vorhandenen Phasen und infolgedessen zu Kristallisationen kommt, wie sie an der Bestandshalde vielfach beim Austritt von Haldenwasser aus dem Haldenkörper zu beobachten sind, insbesondere im Winter. Wie die Temperatur-Logs aus allen Horizontalbohrungen gezeigt haben, liegen die Temperaturen im Haldenkörper bei rd. 15-20°C, mit einem Anstieg zum Haldeninneren hin, und in frischen Schüttbereichen wurden tendenziell höhere Temperaturen verzeichnet. Bereits im Haldenmantelbereich traten in allen Bohrungen Temperaturen von minimal 15 °C auf, so dass in den Wintermonaten ein entsprechend großer Temperaturgradient am Auslauf der Haldenwässer zu erwarten ist, dem bei der Anlage von Entwässerungselementen mit technischen Maßnahmen begegnet werden muss (z.B. durch Spülen), um den Abfluss zu gewährleisten. Unterhalb von rd. 50 m Teufe waren die Temperaturänderungen geringfügig, hier sind keine Maßnahmen erforderlich.

Das technische Konzept für die geplante Haldenerweiterung ist in Band 1 der Antragsunterlage erläutert.

Die Größenordnung der anhaftenden Restfeuchte im Rückstand ist von Relevanz für dessen Fließverhalten im Aufhaldungsprozess, wobei höhere Feuchten und  $\text{MgCl}_2$ -Gehalte nach Betriebserfahrungen das Fließverhalten verstärken. Durch umfangreiche, vergleichende Untersuchungen mit verschiedenen Analysemethoden konnte im Rahmen der hier ausgewerteten Untersuchungen gezeigt werden, dass die üblicherweise im Betrieb eingesetzte Feuchtebestimmung durch Ofentrocknung bei 105°C aufgrund der anteilig freiwerdenden Kristallwasseranteile ausreichend konservativ und damit geeignet im Hinblick auf die Beurteilung der Restfeuchten des Rückstands im Aufhaldungsprozess sind.

### 5.3.1 Festlegung der Breiten der Haldenzonen als Grundlage für weitere Planungen

Die Breite von Haldenmantel und Übergangszone sowohl für die Halden Hattorf als auch Wintershall wurden anhand der in den vorangegangenen Kapiteln erläuterten Kriterien bestimmt. Sie ist relevant für die Planung des Entwässerungssystems im Endausbau des Haldenkörpers. Die in Kapitel 1.2.4 vorgestellte Tabelle 1-6 mit den Ergebnissen für den Standort Hattorf wurde um die Ergebnisse der Bohrung B 72/2014 WI erweitert.

Das Vorhandensein einer zweiten, deutlich schmaleren Haldenmantel- und Übergangszone innerhalb der Bohrung B 72/2014 WI unterhalb von rd. 100 m Bohrtiefe stellt, wie in Kapitel 5.1.5 beschrieben, eine Sondersituation dar, die auf die spezielle Schüttkontur die geringmächtige Überdeckung des betreffenden Bereichs in der Bohrung B 72/2014 WI zurückzuführen ist. Die Befunde sind in der Zusammenschau aufgeführt, aber für die generelle Ableitung und Beurteilung der Zonierung aufgrund der vorstehend beschriebenen Sondersituation nicht relevant. Ihr wurde in Kapitel 5.3 hinsichtlich der Empfehlung unterstützender Maßnahmen zur Entwässerung Rechnung getragen.

**Tabelle 5-3: Breite von Haldenmantel und Übergangszone sowie erbohrter Haldenkernbereich (VB= Vertikalbohrung; HB =Horizontalbohrung)**

Bohrung Nr.		Haldenmantel			Übergangszone			Haldenkern		
		von [m]	bis [m]	Breite	von [m]	bis [m]	Breite	von [m]	bis [m]	Breite
HB B 72/2014 WI		0	42	<b>42</b>	> 42	92	50	> 92	99,7	<b>7,7</b>
	Schüttbereich 1982 - 1995	> 99,7	110	10,3	> 110	125	15	>125	131 (ET)	6
VB B 97/2013 HA		0	36	<b>36</b>	> 36	62	<b>26</b>	> 62	100 (ET)	<b>38</b>
VB B 98/2013 HA		0	68	<b>68</b>	> 68	78	<b>10</b>	> 78	102 (ET)	<b>24</b>
HB B 99/2013 HA		0	42	<b>42</b>	> 42	68	<b>26</b>	> 68	101 (ET)	<b>33</b>
HB B 100/2013 HA		0	52	<b>52</b>	> 52	97	<b>45</b>	> 87	100 (ET)	<b>13</b>
HB B 104/2013 HA		0	42	<b>42</b>	> 42	102	<b>60</b>	> 100	117 (ET)	<b>17</b>

### 5.3.2 Eignung des Rückstandskörpers als Baugrund

[WE\_F/U\_GGt Artschwager, WE\_F/U\_H Poppitz]

#### *Fragestellung des Scoping-Protokolls*

Die folgenden Ausführungen beziehen sich auf die Vorgabe im Scoping-Protokoll /20/ , S. 12, die zum Thema Baugrunduntersuchungen zur Beschreibung der Auswirkungen der Haldenerweiterung auf den Boden gegeben wurde (siehe auch Kap. 2 des vorliegenden Berichtes):

*„Baugrund im weitesten Sinne ist auch die derzeitige Haldenflanke. Zum Überschneidungsbereich zwischen betriebener Halde und Haldenerweiterung sind Aussagen zu treffen. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die zu überschüttenden Haldenflanke einen wasserdurchlässigen Mantelbereich hat und dass sich unlösliche Stoffe angereichert haben. Der Einfluss dieser Faktoren ist zu berücksichtigen.“ (Seite 12).*

Ergänzend zu den vorstehenden Ausführungen zum Einfluss der Haldenerweiterung auf die Wasserwegsamkeiten und zur Rolle von Schüttflächen und Schütthistorie wird nachfolgend auf den Aspekt der Haldenflanke als Baugrund im Sinne der Geotechnik eingegangen. Gleichlautende Ausführungen erfolgten bereits für den Standort Hattorf /2/ und haben auch im Ergebnis der Bohrungen am Standort Wintershall weiterhin Gültigkeit.

#### *Begriffsbestimmung*

Im Fachbereich der Geotechnik ist in DIN EN 1997-1 : 2009-09 zum Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik – Teil 1 : Allgemeine Regeln, der Begriff Baugrund wie folgt definiert:

*„Boden, Fels und Auffüllung, die vor Beginn der Baumaßnahme vor Ort vorhanden sind.“*

#### *Bewertung*

Setzt man als Beginn der Baumaßnahme die geplante Erweiterung der bis dahin geschütteten Halde, so wäre die geschüttete, künstliche Auffüllung Halde als Baugrund für die Erweiterung zu kennzeichnen. In diesem Fall wäre der Haldenkörper im geotechnischen Sinne als Baugrund geeignet, wenn für die Baumaßnahme Erweiterung die Standsicherheit von Bestand und Erweiterung des Haldenkörpers nachgewiesen werden können. Diese Nachweise werden mit Band 3.14 vorgelegt.

Die vorherige Betrachtung ist allerdings eher fiktiver, theoretischer Natur, denn die geplante Erweiterung stellt aus geotechnischer Sicht eine Fortsetzung des quasi kontinuierlichen Aufhaldungsprozesses des Haldenkörpers auf dem „realen“ Baugrund aus Boden und Fels dar. Die vorhandene Halde und die geplante Erweiterung zusammen sind daher aus geotechnischer Sicht als ein Gesamtbauwerk zu betrachten. Der Haldenkörper und speziell dessen Flanken/ Böschungen stellen nach Bewertung durch die Fachgutachter zum Rückstandsmanagement Hattorf sowie durch K+S deswegen keinen Baugrund im eigentlichen Sinn dar.

Unabhängig davon war und ist der Aufhaldungsprozess stets mit der Überschüttung mehr oder weniger „gealterter“ Haldenoberflächen verbunden. Dies haben die Bohrkerndokumentation,

Auswertung der Kamerabefahrungen und Strukturuntersuchungen anhand der geophysikalischen Messungen in den Haldenbohrungen für die Standorte Hattorf /2/ und Wintershall ergeben. Alte Haldenoberflächen zeigen sich in Folge einer Anreicherung unlöslicher Bestandteile in der Bohrkerndokumentation als dünne Bänder/ Schlieren im Millimeter- bis selten Zentimeter-Bereich. An ihnen hat keine signifikante Zerteilung/ Zerlegung des Bohrkerns in Teilstücke stattgefunden. Sie sind in den Kernproben des Haldenkörpers im mechanischen Sinn eingebunden ohne feststellbare Entfestigungs- bzw. Trennwirkung. Dies gilt selbst für die Schüttfläche im Bereich von rd. 100 m Teufe (siehe Abbildung 5-2). Davon ist im Analogieschluss auch für den gesamten Haldenkörper auszugehen, da seit Aufhaldungsbeginn mit Ausnahme weniger lokaler Ereignisse im frischen Schüttungsbereich keine Einschränkungen der globalen Haldenstandsicherheit zu verzeichnen waren.



**Abbildung 5-2      Angeschnittene Schüttfläche bei rd. 100 m Teufe im Kernquerschnitt, siehe Anlage 3.**

Für die Standsicherheit frischen Rückstands auf alten Haldenoberflächen sind deren Festigkeit und deren Struktur/Rauigkeit von Bedeutung. Die Beschaffenheit der Oberflächenstruktur in ihrer makroskopischen Ausbildung im Zentimeter- bis Dezimeter-Bereich ist dabei relevanter als das Vorhandensein unlöslicher Bestandteile im Schluff-/ Tonkornbereich. Diese könnten auf glatten oder weniger rauen Böschungsflächen standsicherheitsrelevante Trennflächen ausbilden. Die folgenden Abbildungen vom Standort Hattorf zeigen beispielhaft eine 10 Jahre alte Haldenoberfläche.





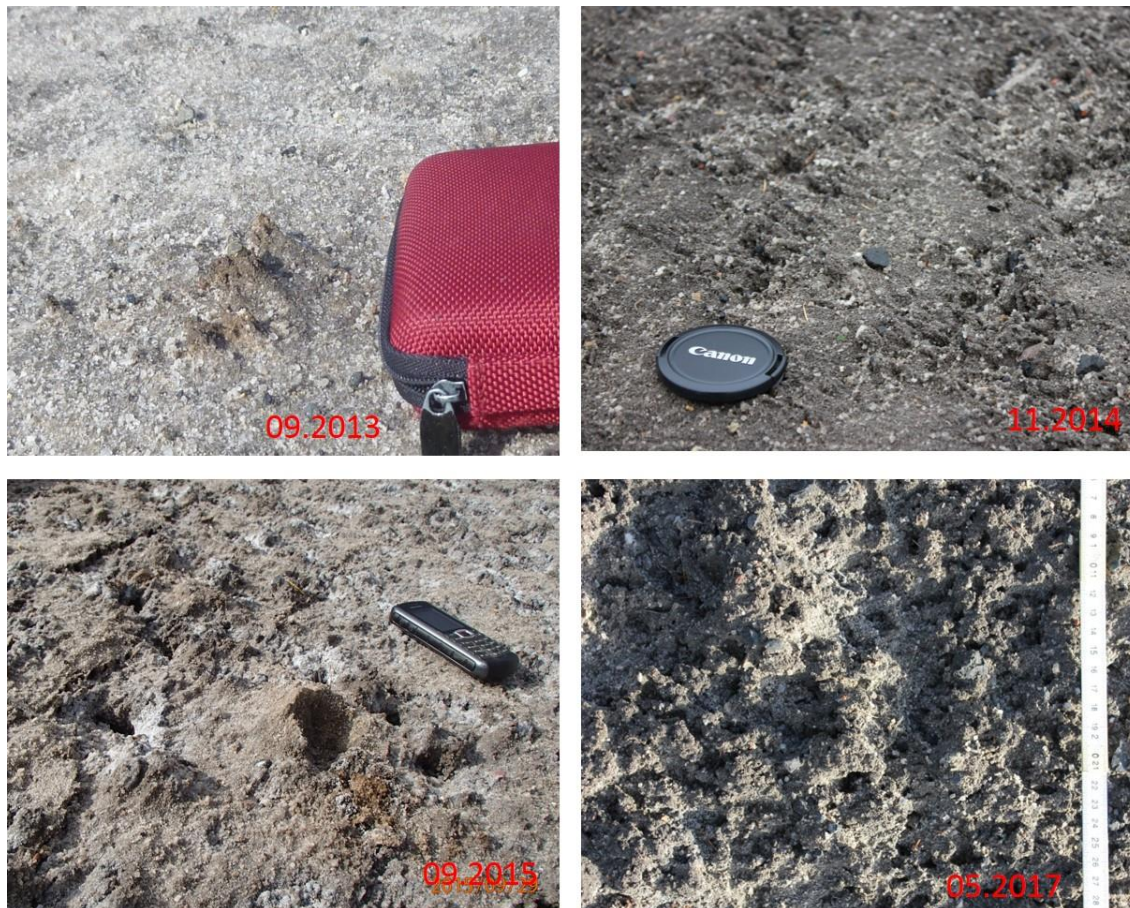
**Abbildung 5-3** Haldenoberfläche, Draufsicht - Chloridkarst, dargestellt Salzkarren und Lösungskavitäten, Alter 10-15 Jahre /2/



**Abbildung 5-4** Haldenoberfläche Standort Hattorf, Nahaufnahme - Chloridkarst, dargestellt Salzkarren und Lösungskavitäten, Alter rd.10-15 Jahre /2/



Die Alterung von Haldenoberflächen wurde in dem im Zeitraum 2013 bis 2017 durchgeführten Lysimeterversuch am Standort Wintershall nachvollzogen, wo unter ungestörten Bedingungen eine waagerechte Rückstandsoberfläche der Witterung ausgesetzt war. Die Veränderungen sind in Abbildung 5-5 dokumentiert. Die Bilder zeigen eine rasche Zunahme der Oberflächenrauigkeit und Ausbildung von makroskopisch sichtbaren Lösungskavitäten bereits nach rd. 1-2 Jahren.



**Abbildung 5-5      Entwicklung der Haldenoberfläche des Flächenlysimeters im Zeitraum 2013 (Errichtung) bis 2017 (Rückbau).**

Zusammenfassend ist auf Basis der Untersuchungsergebnisse zu den Haldenbohrungen und Erfahrungen zum Haldenbetrieb festzustellen, dass der bestehende Haldenkörper und insbesondere dessen Haldenflanken aus geotechnischer Sicht für eine Überschüttung im Zuge der geplanten Haldenerweiterung geeignet sind.

## 6 Zusammenfassung

[WE\_F/U\_H Poppitz]

Im Rahmen der Genehmigungsverfahren für die Haldenerweiterungen an den Standorten Hattorf und Wintershall wurde die ESTA-Rückstandshalden der Standorte Hattorf mithilfe von insgesamt zwei Vertikal- und vier Horizontalbohrungen an beiden Standorten in unterschiedlich alten Bereichen erkundet, um das Haldenkörperverhalten zu analysieren. Für beide Standorte kamen vergleichbare Methoden zum Einsatz: Es wurden Bohrkern gewonnen und das Kernmaterial auf seine stofflichen Eigenschaften (chemische und mineralogische Zusammensetzung, Dichten, Porositäten, und Durchlässigkeiten) untersucht. Ergänzt wurde das Untersuchungsprogramm durch Vorort-Untersuchungen und Untersuchungen der in den Bohrungen angetroffenen Haldenwässer. Zusätzlich wurden die Ergebnisse der in 1997/98 am Standort Hattorf durchgeführten Haldenbohrungen (1 Vertikal- und 1 Horizontalbohrung) herangezogen und im Rahmen der Auswertung der Hattorfer Bohrungen mittels der neu gewonnenen Ergebnisse interpretiert, so dass insgesamt 8 Aufschlüsse berücksichtigt wurden. Weiterhin flossen die Ergebnisse umfangreicher Literaturrecherchen in die Auswertungen ein.

Im Zuge der Auswertung der Hattorfer Haldenbohrungen wurde anhand eines festgelegten Kriterienkatalogs die bisherige Modellvorstellung, die innerhalb des Haldenkörpers einen Haldenmantel und Haldenkern unterscheidet, überprüft, und das Vorhandensein des gering durchlässigen Haldenkerns bestätigt. Um der zeitabhängigen Veränderung des Rückstandskörpers Rechnung zu tragen, wurde das Modell um eine Übergangszone zwischen Mantel und Kern erweitert, deren Breite vom Alter des jeweiligen Rückstandsbereichs abhängig ist. Die Bohrung am Standort Wintershall erfolgte zur Prüfung dieser Modellvorstellung und bestätigte den zuvor in Hattorf erweiterten Kenntnisstand.

In der Zusammenschau der Bohrungen und der gewonnenen Ergebnisse können die folgenden wesentlichen Erkenntnisse hervorgehoben werden:

- Das Haldenkörperverhalten und damit die Ausbildung des Haldenkerns ist zeitabhängig und wird wesentlich durch Kompaktion des Haldenkörpers, Lösungsprozesse und Mineralumwandlungen beeinflusst.
- Der Haldenkern weist aufgrund der vorgenannten Prozesse geringe Porositäten und Durchlässigkeiten auf.
- Wasserbewegungen im Haldenkörper finden bevorzugt im Haldenmantel und bis zum Abschluss der Kompaktionsvorgänge untergeordnet auch in der Übergangszone statt.
- Die Fließprozesse finden dabei auf bevorzugten Wegsamkeiten statt, die sich im löslichen Rückstand sukzessive ausbilden.
- Die aufgehaldete Restfeuchte wird selbst im stark verdichteten Haldenkern nicht vollständig ausgetragen, sondern bleibt teils als Haft-, teils als Kristallwasser gebunden.
- Das Retardationspotenzial des Rückstands ist nicht vollständig ausgeschöpft, was auf die Strömung entlang bevorzugter Wegsamkeiten zurückzuführen ist.

- Horizontale Durchlässigkeiten im Haldenkörper übersteigen vertikale um ein Vielfaches. In Folge dessen kommt es im Zusammenhang mit der tiefenabhängigen Zunahme der Dichten und generellen Abnahme der Durchlässigkeiten zur Ausbildung schwebender Haldenwasserspiegel und einem Abfließen der Haldenwässer in der Haldenmantelzone.
- Überschüttete alte Haldenoberflächen (Schüttflächen) wirken zunächst als initiale Wegsamkeiten für Haldenwasser. Diese werden generell mit zunehmender Kompaktion verschlossen und haben dann keine hydraulische Wirksamkeit mehr. Die Schütthistorie und die Kubatur des Haldenkörpers beeinflussen diesen Prozess. Diese Erkenntnisse werden bei der Konzeption des technischen Konzepts für die Haldenerweiterung berücksichtigt.
- Mineralumwandlungen finden im gesamten Haldenkörper statt. Die Neubildung von Sekundärphasen wurde belegt; In Randbereichen erfolgt bevorzugte Auslösung von Wertstoff-Resten und von Sekundärbildungen.

Die Strömungsprozesse im Haldenkörper wurden auf Grundlage der vorstehenden Erkenntnisse beschrieben. Die Bohrung am Standort Wintershall hat in Ergänzung zu den Erkenntnissen aus Hattorf gezeigt, dass die Schütthistorie und Haldenkubatur das Fließgeschehen im Haldenkörper durchaus beeinflussen.

Aufbauend auf den vorstehenden Erkenntnissen wurde die Breite der jeweiligen Haldenzonen anhand der vorliegenden Bohrungen als Grundlage für weitergehende Betrachtungen und technische Planungen ausgewertet. Auch hier wurden die für den Standort Hattorf getroffenen Abschätzungen bestätigt. Weiterhin wurden Empfehlungen zur Gestaltung des technischen Konzepts für die geplante Haldenerweiterung formuliert. In Kapitel 5.3.2 wurde im Hinblick auf die Frage nach der Eignung des Haldenkörpers als Baugrund festgestellt, dass der bestehende Haldenkörper und insbesondere dessen Haldenflanken aus geotechnischer Sicht für eine Überschüttung im Zuge der geplanten Haldenerweiterung geeignet sind.

Alle im Scoping-Protokoll zur Haldenerweiterung Wintershall aufgeworfenen Fragen (vgl. dazu Kapitel 2) konnten mit Hilfe des umfassenden Untersuchungsprogramms beantwortet werden.

## Literaturverzeichnis

- /1/ **AD-HOC-AG BODEN (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung.** 5. Auflage, 438 S., Hrsg.: BGR in Zusammenarbeit mit den staatlichen geologischen Diensten der Bundesrepublik Deutschland, Hannover.
- /2/ **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.
- /3/ **BOLEY, Conrad (1999): Untersuchungen zur Viskoplastizität und Festigkeit von Steinsalz.** Mitteilungen des Instituts und der Versuchsanstalt für Geotechnik der Technischen Universität Darmstadt, Heft 48. Hrsg: Prof. Dr.-Ing. Rolf Katzenbach und Prof. Dr. Ing. Ulvi Arslan. Darmstadt. 348 S.
- /4/ **Braitsch, O. (1962): Entstehung und Stoffbestand der Salzlagerstätten, Mineralogie und Petrographie in Einzeldarstellungen,** Bd. 3, Springer-Verlag, Berlin/Göttingen/Heidelberg.
- /5/ **DACHROTH, W. (2002): Handbuch der Baugeologie und Geotechnik.** 3., erweiterte und überarbeitete Auflage, 683 S., Springer verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
- /6/ **D`ANS, Jean (1933): Die Lösungsgleichgewichte der Systeme der Salze ozeanischer Salzablagerungen.** Hrsg.: Kali-Forschungsanstalt GmbH, Berlin. Verlagsgesellschaft für Ackerbau mbH, Berlin. 254 S. + 31 Tafeln.
- /7/ **D`Ans, Jean et al.(1955) : Untersuchungen über die Calciumsulfate.** Kali und Steinsalz, Bd. 1, Heft 9. S. 17-38.
- /8/ **GIES, H.; SANDER, W; HERBERT, H.; BODE, W. (1989): Zur Alteration von Haldensalz und seiner Verwendbarkeit als Versatzmaterial.** Kali und Steinsalz, Bd. 10, Heft 4/5. S.144 – 153.
- /9/ **IBEWA (2013): Ingenieurtechnische Begleitung der Erkundungsbohrungen in der Halde Hattorf. Strömungstechnische Eigenschaften - Versuchskonzepte.** 17 S., unveröffentlicht.
- /10/ **IBEWA (2014): Durchführung von Laborversuchen zur Kennzeichnung der strömungstechnischen Eigenschaften von Kernproben aus Haldenkörperbohrungen an der ESTA-Rückstandshalde Hattorf. Berechnungsansätze Parameter.** 4 S., unveröffentlicht.
- /11/ **IDE, K.H. (1938): Zur Hydratation und Dehydratation des Magnesiumsulfats und seiner Hydrate.** Zeitschrift für anorganische und allgemeine Chemie, Band 235. S.305-323.
- /12/ **Kali und Salz AG (1974): Rahmenbetriebsplan 1974 für die Rückstandshalde „Im Kessel“ (Halde IV),** zugelassen am 04.06.1975, AZ 76 d 40-11-325/3/63. 4 S. + Anlagen.
- /13/ **Kali und Salz AG (1994): Rahmenbetriebsplan zur Erweiterung der Rückstandshalde „Im Kessel“ (Halde IV) des Werkes Wintershall.** WI 33.88 vom 09.12.1988, Planungsstand 12.01.1994, zugelassen am 05.07.1995, AZ 76 d 40-11-325/17/58

- /14/ **K+S KALI GmbH (2000): Rahmenbetriebsplan Westerweiterung Halde Neuhoof-Ellers (2000), Anlage A-3.3: Zusammenfassende Informationen über Rückstandshalden-Dichtigkeit des Haldenkerns. 6 S.**
- /15/ **K+S KALI GmbH (2013): „Werk Werra, Standort Wintershall – Umsetzung eines nachhaltigen Rückstandsmanagements (RM-WI); Untersuchung des Haldenkörpers der Halde IV – Bohrung B 72/2014 WI“ SBP WI-04/14; DVS-Nr. 3002810. unveröffentlicht.**
- /16/ **K+S KALI GmbH, Werklabor Wintershall (2014): Niederschläge und Oberflächenwässer in Menge und Qualität; Probenahmestellen: Stapelbecken 1 (Heergraben) und 2 (Zinkesgraben) der Halde IV, Analysenergebnisse. Unveröffentlicht.**
- /17/ **MÄNZ, K., LIEBMANN, H., Köhler, J. (1994): Abschlussbericht über die wissenschaftliche Begleitung der Haldendurchörterung Bleicherode. Kali-Umwelttechnik GmbH Sondershausen. 42 S. Unveröffentlicht.**
- /18/ **PARNIESKE–PASTERKAMP, Jutta (2004): Zur Geoökologie und Geochemie von Rückstandshalden der Kaliindustrie in Nordthüringen. Dissertation (Fakultät für Geowissenschaften, Geotechnik und Bergbau der TU Bergakademie Freiberg). 160S.**
- /19/ **PRINZ, Helmut; STRAUSS, Roland (2011): Abriss der Ingenieurgeologie.. Spektrum Akademischer Verlag, München. 738 S.**
- /20/ **RPKS, Dez. 34 (2013): „Niederschrift über die Erörterung des Gegenstandes, Umfangs und der Methoden der Umweltverträglichkeitsprüfung gem. § 52 Abs. 2a Satz 2 BBergG für das geplante Vorhaben „Umsetzung eines nachhaltigen Rückstandsmanagements am Standort Wintershall (Haldenerweiterung Wintershall)“ der Fa. K+S KALI GmbH am 13.02.2013 im Gebäude des Regierungspräsidiums Kassel, Steinweg 6, Kassel; AZ 34/HEF-76 d-40-11-325-34/22; 18 S.**
- /21/ **RPKS, Dez. 34 (2013): Sonderbetriebsplan Untersuchung des Haldenkörpers der Halde IV – Bohrung B 72/2014 WI – Zulassungsbescheid vom 02.07.2014. AZ 34/Hef-76 d 40-11-325-34/42; 4 S.**
- /22/ **SCHEFFER, F.; SCHACHTSCHABEL, P. (2002): Lehrbuch der Bodenkunde. 15. Auflage, 593 S., Spektrum Akademischer Verlag. Heidelberg.**
- /23/ **SCHRAMM, n.n. (1996): Westerweiterung Rückstandshalde Neuhoof-Ellers: Die Wirkung sulfatischer Salzminerale auf den Wasserhaushalt der Rückstandshalden. RBPI Westerweiterung Anlage A-3.2. Kali und Salz GmbH, Kassel. 10 S.**
- /24/ **SESSLER, W. (1998)a: Ergebnisbericht über 2 Vertikalbohrungen und 4 Horizontalbohrungen auf der ESTA-Rückstandshalde Hattorf zur weiteren hydrogeologischen und geotechnischen Untersuchung von Salzhalden im Werra-Fulda-Kaligebiet. Kali und Salz GmbH, Kassel. 6 S. + 1 Anlage.**
- /25/ **SESSLER, W. (1998)b: Ergebnisbericht über 2 Vertikalbohrungen und 4 Horizontalbohrungen auf der ESTA-Rückstandshalde Hattorf zur weiteren hydrogeologischen und geotechnischen Untersuchung von Salzhalden im Werra-Fulda-Kaligebiet. Kali und Salz GmbH, Kassel. 41 S. + 61 Anlagen. Unveröffentlicht.**
- /26/ **UPI UMWELTPROJEKT-INGENIEURGESELLSCHAFT mbH (2012): Umsetzung eines nachhaltigen Rückstandsmanagements am Standort**

**Wintershall, Verbundwerk Werra.** Vorhabensbeschreibung. Stendal. 100 S. + Anlagen.

/27/ **Wachter, S (2009): Dreidimensionale, zeitvariante stoffliche Modellierung von granularem Steinsalz.** Mitteilungen des Instituts und der Versuchsanstalt für Geotechnik der Technischen Universität Darmstadt, Heft 82. Hrsg: Prof. Dr.-Ing. Rolf Katzenbach. Darmstadt. 253 S.

/28/ **WARREN, John K (2006): Evaporites: Sediments, Ressources and Hydrocarbons.** Springer Verlag. Berlin, Heidelberg, New York. 1035 S.

/29/ **WIRRIES, H. (1993): Untersuchungen zur Winderosion an Salzhalden.** Kali und Steinsalz, Band 11, Heft 3/4. S. 107-115.

/30/ **VERGOUWEN, Liedecke (1981): Eugsterite, a new salt mineral.** Amer. Min. Vol. 66, S. 632 – 636.

## Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen

Allgemein gebräuchliche Abkürzungen werden nicht separat benannt.

AP	Ansatzpunkt
BA	Bohrlochverlaufs-Log
CAL	Kaliber-Log
ESTA	Elektrostatische Aufbereitung
FLW	Impellerflowmeter-Log
FMT	Fotometrisches Trübungs-Log
GG.D	Gamma-Gamma-Dichte-Log
GR	Gamma-Ray-Log
ICP-OES	optische Emissionsspektrometrie mittels induktiv gekoppelten Plasmas
IL	Induktions-Log
NN, INN	Neutron-Neutron-Log
RDA	Röntgendiffraktometrische Analyse
RFA	Röntgenfluoreszenzanalytik
SAL	elektrisches Leitfähigkeits-Log der Bohrlochflüssigkeit
TFL	Tracer-Fluid-Logging
TMP	Temperatur-Log
TV	Fernseh-/ Kamerabefahrung

## Glossar

Effektive Porosität	<p>Am Strömungsprozess beteiligter Porenraum /9/.</p> $n_{eff} = n_t - n_x - n_{HL} \quad   1   /9/$ <p> <math>n_{eff}</math> effektive Porosität [Vol.-%]  <math>n_t</math> totale Porosität → Gesamtporosität [Vol.-%]  <math>n_x</math> geschlossene Porosität (Tot-Porosität) [Vol.-%]  <math>n_{HL}</math> Haftlöseporosität [Vol.-%] </p>
Feinporen (Mikroporen)	Poren mit Äquivalentdurchmesser < 0,2 µm /1/.
Feuchtdichte	→ Rohdichte
Gesamtporosität	<p>Verhältnis von Porenvolumen zum Gesamtvolumen einer Probe. Synonyme: totale Porosität, Porenanteil /9/.</p> $n_t = \frac{V_P}{V_{ges}} = 1 - \frac{\rho_d}{\rho_s} \quad   2  $ <p> <math>n_t</math> totale Porosität [Vol.-%]  <math>V_P</math> Porenvolumen [cm³]  <math>V_{ges}</math> Gesamtvolumen [cm³]  <math>\rho_d</math> Trockenrohddichte [g/cm³]  <math>\rho_s</math> Reindichte → Korndichte [g/cm³]. /9/ </p>
Gesamtwasser-gehalt	<p>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.</p> <p>Gesamtwasser ist die Summe aus →Porenwasser und dem in die Kristallstruktur des Rückstands eingebundenen →Kristallwasser.</p> <p>Symbol <math>w_{ges}</math>, Angabe in [Masse-%] Synonyme: Feuchte, Gesamtfeuchte</p>
Glühverlust (bei 550°C)	<p>Der im Prüfbericht des K+S FI bei Ofentrocknung gemäß DIN EN 12879 ermittelte Trocknungsverlust bezogen auf die Feuchtmasse der Originalsubstanz.</p> <p>Symbol <math>v_{Tr550}</math>, Angabe in [Masse-%]</p>



Grobporen (Makroporen)	Poren mit Äquivalentdurchmesser $\geq 10 \mu\text{m}$ ; Poren mit Äquivalentdurchmesser $> 10 \mu\text{m}$ bis $50 \mu\text{m}$ sind langsam dränend (enge Grobporen), solche mit Äquivalentdurchmesser $\geq 50 \mu\text{m}$ (weite Grobporen) schnell dränend /1/.
Haftwasser/ Haftlösung	<p>im Porenraum einer ungesättigten Probe adsorptiv und/ oder kapillar bei Luftdruckbedingungen gegen die Schwerkraft gehaltene/ fixierte Flüssigkeit (z.B. Wasser oder mineralisiertes Wasser – Lösung, /1/ &amp; /9/).</p> <p>In der Rückstandshalde liegt die Flüssigkeit als salzhaltige Haftlösung vor. Der Aufsalzungsfaktor ist abhängig von der für den Untersuchungs-/ Probenbereich bestimmten Flüssigkeitsdichte (diese wiederum abhängig von der Gesamtmineralisation und der Temperatur). Gemessene Haftwassergehalte werden deshalb dichtekorrigiert.</p> <p>Im Prüfbericht des K+S FI ausgewiesenes Haftwasser entspricht dem Porenwasser (Bestimmung durch Karl-Fischer-Titration).</p>
Hydratwasser	→ Kristallwasser
Korndichte	→ Reindichte
Kristallwasser	<p>An den kristallinen Feststoff gebundenes Wasser.</p> <p>Nach WIRRIES (1993) kann Kristallwasser entweder → schwach gebunden oder → stark gebunden sein /29/.</p> <p>Synonym: Hydratwasser.</p>
Kristallwasser, schwach gebunden	Kristallwasser, z.B. von Glaubersalz oder Epsomit, welches durch Ofentrocknung bei $105^\circ\text{C}$ freigesetzt und in der Angabe des Trocknungsverlustes $v_{\text{Tr}105}$ (Prüfbericht des K+S FI) gemeinsam mit dem Porenwasser erfasst wird.
Kristallwasser, stark gebunden	Kristallwasser, z.B. von Gips und Kieserit, welches bei Ofentrocknung bei $550$ oder $600^\circ\text{C}$ freigesetzt wird. Der Anteil des stark gebundenen Kristallwassers ist die Differenz zwischen den durch Ofentrocknung bei $550/ 600^\circ\text{C}$ und $105^\circ\text{C}$ ermittelten Wassergehalten ( $v_{\text{Tr}550} - v_{\text{Tr}105}$ ).
Mittelporen (Mesoporen)	Poren mit Äquivalentdurchmesser $> 0,2 \mu\text{m}$ bis $< 10 \mu\text{m}$ /1/.
Nassrohdichte	<p>Verhältnis von Masse zu Volumen der gesamten, feuchten Probe (Probe im Rohzustand). Ermittelt durch Ausmessen und Wiegen der Probe oder Tauchwägung.</p> <p>Symbol <math>\rho</math>, Angabe in <math>[\text{g}/\text{cm}^3]</math>.</p> <p>Synonyme: Feuchtdichte, Schüttdichte, Rohdichte</p>
Porenanteil	→ Gesamtporosität

Porenwasser/ Porenlösung	<p>gesamte, im Porenraum enthaltene Flüssigkeit (z.B. Wasser oder mineralisiertes Wasser – Lösung) /1/ &amp; /9/. Summe aus freiem (mobilem/ entwässerbarem) und anhaftendem (immobiler/ nicht entwässerbarem) Anteil →Haftwasser/-lösung</p> <p>In der Rückstandshalde liegt die Flüssigkeit als salzhaltige Porenlösung vor. Der Aufsalzungsfaktor ist abhängig von der für den Untersuchungs-/ Probenbereich bestimmten Flüssigkeitsdichte.</p> <p>Gemessene Wassergehalte werden deshalb dichtekorrigiert (Aufsalzungsfaktor abhängig von der für den Bereich bestimmten Flüssigkeitsdichte; Korrektur in Lösungsgehalt).</p> <p>Das Porenwasser wird vom K+S FI durch Karl-Fischer-Titration bestimmt und im Prüfbericht unter „Wassergehalt“ ausgewiesen.</p> <p>In älteren Dokumenten wird der Begriff „Haftwasser“ für das Porenwasser verwendet (es handelt sich um den durch Ofentrocknung bei niedrigen Temperaturen und ggf. Korrektur um Kristallwassergehalte ermittelten Wassergehalt.), z.B. in /25/.</p>																					
Porenlösung, mobile	<p>Im Porenraum bewegliche Lösung /9/.</p> <p>Synonyme: Sickerlösung, freie Lösung, entwässerbarer Lösungsanteil</p>																					
Porenlösung, immobile	<p>Im Porenraum fixierte Lösung /9/.</p> <p>Synonyme: Haftlösung, nicht entwässerbarer Lösungsanteil</p>																					
Porenvolumen (Gesamt-)	<p>Gesamtheit aller luft- und wasser-/ lösungserfüllten Hohlräume /1/.</p> <p>Symbol <math>V_p</math>, Angabe in <math>[cm^3]</math></p>																					
Porenzahl	<p>Verhältnis von Porenvolumen zu Feststoffvolumen in der Probe /22/.</p> $e = \frac{V_p}{V_s} = \frac{n_t}{1-n_t} \quad   \quad 3 \quad  $ <table><tr><td>e</td><td>Porenzahl</td><td>[Vol.-%]</td></tr><tr><td><math>V_p</math></td><td>Porenvolumen</td><td><math>[cm^3]</math></td></tr><tr><td><math>V_s</math></td><td>Feststoffvolumen</td><td><math>[cm^3]</math></td></tr><tr><td><math>n_t</math></td><td>Gesamtporenanteil</td><td>[Vol.-%]</td></tr></table> <p>oder</p> $e = \frac{\rho_s}{\rho_d} - 1 \quad   \quad 4 \quad  $ <table><tr><td>e</td><td>Porenzahl</td><td>[Vol.-%]</td></tr><tr><td><math>\rho_d</math></td><td>Trockenrohdichte</td><td><math>[g/cm^3]</math></td></tr><tr><td><math>\rho_s</math></td><td>Reindichte</td><td><math>[g/cm^3]</math></td></tr></table>	e	Porenzahl	[Vol.-%]	$V_p$	Porenvolumen	$[cm^3]$	$V_s$	Feststoffvolumen	$[cm^3]$	$n_t$	Gesamtporenanteil	[Vol.-%]	e	Porenzahl	[Vol.-%]	$\rho_d$	Trockenrohdichte	$[g/cm^3]$	$\rho_s$	Reindichte	$[g/cm^3]$
e	Porenzahl	[Vol.-%]																				
$V_p$	Porenvolumen	$[cm^3]$																				
$V_s$	Feststoffvolumen	$[cm^3]$																				
$n_t$	Gesamtporenanteil	[Vol.-%]																				
e	Porenzahl	[Vol.-%]																				
$\rho_d$	Trockenrohdichte	$[g/cm^3]$																				
$\rho_s$	Reindichte	$[g/cm^3]$																				

Reindichte	<p>Verhältnis von Masse zu Volumen der festen Bestandteile der Probe. Die Reindichtebestimmung muss die Auswirkungen der vorher erforderlichen Trocknung auf die untersuchte Masse berücksichtigen.</p> <p>Bestimmung im Heliumpyknometer.</p> <p>Symbol <math>\rho_s</math>, Angabe in <math>[\text{g}/\text{cm}^3]</math>.</p> <p>Synonym: →Korndichte.</p>																		
Rückstandsfeuchte	<p>Ermittelt durch Ofentrocknung bei <math>105^\circ\text{C}</math> bezogen auf die Feuchtmasse der Originalsubstanz (Angabe in %). Die Rückstandsfeuchte umfasst das →Porenwasser sowie das → schwach gebundene Kristallwasser.</p> <p>Synonym: Trocknungsverlust <math>105^\circ\text{C}</math> (<math>v_{\text{tr}105}</math>).</p>																		
Sättigungsbeiwert	<p>Gibt an, zu welchem Anteil das Porenvolumen einer Probe mit Flüssigkeit gefüllt ist (in Rückstandshalde salzhaltige Lösung). Synonym: Sättigungszahl</p> $S_r = \frac{n_L}{n_t} = \frac{w_L^* \rho_s}{e \cdot \rho_L} \quad   \ 5  $ <table><tr><td><math>n_L</math></td><td>mit Lösung gefüllter Porenanteil</td><td>[Vol.-%]</td></tr><tr><td><math>n_t</math></td><td>Gesamtporenanteil</td><td>[Vol.-%]</td></tr><tr><td><math>w_L^*</math></td><td>Lösungsgehalt</td><td>[%]</td></tr><tr><td><math>e</math></td><td>Porenzahl</td><td>[Vol.-%]</td></tr><tr><td><math>\rho_L</math></td><td>Lösungsdichte</td><td><math>[\text{g}/\text{cm}^3]</math></td></tr><tr><td><math>\rho_s</math></td><td>Reindichte</td><td><math>[\text{g}/\text{cm}^3]</math></td></tr></table>	$n_L$	mit Lösung gefüllter Porenanteil	[Vol.-%]	$n_t$	Gesamtporenanteil	[Vol.-%]	$w_L^*$	Lösungsgehalt	[%]	$e$	Porenzahl	[Vol.-%]	$\rho_L$	Lösungsdichte	$[\text{g}/\text{cm}^3]$	$\rho_s$	Reindichte	$[\text{g}/\text{cm}^3]$
$n_L$	mit Lösung gefüllter Porenanteil	[Vol.-%]																	
$n_t$	Gesamtporenanteil	[Vol.-%]																	
$w_L^*$	Lösungsgehalt	[%]																	
$e$	Porenzahl	[Vol.-%]																	
$\rho_L$	Lösungsdichte	$[\text{g}/\text{cm}^3]$																	
$\rho_s$	Reindichte	$[\text{g}/\text{cm}^3]$																	
Schüttdichte	<p>Dichte eines Gemenges aus Feststoff (hier: Rückstand) und Flüssigkeit in den Zwischenräumen des Feststoffs. Verwendung für frisch geschütteten Rückstand.</p> <p>Synonyme: Nassroh-/ Rohdichte</p>																		
Trockenrohdichte	<p>Quotient aus der Trockenmasse einer Probe und ihrem Gewicht /1/ (Symbol <math>\rho_d^*</math>, Angabe in <math>[\text{g}/\text{cm}^3]</math>). Berechnet aus der gemessenen Rohdichte und dem Porenlösungsgehalt (Wassergehalt, bestimmt durch Karl-Fischer-Titration, dichtekorrigiert):</p> $\rho_d^* = \frac{\rho}{1+(w_L^*/100)} \quad   \ 6  $ <table><tr><td><math>\rho_d^*</math></td><td>Trockenrohdichte</td><td><math>[\text{g}/\text{cm}^3]</math></td></tr><tr><td><math>\rho</math></td><td>Nassrohdichte</td><td><math>[\text{g}/\text{cm}^3]</math></td></tr><tr><td><math>w_L^*</math></td><td>Porenlösungsgehalt</td><td>[%]</td></tr></table>	$\rho_d^*$	Trockenrohdichte	$[\text{g}/\text{cm}^3]$	$\rho$	Nassrohdichte	$[\text{g}/\text{cm}^3]$	$w_L^*$	Porenlösungsgehalt	[%]									
$\rho_d^*$	Trockenrohdichte	$[\text{g}/\text{cm}^3]$																	
$\rho$	Nassrohdichte	$[\text{g}/\text{cm}^3]$																	
$w_L^*$	Porenlösungsgehalt	[%]																	

Trocknungsverlust (bei 55°C, 105°C oder 130 °C)	Der bei Ofentrocknung gemäß DIN EN 12880 ermittelte Wassergehalt, bezogen auf die Feuchtmasse der Originalsubstanz (Angabe in %). Bei der Ofentrocknung wird neben dem Porenwasser auch ein Teil des Kristallwassers einiger Minerale freigesetzt und mit erfasst. Die Auskristallisation kristallwasserhaltiger Phasen aus der Porenlösung unter Einbindung von Wasser während der Trocknung kann das Ergebnis beeinflussen.															
Viskoplastisches Verformungs- verhalten	Irreversible, bruchlose Verformung des Haldenmaterials durch langsames Fließen von Salzen unter Einfluss einer Auflast aufgrund der stofflichen Eigenschaften des Rückstands, insbesondere des Hauptbestandteils Steinsalz. Für Rückstandshalden beschrieben in BOLEY, 1999.															
Wasser-/ Lösungsgehalt	<p>Verhältnis von Wasser- bzw. Lösungsmasse zur Trockenmasse in einer Probe. Synonym: Porenwassergehalt.</p> <p>Der Wassergehalt wird vom K+S FI durch Karl-Fischer-Titration bestimmt und im Prüfbericht unter „Wassergehalt“ ausgewiesen (Bezug Feuchtmasse).</p> <p>Für die weiterführenden Vergleiche und Berechnungen wird der Bezug auf die Trockenmasse und eine Korrektur in Bezug auf Flüssigkeitsdichte vorgenommen. /22/</p> <p>Trockenmassekorrektur /10/:</p> $m_{St}^* = \frac{m_{St} \cdot \rho_L - m_{Sf} \cdot C_L}{\rho_L - C_L} \mid 7 \mid$ <table><tr><td>m<sup>*</sup><sub>St</sub></td><td>Korrigierte Trockenmasse des Feststoffs</td><td>[g]</td></tr><tr><td>m<sub>St</sub></td><td>Trockenmasse des Feststoffs</td><td>[g]</td></tr><tr><td>m<sub>Sf</sub></td><td>Feuchtmasse des Feststoffs</td><td>[g]</td></tr><tr><td>ρ<sub>L</sub></td><td>Lösungsdichte</td><td>[g/cm<sup>3</sup>]</td></tr><tr><td>C<sub>L</sub></td><td>Gesamtmineralisation der Lösung</td><td>[g/cm<sup>3</sup>]</td></tr></table> <p>Symbol: w<sup>*</sup><sub>w</sub> (Wassergehalt, Bezug auf korrigierte Trockenmasse) bzw. w<sup>*</sup><sub>L</sub> (Lösungsgehalt, Bezug auf korrigierte Trockenmasse), Angabe in [Masse-%]</p>	m <sup>*</sup> <sub>St</sub>	Korrigierte Trockenmasse des Feststoffs	[g]	m <sub>St</sub>	Trockenmasse des Feststoffs	[g]	m <sub>Sf</sub>	Feuchtmasse des Feststoffs	[g]	ρ <sub>L</sub>	Lösungsdichte	[g/cm <sup>3</sup> ]	C <sub>L</sub>	Gesamtmineralisation der Lösung	[g/cm <sup>3</sup> ]
m <sup>*</sup> <sub>St</sub>	Korrigierte Trockenmasse des Feststoffs	[g]														
m <sub>St</sub>	Trockenmasse des Feststoffs	[g]														
m <sub>Sf</sub>	Feuchtmasse des Feststoffs	[g]														
ρ <sub>L</sub>	Lösungsdichte	[g/cm <sup>3</sup> ]														
C <sub>L</sub>	Gesamtmineralisation der Lösung	[g/cm <sup>3</sup> ]														