

Nachhaltiges Rückstandsmanagement am Standort Hattorf (Haldenerweiterung Hattorf) - Phase 3

Band 3.17.3N der Antragsunterlage

Bewertung der Modellvorstellung zur Ausbildung eines dichten Haldenkerns an Rückstandshalden

Vorhabenträger:

K+S Minerals and Agriculture GmbH
Werk Werra, Standort Hattorf
Hattorfer Straße
36269 Philippsthal



Verfasser:

Ingenieursozietät Professor Dr.-Ing. Katzenbach GmbH
Vereidigte und nach Bauordnungsrecht anerkannte
Sachverständige für Geotechnik
Robert-Bosch-Straße 9
64293 Darmstadt

Impressum

Fassung vom 10. Dezember 2021

Ansprechpartner: Prof. Dr.-Ing. Rolf Katzenbach / Dipl.-Ing. Matthias Seip

Telefon: +49-6151-13013-10

Web: <http://www.katzenbach-ingenieure.de>

Ergebnisse im Überblick:

- Bezogen auf die Haldenaufstandsfläche ist der hydraulisch inaktive – d.h. im bautechnischen Sinn dichte – Haldenkern somit in einem mittleren Abstand zum Haldenfuß (horizontal) von rd. 70 bis 80 m anzutreffen. Dies wird durch die Ergebnisse der Befahrung der Haldendurchörterung Bleicherode bestätigt, wo bei deutlich geringeren Überschüttungshöhen vergleichbare Ergebnisse abgeleitet wurden.
- Im Ergebnis der Auswertung der Haldenkörperbohrungen und der geophysikalischen Untersuchungen werden die bislang vorliegenden Abschätzungen zur Breite des hydraulisch aktiven Bereichs (Haldenmantel und Übergangszone) gemäß mit rd. 90 m bis 110 m sachverständigenseits als konservativ bestätigt.
- Mit den geophysikalischen Messungen wurden außerdem eindeutig die last- und zeitabhängige Ausbildung des Haldenkerns und die Verlagerung von Übergangszone und Haldenmantel in Richtung Haldenflanken bzw. Haldentop bestätigt.
- Mit den umfangreichen Feld-, Laboruntersuchungen und geophysikalischen Messungen wurde zweifelsfrei nachgewiesen, dass innerhalb des Haldenkörpers keine Hohlräume oder Klüfte vorhanden sind.
- Mit allen Untersuchungsmethoden wurden die hydraulisch aktiven Zonen im äußeren Bereich, d.h. in der Haldenmantel und Übergangszone, der Rückstandshalden erkundet. In keiner Bohrung wurden vollständig gesättigte oder wasserführende Schichten angetroffen. Die Sättigung der im Labor untersuchten Rückstandssalzproben betrug < 50 Vol.-%.
- Im Haldenkern können Wasserzutritte und Fließbewegungen auf Grund des hohen Anteils von Kristallwasser ausgeschlossen werden. Der Gesamtwassergehalt wird in diesem Bereich erwiesenermaßen maßgeblich durch Kristallwasser und nicht durch Porenwasser bestimmt.
- Die Modellvorstellung zum Haldenkörper mit der Ausbildung eines dichten, im Sinne der DIN18130 nahezu undurchlässigen – im bautechnischen Sinne dichten Haldenkerns wird sachverständigenseits auf der Basis der zur Verfügung stehenden Datenlage als zutreffend beurteilt.

K/Vo/Se/Le/Te
IK2014
10.12.2021

SACHVERSTÄNDIGEN-GUTACHTEN Nr. IK2014/01

Vorhaben: **Bewertung der Modellvorstellung zur Ausbildung eines dichten Haldenkerns an Rückstandshalden**
Prüfung und Bewertung von ausgeführten und dokumentierten Haldenbohrungen und geophysikalischen Untersuchungen

Auftraggeber: **K+S Aktiengesellschaft**
Bertha-von-Suttner-Straße 7
34131 Kassel

Geotechnische Sachverständige: Ingenieursozietät Professor Dr.-Ing. Katzenbach GmbH
Vereidigte und nach Bauordnungsrecht anerkannte
Sachverständige für Geotechnik
Robert-Bosch-Straße 9 • 64293 Darmstadt

Inhaltsverzeichnis		Seite:
1	Vorgang	6
2	Unterlagen	8
3	Zusammenstellung der Haldenkernbohrungen und Haldendurchörterung	11
3.1	Haldenbohrung am Standort Niedersachsen-Riedel	12
3.1.1	Haldenbohrung im Jahr 1989	12
3.1.2	Chemische Zusammensetzung des Rückstandssalzes der Halde Niedersachsen-Riedel	13
3.2	Haldenbohrung am Standort Neuhof-Ellers	13
3.2.1	Haldenbohrung im Jahr 1990	13
3.2.2	Chemische Zusammensetzung des Rückstandssalzes der Halde Neuhof-Ellers	14
3.3	Haldendurchörterung der Halde Bleicherode	15
3.3.1	Haldendurchörterung im Jahr 1993	15
3.3.2	Chemische Zusammensetzung des Rückstandssalzes der Halde Bleicherode	16
3.3.3	Befahrung des Stollens der Halde Bleicherode	16
3.4	Haldenbohrungen am Standort Hattorf	20
3.4.1	Haldenbohrungen im Jahr 1997	20
3.4.2	Haldenbohrungen im Jahr 2013	21
3.4.3	Chemische Zusammensetzung des Rückstandssalzes der Halde Hattorf	27
3.4.4	Modellvorstellung der Halde Hattorf	27
3.5	Haldenbohrung am Standort Wintershall	29
3.5.1	Haldenbohrung im Jahr 2014	29
3.5.2	Chemische Zusammensetzung des Rückstandssalzes der Halde Wintershall	33
3.5.3	Modellvorstellung am Standort Wintershall	33
3.6	Haldenbohrung am Standort Zielitz	35
3.6.1	Haldenbohrung im Jahr 2008	35
3.6.2	Chemische Zusammensetzung des Rückstandssalzes der Halde Zielitz	36
3.7	Zusammenfassung der Erkenntnisse zur Zonierung des Haldenkörpers von Rückstandshalden anhand der Haldenbohrungen und Haldendurchörterung mit begehbarem Stollen	37
4	Geophysikalische Untersuchungen an Salzhalden	45
4.1	Grundlagen und Untersuchungsmethodik	45
4.2	Geophysikalische Erkundungen an der Halde Hattorf	46
4.2.1	Ergebnisse der geoelektrischen Messungen	48
4.2.2	Ergebnisse der seismischen Messungen	53

4.2.3	Bewertung der geophysikalischen Erkundungen	56
4.3	Geophysikalische Erkundungen an der Halde Wintershall	59
4.3.1	Ergebnisse der geoelektrischen Messungen	60
4.3.2	Ergebnisse der seismischen Messungen	62
4.3.3	Bewertung der geophysikalischen Erkundungen	63
4.4	Zusammenfassung der Erkenntnisse zum Haldenkörperverhalten von Rückstandshalden anhand der geophysikalischen Untersuchungen	66
5	Vergleich der Haldenkernbohrungen und der geophysikalischen Untersuchungen an den Halden Hattorf und Wintershall	77
6	Sachverständige Bewertung / Zusammenfassung	81

Bilderverzeichnis	Seite:
Bild 1: Modellvorstellung bestehend aus Haldenmantel, Übergangszone und Haldenkern gemäß [U2.1]	7
Bild 2: Wasseraustritte und Korrosion im Stollen im Bereich des Haldenmantels der Halde Bleicherode gemäß [U3.3]	17
Bild 3: Trockene Risse im mittleren Bereich des Stollens im dichten Haldenkern der Halde Bleicherode gemäß [U3.3]	18
Bild 4: Mittlerer Streckenabschnitt im dichten Haldenkern ohne Rinne zur Wasserfassung [U3.3]	19
Bild 5: Dichteverteilung über die Bohrtiefe der Haldenbohrungen an der Rückstandshalde Hattorf	23
Bild 6: Wassergehaltsverteilung über die Bohrtiefe der Haldenbohrungen an der Rückstandshalde Hattorf (Trocknung bei 105 ° C)	24
Bild 7: Porositätsverteilung über die Bohrtiefe der Haldenbohrungen an der Rückstandshalde Hattorf	26
Bild 8: Dichteverteilung über die Bohrtiefe der Haldenbohrung B72/2014-WI an der Rückstandshalde Wintershall	30
Bild 9: Wassergehaltsverteilung über die Bohrtiefe der Haldenbohrung B72/2014-WI an der Rückstandshalde Wintershall (Trocknung bei 105 ° C)	31
Bild 10: Porositätsverteilung über die Bohrtiefe der Haldenbohrung B72/2014-WI an der Rückstandshalde Wintershall	32
Bild 11: Zusammenstellung der Dichte- und Porositätsverteilungen sowie der Wassergehaltsverteilungen der Horizontalbohrungen an den Halden Hattorf und Wintershall	42

Bild 12:	Zusammenstellung der Dichte- und Porositätsverteilungen sowie der Wassergehaltsverteilungen der Vertikalbohrungen an der Halde Hattorf	42
Bild 13:	Zusammenstellung der Wassergehaltsverteilungen (Karl-Fischer-Titration) der Horizontalbohrungen an den Halden Hattorf und Wintershall	43
Bild 14:	Lageplan der Rückstandshalde Hattorf mit Erkundungsschnitt B-B	47
Bild 15:	Verteilung des scheinbaren spezifischen elektrischen Widerstands gemäß [U2.5]	49
Bild 16:	Verteilung des Kompressionswellengeschwindigkeit gemäß [U2.5]	53
Bild 17:	Verteilung der zu erwartenden, idealisierten Kompressionswellengeschwindigkeiten an der a) Westflanke und b) Ostflanke gemäß [U2.5] (Ausschnitte aus Bild 16)	55
Bild 18:	Vergleich der Verteilung der scheinbaren elektrischen Widerstände und der Verteilung der Kompressionswellengeschwindigkeiten an der Rückstandshalde Hattorf	57
Bild 19:	Lageplan der Rückstandshalde Wintershall mit Erkundungsschnitt C-C	60
Bild 20:	Verteilung des scheinbaren spezifischen elektrischen Widerstands gemäß [U2.5]	61
Bild 21:	Verteilung der Kompressionswellengeschwindigkeit gemäß [U2.5]	62
Bild 22:	Verteilung der zu erwartenden, idealisierten Kompressionswellengeschwindigkeiten an der a) Ostflanke und b) Westflanke gemäß [U2.5] (Ausschnitte aus Bild 21)	63
Bild 23:	Vergleich der Verteilung der scheinbaren elektrischen Widerstände und der Verteilung der Kompressionswellengeschwindigkeiten an der Rückstandshalde Wintershall	65
Bild 24:	Vergleich der geoelektrischen Messergebnisse im Bereich der Haldenfüße der Halden Hattorf und Wintershall	67
Bild 25:	Haldenzonierung der Halde Hattorf gemäß Bohrung B99/2013-HA [U2.1] mit den Ergebnissen der geophysikalischen Messungen aus [U2.5]	70
Bild 26:	Haldenzonierung der Halde Hattorf gemäß Bohrung B99/2013-HA [U2.1] mit den Ergebnissen der geophysikalischen Messungen aus [U2.5] und den Grenzkriterien für HM-ÜZ sowie ÜZ-HK	71
Bild 27:	Haldenzonierung der Halde Wintershall gemäß Bohrung B72/2014-WI [U2.2] mit den Ergebnissen der geophysikalischen Messungen aus [U2.5]	72
Bild 28:	Haldenzonierung der Halde Hattorf gemäß Bohrung B99/2013-HA [U2.1] mit den Ergebnissen der geophysikalischen Messungen aus [U2.5] und den Grenzkriterien für HM-ÜZ sowie ÜZ-HK	73

Bild 29:	Zusammenstellung der Laborergebnisse der Horizontalbohrungen an den Halden Hattorf und Wintershall, der Haldenzonierungen gemäß [U2.1] und [U2.2] sowie der Haldenzonierungen gemäß geophysikalischer Untersuchungen	79
Bild 30:	Zusammenstellung der Laborergebnisse der Horizontalbohrungen an der Halde Hattorf der Haldenzonierungen gemäß [U2.1] sowie der Haldenzonierungen gemäß geophysikalischer Untersuchungen	80

Tabellenverzeichnis	Seite:	
Tabelle 1:	Ausgeführte Haldenbohrungen Hattorf im Jahr 2013	21
Tabelle 2:	Trockendichte ρ_d und Porosität n je Haldenbohrung [U2.1]	22
Tabelle 3:	Mittlere Durchlässigkeitsbeiwerte k_f anhand von Bohrlochuntersuchungen in den Bohrungen B97/2013-HA und B98/2013-HA [U2.1]	25
Tabelle 4:	Schwellenwerte für die Übergangsbereiche gemäß [U2.1]	28
Tabelle 5:	Dicke von Haldenmantel, Übergangszone und erbohrtem Haldenkern an der Halde Hattorf [U2.1]	28
Tabelle 6:	Ausgeführte Haldenbohrung Wintershall im Jahr 2014	29
Tabelle 7:	Trockendichte ρ_d und Porosität n der Haldenbohrung [U2.2]	30
Tabelle 8:	Minimaler und maximaler horizontale Durchlässigkeitsbeiwert $k_{f,h}$ der Proben aus der Bohrung B72/2014-WI [U2.2]	32
Tabelle 9:	Dicke von Haldenmantel, Übergangszone und erbohrtem Haldenkern an der Halde Wintershall	35
Tabelle 10:	Ausgeführte Haldenbohrung Zielitz im Jahr 2008	35
Tabelle 11:	Durchlässigkeitsbereiche im gesättigten Zustand in Abhängigkeit vom Durchlässigkeitsbeiwert gemäß DIN 18130	38
Tabelle 12:	Zusammenstellung der Haldenbohrungen und der Haldendurchörterung Bleicherode mit der zugehörigen Zonierung	41
Tabelle 13:	Zusammenstellung der chemischen Zusammensetzung der Rückstandshalden	44
Tabelle 14:	Dicke von Haldenmantel, Übergangszone und erbohrtem Haldenkern an der Halde Hattorf [U2.1] mit den gemessenen elektrischen Widerständen gemäß [U2.5]	52
Tabelle 15:	Dicke von Haldenmantel, Übergangszone und erbohrtem Haldenkern an der Halde Hattorf [U2.1] mit den gemessenen Kompressionswellengeschwindigkeiten gemäß [U2.5]	56

Tabelle 16:	Lage der Schichtgrenzen an der Halde Hattorf mit den zugehörigen elektrischen Widerständen und Kompressionswellengeschwindigkeiten	58
Tabelle 17:	Lage der Schichtgrenzen an der Halde Wintershall mit den zugehörigen elektrischen Widerständen und Kompressionswellengeschwindigkeiten	65
Tabelle 18:	Lage der Schichtgrenzen in den Horizontalbohrungen B99/2013-HA und B72/2014-WI mit den zugehörigen elektrischen Widerständen und Kompressionswellengeschwindigkeiten	68
Tabelle 19:	Tiefenlage der Schichtgrenze zwischen Haldenmantel und Übergangszone bzw. Übergangszone und Haldenkern gemäß abgeleiteter Grenzkriterien für den elektrischen Widerstand und die Kompressionswellengeschwindigkeit an der Halde Hattorf	72
Tabelle 20:	Tiefenlage der Schichtgrenze zwischen Haldenmantel und Übergangszone bzw. Übergangszone und Haldenkern gemäß abgeleiteter Grenzkriterien für den elektrischen Widerstand und die Kompressionswellengeschwindigkeit an der Halde Wintershall	74
Tabelle 21:	Tiefenlage der Schichtgrenze zwischen Haldenmantel und Übergangszone bzw. Übergangszone und Haldenkern an den Halden Hattorf und Wintershall	75
Tabelle 22:	Zusammenstellung der Haldenzonierungen gemäß Haldenbohrungen und geophysikalischen Untersuchungen an den Halden Hattorf und Wintershall	78

1 Vorgang

Die K+S Minerals and Agriculture GmbH (K+S) betreibt im Werk Werra an den Standorten Hattorf, Wintershall und Unterbreizbach sowie in den Werken NeuhoF und Zielitz die Gewinnung und Aufbereitung von Kalirohsalzen. Die unter Tage abgebauten Kalirohsalze werden nach über Tage gefördert und dort zu Kali- und Magnesiumprodukten verarbeitet, die weltweit als landwirtschaftliche Düngemittel sowie als Grundstoffe für die chemische und pharmazeutische Industrie Verwendung finden.

Der bei der Gewinnung und Aufbereitung der Kalirohsalze anfallende, im Wesentlichen aus Steinsalz bestehende Rückstand wird auf den unmittelbar an die Fabrikgelände angrenzenden Halden abgelagert.

Seit Beginn der Aufschüttung der Halden führt K+S wiederholt Untersuchungen zu den hydraulischen Verhältnissen im Haldenkörper, deren zeitlichen Entwicklungen und den stofflichen Eigenschaften des Rückstands durch. Hierzu wurden unter anderem Haldenbohrungen an den Halden NeuhoF-Ellers [U5], Hattorf und Wintershall [U5], Zielitz [U6] sowie an der Althalde

Niedersachsen-Riedel [U1.2] ausgeführt. Hieraus ergab sich ein Haldenmodell, bestehend aus Haldenmantel, Übergangszone und Haldenkern, welches durch die Ergebnisse der in Hattorf und Wintershall durchgeführten Untersuchungen bestätigt wird. Wie diese Untersuchungen zeigen, ist das Haldenkörperverhalten selbst sowie die Ausbildung eines dichten Haldenkerns last- und zeitabhängig und wird im Wesentlichen durch das Kompaktionsverhalten der Halde, Lösungsprozesse und Mineralumwandlungen beeinflusst. Der klimatisch bedingte Wasserhaushalt findet, gemäß den durchgeführten Untersuchungen [U2.2], primär im Bereich des Haldenmantels statt. Bis zum Abschluss der Kompaktionsvorgänge im Haldenkörper können untergeordnet auch Wasserwegsamkeiten im Bereich der Übergangszone stattfinden [U2.2]. In Bild 1 ist die Modellvorstellung, bestehend aus Haldenmantel, Übergangszone und Haldenkern exemplarisch dargestellt.

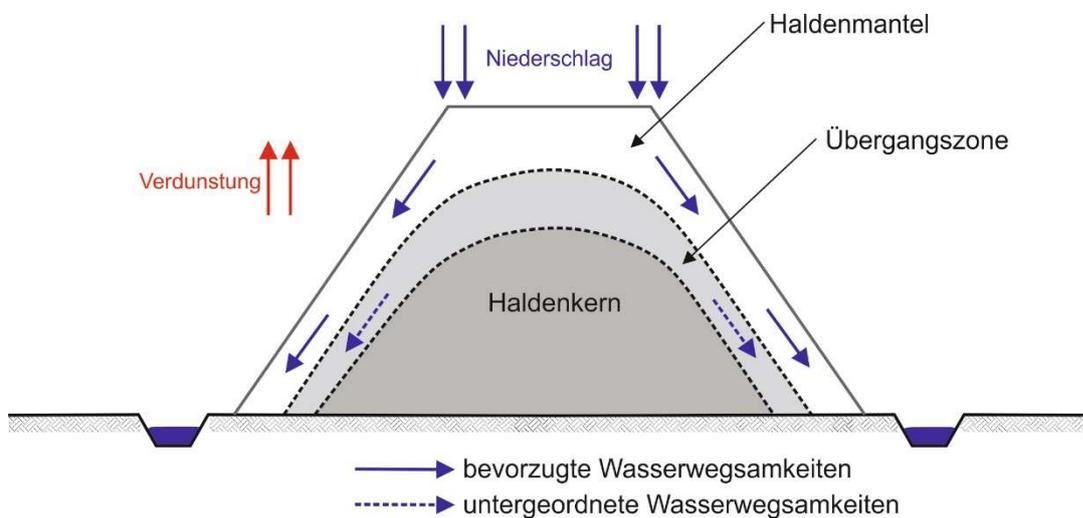


Bild 1: Modellvorstellung, bestehend aus Haldenmantel, Übergangszone und Haldenkern gemäß [U2.1]

In der Stellungnahme zum geänderten Rahmenbetriebsplan RBP WI-27/12 (Fassung 06/2019) des Hessischen Landesamtes für Naturschutz, Umwelt und Geologie vom 02.09.2019, Aktenzeichen 34/Hef 40-11-325-34/250 II [U8] wird folgendes ausgeführt (Zitat):

Die hydraulische Modellvorstellung zum internen Haldenaufbau ist auf Grundlage der Ergebnisse der horizontalen Haldenbohrungen nicht zu bestätigen. Auch der Haldenkern weist demnach eine wesentliche hydraulische Durchlässigkeit auf.

Diese Aussage des Hessischen Landesamtes für Naturschutz, Umwelt und Geologie ist im Auftrag von K+S auf der Basis der umfangreichen Haldenbohrungen an verschiedenen Rückstandshalden und der Haldendurchörterung am Standort Bleicherode zu prüfen.

Ergänzend zu den zahlreichen Haldenbohrungen und damit einhergehenden Labor- und Feldversuchen wurden geophysikalische Messungen im Sommer und Herbst 2020 an der Bestandshalde Hattorf sowie im Sommer 2021 an der Bestandshalde Wintershall durchgeführt. Mit Hilfe von seismischen und geoelektrischen Messungen wurde die Modellvorstellung zur Ausbildung eines dichten Haldenkerns weiter untersucht. Die geophysikalischen Erkundungen sind unter Berücksichtigung der Haldenkernbohrungen an den Halden Hattorf und Wintershall aus geotechnischer Sicht zu bewerten.

Im gegenständlichen geotechnischen Sachverständigen-Gutachten Nr. IK2014/01 werden die bereits ausgeführten und dokumentierten Haldenbohrungen und Haldendurchörterungen an den Standorten Hattorf, Wintershall, Neuhof-Ellers, Zielitz und Bleicherode zusammengefasst und hinsichtlich der Modellvorstellung zur Ausbildung eines dichten Haldenkerns durch die Sachverständigen Prof. Dr.-Ing. Katzenbach und Dipl.-Ing. Matthias Seip (SV) sachverständigenseits bewertet. Dabei werden ebenfalls die geophysikalischen Untersuchungen an den Halden Hattorf und Wintershall berücksichtigt.

2 Unterlagen

[U1] Kali und Salz GmbH, Kassel:

1. Ergebnisbericht über 2 Vertikalbohrungen und 4 Horizontalbohrungen auf der ESTA-Rückstandshalde Hattorf zur weiteren hydrogeologischen und geotechnischen Untersuchung von Salzhalden im Werra-Fulda-Kaligebiet vom Mai 1998
2. Zusammenfassende Information über Rückstandshalden, Dichtigkeit des Haldenkerns vom 02.07.1996, Rahmenbetriebsplan Westerweiterung der Halde Neuhof-Ellers, Anlage A.3-3

[U2] K+S Minerals and Agriculture GmbH, Werk Werra (vormals K+S KALI GmbH):

1. Nachhaltiges Rückstandsmanagement am Standort Hattorf (Haldenerweiterung Hattorf); Band 3.17 der Antragsunterlagen „Haldenkörperbohrungen am Standort Hattorf - Ergebnisbericht“ vom 03.06.2014
2. 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“ vom 29.03.2018

3. Nachhaltiges Rückstandsmanagement am Standort Hattorf (Haldenerweiterung Hattorf) – Phase 2; Band 1.3E2 – Anlage 16 „Ableitung des freien Wassergehalts des aufgehaldeten Rückstands als Eingangsparameter der Haldenwasserbilanz“ vom 01.06.2021
4. Rahmenbetriebsplan „Nachhaltiges Rückstandsmanagement am Standort Hattorf (Haldenerweiterung Hattorf)“, RBP HA-04/09, DVS 3002013 in der Fassung 2018, Band 1.1.1E „Technisches Konzept“
5. Nachhaltiges Rückstandsmanagement am Standort Hattorf (Haldenerweiterung Hattorf) – Phase 3, Band 3.17.2N „Geophysikalische Erkundung – Tomographie der Bestandshalden in Hattorf und Wintershall mittels Geoelektrik und Seismik“, Teil 1 Hattorf/Teil 2 Wintershall

[U3] Kali-Umwelttechnik GmbH, Sondershausen:

1. Abschlussbericht über die wissenschaftliche Begleitung der Haldendurchörterung vom 15.02.1995
2. Abschlussbericht Pilotprojekt Bleicherode, Entwicklung eines Verfahrens zur Rekultivierung von Kali-Althalden aus dem Jahr 1997
3. Bericht zur Befahrung der Haldenunterfahrung Halde Bleicherode am 17.06.2021

[U4] K+S KALI GmbH, Werk Zielitz:

Bergrechtliches Planfeststellungsverfahren „Haldenkapazitätserweiterung II Werk Zielitz (HKE II)“ vom 29.09.2017

[U5] Technische Universität Clausthal, Institut für Tiefbohrtechnik, Erdöl- und Erdgasgewinnung, Abteilung Lagerstättentechnik:

Laborbericht zu den Permeabilitätsmessungen im Auftrag der Kali-Umwelttechnik Sondershausen GmbH vom 08.11.1994

[U6] Taberg Planungsbüro GmbH, Kassel:

Technischer Erläuterungsbericht zum Rahmenbetriebsplan mit Umweltverträglichkeitsstudie gemäß §§ 52 (2a) und 57a BbergG zur Westerweiterung der Kalirückstandshalde Neuhof-Ellers vom Februar 2000

[U7] GFL - Dr. Lux Geophysikalische Fachberatung GbR, Friedrichroda:

1. Bericht zu geophysikalischen Bohrlochmessungen, Zielitz - Halde 2, Bohrung BK 1/08 vom 29.05.2008
2. Bericht zu geophysikalischen Bohrlochmessungen, Zielitz - Halde 2, Bohrungen BK 2/08, BK 2A/08 und Vergleich mit BK 1/08 vom 11.07.2008

-
- [U8] Bergbehörde, Regierungspräsidium Kassel
Stellungnahme zum geänderten Rahmenbetriebsplan (Fassung 06/2019), Erweiterung der Rückstandshalde des Werks Werra, Standort Wintershall der K+S KALI GmbH - Bergrechtliches Planfeststellungsverfahren vom 02.09.2019
- [U9] Professor Dr.-Ing. Rolf Katzenbach, Institut für Geotechnik der Technischen Hochschule Darmstadt:
Zusammenfassendes Geotechnisches Gutachten zur Haldenstabilität der Rückstandshalde Neuhof vom 11.06.1993
- [U10] Ingenieursozietät Professor Dr.-Ing. Katzenbach GmbH, Darmstadt:
Sachverständigen-Gutachten Nr. IK0840/01 zur Verifizierung der Verformungs- und Festigkeitseigenschaften von Rückstandssalz vom 21.11.2013
- [U11] K-UTEC Salt Technologies, Sondershausen:
1. Abschlussbericht zum FuE Projekt „Salzhaldenmonitoring - Praktische Umsetzung und Problembeseitigung des 4D geophysikalischen Monitoring von Salzhalden“ vom 29.03.2018
2. Tischvorlage zur Besprechung am 23.04.2020 „Ergebnisse des FUE Projektes - Salzhaldentomographie“
- [U12] Technische Universität Berlin:
1. Abschlussbericht: Salzhaldentomographie vom 27.03.2015
2. Dissertation „Quantitative Untersuchungen zur Mikrorissigkeit aus akustischen Gesteinseigenschaften am Beispiel von Steinsalz und Anhydrit“ vom 19.12.2000
- [U13] GGU Gesellschaft für Geophysikalische Untersuchungen mbH, Karlsruhe:
Mikroseismische Fundamenttiefenbestimmung, 2003
- [U14] Prof. Dr. G Lüttig, Institut für Geologie und Mineralogie, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
Gutachterliche Stellungnahme zu den geologisch-hydrogeologischen Aspekten der Sicherheitsbetrachtungen an Rückstandshalden des Salzbergbaues in Niedersachsen – Beispiel: Niedersachsen-Riedel vom 20.12.1990

3 Zusammenstellung der Haldenkernbohrungen und Haldendurchörterung

Aus den übergebenen Unterlagen [U1] bis [U7], [U9], [U10] sowie [U12] bis [U14] geht hervor, dass das Haldenkörperverhalten von Rückstandshalden durch zahlreiche Haldenkörperbohrungen sowie durch Feld- und Laborversuche untersucht wurde. Insgesamt wurden seit 1989 folgende Bohrungen an den Standorten Niedersachsen-Riedel, Hattorf, Wintershall, Zielitz, Neuhof und Bleicherode ausgeführt:

Standort Niedersachsen-Riedel:	1 Vertikalbohrung mit einer Länge von 50 m
Standort Neuhof-Ellers:	3 Vertikalbohrungen mit einer Länge von 25 m bis 96 m
Standort Bleicherode:	1 Haldendurchörterung (Stollen) von Norden nach Süden mit einer Gesamtlänge (Haldenquerschnitt) von 378 m
Standort Hattorf:	3 Vertikalbohrungen mit einer Länge von 80 m bis 102 m 4 Horizontalbohrungen mit einer Länge von 80 m bis 117 m
Standort Wintershall:	1 Horizontalbohrung mit einer Länge von 131 m
Standort Zielitz:	2 Vertikalbohrungen mit einer Länge von 112 m bzw. 116 m

An allen Haldenbohrungen sowie im Stollen wurden umfangreiche Feld- und Laborversuche ausgeführt, u.a. Kamerabefahrungen, geophysikalische und geohydraulische Bohrlochmessungen, Fotodokumentationen, chemische Analysen sowie salzmechanischen Laborversuche an entnommenen Kernproben.

Für eine Vergleichbarkeit bzw. Gegenüberstellung der im Folgenden angegebenen, an Salzproben aus den unterschiedlichen Bohrungen labortechnisch bestimmten Parameter werden folgenden Begrifflichkeiten definiert:

- Unter der Dichte ρ [g/cm^3] wird die Feuchtdichte der Probe vor dem Trocknen bzw. vor Bestimmung des Wassergehalts verstanden.

- Unter der Trockendichte ρ_d [g/cm³] wird die Dichte der trockenen Probe nach dem Trocknen verstanden. Die Trockendichte ρ_d ergibt sich aus der Dichte ρ der Probe und dem zugehörigen Wassergehalt wie folgt:

$$\rho_d = \frac{\rho}{1 + w}$$

- Unter dem Wassergehalt w [%] wird das Wasservolumen, das bei einer Trocknung bei 105 ° C bestimmt wurde, bezogen auf das Gesamtvolumen der Probe verstanden.
- Die Durchlässigkeit wird durch den Durchlässigkeitsbeiwert k [m/s] beschrieben und ist ein Maß für die hydraulische Leitfähigkeit des durchströmten Materials (Salz, Boden). Die Durchlässigkeit wird im Labor an gesättigten Proben bestimmt. Nach DIN 18130 beschreibt ein Durchlässigkeitsbeiwert von $k < 10^{-9}$ (Zitat) „nahezu völlig wasserundurchlässiges“ Material. Bei $10^{-9} < k < 10^{-8}$ m/s wird das Material nach DIN 18130 als (Zitat) „sehr schwach durchlässig“ bezeichnet. Derartige Materialien sind im geotechnischen/salzmechanischen Sinn dicht. In ungesättigten Zonen ist die Durchlässigkeit aufgrund von Lufteinschlüssen stets um ein Vielfaches geringer als in gesättigten Zonen.

Wurden andere Parameter, beispielsweise die Trockendichte ρ_d anstelle der Feuchtdichte ρ bestimmt, wird dies explizit genannt.

3.1 Haldenbohrung am Standort Niedersachsen-Riedel

3.1.1 Haldenbohrung im Jahr 1989

Am Standort Niedersachsen-Riedel wurde im Jahr 1989 eine Vertikalbohrung ausgeführt [U1.2]. Der Bohransatzpunkt lag rd. 50 m über der Haldenaufstandsfläche, in einem älteren Bereich der Halde. Aus den Bohrkernen wurden Proben entnommen, an denen die Dichte und die chemische Zusammensetzung bestimmt wurden. Darüber hinaus wurden an 11 Proben salzmechanische Laborversuche zur Bestimmung der einaxialen Druckfestigkeit durchgeführt.

Die wesentlichen Ergebnisse der im Jahr 1989 durchgeführten Haldenbohrungen sowie der Laborversuche sind:

- Die Dichte der untersuchten Haldenkernproben liegt zwischen mindestens $\rho = 1,7$ g/cm³ und maximal $\rho = 2,0$ g/cm³. Im Durchschnitt beträgt die ermittelte Dichte $\rho = 1,95$ g/cm³.

- Die mittels Laborversuchen bestimmten einaxialen Druckfestigkeiten q_u der Rückstandsalzproben liegen zwischen $q_u = 16,1 \text{ MN/m}^2$ und $q_u = 30,2 \text{ MN/m}^2$; dies ist die Festigkeit von Beton.
- An den gewonnenen Kernstücken der Haldenbohrung wurden keine Hohlräume, Zonen geringer Verfestigung oder Zonen mit erhöhter Wasserwegsamkeit festgestellt. Wasservorkommen oder Salzlösung in der Bohrung wurden ebenfalls nicht erkundet.

3.1.2 Chemische Zusammensetzung des Rückstandssalzes der Halde Niedersachsen-Riedel

Gemäß [U14] besteht das Rückstandssalz der Halde Niedersachsen-Riedel aus

- rd. 95 % Steinsalz (NaCl)
- rd. 2 % Wasserunlösliches Material (Hauptbestandteil: Ton)
- rd. 2 % Anhydrit (CaSO_4)
- rd. 1 % weitere Bestandteile (Kalium, Magnesium)

3.2 Haldenbohrung am Standort Neuhof-Ellers

3.2.1 Haldenbohrung im Jahr 1990

Am Standort Neuhof-Ellers wurde im Jahr 1990 die rd. 96 m tiefe Vertikalbohrung B22 ausgeführt [U1.2]. Die Bohrung wurde zu einer Inklinometermessstelle ausgebaut. Ergänzend zur ausgeführten Vertikalbohrung B22 wurden an der Halde Neuhof-Ellers zwei Meißelbohrungen ausgeführt und zu Grundwassermessstellen (B21 und B23) ausgebaut. Diese beiden Bohrungen dienten zur Beobachtung der in der Hauptbohrung angetroffenen lösungsführenden Horizonte.

An den Kernen der Hauptbohrung B22 wurden neben der Fotodokumentation und der Kernansprache folgende Laborversuche durchgeführt:

- Chemische Laborversuche
- Hydrologische Laborversuche
- Bodenmechanische Laborversuche

Die wesentlichen Ergebnisse der im Jahr 1990 durchgeführten Haldenbohrungen sowie der zugehörigen Laborversuche sind:

- Die Dichte der untersuchten Haldenkernproben nahm mit der Tiefe zu und liegt zwischen $\rho = 1,9 \text{ g/cm}^3$ und $\rho = 2,1 \text{ g/cm}^3$ (Dichte intaktes Steinsalz: $\rho = 2,1$ bis $2,3 \text{ g/cm}^3$).
- Die in den Laborversuchen bestimmte einaxiale Druckfestigkeit der Rückstandsalzproben lag zwischen $q_u = 12,8 \text{ MN/m}^2$ und $q_u = 18,8 \text{ MN/m}^2$. Darüber hinaus wurde die Scherfestigkeit an 3 Rückstandssalzproben aus einer Tiefe von rd. 36 m bis 37 m bestimmt. Die Bruchscherfestigkeit liegt im Mittel bei $\varphi' = 66,3^\circ$ bei einer Kohäsion von $c' = 500 \text{ kN/m}^2$.
- In der Bohrung B22 wurde in einer Tiefe von 15 m und 44 m ab Bohransatzpunkt jeweils ein schwebender Salzlösungsspiegel angetroffen. Beide Salzlösungsspiegel wurden mit den Bohrungen B21 und B23 ebenfalls aufgeschlossen und hydrologisch näher untersucht. Ergebnis der hydrologischen Untersuchungen ist, dass die beiden salzlösungsführenden Bereiche nicht miteinander in Verbindung stehen. Die chemische Analyse der angetroffenen Lösungen ergibt, dass die Lösung des oberen Bereichs nahezu mit den an der Halde Neuhof-Ellers anfallenden Haldenwässern identisch ist. Das untere Lösungsvorkommen wurde mittels Tritium-Methode untersucht und stammt aus den 1960er Jahren. Das Lösungsvorkommen ist seither unbeeinflusst und kann somit als eingekapselte Lösung bewertet werden [U1.2].

3.2.2 Chemische Zusammensetzung des Rückstandssalzes der Halde Neuhof-Ellers

An allen entnommenen Proben der Haldenbohrungen am Standort Neuhof-Ellers wurde die chemische Zusammensetzung bestimmt. Das in den Bohrungen erkundete Rückstandssalz besteht gemäß [U1.2] im Mittel aus:

- rd. 94 % Steinsalz (NaCl)
- rd. 3 % Wasserunlösliches Material (Hauptbestandteil: Ton, untergeordnet: Karbonate)
- rd. 2 % Anhydrit (CaSO_4)
- rd. 1 % Sylvin (KCl)

3.3 Haldendurchörterung der Halde Bleicherode

3.3.1 Haldendurchörterung im Jahr 1993

Am Standort des stillgelegten Kaliwerkes Bleicherode wurde im Jahr 1993 eine Haldendurchörterung zur Herstellung eines Stollens an der Haldenbasis ausgeführt [U3.1]. Somit konnte das Haldenkörperverhalten sowie die Basis der Rückstandshalde am Standort Bleicherode durchgehend erkundet werden.

Die Auffahrung des Stollens erfolgte zunächst im Schneidvortrieb, aufgrund der zunehmenden Festigkeit des Rückstandsmaterials wurde bei Stollenmeter 64 auf Sprengvortrieb umgestellt. Dem Stollenvortrieb folgte ein Spritzbetonausbau mit etwa 20 m bis 30 m Entfernung zur Ortsbrust nach.

Bei der Haldendurchörterung der Halde Bleicherode wurden unterschiedlich alte Bereiche der Rückstandshalde durchörtert. Insgesamt wurden Ablagerungen der Jahre 1981 (nördlicher und südlicher Randbereich) bis 1965 (Stollenmeter 62 m bis 192 m) angetroffen. Die gesamte Stollenlänge beträgt rd. 380 m.

Begleitend zur Haldendurchörterung wurden neben der Befahrung, der Fotodokumentation sowie der Probenentnahme die folgenden Feld- und Laboruntersuchungen durchgeführt:

- Geophysikalische Untersuchungen des Haldenkörpers
- Chemische Analysen
- Salzmechanische Untersuchungen

Die wesentlichen Ergebnisse der im Jahr 1993 durchgeführten Haldendurchörterung sowie der zugehörigen Feld- und Laborversuche sind:

- Der Wassergehalt des Rückstandsmaterials beträgt im Haldeninneren rd. $w = 2\%$ und maximal $w = 6 - 8\%$ im Randbereich des Haldenkörpers. Der Wassergehalt nimmt vom Haldeninneren bis zum Randbereich zu. Zutritte von Haldenwässern konnten ausschließlich im Randbereich (≤ 50 m) der Halde am Stollenanfang und am Stollenende festgestellt werden.
- Die Dichte der untersuchten Haldenproben nahm mit der Tiefe zu und liegt zwischen min. $\rho = 1,9 \text{ g/cm}^3$ (Haldenrand) und max. $\rho = 2,3 \text{ g/cm}^3$ (Haldenkern).

- Die Porosität (Porenanteil nach DIN 4220) nimmt, analog zur Dichte, mit zunehmender Tiefe ab und liegt zwischen max. $n = 22,5$ Vol.-% (Haldenrand) und min. $n = 8$ Vol.-% (Haldenkern).
- Die Durchlässigkeit des Rückstandes (Gaspermeabilität) nimmt vom Haldenrand zum Haldenkern hin ab. Im Randbereich der Rückstandshalde beträgt der Durchlässigkeitsbeiwert $k = 2,8 \cdot 10^{-7}$ m/s. Im Haldenkern liegen die ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerte bei max. $k = 2,4 \cdot 10^{-8}$ m/s bis min. $k = 4 \cdot 10^{-10}$ m/s.
- Die in den Laborversuchen bestimmten einaxialen Druckfestigkeiten q_u der Rückstandsalzproben liegen im Mittel zwischen $q_u = 6,5$ MN/m² (Haldenrand) und $q_u = 16$ MN/m² (Haldenkern). Nach den Laborversuchen nimmt die einaxiale Druckfestigkeit vom Haldenrand aus hin zum Haldenkern zu [U3.1].

3.3.2 Chemische Zusammensetzung des Rückstandssalzes der Halde Bleicherode

Das an der Halde Bleicherode aufgehaldete Rückstandssalz besteht gemäß [U3.1] in ihren Hauptkomponenten aus:

- rd. 70% Steinsalz (NaCl)
- rd. 25 % Anhydrit ($\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$)

Die übrigen Komponenten werden durch rohsalzbedingte Veränderungen über die gesamte Aufhaldungszeit der Rückstandshalde Bleicherode geprägt. Durch Veränderungen der Rohsalzaufbereitung wird auch die Zusammensetzung des Rückstandssalzes beeinflusst. Als Neubildung auf der Rückstandshalde treten Syngenit und Polyhalit sowie, bei ausreichendem Angebot von Anhydrit, Kainit auf.

3.3.3 Befahrung des Stollens der Halde Bleicherode

Am 17.06.2021 erfolgte eine Befahrung des Stollens der Halde Bleicherode durch K+S und dem SV Prof. Katzenbach. Die Befahrung diente der Inaugenscheinnahme der lokal im Bereich des Haldenmantels vorhandenen Wasserwegsamkeiten und Nässeverteilungen [U3.3].

Wie oben beschrieben, wurde der im Jahr 1993 im Schneid- und Sprengvortrieb aufgefahrene Stollen mit Spritzbeton ausgebaut. Die Betonsohle des Stollens wurde später entfernt, da sie durch die Bewegungen des Haldenkörpers überbeansprucht war. An der Firste und teilweise auch an der

Ulme des Stollens waren bei der Befahrung Risse, Klüfte, Ausbrüche und kleinere Überschiebungen des Spritzbetons zu erkennen.

In den äußeren Bereichen des Stollens, das heißt auf den ersten (südlicher Stolleneingang) und letzten (nördlicher Stolleneingang) 60 m bis 80 m, waren deutlich Lösungsaustritte u.a. direkt durch Haldenwässer, die gefasst werden, oder durch Korrosion der Stahlbewehrung zu beobachten (Bild 2).

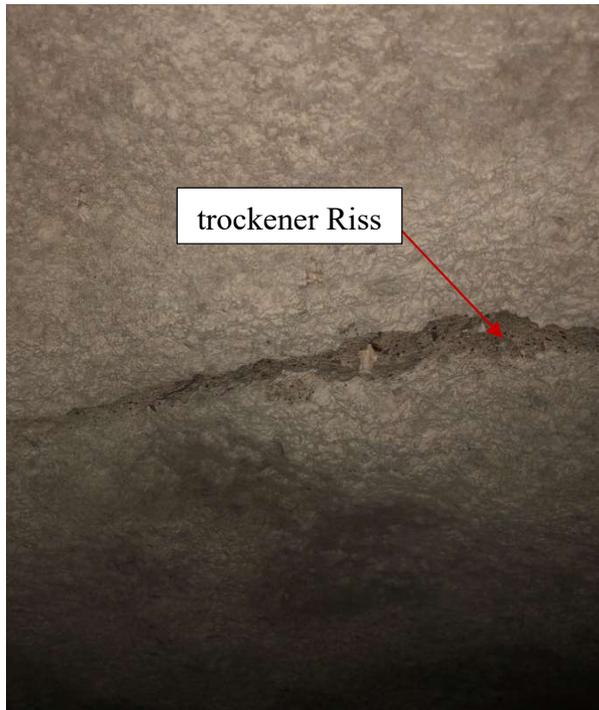


Südlicher Teilabschnitt des Stollens

Korrosion der Stahlbewehrung

Bild 2: Wasseraustritte und Korrosion im Stollen im Bereich des Haldenmantels der Halde Bleicherode gemäß [U3.3]

Dort, wo der Stollen den Haldenkern durchörtert, gibt es keinerlei Wasserzutritte und auch keine Korrosion an der Stahlbewehrung. Trotz deutlicher Risse im Bereich der Firste des Stollens ist dieser Haldenbereich trocken (Bild 3).



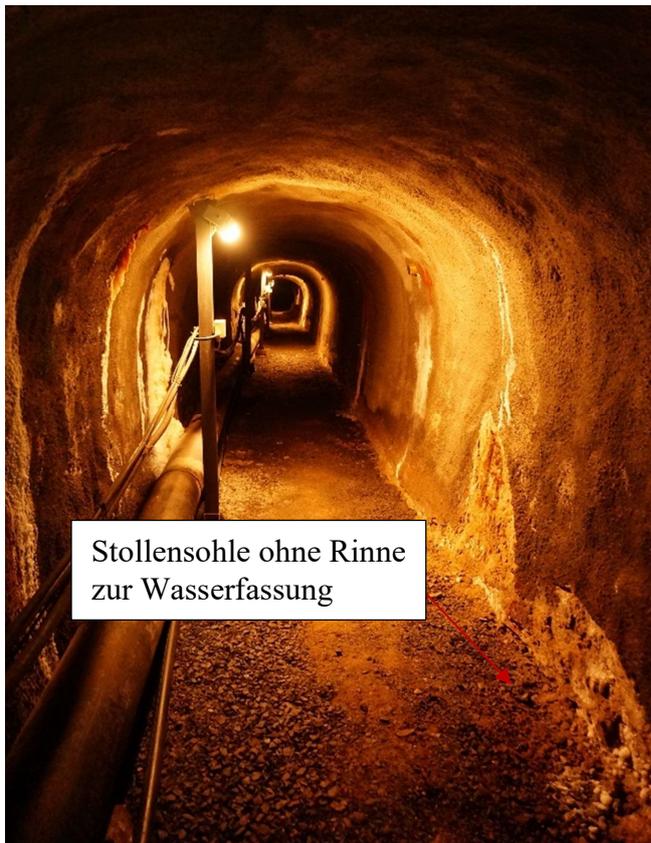
Mittlerer Streckenabschnitt (dichter Haldenkern)



Mittlerer Streckenabschnitt (Dichter Haldenkern)

Bild 3: Trockene Risse im mittleren Bereich des Stollens im dichten Haldenkern der Halde Bleicherode gemäß [U3.3]

Da der Haldenkern nachweislich dicht ist, wurde der Stollen im mittlere Streckenabschnitt nicht mit einer Rinne (siehe Bild 2) zur Fassung möglicher Haldenwässer ausgebaut (siehe Bild 4). Die Rinnen am südlichen bzw. nördlichen Stollenabschnitt entwässern durch ein nach außen geneigtes Gefälle in Richtung der jeweiligen Stollenportale.



Mittlerer Streckenabschnitt (dichter Haldenkern)

Bild 4: Mittlerer Streckenabschnitt im dichten Haldenkern ohne Rinne zur Wasserfassung [U3.3]

Am Stollen der Halde Bleicherode ist deutlich erkennbar, dass die hydraulisch aktiven Zonen des Haldenkörpers ausschließlich im Bereich der südlichen und westlichen Stollenportale, also im Bereich des Haldenmantels liegen. In horizontaler Richtung gemessene Breite des Haldenmantels beträgt maximal 80 m, was einer Dicke des Haldenmantels von rd. 50 m entspricht. Der mittlere Bereich des Stollens, mit einem Abstand zu den Stolleneingängen von > 80 m, war frei von Wasserwegsamkeiten und frei von wasserführenden Schichtgrenzen oder Wasser- bzw. Feuchteausstritten; dies ist der Bereich des an der Basis mindestens 220 m breiten Haldenkerns.

Bei der Beurteilung des dichten Haldenkerns ist hier zu berücksichtigen, dass die Rückstandshalde Bleicherode eine durchschnittliche Haldenhöhe von nur 75 m über GOF hat. Die maximale Haldenhöhe beträgt 100 m; diese wird gemäß [U3.3] nur auf einzelnen Plateauflächen der Halde erreicht. Selbst bei dieser, im Vergleich zu den Höhen der Halden Hattorf und Wintershall geringen Haldenhöhe ist eine Zonierung des Haldenkörpers in eine hydraulisch aktivere Haldenmantel- und Übergangszone und einen hydraulisch inaktiven – bautechnisch dichten – Haldenkern eindeutig gegeben.

3.4 Haldenbohrungen am Standort Hattorf

Am Standort Hattorf wurden gemäß [U1.1] und [U2.1] in den Jahren 1997 und 2013 insgesamt 7 Haldenbohrungen ausgeführt.

3.4.1 Haldenbohrungen im Jahr 1997

Mit den Bohrungen im Jahr 1997 wurde ein rund 9 bis 12 Jahre alter Haldenbereich erkundet. Es wurde sowohl eine Vertikal- als auch eine Horizontalbohrung bis in eine Tiefe von rd. 80 m ausgeführt. Das Bohrprogramm umfasste die Aufzeichnung von Bohrparametern, Zuflussmengen und Wasserspiegelbeobachtungen [U1.1]. Darüber hinaus wurden neben der Kamerabefahrung und Dokumentation folgende Feld- und Laborversuche durchgeführt:

- Chemische und mineralogische Untersuchungen an den Bohrkernen
- Lösungsanalysen der aufgefangenen Haldenwässer
- Porositätsmessungen (\triangleq Bestimmung der Porenanteils n)
- Permeabilitätsbestimmungen
- Scherfestigkeitsversuche

Die wesentlichen Ergebnisse der im Jahr 1997 durchgeführten Haldenbohrungen sowie der zugehörigen Feld- und Laborversuche sind:

- Es wurden Haldenwasserzuflüsse bis maximal 21 m Entfernung von Haldenfuß angetroffen. Außerdem ist eine Abnahme der Porosität sowie der Durchlässigkeitsbeiwerte mit zunehmender Tiefe festzustellen. Die Porosität in der Horizontalbohrung nimmt von $n = 32$ Vol.-% auf $n = 17$ Vol.-% mit zunehmender Tiefe ab. Auch die Porosität in der Vertikalbohrung nimmt von $n = 38$ Vol.-% auf $n = 14$ Vol.-% mit zunehmender Tiefe ab. Die Durchlässigkeitsbeiwerte nehmen von max. $k_f = 2,3 \cdot 10^{-5}$ m/s im Haldenmantel auf $k_f = 2 \cdot 10^{-8}$ m/s im Haldenkern ab. Die Durchlässigkeitsbeiwerte der Proben aus der Horizontalbohrung sind rd. eine Zehnerpotenz größer als die Durchlässigkeitsbeiwerte der Proben aus der Vertikalbohrung (Kernbereich). Dies ist auf die geringe Überdeckung der Horizontalbohrung von wenigen Metern (Randbereich, Haldenfuß) bis maximal rd. 60 m (am Fuß der Bohrung, Bohrlänge = 80 m) zurückzuführen.
- Aus den ausgeführten Haldenbohrungen sowie den Feld- und Laborversuchen wird gemäß [U1.1] geschlussfolgert, dass die Breite des Haldenmantels selbst im ungünstigsten Fall max. rd. 25 m bis 30 m beträgt.

3.4.2 Haldenbohrungen im Jahr 2013

Mit den Bohrungen im Jahr 2013 wurden die Ergebnisse der Haldenbohrungen von 1997 überprüft, die Modellvorstellung auf der Basis umfangreicher Untersuchungen erweitert sowie die zeitliche Entwicklung der Strömungsprozesse der Halde in den Focus genommen. Insgesamt wurden hierfür 5 Haldenbohrungen in unterschiedlichen Haldenbereichen ausgeführt; diese sind in [U2.1] dokumentiert und in Tabelle 1 zusammengestellt.

Bohrung Nr.	Art	Bohrteufe	Haldenbereich	Alter des Haldenbereichs [a]
B97/2013-HA	Vertikalbohrung	100 m	im Bereich der 1997 durchgeführten Bohrungen	25 – 28
B98/2013-HA	Vertikalbohrung	102 m	im Bereich der Haldenbandunterführung	19 – 21
B99/2013-HA	Horizontalbohrung	101 m	im Bereich der Haldenbandunterführung	17 – 21
B100/2013-HA	Horizontalbohrung	100 m	im Bereich der Grundwassermessstelle (GWM) 7	5 – 8
B104-2013-HA	Horizontalbohrung	117 m	im Bereich der in 2012 testweise erstellten Entwässerungsbohrungen am Untersuchungsbereich UB-B	4 – 7

Tabelle 1: Ausgeführte Haldenbohrungen Hattorf im Jahr 2013

Das Bohrprogramm umfasste die Aufzeichnung von Bohrparametern, Zuflussmengen und Wasserspiegelbeobachtungen sowie regelmäßige Auslaufmessungen in den Horizontalbohrungen. Darüber hinaus wurden neben der Kamerabefahrung, der Fotodokumentation sowie der Kernansprache folgende Feld- und Laborversuche durchgeführt:

- Geophysikalische und hydrodynamische Bohrlochmessungen
- Chemische und mineralogische Untersuchungen an den Bohrkernen
- Lösungsanalysen der aufgefangenen Haldenwässer
- Porositätsmessungen
- Permeabilitätsbestimmungen

Die Ergebnisse der im Jahr 2013 durchgeführten Haldenbohrungen sowie der Feld- und Laborversuche bestätigen grundsätzlich die Ergebnisse der Haldenbohrungen und der Feld- bzw. Laborversuche aus dem Jahr 1997 hinsichtlich Dichte, Porosität, Durchlässigkeit und Haldenzonierung.

In der Tabelle 2 sind die erkundeten und labortechnisch ermittelten Dichten ρ und die Porosität n für die einzelnen Bohrungen zusammengestellt. Dabei werden jeweils das Maximum und das Minimum sowie die zugehörige Bohrtiefe angegeben.

	Tiefe *) [m]	Dichte ρ [g/cm ³]	Porosität n [%]
B97/2013-HA	2,5 / 4	1,3	47
	100	2,0	6
B98/2013-HA	7	1,2	45
	103	2,0	7
B99/2013-HA	22	1,65	22
	95	2,0	5
B100/2013-HA	8 / 1	1,4	34
	100	1,9	10
B104-2013-HA	7	1,5	30
	106	1,95	9

*) sind bei der Tiefe zwei Werte angegeben, so bezieht sich die Dichte auf die erste Tiefe und die Porosität auf die zweite Tiefe

Tabelle 2: Trockendichte ρ_d und totale Porosität n [U2.1]

Ergänzend zu Tabelle 2 sind in Bild 5 die ermittelten Dichten für alle Bohrungen über die Tiefe dargestellt. Dabei sind links die an Proben der Horizontalbohrungen B99/2013-HA, B100/2013-HA und B104/2013-HA bestimmten Dichten ρ horizontal aufgetragen und rechts die an Proben der der Vertikalbohrungen B97/2013-HA und B98/2013-HA bestimmten Dichten ρ vertikal aufgetragen.

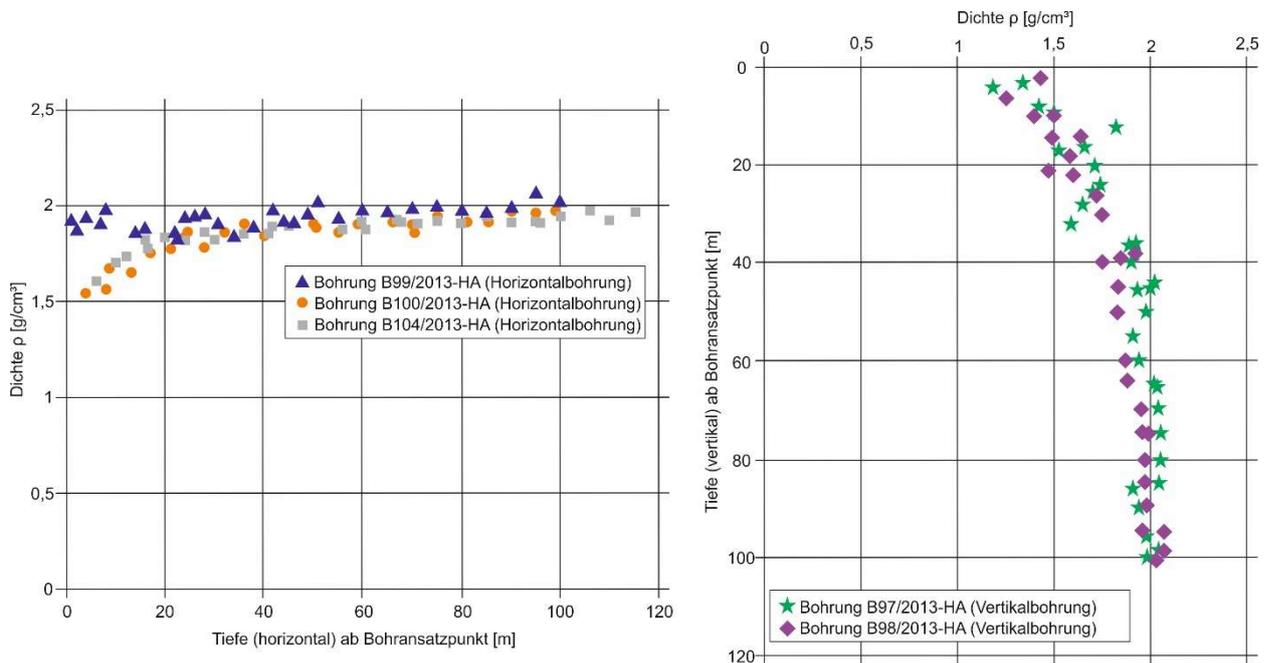


Bild 5: Dichteverteilung über die Bohrtiefe der Haldenbohrungen an der Rückstandshalde Hattorf

In allen Bohrungen ist eine signifikante Dichtezunahme über die Tiefe festzustellen. In der Bohrung B99/2013-HA werden bereits ab Bohransatzpunkt sehr große Dichten von $\rho \geq 1,8 \text{ g/cm}^3$ erkundet. Die Dichtezunahme mit der Tiefe ist in dieser Bohrung geringer. Oberflächennah, d.h. bei geringen Bohrtiefen wurden Dichten von $\rho \leq 1,5 \text{ g/cm}^3$ ermittelt. Bereits bei einer Tiefe von rd. 40 m ist eine deutliche Zunahme der Dichte auf rd. $\rho = 1,7 \text{ g/cm}^3$ bis $\rho = 1,9 \text{ g/cm}^3$ zu beobachten. Die maximal im Labor ermittelten Dichten betragen $\rho \approx 2,0 \text{ g/cm}^3$ und liegen damit knapp unter der bei $2,1 - 2,3 \text{ g/cm}^3$ liegenden Dichte von intaktem Steinsalz.

Analog zur Darstellung in Bild 5 sind auch die labortechnisch bestimmten Wassergehalte w (Trocknung bei $105 \text{ }^\circ\text{C}$) der Haldenbohrungen am Standort Hattorf in Bild 6 dokumentiert. Dieser Parameter wurde aufgrund der Vergleichbarkeit zu den übrigen Haldenbohrungen an anderen Rückstandshalden gewählt.

In den Horizontalbohrungen ist eine Abnahme des Wassergehalts mit zunehmender Bohrtiefe zu erkennen. In den Vertikalbohrungen wurden bereits oberflächennah sehr geringe Wassergehalte von $w < 5 \%$ erkundet. Diese bleiben bis zur Endtiefe der Bohrungen konstant oder nehmen geringfügig weiter ab.

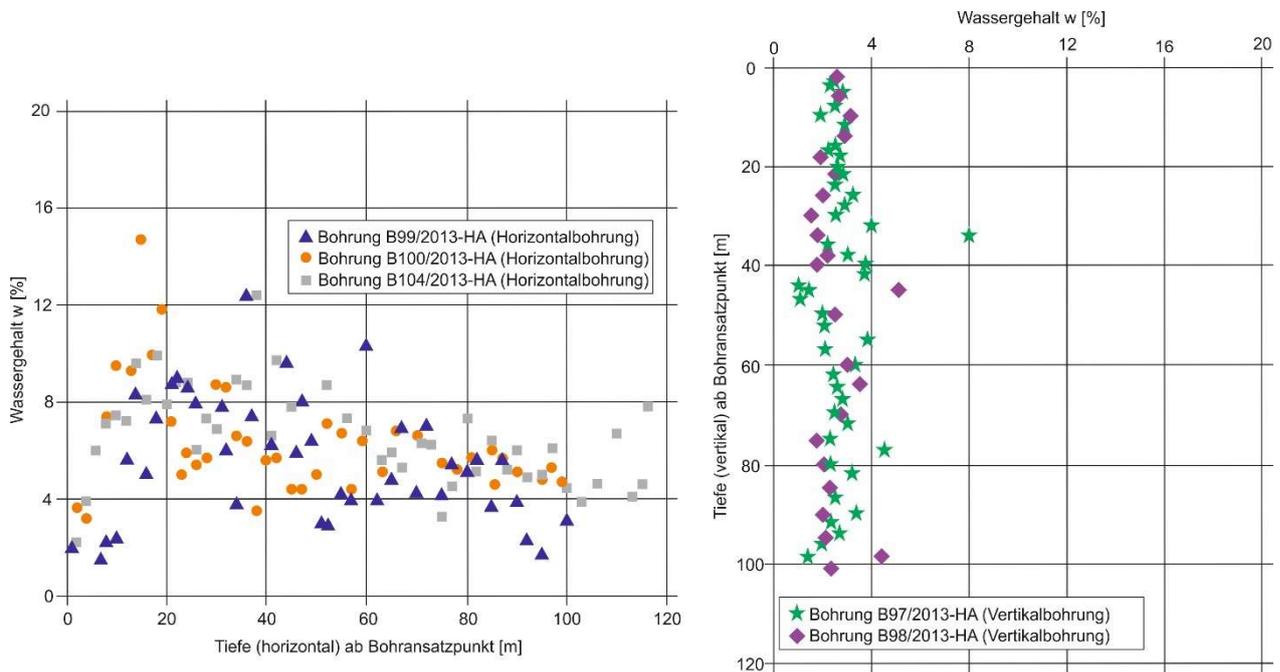


Bild 6: Wassergehaltsverteilung über die Bohrtiefe der Haldenbohrungen an der Rückstandshalde Hattorf (Trocknung bei 105 ° C)

Neben der Bestimmung des Wassergehalts bei 105 °C Ofentrocknung wurden in [U2.1] auch eine Bestimmung des Trocknungsverlusts bei 55 °C, des Glühverlustes bei 550 °C und die Bestimmung des Wassergehalts mittels Karl-Fischer-Titration ausgewertet. Auf Basis dieser umfangreichen Laborergebnisse erfolgte mit [U2.3], im Gegensatz zur Beurteilung auf Basis des Gehalts an Haftwasser, das als Teil des Porenwassers im Porenraum des Rückstandes gehalten wird und somit hydraulisch inaktiv ist, eine Bewertung der Strömungs- und Retardationsprozesse im Haldenkörper.

An den Bohrungen B97/2013-HA und B98/2013-HA wurden anhand von geophysikalischen und hydrodynamischen Messungen im Bohrloch die mittleren Durchlässigkeitsbeiwerte k_f in Abhängigkeit von der Tiefe bestimmt. Die Durchlässigkeitsbeiwerte k_f aus [U2.1] sind in Tabelle 3 zusammengestellt. In beiden Bohrungen wurden sowohl die horizontale als auch die vertikale Durchlässigkeit untersucht.

Bohrung	Mittlere Tiefe der Untersuchungsbereiche [m]	horizontaler Durchlässigkeitsbeiwert $k_{f,h}$ [m/s]	vertikaler Durchlässigkeitsbeiwert $k_{f,v}$ [m/s]
B97/2013-HA	34	$3,7 \cdot 10^{-6}$	
	28		$1,7 \cdot 10^{-8}$
	44	$1,1 \cdot 10^{-7}$	
	57	$5,1 \cdot 10^{-7}$	
	71	$2,3 \cdot 10^{-8}$	
	89	$1,8 \cdot 10^{-8}$	
B98/2013-HA	16		$1,2 \cdot 10^{-7}$
	41		$3,1 \cdot 10^{-8}$
	55	$1,2 \cdot 10^{-6}$	
	67		$6,2 \cdot 10^{-8}$
	92	$7 \cdot 10^{-8}$	

Tabelle 3: Mittlere Durchlässigkeitsbeiwerte k_f anhand von Bohrlochuntersuchungen in den Bohrungen B97/2013-HA und B98/2013-HA [U2.1]

Aus Tabelle 3 wird ersichtlich, dass bei beiden Vertikalbohrungen eine große Anisotropie zwischen den horizontalen und vertikalen Durchlässigkeiten erkundet wurde. Die horizontalen Durchlässigkeiten sind bei vergleichbarer Tiefenlage in diesen Bohrungen rd. zwei Zehnerpotenzen größer als die vertikalen Durchlässigkeiten. Aus diesem Laborergebnissen ist ein bevorzugter lateraler Abstrom im Rückstandssalz abzuleiten.

Für die Beurteilung des dichten Haldenkerns ist im Hinblick auf die Versickerung von Niederschlag durch die Halde hindurch der vertikale Durchlässigkeitsbeiwert $k_{f,v}$ maßgeblich, der im Minimum zu $1,7 \cdot 10^{-8}$ m/s und maximal zu $1,2 \cdot 10^{-7}$ m/s bestimmt worden ist.

Die in den Haldenbohrungen 2013 an der Rückstandshalde Hattorf labortechnisch bestimmten Porosität ist in Bild 7 über die Bohrtiefe dargestellt. In allen Bohrungen nimmt die Porosität n [Vol.-%] mit der Tiefe hin ab. An keiner Stelle der Haldenbohrungen wurde vollständig gesättigtes Rückstandssalz vorgefunden.

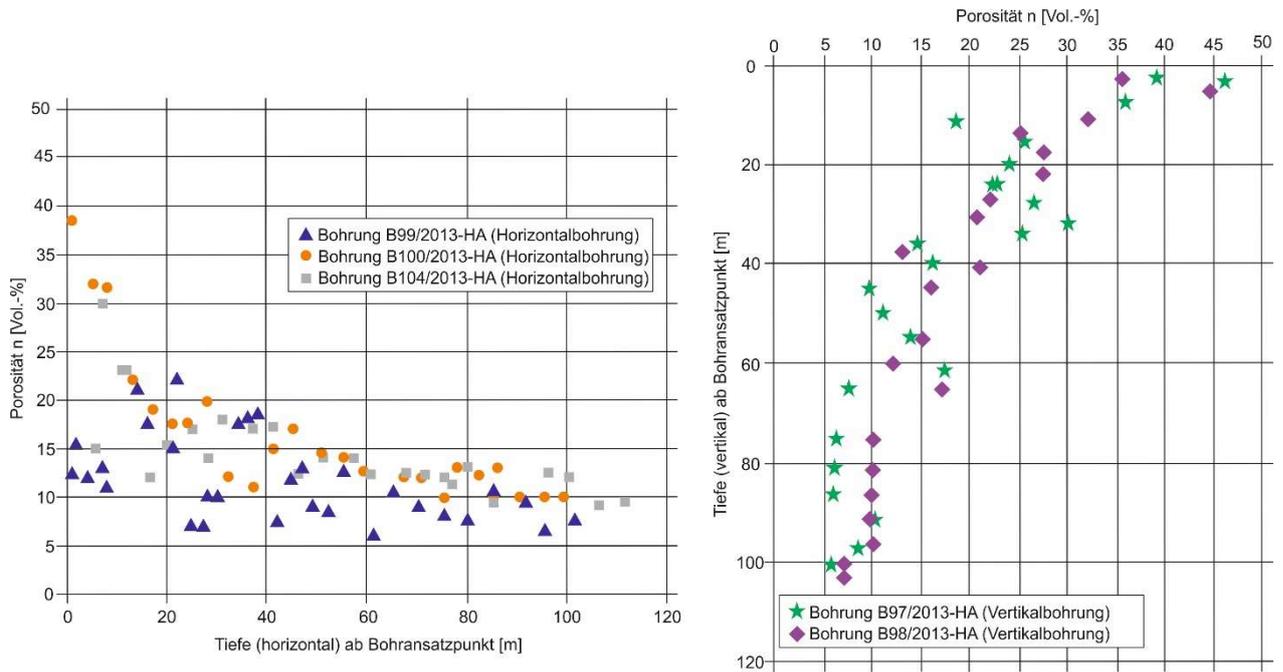


Bild 7: Porositätsverteilung über die Bohrtiefe der Haldenbohrungen an der Rückstandshalde Hattorf

Auch in den 2013 am Standort Hattorf ausgeführten Haldenbohrungen ist eine Abnahme der Porosität von $n = 47$ Vol.-% im Haldenmantel auf $n = 5$ Vol.-% im Haldenkern und der Durchlässigkeitsbeiwerte von $k_f = 3,7 \cdot 10^{-6}$ m/s im Haldenmantel auf $k_f = 1,5 \cdot 10^{-8}$ m/s (horizontal) bzw. $3,5 \cdot 10^{-10}$ m/s (vertikal) im Haldenkern mit zunehmender Tiefe festzustellen. Darüber hinaus nimmt die Dichte des erbohrten Rückstandsmaterials vom Haldenmantel mit $\rho = 1,2$ g/cm³ hin zum Haldenkern $\rho = 2,0$ g/cm³ zu.

In den an der Rückstandshalde Hattorf ausgeführten Haldenbohrungen wurden an keiner Stelle wasserführenden Schichten oder Spalten, Hohlräume oder Klüfte erkundet.

3.4.3 Chemische Zusammensetzung des Rückstandssalzes der Halde Hattorf

Gemäß [U10.5] ergibt sich für das Rückstandssalz der Halde Hattorf die folgende chemische Zusammensetzung:

- rd. 91 % Steinsalz (NaCl)
- rd. 5 % Kieserit ($\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$)
- rd. 1 % Carnallit ($\text{KCl} \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$)
- rd. 2 % Anhydrit u.a (CaSO_4 u.a.)
- rd. 1 % Sylvin (KCl)

3.4.4 Modellvorstellung der Halde Hattorf

Die Haldenkernausbildung der Halde Hattorf wurde an insgesamt 3 Vertikal- und 4 Horizontalbohrungen in unterschiedlich alten Bereichen untersucht. Aus den Haldenbohrungen und den zahlreichen Feld- und Laborversuchen ergibt sich gemäß [U2.1] folgende Modellvorstellung:

Der Haldenkörper ist in Haldenmantel (außen), Übergangszone und Haldenkern (innen) zu unterteilen. Das mechanische und chemische Verhalten von Rückstandssalz auf den Rückstandshalden führt zu der Ausbildung eines Haldenkerns. Dieser Prozess ist last- und zeitabhängig und wird wesentlich durch Kompaktion, Lösungsprozesse und Mineralumwandlungen des Rückstandssalzes beeinflusst. Wasserbewegungen im Haldenkörper finden bevorzugt im Haldenmantel und untergeordnet, bis zum Abschluss der Kompaktion, auch in der Übergangszone statt.

Der Haldenkern weist gemäß [U2.1] aufgrund der vorgenannten Prozesse nur geringe Porositäten von $n \leq 5$ Vol.-% und Durchlässigkeiten von $k_f \leq 1,0 \cdot 10^{-8}$ m/s auf. Die Durchlässigkeiten unterscheiden sich dabei in horizontaler und vertikaler Richtung und sind im Haldenkern mit $k_f \leq 1,5 \cdot 10^{-8}$ m/s (horizontal) um ein Vielfaches größer als in vertikaler Richtung mit $k_f \leq 3,5 \cdot 10^{-10}$ m/s. Diese Anisotropie der horizontalen und vertikalen Durchlässigkeiten ist auch in den übrigen Haldenbereichen (Haldenmantel, Übergangszone) zu erkennen.

Dabei ist zu berücksichtigen, dass die im Labor bestimmten Durchlässigkeiten an gesättigten Proben bestimmt wurden. Innerhalb des Haldenkörpers herrschen keine vollkommen gesättigten Zustände, die Sättigung S_r des Rückstandssalzes betrug in allen Bohrungen weitestgehend $S_r \leq 50$ % [U2.1], sodass die Durchlässigkeiten in der Realität unter den labortechnisch bestimmten Werten liegen. Infolgedessen kommt es im Zusammenhang mit der tiefenabhängigen Zunahme der Dichten und der Abnahme der Durchlässigkeit zu schwebenden Haldenwasserlinsen und einem

Abfließen der Haldenwässer im Haldenmantel. Überschüttete, alte Haldenoberflächen wirken zunächst als initiale Wegsamkeiten für Haldenwasser, diese werden aber mit zunehmender Kompaktion verschlossen [U2.1].

Gemäß [U2.1] wurden die in der Tabelle 4 dokumentierten Schwellenwerte für die Trockendichte ρ_d und die Porosität n den Übergangsbereichen Haldenmantel-Übergangszone und Übergangszone-Haldenkern zugeordnet.

	Schwellenwert		
	Trockendichte ρ_d [g/cm ³]	Porosität n [%]	Vertikale Durchlässigkeit k [m/s]
Haldenmantel - Übergangszone *)	$MZ < 1,8 \leq \ddot{U}Z$	$MZ > 20 \geq \ddot{U}Z$	$MZ > 1 \times 10^{-7} \geq \ddot{U}Z$
Übergangszone - Haldenkern *)	$\ddot{U}Z < 1,9 \leq HK$	$\ddot{U}Z > 10 \geq HK$	$\ddot{U}Z > 1 \times 10^{-9} \geq HK$

*) Haldenmantel = HM, Übergangszone = $\ddot{U}Z$, Haldenkern = HK

Tabelle 4: Schwellenwerte für die Übergangsbereiche gemäß [U2.1]

In Tabelle 5 sind die erkundeten Haldenbereiche (Haldenmantel, Übergangszone und Haldenkern) gemäß [U2.2] für die Bohrungen B97/2013 HA, B98/2013 HA, B99/2013 HA, B100/2013 HA und B104/2013 HA sowie die Bohrungen VB B1-80 m und HB B1-80 m aus dem Jahr 1997 jeweils beginnend vom Bohransatzpunkt dokumentiert.

Bohrung Nr.	Haldenmantel			Übergangszone			Haldenkern		
	von [m]	bis [m]	Dicke [m]	von [m]	bis [m]	Dicke [m]	von [m]	bis (erbohrt) [m]	Dicke (erbohrt) [m]
B97/2013-HA	0	36	36	> 36	62	26	> 62	100	38
B98/2013-HA	0	68	68	> 68	78	10	> 78	102	24
B99/2013-HA	0	42	42	> 42	68	26	> 68	101	33
B100/2013-HA	0	52	52	> 52	97	45	> 97	100	3
B104-2013-HA	0	42	42	> 42	102	60	> 100	117	17
VB B1-80 m	0	55	55	> 55	64	10	> 64	80	16
HB B1-80 m	0	25	25	> 25	55	30	> 55	80	25

Tabelle 5: Dicke von Haldenmantel, Übergangszone und erbohrtem Haldenkern an der Halde Hattorf [U2.1]

Die Bereichseinteilung erfolgte gemäß den in Tabelle 4 angegebenen Schwellenwerten, wobei hier im Wesentlichen die Kriterien der Dichte ρ und der Porosität n zugrunde gelegt wurden.

Mit den o.g. Haldenbohrungen wurde, im Grenzbereich des bohrtechnisch Möglichen, der äußere Rand des Haldenkerns erbohrt. Es ist davon auszugehen, dass die Trockendichten zum Haldeninneren hin weiter zunehmen und die Porositäten sowie Durchlässigkeiten zum Haldeninneren hin weiter abnehmen.

3.5 Haldenbohrung am Standort Wintershall

3.5.1 Haldenbohrung im Jahr 2014

Am Standort Wintershall wurde im Jahr 2014 eine Horizontalbohrung ausgeführt. Diese ist in [U2.2] dokumentiert. Bei dieser Haldenkernbohrung wurde die Modellvorstellung zur Ausbildung eines dichten Haldenkerns unter Berücksichtigung der Erkenntnisse am Standort Hattorf überprüft.

Bohrung Nr.	Art	Bohrteufe	Haldenbereich	Alter [a]
B72/2014-WI	Horizontalbohrung	131 m	im Bereich der beantragten Haldenerweiterung; Südostseite der bestehenden Halde	17 – 33

Tabelle 6: Ausgeführte Haldenbohrung Wintershall im Jahr 2014

Das ausgeführte Bohrprogramm umfasste die Aufzeichnung von Bohrparametern, Zuflussmengen und Wasserspiegelbeobachtungen. Darüber hinaus wurden neben der Kamerabefahrung, der Fotodokumentation sowie der Kernansprache folgende Feld- und Laborversuche durchgeführt:

- Geophysikalische Bohrlochmessungen
- Geohydraulische Bohrlochuntersuchungen
- Chemische und mineralogische Untersuchungen an den Bohrkernen
- Lösungsanalysen der aufgefangenen Haldenwässer
- Porositätsmessungen
- Permeabilitätsbestimmungen

Die wesentlichen Ergebnisse der im Jahr 2014 durchgeführten Haldenbohrungen sowie der zugehörigen Feld- und Laborversuche sind:

In der Tabelle 7 sind die erkundeten und labortechnisch ermittelten Trockendichten ρ_d und Porositäten n für die Bohrung B72/2014-WI dokumentiert. Dabei werden jeweils das Maximum (Haldenkern) und das Minimum (Haldenmantel) sowie die zugehörige Bohrtiefe angegeben.

	Tiefe *) [m]	Dichte ρ [g/cm ³]	Porosität n [%]
B72/2014-WI	1	1,4	35
	105 / 126	2,0	8

*) sind bei der Tiefe zwei Werte angegeben, so bezieht sich die Dichte auf die erste Tiefe und die Porosität auf die zweite Tiefe

Tabelle 7: Trockendichte ρ_d und Porosität n der [U2.2]

Ergänzend zu Tabelle 7 sind in Bild 8 die ermittelten Dichten für die Bohrung B72/2014-WI über die Tiefe dargestellt.

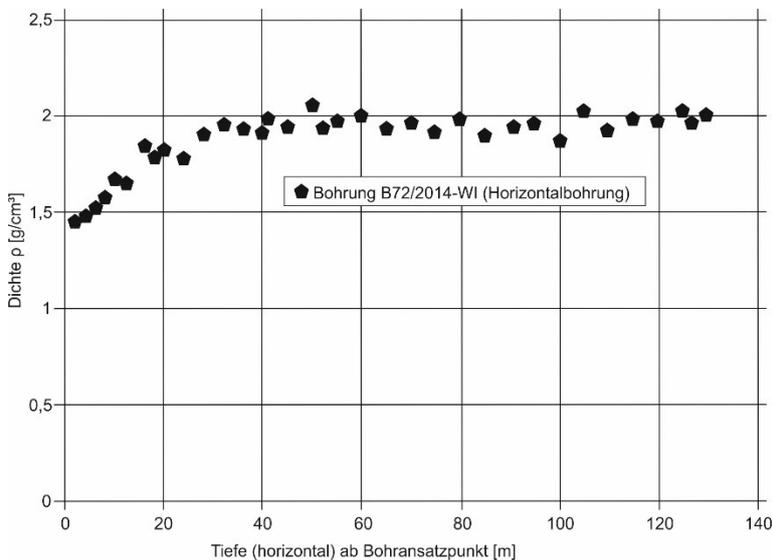


Bild 8: Dichteverteilung über die Bohrtiefe der horizontalen Haldenbohrung B72/2014-WI an der Rückstandshalde Wintershall

In der Horizontalbohrung B72/2014-WI ist eine deutliche Dichtezunahme über die Tiefe festzustellen. Oberflächennah, d.h. bei geringen Bohrtiefen wurden Dichten von $\rho \leq 1,5 \text{ g/cm}^3$ ermittelt. Bereits bei einer Tiefe von rd. 40 m ist eine deutliche Zunahme der Dichte auf rd. $\rho = 1,8 \text{ g/cm}^3$ bis $\rho = 1,9 \text{ g/cm}^3$ festzustellen. Die maximal im Labor ermittelten Dichten betragen $\rho > 2,0 \text{ g/cm}^3$.

Analog zur Darstellung in Bild 8 werden auch die labortechnisch bestimmten Wassergehalte (Trocknung bei $105 \text{ }^\circ\text{C}$) der Haldenbohrung am Standort Wintershall in Bild 9 dokumentiert. In der Horizontalbohrung ist prinzipiell eine abnehmende Tendenz des Wassergehalts mit zunehmender Bohrtiefe zu erkennen. Lokal sind auch in größeren Tiefen Ausreißer festzustellen; diese korrelieren z.T. mit den in der Bohrung B72/2014-WI in größeren Haldentiefen erkundeten alten Schüttoberflächen. Es wurden insgesamt vergleichsweise geringe Wassergehalte ermittelt, die bereits ab einer Bohrtiefe von $> 30 \text{ m}$ einen Wert von $w < 8 \%$ annehmen.

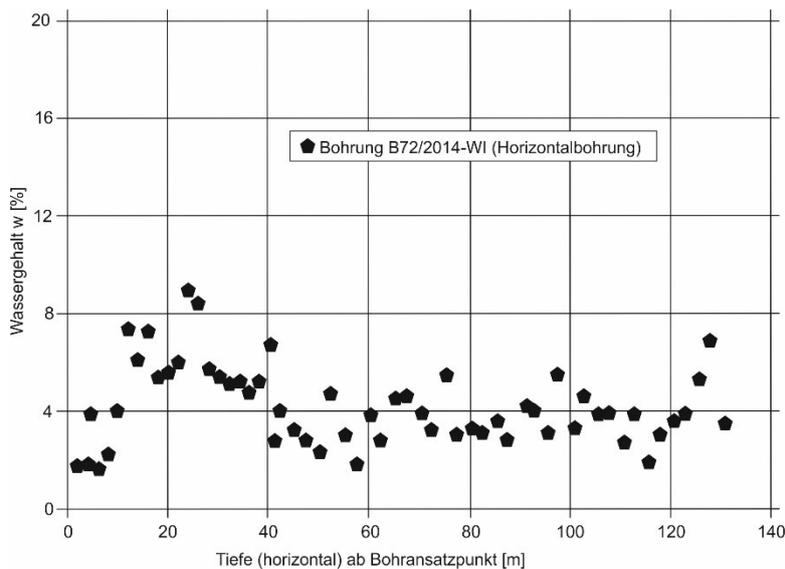


Bild 9: Wassergehaltsverteilung über die Bohrtiefe der Haldenbohrung B72/2014-WI an der Rückstandshalde Wintershall

An Kernproben der Bohrung B72/2014-WI wurden im Labor die horizontalen Durchlässigkeitsbeiwerte $k_{f,h}$ in unterschiedlichen Tiefen bestimmt. Die Durchlässigkeitsbeiwerte $k_{f,h}$ aus [U2.2] sind in Tabelle 8 zusammengestellt.

Bohrung	Tiefe [m]	horizontaler Durchlässigkeitsbeiwert $k_{f,h}$ [m/s]
B72/2014-WI	19	$1,1 \cdot 10^{-4}$
	122	$7,5 \cdot 10^{-11}$

Tabelle 8: Minimaler und maximaler horizontale Durchlässigkeitsbeiwert $k_{f,h}$ der Proben aus der Bohrung B72/2014-WI [U2.2]

Die in der Haldenbohrung 2014 an der Rückstandshalde Wintershall labortechnisch bestimmten Porositäten sind in Bild 10 über die Bohrtiefe dargestellt. Die Porosität n [Vol.-%] nimmt mit der Tiefe deutlich ab. Zudem ist in [U2.2] nachgewiesen worden, dass bei abnehmender Porosität der Anteil von Meso- und Mikroporen zunimmt, wohingegen der Anteil von Grobporen abnimmt. Der Anteil der Grobporen ist dabei für Strömungsprozesse im Haldenkörper.

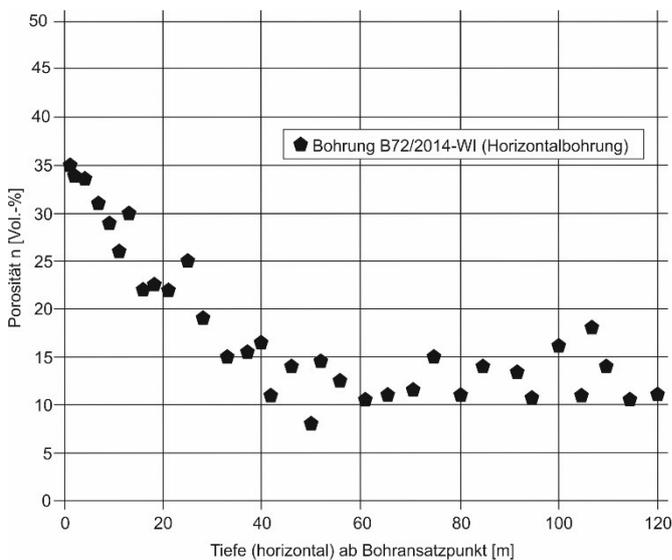


Bild 10: Porositätsverteilung über die Bohrtiefe der Haldenbohrung B72/2014-WI an der Rückstandshalde Wintershall

Ab einer Teufe von rd. 40 m ändern sich die Parameter Dichte, Wassergehalt und Porosität, mit Ausnahme an den nachfolgenden beschriebenen alten Haldenoberflächen, nur noch geringfügig.

In Tiefen von 100 m und 114 m wurden zwei alte Haldenoberflächen, auch als Schüttflächen bezeichnet, durchörtert. Aufgrund der wechselnden Schütthistorie der Halde Wintershall in den Jahren 1982 bis 1996 wurden im Bereich der Haldenbohrung mehrmals alte Haldenoberflächen mit längeren Liegezeiten und geringen vertikalen Überdeckungen überschüttet. Aufgrund der längeren Liegezeiten von bis zu 10 Jahren kam es zu Verkarstungsprozessen an der Haldenoberfläche. Zudem verläuft die Bohrung B72/2014-WI im Bereich der aktuellen Haldenauffahrt, sodass die Bereiche der alten Haldenoberflächen nur geringe vertikale Überschüttungshöhen aufweisen, woraus geringere lastabhängige Verdichtungsprozesse resultieren.

Die alten Haldenoberflächen sind somit an die hydraulisch aktive Zone des Haldenmantels bzw. untergeordnet an die Übergangszone angeschlossen. In der Haldenkernbohrung und den Laborversuchen äußert sich dies in Form von bereichsweise erhöhten Porositäten von bis zu $n = 18 \text{ Vol.-%}$ und Durchlässigkeitsbeiwerten von bis zu $k_f = 1,9 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$ an den erkundeten Schüttflächen. Ergänzende und im unmittelbar benachbarten Bereich durchgeführte Laborversuche lieferten deutlich geringere Porositäten und Durchlässigkeitsbeiwerte.

3.5.2 Chemische Zusammensetzung des Rückstandssalzes der Halde Wintershall

Gemäß [U2.5] ergibt sich für das Rückstandssalz der Halde Wintershall die folgende chemische Zusammensetzung:

- rd. 91 % Steinsalz (NaCl)
- rd. 5 % Kieserit ($\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$)
- rd. 1 % Anhydrit (CaSO_4)
- rd. 2 % Sylvin (KCl)
- rd. 1 % sonstige Minerale und Tone

3.5.3 Modellvorstellung am Standort Wintershall

Zunächst wird sachverständigenseits festgestellt, dass die Ergebnisse der Haldenkernbohrungen und Feld- bzw. Laborversuche aus den Jahren 1997 und 2013 am Standort Hattorf mit der Bohrung am Standort Wintershall im Wesentlichen bestätigt werden.

Die Halden an den Standorten Wintershall und Hattorf verfügten aufgrund der gemeinsam genutzten Lagerstätte und vergleichbaren Aufbereitungsverfahren sowie vergleichbarer Aufhaltungstechnologie und Haldentechnik über eine vergleichbare Zusammensetzung und

vergleichbare Eigenschaften des Rückstands. Es ist daher davon auszugehen, dass die Ergebnisse der Haldenbohrungen am Standort Hattorf und die daraus entwickelte Modellvorstellung grundsätzlich auch auf den Standort Wintershall übertragbar sind.

Die im Ergebnis der Auswertung der in den Jahren 1997 und 2013 durchgeführten Haldenbohrungen am Standort Hattorf [U1.1], [U2.1] entwickelte Modellvorstellung zur Ausbildung eines dichten Haldenkerns bei Rückstandshalden ist mit der Haldenkernbohrung am Standort Wintershall in 2014 bestätigt worden.

Es wurde in [U2.2] festgestellt, dass der Kompaktionsprozess und die damit in Zusammenhang stehenden hydrologischen Prozesse von überschütteten alten Haldenoberflächen (Schüttflächen) durch die Schütthistorie und die Kubatur des Haldenkörpers beeinflusst werden können.

Gemäß [U2.1] wurden die in der Tabelle 4 angegebenen Schwellenwerte für die Trockendichte ρ_d und die Porosität n den Übergangsbereichen Haldenmantel-Übergangszone und Übergangszone-Haldenkern zugeordnet; diese Werte grenzen somit per Definition die Bereiche Haldenmantel, Übergangszone und Haldenkern voneinander ab. Die in Tabelle 4 für den Standort Hattorf dokumentierten Grenzwerte für die Trockendichte ρ_d und die Porosität n für die Übergangsbereiche Haldenmantel-Übergangszone und Übergangszone-Haldenkern sind auf den Standort Wintershall übertragbar [U2.2].

In Tabelle 9 sind die erkundeten Haldenbereiche (Haldenmantel, Übergangszone und Haldenkern) gemäß [U2.2] für die Bohrung B72/2014 WI dokumentiert.

Bei einer Tiefe von 100 m und 114 m besitzt das Material einen hohen Porenanteil und größere Durchlässigkeitsbeiwerte, da es sich um zwei ehemalige Oberflächen mit langer Liegezeit handelt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die ehemaligen Haldenoberflächen nahezu bis an das Haldentop und somit in den hydraulisch aktiven Bereich des Haldenmantels und der Übergangszone reichen, da sie im Bereich der Haldenauffahrt liegen. Unmittelbar benachbarte Bereiche weisen deutlich geringere Porositäten und Durchlässigkeitsbeiwerte auf.

Bohrung Nr.	Haldenmantel			Übergangszone			Haldenkern *)		
	von [m]	bis [m]	Breite [m]	von [m]	bis [m]	Breite [m]	von [m]	bis [m]	Breite [m]
B72/2014-WI	0	42	42	> 42	92	50	> 92	131	39

*) erkundet ehemalige Haldenoberflächen bei 110 m und 114 m

Tabelle 9: Breite von Haldenmantel, Übergangszone und erbohrtem Haldenkern an der Halde Wintershall

Die Bereichseinteilung erfolgte gemäß den in Tabelle 4 angegebenen Schwellenwerten, wobei hier im Wesentlichen die Kriterien der Trockendichte ρ_d und der Porosität n zugrunde gelegt wurden.

Mit den o.g. Haldenbohrungen wurde, im Grenzbereich des bohrtechnisch Möglichen, der äußere Rand des Haldenkerns erbohrt. Es ist – wie bei der Halde Hattorf – auch hier davon auszugehen, dass die Trockendichten zum Haldeninneren hin weiter zunehmen und die Porositäten sowie Durchlässigkeiten zum Haldeninneren hin weiter abnehmen.

3.6 Haldenbohrung am Standort Zielitz

3.6.1 Haldenbohrung im Jahr 2008

Am Standort Zielitz wurden im Jahr 2008 zwei Vertikalbohrungen ausgeführt. Die Bohrungen und die durchgeführten Laborversuche dienten in erster Linie der Ermittlung von salzmechanischen Parametern und zur Beschreibung des visko-plastischen Verhaltens von Rückstandshalden.

Bohrung Nr.	Art	Haldenbereich
BK1/2008-ZI	Vertikalbohrung	Haldentop der Halde 2
BK2/2008-ZI BK2A/2008-ZI	Vertikalbohrung	Haldentop der Halde 2

Tabelle 10: Ausgeführte Haldenbohrung Zielitz im Jahr 2008

Die Bohrungen wurden bis in den Untergrund der Halde abgeteuft.

Das ausgeführte Bohrprogramm umfasste eine fotografische Dokumentation der Bohrkerne und Ansprache hinsichtlich ihrer Beschaffenheit. Darüber hinaus wurden folgende Feld- und Laborversuche durchgeführt:

- Geophysikalische Bohrlochmessungen
- Bodenmechanische Laborversuche

Die Ergebnisse der im Jahr 2008 durchgeführten Haldenbohrungen sowie der Feld- und Laborversuche bestätigen am Standort Zielitz eine Zunahme der Dichte mit zunehmender Tiefe von $\rho = 1,5 \text{ g/cm}^3$ im Haldenmantel bis $\rho = 2,0 \text{ g/cm}^3$ im Haldenkern. Außerdem ist eine Abnahme der Porosität von $n = 30 \text{ Vol.-%}$ im Haldenmantel auf $n = 10 \text{ Vol.-%}$ im Haldenkern mit zunehmender Tiefe festzustellen [U10].

Die o.g. Dichtezunahme bzw. Zunahme der Kompaktion in Abhängigkeit von der Tiefe wird durch die geophysikalischen Bohrlochmessungen in [U6] bestätigt. Außerdem wurde aufgrund hydrodynamischer Bohrlochmessungen eine Abnahme der Durchlässigkeitsbeiwerte in vertikaler Richtung von $k_f = 2,2 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$ im Haldenmantel auf $k_f = 3,6 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$ im Haldenkern mit zunehmender Tiefe beobachtet. In einer Tiefe von rd. 45 m unter Haldenoberkante der Bohrung BK1/2008-ZI wurde eine ausgeprägt wasseraufnehmende/führende Zone erkundet, die von dichten, trockenen Haldenbereichen unter- und überlagert wird.

Es ist zu berücksichtigen, dass die Halde Zielitz im Scheibenschüttverfahren aufgehaldet wurde und nicht im Flankenschüttverfahren wie beispielsweise die Halden Wintershall und Hattorf. Daher ist die teufenabhängige Dichtezunahme bzw. Porositätsabnahme geringer ausgeprägt als in den Bohrungen an den Standorten der Werra.

3.6.2 Chemische Zusammensetzung des Rückstandssalzes der Halde Zielitz

Gemäß [U4] ergibt sich für das Rückstandssalz der Halde Zielitz die folgende chemische Zusammensetzung:

- rd. 93 % Steinsalz (NaCl)
- rd. 1 % Kieserit ($\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$)
- rd. 1,6 % Anhydrit (CaSO_4)
- rd. 2 % Sylvin (KCl)
- rd. 2,4 % sonstige Minerale, Tone und Glühverlust

3.7 Zusammenfassung der Erkenntnisse zur Zonierung des Haldenkörpers von Rückstandshalden anhand der Haldenbohrungen und Haldendurchörterung mit begehbarbarem Stollen

Der Haldenkern ist der Bereich im Haldeninneren, in dem im Vergleich zum Haldenmantel und zur Übergangszone keine Strömungsprozesse stattfinden, und in dessen Haldenbasis damit auch keine für Auswirkungsprognosen relevante Restinfiltration eintritt.

Die Modellvorstellung zur Entstehung des dichten Haldenkerns bei Rückstandshalden wurde seit 1989 anhand einer Haldendurchörterung (Stollen) und auf Basis von insgesamt 9 Vertikal- und 5 Horizontalbohrungen an unterschiedlichen Standorten und in unterschiedlich alten Haldenbereichen entwickelt. Aus den Haldenbohrungen und den zahlreichen Feld- und Laborversuchen ergibt sich, dass der Haldenkörper von Rückstandshalden in Haldenmantel (außen), Übergangszone und Haldenkern (innen) zu unterteilt ist. Die Ausbildung des Haldenkerns ist dabei last- und zeitabhängig und wird wesentlich durch Kompaktion, Lösungsprozesse und Mineralumwandlungen beeinflusst. Wasserbewegungen im Haldenkörper finden bevorzugt im Haldenmantel und untergeordnet auch in der Übergangszone statt [U2.2].

Gemäß [U2.1] wurden folgende Kriterien für die Einteilung von Rückstandshalden in Haldenmantel, Übergangszone und Haldenkern festgelegt:

- Haldenmantel:	Trockendichte	$\rho = 1,2 \text{ g/cm}^3 - 1,8 \text{ g/cm}^3$
	Durchlässigkeit	$k > 1 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$
	Porosität	$n > 20 \text{ Vol.-%}$
- Übergangszone:	Trockendichte	$1,8 \text{ g/cm}^3 \leq \rho \leq 1,9 \text{ g/cm}^3$
	Durchlässigkeit	$1 \cdot 10^{-7} \text{ m/s} > k > 1 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}$
	Porosität	$10 \text{ Vol.-%} \leq n \leq 20 \text{ Vol.-%}$
- Haldenkern:	Trockendichte	$\rho > 1,9 \text{ g/cm}^3$
	Durchlässigkeit	$k < 1 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}$
	Porosität	$n < 10 \text{ Vol.-%}$

Mit dem aus den Haldenbohrungen, Feld- und Laborversuchen abgeleiteten Kriterium zur Durchlässigkeit ist der Haldenkern gemäß DIN 18130 nahezu wasserundurchlässig, und die Übergangszone als schwach durchlässig bis sehr schwach durchlässig eingestuft (siehe Tabelle 11).

k_f [m/s]	Bereich
unter 10^{-9}	nahezu völlig wasserundurchlässig
10^{-8} bis 10^{-9}	sehr schwach durchlässig
10^{-8} bis 10^{-6}	schwach durchlässig
10^{-6} bis 10^{-4}	durchlässig
10^{-4} bis 10^{-2}	stark durchlässig
über 10^{-2}	sehr stark durchlässig

Tabelle 11: Durchlässigkeitsbereiche im gesättigten Zustand in Abhängigkeit vom Durchlässigkeitsbeiwert gemäß DIN 18130

Bei allen Angaben zur Durchlässigkeit handelt es sich um die Durchlässigkeit des Rückstandssalzes bei vollständig gesättigten Verhältnissen. In den Bohrungen an den Halden Hattorf und Wintershall wurden aber stets ungesättigte Verhältnisse angetroffen, sodass die o.g. Werte und Grenzkriterien im Vergleich zu den realen Bedingungen im Haldenkörper weit auf der sicheren Seite liegen – die tatsächliche Durchlässigkeit ist geringer.

Im Folgenden werden die einzelnen Zonierungen von Rückstandshalden detailliert beschrieben.

Haldenmantel:

Der Haldenmantel beschreibt den randnahen Bereich des Haldenkörpers. Der Haldenmantel ist gemäß [U2] durch nachhaltig durchströmte Bereiche, geringe und schwankende Nass- und Trockendichten, vergleichsweise große Durchlässigkeiten und hohe Anteile von Porenwasser am Gesamtwasser gekennzeichnet. Im Haldenmantel finden Strömungsprozesse i.d.R. nicht flächig, sondern entlang bevorzugter Wegsamkeiten statt, die sich im löslichen Rückstand sukzessive unter Niederschlagseinfluss ausbilden. Die Einteilungskriterien für die Zonierung sind in der Tabelle 4 und die Abmessungen für die Halde in Hattorf und Wintershall sind in den Tabellen 5 und 9 dargestellt.

Übergangszone:

Die Übergangszone beschreibt den Bereich zwischen Haldenmantel und Haldenkern. In der Übergangszone kam es vereinzelt zu Lösungszutritten in die Bohrungen, die nur einen untergeordneten Anteil an den Gesamtabflüssen der Halde haben. Lösungsbeeinflusste Bereiche wechseln sich engräumig mit trockenen oder schwach feuchten Bereichen mit geringer Sättigung des Porenraums ab [U2.2].

Bei der Zonierung der Halde in Haldenmantel, Übergangszone und Haldenkern ist zu beachten, dass sich diese zeitabhängig verändern und der Übergangsbereich mit zunehmendem Alter des betreffenden Haldenabschnitts abnimmt. Wasserfließbewegungen und Lösungszutritte sind in der Übergangszone im Wesentlichen an ehemalige Haldenoberflächen mit langer Liegezeit, d.h. an lokale Wegsamkeiten gebunden. Mit zunehmender Kompaktion der Übergangszone werden Wegsamkeiten geschlossen und die Übergangszone wird zum Haldenkern.

Haldenkern:

Der Haldenkern beschreibt das Innere der Rückstandshalde. Der Haldenkern weist durchgängig hohe Trockendichten $\rho_d > 1,9 \text{ g/cm}^3$, die nahezu der Dichte von intaktem Steinsalz $\rho > 2,1 \text{ g/cm}^3$ entsprechen, sowie sehr geringe Durchlässigkeiten $k_f \leq 1 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}$ und Porositäten $n < 10 \text{ Vol.-%}$ auf. Gemäß [U2.2] führen die geringen Lösungsgehalte zu einer geringen Teilsättigung des Rückstandssalzes von $< 50 \text{ %}$. In Verbindung mit den sehr geringen Durchlässigkeiten an gesättigten Proben führt dies zu einer hydraulischen Inaktivität des Haldenkerns.

Im Haldenkern können Wasserzutritte und Fließbewegungen auf Grund des hohen Anteils von Kristallwasser ausgeschlossen werden [U2.2]. Der Gesamtwassergehalt wird in diesem Bereich maßgeblich durch Kristallwasser und nicht durch Porenwasser bestimmt. Die in den Bohrungen im Bereich des Haldenkerns ermittelten Porenwassergehalte liegen unter den Haftwassergehalten, d.h. unter dem Wassergehalt, der in den Poren entgegen der Schwerkraft gehalten werden kann [U2.2].

Die aus den zahlreichen Haldenbohrungen an unterschiedlichen Standorten gewonnenen Erkenntnisse werden durch die Untersuchungen am und im Stollen der Halde Bleicherode bestätigt. Es zeigen sich hier die gleichen Abhängigkeiten der untersuchten salzmechanischen und hydrogeologischen Parameter wie in den Haldenbohrungen. Zutritte von Haldenwässern wurden ausschließlich in einer randlichen Mantelzone ($\leq 50 \text{ m}$) der Halde am Stollenanfang und am Stollende festgestellt. Der Haldenkern ohne feststellbare Wasserbewegungen ist demnach dicht. Mit dem durch die gesamte Halde verlaufenden Stollen wird gezeigt, dass mechanische, chemische, hydrologische und hydrogeologische Erkenntnisse der Halden nicht nur lokal für den Bereich der einzelnen Haldenbohrungen gelten, sondern für den gesamten Querschnitt einer Halde.

Diese Erkenntnisse wurden zusätzlich durch die Befahrung des Stollens der Halde Bleicherode am 17.06.2021 bestätigt. Hydraulisch aktive Zonen wurden hierbei nur im äußeren Bereich des Stollens, mit einer Tiefe $< 80 \text{ m}$ ab Haldenböschung, d.h. im Bereich des Haldenmantels und der Übergangszone, festgestellt. Es sei auch an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass diese Beobachtungen an der Rückstandshalde Bleicherode bei geringeren Haldenhöhen von im Mittel 75 m und

nur lokal von maximal 100 m gemacht wurden. Der mittlere Stollenabschnitt und somit der Bereich des Haldenkerns war frei von Wasserwegsamkeiten sowie frei von wasserführenden Schichtgrenzen oder Wasser- bzw. Feuchteaustritten.

In Tabelle 12 sind alle durchgeführten Haldenbohrungen sowie die Haldendurchörterung an der Halde Bleicherode mit den zugehörigen Zonierungen in Haldenmantel, Übergangszone und Haldenkern zusammengestellt. Für die Einteilung wurden die o.g. Kriterien zur Trockendichte, Porosität und Durchlässigkeit angewendet. Alle Kriterien sind bei der Bewertung zu berücksichtigen. Schwankungsbereiche innerhalb der Bohrungen, beispielsweise bei der Durchlässigkeit, sind unter Zuhilfenahme der weiteren Labor- und Feldversuche sowie der Fotodokumentation und Bohrkernansprache zu bewerten.

Für die Bohrungen an der Rückstandshalde Neuhof-Ellers und an der Rückstandshalde Niedersachsen Riedel ist, aufgrund der geringen Datenlage, zur Zeit noch keine Einteilung in Haldenmantel, Übergangszone und Haldenkern möglich.

Bohrung Nr.	Haldenmantel			Übergangszone			Haldenkern			
	von [m]	bis [m]	Dicke [m]	von [m]	bis [m]	Dicke [m]	von [m]	bis (erbohrt) [m]	Dicke (erbohrt) [m]	
Haldendurchörterung Bleicherode *)	nördliches Portal			0	80	80	> 80	300 (Süd)	220	
	südliches Portal			380	300	80	> 300	80 (Nord)		
Hattorf	B97/2013-HA (vertikal)	0	36	36	> 36	62	26	> 62	100	38
	B98/2013-HA (vertikal)	0	68	68	> 68	78	10	> 78	102	24
	B99/2013-HA (horizontal)	0	42	42	> 42	68	26	> 68	101	33
	B100/2013-HA (horizontal)	0	52	52	> 52	97	45	> 97	100	3
	B104-2013-HA (horizontal)	0	42	42	> 42	102	60	> 100	117	17
	VB B1-80 m (vertikal)	0	55	55	> 55	64	10	> 64	80	16
	HB B1-80 m (horizontal)	0	25	25	> 25	55	30	>55	80	25

Fortsetzung siehe Seite 41

Fortsetzung:

Bohrung Nr.		Haldenmantel			Übergangszzone			Haldenkern		
		von [m]	bis [m]	Dicke [m]	von [m]	bis [m]	Dicke [m]	von [m]	bis (erbohrt) [m]	Dicke (erbohrt) [m]
Wintershall	B72/2014-WI (horizontal) **)	0	42	42	> 42	92	50	> 92	131	39
	BK1/2008-ZI ***)	0	59	59	> 59	104	45	> 104	118	14
Zielitz	BK2/2008-ZI ***)	0	52	52	> 52	109	57	> 109	129	20
	BK2A/2008-ZI	0	52	52	> 52	109	57	> 109	129	20

*) unter Berücksichtigung der Haldendurchörterung und der Haldenbefahrung; Haldenmantel und Übergangszzone konnten, aufgrund fehlender Laborergebnisse nicht eindeutig unterschieden werden; Einteilung sowohl vom südlichen und vom westlichen Stollenportal

***) erkundet Haldenflächen bei 110 m und 114 m

****) Einteilung in Haldenmantel, Übergangszzone und Haldenkern gemäß o.g. Kriterien ohne Berücksichtigung der Durchlässigkeit da nicht bestimmt

Tabelle 12: Zusammenstellung der Haldenbohrungen und der Haldendurchörterung Bleicherode mit der zugehörigen Zonierung

Zusammenfassend werden die Ergebnisse der umfangreichen Labor- und Feldversuche an den Halden Hattorf und Wintershall in den Bildern 11 (horizontale Bohrungen) und 12 (vertikale Bohrungen) dargestellt. Dabei wurden die Ergebnisse der Dichte- und Porositätsbestimmung überlagert. Die Ergebnisse der Wassergehaltsbestimmung sind der Übersichtlichkeit halber getrennt dargestellt. Die Bohrungen sind anhand der verschiedenen Formen der Datenpunkte zu unterscheiden. Aufgrund der Vielzahl an Laborergebnissen sind die Dichten aller Bohrungen in Graustufen, die Porositäten in unterschiedlichen Grüntönen und die Wassergehalte in unterschiedlichen Blautönen dargestellt.

Zusätzlich wurden die Bereiche der Schichtgrenzen zwischen Haldenmantel-Übergangszzone (HM-ÜZ) und zwischen Übergangszzone-Haldenkern (ÜZ-HK) grau hinterlegt. Diese Bereiche ergeben sich aus den in Tabelle 12 angegebenen Zonierungen für die Bohrungen in Hattorf und Wintershall. Zusätzlich werden diese durch die Bohrungen an der Halde Zielitz und der Haldendurchörterung Bleicherode in ihrer Größenordnung bestätigt.

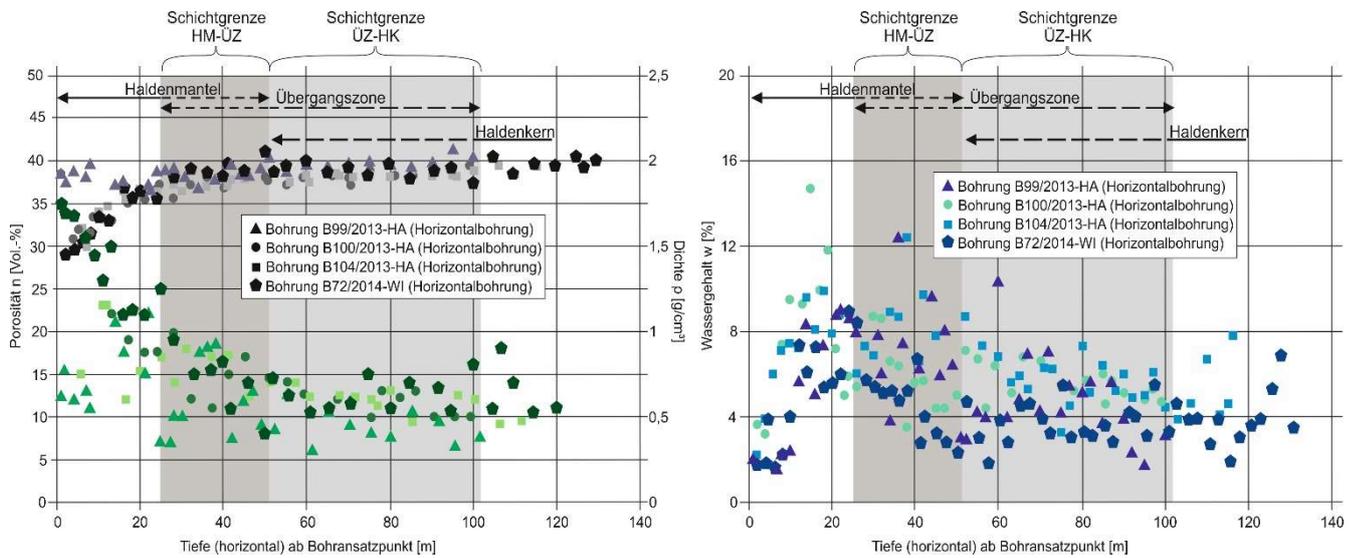


Bild 11: Zusammenstellung der Dichte- und Porositätsverteilungen sowie der Wassergehaltsverteilungen der Horizontalbohrungen an den Halden Hattorf und Wintershall

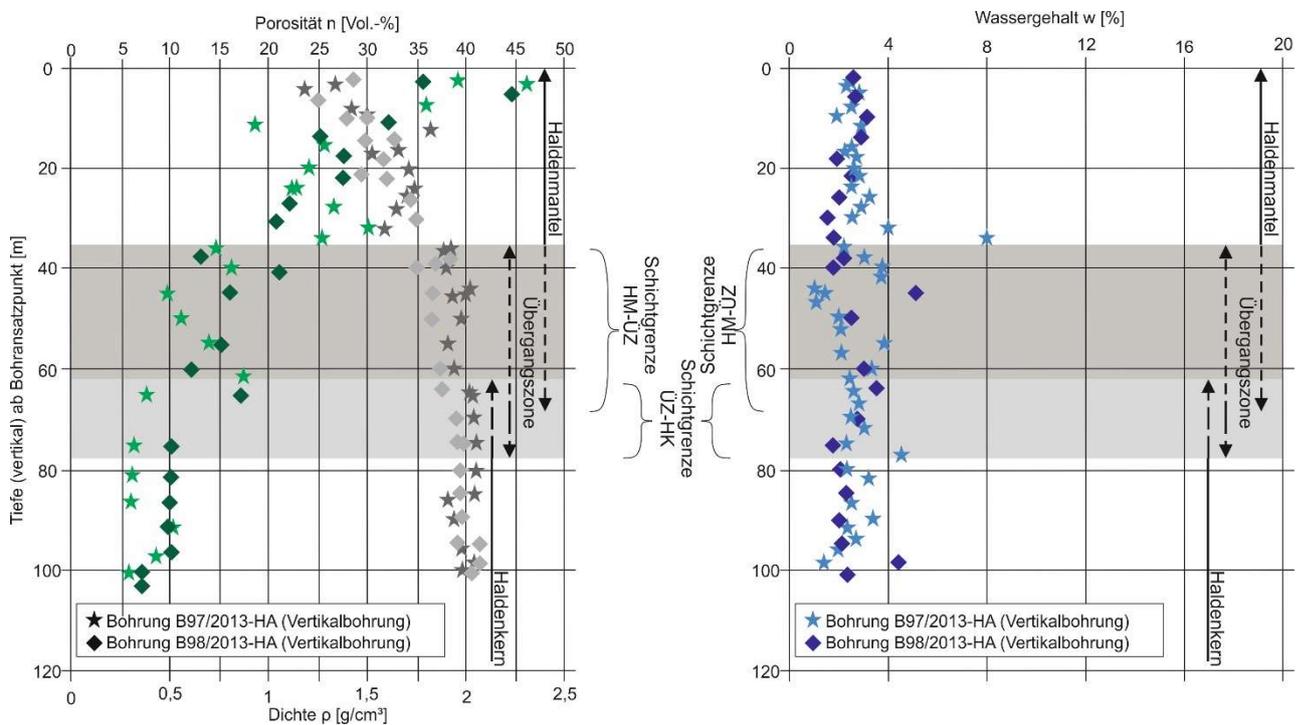


Bild 12: Zusammenstellung der Dichte- und Porositätsverteilungen sowie der Wassergehaltsverteilungen der Vertikalbohrungen an der Halde Hattorf

Gemäß [U2.1] und [U2.2] zeigen die Wassergehaltsbestimmungen mittels Ofentrocknung, dass die Haftwassergehalte grundsätzlich überschätzt werden und teils deutlich von den Wassergehalten abweichen, die mittels Karl-Fischer-Titration bestimmt wurden. Die Bestimmung des Wassergehaltes mittels Ofentrocknung ist somit konservativ und liegt auf der sicheren Seite, weil der relevante Wassergehalt überschätzt wird.

Für eine vollumfängliche Bewertung der Ergebnisse der Haldenbohrungen, Labor- und Feldversuche wurden daher in Bild 13 die Wassergehalte nach Karl-Fischer-Titration in den Horizontal- und Vertikalbohrungen an den Rückstandshalden Hattorf und Wintershall dokumentiert.

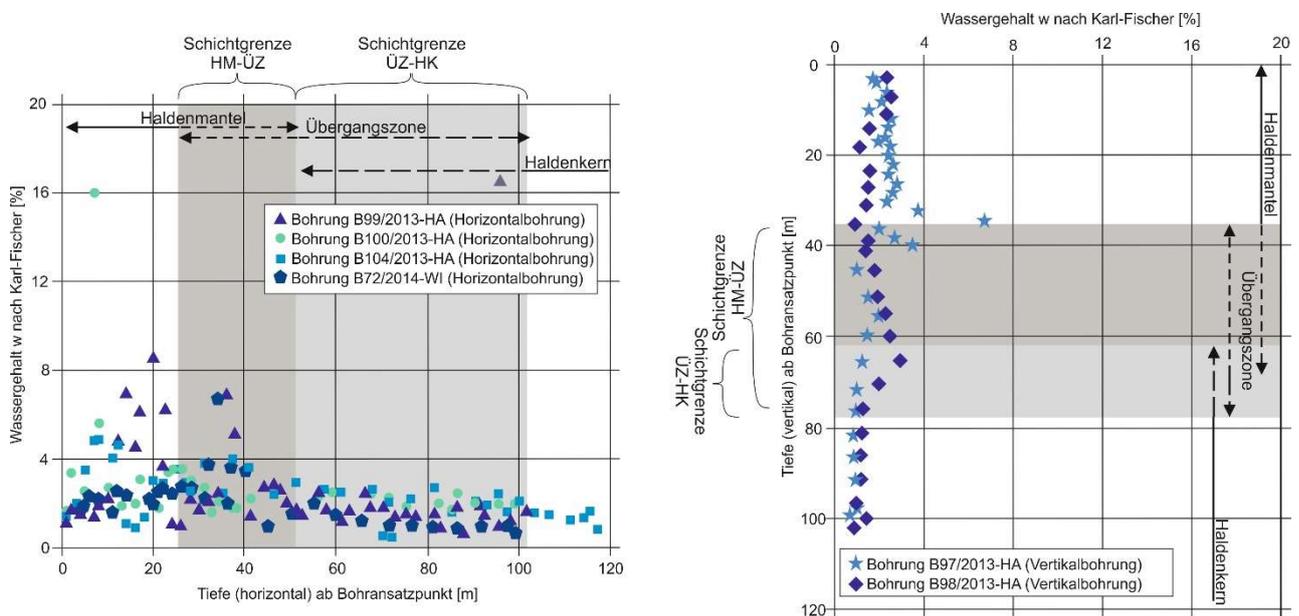


Bild 13: Zusammenstellung der Wassergehaltsverteilungen (Karl-Fischer-Titration) der Horizontal- und Vertikalbohrungen an den Halden Hattorf und Wintershall

Auch in den in Bild 13 dargestellten Wassergehalten nach Karl-Fischer-Titration ist eine Abnahme der Wassergehalte mit zunehmender Tiefe erkennbar. Die nach Karl-Fischer bestimmten Wassergehalte liegen in allen Bohrungen unter den Wassergehalten, die durch Trocknung bei 105 °C bestimmt wurden (Bild 11 und Bild 12).

Die Haldenzonierungen in Tabelle 12 ist durch die Feld- und Laborversuche belegt.

Ergänzend zu den umfangreichen Erkundungen, Labor- und Feldversuche im Zuge der Haldenbohrungen an den Rückstandshalden Niedersachsen-Riedel, Neuhof-Ellers, Bleicherode, Hattorf,

Wintershall und Zielitz wurden auch die chemischen Zusammensetzungen der Rückstandshalden untersucht und dokumentiert. Ziel ist, Gemeinsamkeiten bzw. Unterschiede im Chemismus der einzelnen Halden zu detektieren und eine Übertragbarkeit von Erkenntnissen hinsichtlich eines Haldenmodells zu prüfen. Die chemische Zusammensetzung aller Rückstandshalden ist in der Tabelle 13 gegenübergestellt.

	Steinsalz NaCl	Anhydrit CaSO₄	Sylvin KCl	Kieserit MgSO₄ · H₂O	Carnallit KCl · MgCl₂ · 6 H₂O
Niedersachsen-Riedel	95 %	2 %			1 %
Neuhof-Ellers	94 %	2 %	1 %		
Bleicherode	70 %	25 %			
Hattorf	91 %	2 %	1 %	5 %	1 %
Wintershall	91 %	1 %	2 %	5 %	
Zielitz	93 %	1,6 %	2 %		

Die unlöslichen Anteile wurden in der Tabelle nicht angegeben

Tabelle 13: Zusammenstellung der chemischen Zusammensetzung der Rückstandshalden

Aus Tabelle 13 wird ersichtlich, dass alle Rückstandshalden als Hauptbestandteil Steinsalz (NaCl) aufweisen. Der Hauptbestandteil beträgt, ausgenommen an der Halde Bleicherode, > 90 %. Es ist zu berücksichtigen, dass die Halde Bleicherode zwischen 1965 und 1981 aufgehaldet wurde. Dabei wurde die Zusammensetzung der Rückstandshalde über die gesamte Aufhaldungszeit durch Veränderungen der Rohsalzaufbereitung geprägt.

Die Nebenbestandteile der dokumentierten Halden sind ebenfalls vergleichbar und bestehen aus Anhydrit (CaSO₄) und Sylvin (KCl). An den Halden Hattorf und Wintershall bestehen rd. 5 % des Gesamtrückstands aus Kieserit (MgSO₄ · H₂O). Im Rückstandssalz der Halde Niedersachsen-Riedel und der Halde Hattorf sind geringfügige Beimengungen von Carnallit (KCl · MgCl₂ · 6 H₂O) von rd. 1% enthalten. Alle Rückstandshalden haben geringe Anteile von unlöslichen Material – vornehmlich Tone – von 1 % bis 3 %. Diese sind in den Angaben zur mineralogischen Zusammensetzung z. T. mit der Angabe für Anhydrit zusammengefasst (siehe Kapitel 3.4.3, „CaSO₄ u.a.“).

Insgesamt ist die chemische Zusammensetzung an allen Halden – ausgenommen der Halde Bleicherode – vergleichbar. Dies lässt auf ähnliche Eigenschaften des Rückstands und damit vergleichbare Prozesse innerhalb der untersuchten Haldenkörper, insbesondere hinsichtlich

Verdichtungs- und Alterungsprozesse, schließen. Bestätigt wird dies auch durch die übereinstimmenden Erkenntnisse aus den Haldenkernbohrungen hinsichtlich Porosität, Dichte, Durchlässigkeit etc. Die Modellvorstellung zur Ausbildung des dichten Haldenkerns sowie die Zonierung von Rückstandshalden in Haldenmantel, Übergangszone und Haldenkern ist grundsätzlich übertragbar auf alle im gegenständlichen Sachverständigen-Gutachten dokumentierten Rückstandshalden. Dies gilt auch für die Halde Bleicherode mit einem im Vergleich zu den übrigen Rückstandshalden geringerem NaCl-Anteil.

4 Geophysikalische Untersuchungen an Salzhalden

4.1 Grundlagen und Untersuchungsmethodik

Gemäß [U11] und [U12.1] wurden von 2012 bis 2017 Untersuchungen hinsichtlich tomographischer und petrophysikalischer Eigenschaften von Kalirückstandshalden in Zusammenarbeit mit der Technischen Universität Berlin (TU Berlin) durchgeführt. Ziel war es, Prognosen hinsichtlich Langzeitstabilität, Materialverteilung und Wasserdynamik von Rückstandshalden zu erarbeiten.

Im Zuge der Untersuchungen an den Kalirückstandshalden Bleicherode und Sondershausen in Thüringen wurden gemäß [U11] und [U12.1] folgenden Verfahren eingesetzt:

- Erkundungsseismik zur Bestimmung von Verwerfungen, Störungszonen, Klüften, Dichteunterschieden und seismischer Geschwindigkeitsanomalien
- Geoelektrik zur Erkundung von Leitfähigkeiten und Strukturunterschieden sowie zum Monitoring von Flüssigkeiten im Untersuchungsbereich
- Georadar zur Erkundung von Schichtdicken und Strukturveränderungen
- Nukleare Magnetische Resonanz (NMR)
- Spektral Induzierte Polarisation (SIP)

Mit Hilfe der o.g. Methoden wurden geophysikalische Kennwerte an den Kalirückstandshalden ermittelt und mit Kennwerten an gewonnenen Rückstandssalzproben verglichen (Dichte, Steifigkeit, Wassergehalt, Korngrößenverteilung) [U11]. Dafür wurden an festem und lockerem Haldenmaterial im Labor der TU Berlin die entsprechenden salzmechanischen Parameter sowie die mineralogische Zusammensetzung des Rückstandssalzes bestimmt [12.1].

Außerdem sind in [U12.1] 1 m hohe Säulenversuche mit Rückstandssalz dokumentiert. An insgesamt 11 Säulen wurden elektrische Tomografiemessungen durchgeführt. Schwerpunkt der Messungen war, den Einfluss des Lösungsverhaltens von Salz durch Zugabe von destilliertem Wasser zu untersuchen, um trockene und nasse Zonen im Salz durch geoelektrische Messungen zu

erkennen. Trockene Zonen weisen eine geringere elektrische Leitfähigkeit auf als Zonen mit hohem Wassergehalt. Die Messungen zeigen, dass bei vorheriger Zugabe von Wasser an der Oberkante des Behälters der elektrische Widerstand entlang der Säule zunächst konstant ist und über die Zeit von oben nach unten abnimmt [U12.1]. Hierbei ist über den zeitlichen Verlauf ein Austrocknen des Probenmaterials im oberen Drittel zu beobachten, das mit der Zunahme des elektrischen Widerstands korreliert. Wasserführende bzw. feuchte Zonen weisen dahingegen einen geringen elektrischen Widerstand und somit eine gute elektrische Leitfähigkeit auf. Rückschlüsse auf Dichtezunahmen bzw. eine Abnahme des Porenraums mit zunehmender Tiefe können aus den Versuchen nicht gezogen werden. Dies ist auf den Versuchsaufbau und die geringe Säulenhöhe bzw. Überdeckung innerhalb des Versuchsstandes zurückzuführen.

Für eine großräumige Messung an der Rückstandshalde Bleicherode wurden schließlich seismische und geoelektrische Messungen durchgeführt [U12.1]. Insgesamt wurden 12 geoelektrische Profile bis in eine Tiefe von 100 m und 8 seismische Profile bis in eine Tiefe von 50 m erstellt. In den seismischen Profilen sind deutlich zwei verschiedene Schichten mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten der seismischen Wellen zu erkennen. Bereiche mit höherer Dichte zeigen dabei erhöhte Geschwindigkeiten auf [U12.1].

Das Ergebnis der umfangreichen Untersuchungen in [U11] und [U12.1] ist, dass gemäß [U2.5] die seismischen Geschwindigkeiten und spezifischen elektrischen Widerstände Rückschlüsse auf Zonen mit verringerter Festigkeit, erhöhter Durchlässigkeit bzw. erhöhter Wassergehalte zulassen. Mittels Seismik und Geoelektrik können somit Struktur- und Materialeigenschaften an Rückstandshalden erkundet und Schwächezonen identifiziert werden.

4.2 Geophysikalische Erkundungen an der Halde Hattorf

Im Sommer und Herbst 2020 wurden zur Bestätigung der Modellvorstellung zur Ausbildung des dichten Haldenkerns geophysikalische Untersuchungen an der Bestandshalde Hattorf durchgeführt. Im Bereich der horizontalen Haldenbohrung B99/2013 HA und der vertikalen Haldenbohrung B98/2013 HA wurde der Schnitt B-B aus [U2.1] für die geophysikalischen Untersuchungen festgelegt (siehe Bild 14).

Der Schnitt B-B erfasst den kompletten Querschnitt durch die Bestandshalde Hattorf.

Es wurden zwei Messkampagnen am Schnitt B-B durchgeführt. Dabei wurden vom 27.07.2020 bis 31.07.2020 und vom 05.11.2020 bis 09.11.2020 geoelektrische und seismische Messungen vorgenommen. Für die geoelektrischen Messungen wurden 160 Elektroden mit einem

Die zweite Messkampagne wurde deckungsgleich zur ersten Messkampagne aufgebaut, sodass die zweite Messkampagne die Datenbasis der ersten Messkampagne ergänzt. Auf Basis beider Messkampagnen ergeben sich aussagekräftige Ergebnisse. Außerdem wurden die Ergebnisse der Messkampagnen an der Halde Hattorf in 2020, nach Durchführung einer weiteren Messkampagne an der Halde Wintershall 2021, überprüft und nach einem Reprozessing aktualisiert [U2.5].

Gemäß [U2.5] konnte bei den seismischen Messungen am Standort Wintershall im Juni 2021 ein geringeres Noise- bzw. Hintergrundrauschlevel verzeichnet werden. Große Noise- bzw. Hintergrundrauschlevel bei den Messungen an der Rückstandshalde Hattorf führten zu einer geringeren Datenbasis für die Ergebnisse der seismischen Untersuchungen. Auf Grundlage der Messungen am Standort Wintershall, desselben Messprinzips an beiden Standorten sowie der gleichen Zusammensetzung und Beschaffenheit beider Halden des Werkes Werra war eine Wellenfeld- und Frequenzanalyse des Nutzsignals möglich [U2.5]. Somit konnten aus den ursprünglichen seismischen Messungen am Standort Hattorf weitere Daten durch Herausfiltern des Hintergrundrauschens nutzbar gemacht und im Sinne eines Reprozessings in der Bewertung der geophysikalischen Untersuchungen berücksichtigt werden.

Im gegenständlichen Sachverständigen-Gutachten Nr. IK2014/01 sind für die seismischen Messungen nur die Ergebnisse nach dem Reprozessing dokumentiert. Eine umfangreiche Dokumentation und Erläuterung aller Messergebnisse ist in [U2.5] enthalten.

4.2.1 Ergebnisse der geoelektrischen Messungen

Bei der geoelektrischen Messung wird mittels Elektroden ein räumliches Potentialfeld erzeugt, das durch die Leitfähigkeitsstrukturen/-eigenschaften im Untersuchungsraum beeinflusst wird. Durch Messung des Potentialverlaufs kann die räumliche Verteilung des scheinbaren spezifischen elektrischen Widerstands in Ωm ermittelt werden. Der scheinbare spezifische elektrische Widerstand wird u.a. durch die Dichte und Feuchte des Materials im Untersuchungsraum beeinflusst [U2.5].

Entsprechend der Aufgabenstellung der geoelektrischen Messungen war die Zielsetzung, den zonierten Aufbau und insbesondere die Existenz eines dichten Haldenkerns der Bestandshalde nachzuweisen [U2.5]. Hierfür waren unterschiedliche Gewichtungen der horizontalen bzw. geschichteten scheinbaren spezifischen Widerstände und der vertikalen bzw. isotropen scheinbaren Widerstände erforderlich. Hieraus konnte die Verteilung des scheinbaren spezifischen elektrischen Widerstands im Schnitt B-B der Rückstandshalde Hattorf abgeleitet werden (Bild 15). Zusätzlich

ist die Beschüttung der Halde von 2011 bis November 2020 in Form von verschiedenfarbigen Haldenkonturlinien sowie die Haldenbohrungen B98/2013 HA und B99/2013 HA dokumentiert.

Im Bereich des westlichen Haldenfußes, d.h. im Bereich der für die Haldenerweiterung Hattorf bereits hergestellten hydraulischen Trennung, konnten nicht ausreichend Daten erfasst werden, sodass für einen Bereich von rd. 50 m horizontal zum Haldenfuß keine Aussagen zu den scheinbareren spezifischen elektrischen Widerständen getroffen werden können.

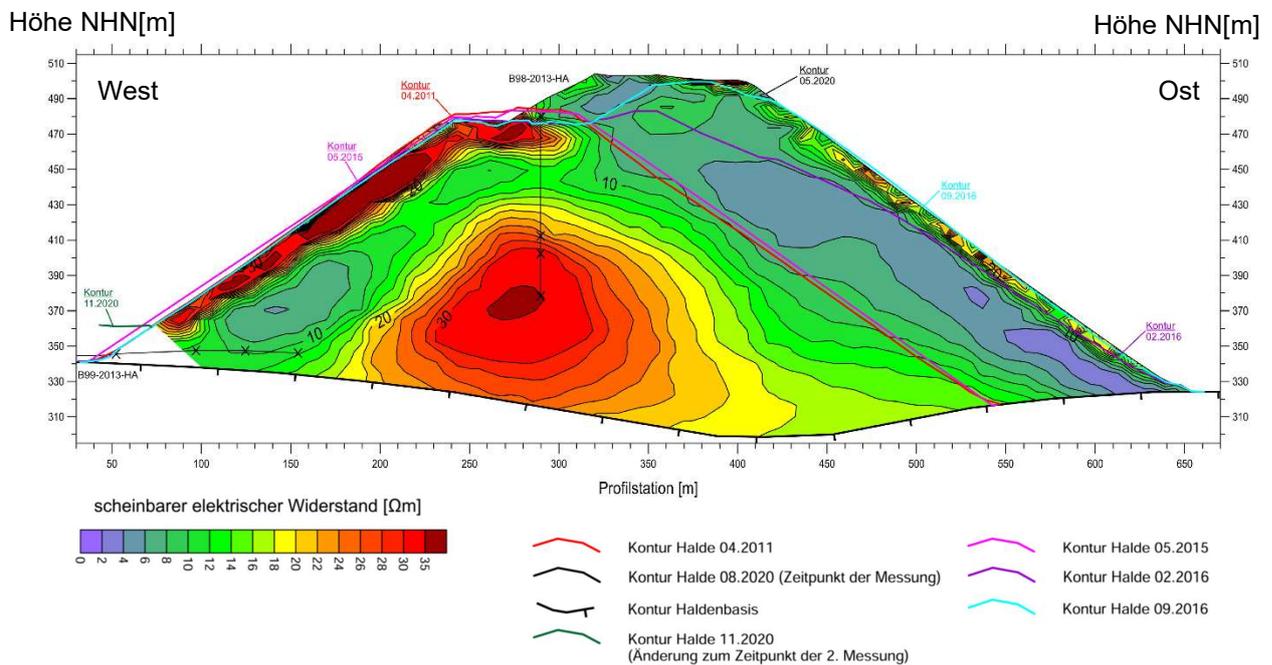


Bild 15: Verteilung des scheinbaren spezifischen elektrischen Widerstands gemäß [U2.5]

Im Schnitt B-B ist im Wesentlichen eine deutliche Zunahme des scheinbaren spezifischen elektrischen Widerstands (im Folgenden auch als elektrischer Widerstand bezeichnet) zum Haldeninneren zu beobachten. Im Bereich der westlichen Haldenflanke wurden oberflächennah ebenfalls hohe elektrische Widerstände gemessen. Diese lassen sich auf Krustenbildung und Bereiche mit geringem Wassergehalt zurückführen. Im Bereich der östlichen Haldenflanke ist dieses Phänomen nur lokal und mit geringer Ausprägung zu beobachten. Das ist auf die geringeren Liegezeiten des Rückstandssalzes an der Ostseite zurückzuführen. Ein geringerer Wassergehalt ergibt sich aus Verdunstung an der Haldenoberfläche und aus Versickerung in tieferliegende Haldenmantelbereiche. Das zeigt sich auch in der horizontalen Haldenbohrung B99/2013 HA, hier wurden

oberflächennah, also von 0 m bis rd. 10 m Bohrtiefe, Wassergehalte von max. 3 % bestimmt. Erst bei einer Bohrtiefe von 15 m steigt der Wassergehalt auf rd. 9 %.

Die oberflächennahen Bereiche mit teils erhöhten elektrischen Widerständen werden an beiden Haldenflanken von Bereichen mit geringen elektrischen Widerständen unterlagert. An der Ostflanke betragen die elektrischen Widerstände teilweise nur 2 Ωm bis 4 Ωm . An der Westflanke liegen die geringsten elektrischen Widerstände minimal bei 4 Ωm bis 6 Ωm . Geringe elektrische Widerstände lassen Rückschlüsse auf wasserführende Bereiche zu. Zum Inneren der Halde und zur Haldenbasis hin nehmen die elektrischen Widerstände wieder signifikant zu. Maximal wurde ein elektrischer Widerstand von 35 Ωm gemessen.

Der in Bild 14 dargestellte „zwiebelartige“ Verlauf der elektrischen Widerstandsverteilung ist gemäß [U2.5] dem Auflösungsvermögen der Messungen, dem Inversionsalgorithmus sowie der ausgeprägten Topographie geschuldet. In der Realität ist ein glockenförmiger bzw. trapezförmiger Verlauf der elektrischen Widerstandsverteilung ohne Abnahme der elektrischen Widerstände zur Basis hin zu erwarten.

Gemäß [U2.5] kennzeichnen Bereiche niedriger elektrischer Widerstände bzw. die in den geophysikalischen Messungen detektierten haldenoberflächennahen Bänder niedriger elektrischer Widerstände den Hauptströmungsverlauf des Haldenwassers.

Die Zunahme der elektrischen Widerstände zum Haldeninneren bzw. zur Haldenbasis deuten darauf hin, dass keine frei beweglichen Elektronen vorhanden sind [U2.5]. Frei bewegliche Elektronen sind im Sinne einer hydraulischen Verbindung des Porenwasser Voraussetzung zum Ingangsetzen von Strömungsprozessen. Die Ergebnisse der geophysikalischen Messungen stellen einen physikalisch eindeutigen Beleg für einen trockenen Haldenkern dar, der frei von zirkulierenden Haldenwässern ist [U2.5].

Auffällig ist, dass die elektrischen Widerstände im Bereich der Westflanke größer sind als an der Ostflanke. Dies ist auf die Schütthistorie der Halde Hattorf zurückzuführen. Die Ostflanke wurde erst in den Jahren 2015 bis 2016 beschüttet, wohingegen die Westflanke gemäß [U2.1] bereits zwischen 1992 und 1996 voll beschüttet war und in den Folgejahren bis 2020 nur geringfügige Konturausgleiche erfolgten. Hieraus lassen sich zum einen weiter fortgeschrittene Lösungs- und Alterationsprozesse an der Oberfläche der Westflanke (Bereiche mit großen elektrischen Widerständen) sowie zum anderen, aufgrund der geringeren Liegezeiten und damit einhergehender geringerer Verdichtung, ausgeprägtere Haldenmantel- und Übergangszonen an der Ostflanke (Bereiche mit kleineren elektrischen Widerständen) ableiten.

Auch im Bereich des Haldentops wurden geringere elektrische Widerstände gemessen, die sowohl auf fortlaufende Ausgleichsschüttungen und damit einhergehende geringere Setzungen sowie Verdichtung des Rückstandssalzes als auch auf einen höheren Niederschlagseintrag am Haldentop zurückzuführen sind.

In der Literatur werden unterschiedliche elektrische Widerstände für Salzgestein genannt. Gemäß [U2.5] wird für feuchtes, gewachsenes Steinsalz als unterer Grenzwert ein elektrischer Widerstand von $30 \Omega\text{m}$ ausgewiesen, für Salzlauge von $< 0,1 \Omega\text{m}$. Der elektrische Widerstand kann damit in der Rückstandshalde, die quasi aus einem gleichen Grundmaterial besteht, anhand dieser Sensitivität von der Feuchte als qualitativer Marker für die Verteilung der Porenwassergehalte und die durch sie bestimmten Strömungsprozesse verwendet werden. Gemäß [U2.1] wurden an der Rückstandshalde Hattorf in der Bohrung B98/2013-HA im Jahr 2013 die folgenden elektrischen Widerstände für die einzelnen Haldenbereiche mittels Induktions-Log gemessen:

Haldenmantel:	mittlerer elektrischer Widerstand = $6 \Omega\text{m}$ bis $8 \Omega\text{m}$
Übergangszone:	mittlerer elektrischer Widerstand = $8 \Omega\text{m}$ bis $9 \Omega\text{m}$
Haldenkern:	mittlerer elektrischer Widerstand = $8 \Omega\text{m}$ bis $9 \Omega\text{m}$

In der Bohrung B98/2013-HA bei einer Tiefe von 37 m bis 43 m unter Bohrersatzpunkt wurden lokal elektrische Widerstände von $15 \Omega\text{m}$ bis $30 \Omega\text{m}$ im Induktions-Log gemessen.

In Tabelle 14 sind den in [U2.1] erkundeten Tiefenlagen von Haldenmantel, Übergangszone und Haldenkern die in [U2.5] dokumentierten elektrischen Widerstände gegenübergestellt. Der Übersichtlichkeit halber wurde nur die Tiefenlage der Schichtgrenzen zwischen Haldenmantel (HM) und Übergangszone (ÜZ) bzw. zwischen Übergangszone (ÜZ) und Haldenkern (HK) sowie die erreichte Bohrtiefe dargestellt.

Bohrung Nr.	HM - ÜZ		ÜZ – HK		erreichte Bohrtiefe	
	Tiefe [m]	elektrischer Widerstand [Ω m]	Tiefe [m]	elektrischer Widerstand [Ω m]	Tiefe (erbohrt) [m]	elektrischer Widerstand [Ω m]
B98/2013-HA	68	24	78	30	102	35
B99/2013-HA **)	42	12 *)	68	10 *)	101	12

*) Anomalie aufgrund der geringen Datenbasis am östlichen Haldenfuß

***) horizontale Bohrung

Tabelle 14: Dicke von Haldenmantel, Übergangszone und erbohrtem Haldenkern an der Halde Hattorf [U2.1] mit den gemessenen elektrischen Widerständen gemäß [U2.5]

Im Bereich der Westflanke liegt eine geringere Datenbasis bei den geoelektrischen Messungen vor. Diese ist auf die bereits errichtete hydraulische Trennung zwischen Bestandshalde (Untersuchungsbereich) und Haldenerweiterung zurückzuführen. Hieraus können mögliche Anomalien in den prozessierten/ermittelten Verteilungen der geoelektrischen Messungen am westlichen Haldenfuß resultieren.

Die in der horizontalen Bohrung B99/2013-HA detektierte Haldenzonierung und Unterteilung in Haldenmantel, Übergangszone und Haldenkern kann anhand der geoelektrischen Messungen und unter Berücksichtigung der in Kapitel 4.2.2 vorgestellten Ergebnisse der seismischen Untersuchungen grundsätzlich bestätigt werden. Die gemessenen elektrischen Widerstände gemäß [U2.5] liegen dabei in der Bandbreite bzw. über den gemäß [U2.1] bei der Bohrung B98/2013-HA in gleicher Haldenzone mittels Induktions-Log gemessenen elektrischen Widerständen.

Die in der vertikalen Bohrungen B98/2013-HA detektierten Haldenzonierung kann nicht durch die geoelektrischen Messungen bestätigt werden. Die in [U2.5] dokumentierten elektrischen Widerstände liegen weit über den gemäß [U2.1] in der Bohrung B98/2013-HA in gleicher Haldenzone mittels Induktions-Log gemessenen elektrischen Widerständen. Hier ist davon auszugehen, dass die Ausbildung des Haldenkerns in den Jahren zwischen 2013 (Bohrung) und 2020 (geoelektrische Messungen) mit der Beschüttung der Ostflanke in den Jahren 2015/2016 weiter vorangeschritten ist und die Grenzen zwischen Haldenkern-Übergangszone und Übergangszone-Haldenmantel infolge des last- und zeitabhängigen Haldenkörperverhaltens nun in geringerer Tiefe unter dem damaligen Bohransatzpunkt liegen.

4.2.2 Ergebnisse der seismischen Messungen

Bei der seismischen Messung werden künstlich erzeugte seismische Wellen und Wellenfelder im Untersuchungsraum gemessen. Aussagekräftige Parameter sind dabei die Wellenausbreitung und die Wellengeschwindigkeit, die durch Dichte, Kompressions- und Schubmodul sowie Porosität des Baugrunds beeinflusst werden. Außerdem wird die Ausbreitung seismischer Wellen im Untersuchungsraum durch Reflexion und Refraktion z.B. an Schichtgrenzen beeinflusst. Die gegenständlichen Messungen wurden in der Methodik so konfiguriert, dass die erreichte Eindringtiefe das Haldenprofil erfasst.

Im Modell wird die Verteilung der Kompressionswellengeschwindigkeit ermittelt und in Form von Konturplots dargestellt (Bild 16) [U2.5]. Zusätzlich sind die Beschüttung der Halde von 2011 bis November 2020 in Form von verschiedenfarbigen Haldenkonturlinien und die Haldenbohrungen B98/2013 HA und B99/2013 HA dokumentiert.

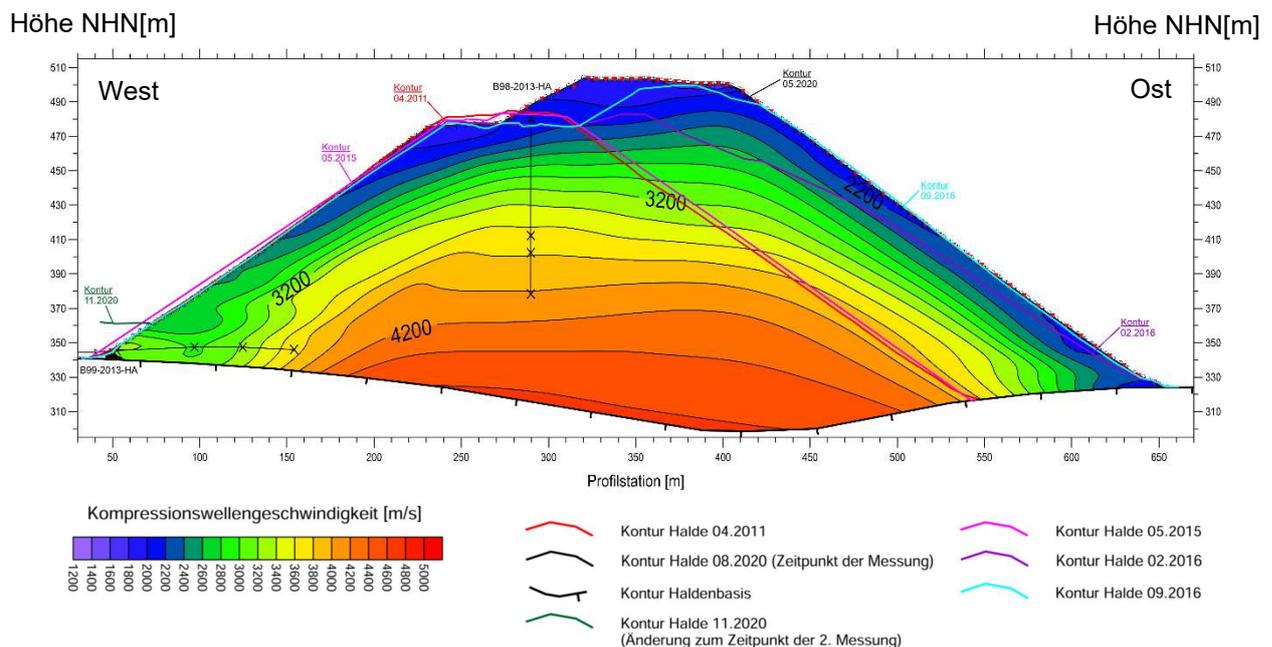


Bild 16: Verteilung der Kompressionswellengeschwindigkeit gemäß [U2.5]

Im gesamten Haldenkörper wurde eine hohe Grundgeschwindigkeit der Kompressionswellen gemessen. Insgesamt weist eine hohe Grundgeschwindigkeit auf weitestgehend kompaktiertes Material mit nahezu Festgesteinscharakter hin [U2.5]. Oberflächennah wurden Kompressionswellengeschwindigkeiten von 1.800 m/s gemessen; im Inneren der Rückstandshalde wurden Kompressionswellengeschwindigkeiten von 4.600 m/s gemessen. Eine Zunahme der Kompressionswellen-

geschwindigkeiten zum Haldeninneren hin ist in Bild 16 sowohl horizontal als auch vertikal eindeutig zu erkennen.

Dabei werden im Mantelbereich der Westflanke größere Kompressionswellengeschwindigkeiten gemessen als an der Ostflanke. Dies ist auf die Schütthistorie der Halde Hattorf zurückzuführen. Die Ostflanke wurde erst in den Jahren 2015 bis 2016 beschüttet, wohingegen die Westflanke gemäß [U2.1] bereits zwischen 1992 und 1996 voll beschüttet war und in den Folgejahren bis 2020 nur geringfügige Konturausgleiche erfolgten. Hieraus ist eine größere Kompaktion an der älteren, westlichen Haldenflanke abzuleiten.

Sowohl an der Ostflanke als auch am Haldentop fanden seit 2016 kontinuierlich Konturausgleichsschüttung statt. Diese Bereiche zeigen geringere Kompressionswellengeschwindigkeiten auf, was mit einer geringeren Kompaktion und geringeren Dichten einhergeht.

Gemäß [U2.5] konnte anhand der angepassten und optimierten Inversionsparameter das Ergebnis der seismischen Messungen signifikant verbessert werden. Inversionsartefakte konnten reduziert, aber nicht gänzlich vermieden werden. Insbesondere im Bereich des östlichen und untergeordnet im Bereich des westlichen Haldenfußes kommt es aufgrund des starken topographischen Einflusses und der geringeren Datendichten an den Rändern des Untersuchungsraums zu Inversionsartefakten bzw. Randeffekten. Basierend auf den in [U2.5] beschriebenen Erfahrungen mit geophysikalischen Untersuchungen an Rückstandshalden lässt sich der idealisierte Verlauf (gestrichelte Linien) der Kompressionswellengeschwindigkeiten im Bereich des westlichen und östlichen Haldenfußes ableiten (Bild 17).

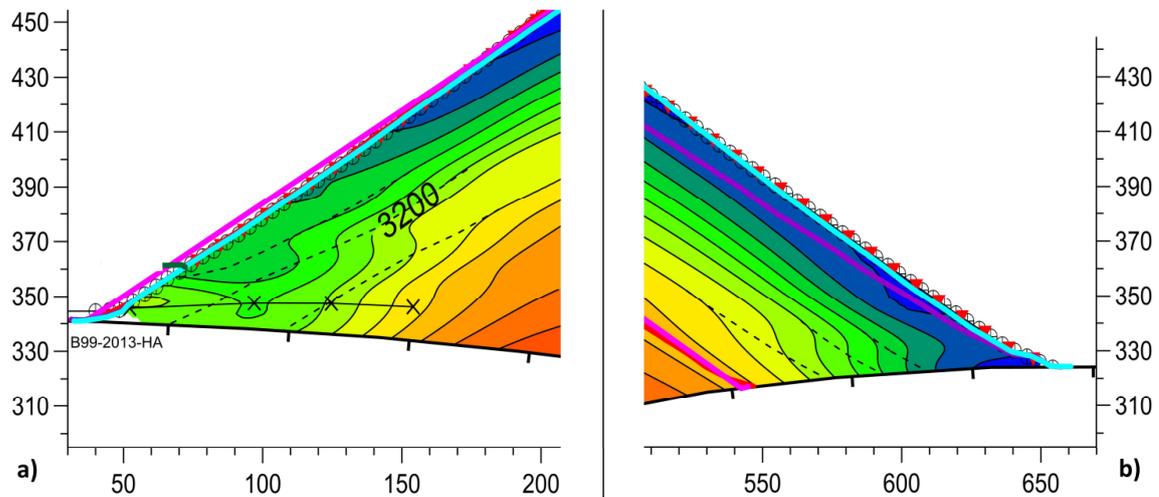


Bild 17: Verteilung der zu erwartenden, idealisierten Kompressionswellengeschwindigkeiten 2.800 m/s, 3.200 m/s und 3.600 m/s an der a) Westflanke und b) Ostflanke gemäß [U2.5] (Ausschnitte aus Bild 16)

In der Literatur werden folgende Kompressionswellengeschwindigkeiten in Beton, Mauerwerk und in gewachsenem Steinsalz sowie in ausgewählten Mineralen angegeben [U2.5], [U12]:

Beton (fest)	≥ 3.500 m/s
Mauerwerk	≥ 2.000 m/s – 3.000 m/s
gewachsenes Steinsalz (Halit)	≥ 4.500 m/s
gewachsenes Steinsalz (Südharz)	≥ 4.000 m/s – 4.500 m/s
Anhydrit	≥ 4.500 m/s – 6.500 m/s
Carnallit	≥ 2.800 m/s – 3.300 m/s

In Tabelle 15 sind den in [U2.1] erkundeten Tiefenlagen von Haldenmantel, Übergangszone und Haldenkern die in [U2.5] dokumentierten Kompressionswellengeschwindigkeiten gegenübergestellt. Der Übersichtlichkeit halber wurde nur die Tiefenlage der Schichtgrenzen zwischen Haldenmantel (HM) und Übergangszone (ÜZ) bzw. zwischen Übergangszone (ÜZ) und Haldenkern (HK) sowie die erreichte Bohrtiefe dargestellt.

Bohrung Nr.	HM - ÜZ		ÜZ – HK		erreichte Bohrtiefe	
	Tiefe [m]	Wellenge- schwindigkeit [m/s]	Tiefe [m]	Wellenge- schwindigkeit [m/s]	Tiefe (erbohrt) [m]	Wellenge- schwindigkeit [m/s]
B98/2013-HA	68	3.600	78	3.800	102	4.000
B99/2013-HA	42	3.200	68	3.600	101	3.600

Tabelle 15: Dicke von Haldenmantel, Übergangszone und erbohrtem Haldenkern an der Halde Hattorf [U2.1] mit den gemessenen Kompressionswellengeschwindigkeiten gemäß [U2.5]

Bereits die Bereiche zwischen Haldenmantel und Übergangszone weisen gemäß [U2.5] eine Kompressionswellengeschwindigkeit von Carnallit (Horizontalbohrung B99/23013-HA) oder Beton (Vertikalbohrung B98/2013-HA) auf. Mit zunehmender Tiefe werden Kompressionswellengeschwindigkeiten von gewachsenem Steinsalz (Südharz) erreicht (Bohrung B98/2013-HA, Haldenkern).

4.2.3 Bewertung der geophysikalischen Erkundungen

Unter Berücksichtigung der geophysikalischen Ergebnisse wie des spezifischen elektrischen Widerstandes der und Kompressionswellengeschwindigkeit ergibt sich die Darstellung in Bild 18.

Zur Bewertung der geophysikalischen Untersuchungen wurde in Bild 18 die Ergebnisse der elektrischen Widerstände als farbige Konturplots dargestellt. Die Ergebnisse der Kompressionswellengeschwindigkeit wurden als Linien dargestellt. Der Verlauf der Kompressionswellengeschwindigkeit ist mit den entsprechenden Messwerten beschriftet. Im Bereich des westlichen und östlichen Haldenfußes wurde der idealisierte Verlauf der Kompressionswellengeschwindigkeit gemäß [U2.5] berücksichtigt.

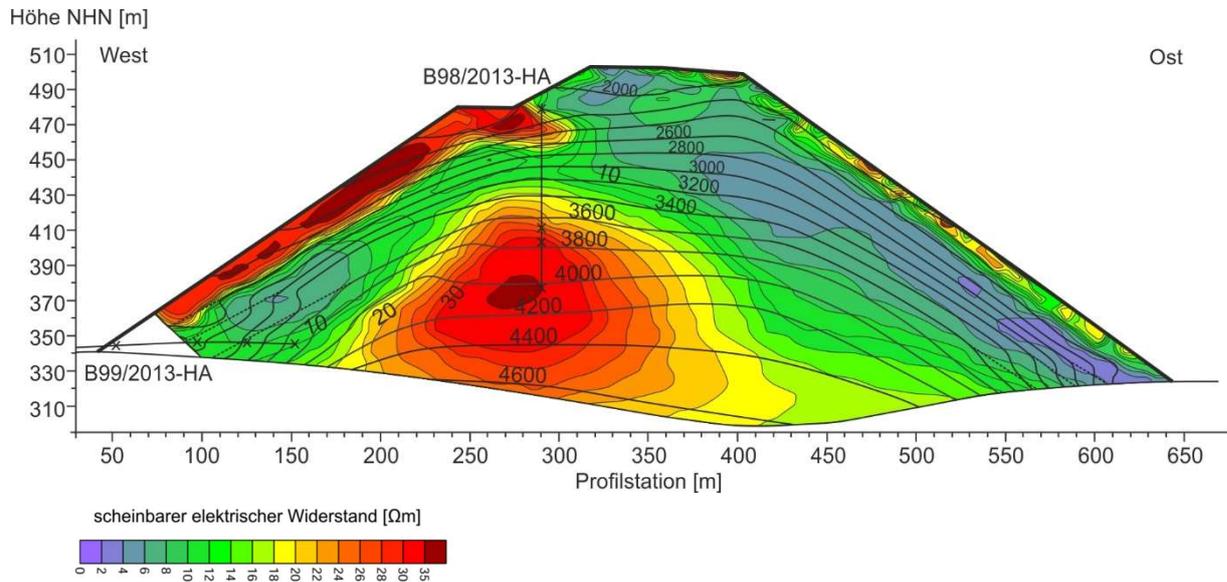


Bild 18: Vergleich der Verteilung der scheinbaren elektrischen Widerstände und der Verteilung der Kompressionswellengeschwindigkeiten an der Rückstandshalde Hattorf

Die Ergebnisse der geoelektrischen und seismischen Messungen korrelieren gut miteinander. Sowohl die geoelektrischen als auch die seismischen Messungen spiegeln die Schütthistorie der Halde Hattorf mit einer späteren Beschüttung der Ostflanke und einer älteren Westflanke wieder. Der Bereich der Westflanke zeichnet sich durch größere elektrische Widerstände und größere Kompressionswellengeschwindigkeiten aus. Im Bereich der jüngeren Ostflanke (Beschüttungszeitraum: 2015 bis 2016) und im Bereich des von Ausgleichsschüttungen beeinflusste Haldentops wurden geringere elektrische Widerstände und Kompressionswellengeschwindigkeiten gemessen als an der bereits 1996 beschütteten und somit stärker kompaktierten Westflanke.

Die in den Bohrungen B98/2013-HA und B99/2013-HA erkundeten Tiefenlagen von Haldenmantel, Übergangszone und Haldenkern können den Ergebnissen der geophysikalischen Untersuchungen gemäß [U2.5] gegenübergestellt werden. Der Übersichtlichkeit halber wurde in Tabelle 16 nur die Tiefenlage der Schichtgrenzen zwischen Haldenmantel (HM) und Übergangszone (ÜZ) bzw. zwischen Übergangszone (ÜZ) und Haldenkern (HK) sowie die erreichte Bohrtiefe dargestellt.

	B98/2013-HA (vertikal)			B99/2013-HA (horizontal)		
	HM-ÜZ	ÜZ-HK	erreichte Bohrtiefe	HM-ÜZ	ÜZ-HK	erreichte Bohrtiefe
Tiefe [m]	68	78	102	42	68	101
spezifischer elektrischer Widerstand [Ωm]	24	30	35	12 *)	10 *)	12
Kompressionswellengeschwindigkeit [m/s]	3.600	3.800	4.000	3.200	3.600	3.600

*) Anomalie aufgrund der geringen Datenbasis am östlichen Haldenfuß

Tabelle 16: Lage der Schichtgrenzen an der Halde Hattorf mit den zugehörigen elektrischen Widerständen und Kompressionswellengeschwindigkeiten

Bei einer Tiefenlage von rd. 42 m, die in der Horizontalbohrung B99/2013-HA der Schichtgrenze zwischen Haldenmantel und Übergangszone entspricht, ergibt sich ein elektrischer Widerstand von 12 Ω m. Dieser nimmt zur Schichtgrenze zwischen Übergangszone und Kernzone auf 10 Ω m ab und steigt mit zunehmender Tiefe wieder an. An der Ostflanke nehmen die elektrischen Widerstände dagegen ausgehend von dem Widerstandsminimum in einer Tiefe von rd. 30 m stetig zu und betragen in einer Tiefe von rd. 68 m (Übergangszone-Haldenmantel) 14 Ω m. Diese Widerstandsverteilung an der Westflanke ist bzgl. der Untersuchungsergebnisse in der Horizontalbohrung B99/2013-HA nicht plausibel und vermutlich auf die geringere Datenbasis im Bereich der bereits errichteten hydraulischen Trennung zwischen Bestandshalde und Haldenerweiterung zurückzuführen. In Kapitel 4.4 wird in der zusammenfassenden Bewertung aller Erkenntnisse aus den gegenständlichen Untersuchungen abschließend darauf eingegangen.

In der Vertikalbohrung B98/2013-HA wurden vielfach höhere elektrische Widerstände gemessen. In einer Tiefenlage von 68 m, die gemäß Erkundung der Schichtgrenze zwischen Haldenmantel und Übergangszone entspricht, wurde ein elektrischer Widerstand von 24 Ω m ermittelt. An der Schichtgrenze zwischen Übergangszone und Haldenkern, d.h. bei einer Tiefe von 78 m unter Bohransatzpunkt, wurde ein elektrischer Widerstand von 30 Ω m gemessen.

Die Kompressionswellengeschwindigkeiten nehmen in allen Bohrungen mit der Tiefe zu. In der Horizontalbohrung B99/2013-HA beträgt die Kompressionswellengeschwindigkeit an der Schichtgrenze zwischen Haldenmantel und Übergangszone, d.h. in einer Tiefe von rd. 42 m, rd. 3.200 m/s. An der Schichtgrenze zwischen Übergangszone und Haldenkern, d.h. bei einer Tiefe von 68 m unter Bohransatzpunkt, wurde eine Kompressionswellengeschwindigkeit von 3.600 m/s gemessen.

In der Vertikalbohrung B98/2013-HA wurden ebenfalls höhere Kompressionswellengeschwindigkeiten als in der Horizontalbohrung B99/2013-HA gemessen. In einer Tiefenlage von 68 m, die gemäß Erkundung der Schichtgrenze zwischen Haldenmantel und Übergangszone entspricht, wurde eine Kompressionswellengeschwindigkeit von 3.600 m/s ermittelt. An der Schichtgrenze zwischen Übergangszone und Haldenkern, d.h. bei einer Tiefe von 78 m unter Bohransatzpunkt, wurde eine Kompressionswellengeschwindigkeit von 3.800 m/s gemessen.

4.3 Geophysikalische Erkundungen an der Halde Wintershall

Im Sommer 2021 wurden zur Bestätigung der Modellvorstellung zur Ausbildung eines dichten Haldenkerns, ergänzend zu den in Kapitel 5.2. beschriebenen Untersuchungen an der Halde Hattorf, geophysikalische Untersuchungen an der Bestandshalde Wintershall durchgeführt. An der Halde Wintershall sollte zur Bestätigung des Haldenmodells, bestehend aus Haldenmantel, Übergangszone und Haldenkern, ein gesamter Haldenquerschnitt untersucht werden. Gemäß Abstimmung zwischen K+S und IK wurde der Schnitt C-C für die geophysikalischen Untersuchungen festgelegt (siehe Bild 19).

Der Schnitt C-C erfasst den kompletten Querschnitt durch die Bestandshalde Wintershall.

Am Schnitt C-C wurden vom 01.07.2021 bis 07.07.2021 geoelektrische und seismische Messungen vorgenommen. Für die geoelektrischen Messungen wurden 160 Elektroden mit einem Elektrodenabstand von 5 m verlegt, daraus ergibt sich eine Profillänge von 795 m. Die Eindringtiefe der geoelektrischen Messungen beträgt rd. 220 m unterhalb der Messprofilmitte (Haldentop). Für die seismischen Messungen wurden 144 Geophone mit einem Geophonabstand von ebenfalls 5 m verlegt, daraus ergibt sich eine Profillänge von 715 m. Die Eindringtiefe der seismischen Messungen beträgt ebenfalls rd. 220 m unterhalb der Messprofilmitte (Haldentop). Mit beiden Messmethoden konnte damit der komplette Haldenkörper vermessen werden. Die Untersuchungen des Baugrundes war nicht Teil der Aufgabenstellung und entsprechende Messwerte für diesen Bereich sind nicht aussagekräftig.

Zur Aufrechterhaltung des Haldenbetriebs an der Halde Wintershall wurden an drei Stellen des Schnittes C-C u.a. Fahrwege und Infrastruktureinrichtung mittel Kabelunterführung gekreuzt. Elektroden und Geophone konnten in diesen Bereichen nicht installiert werden [U2.5].

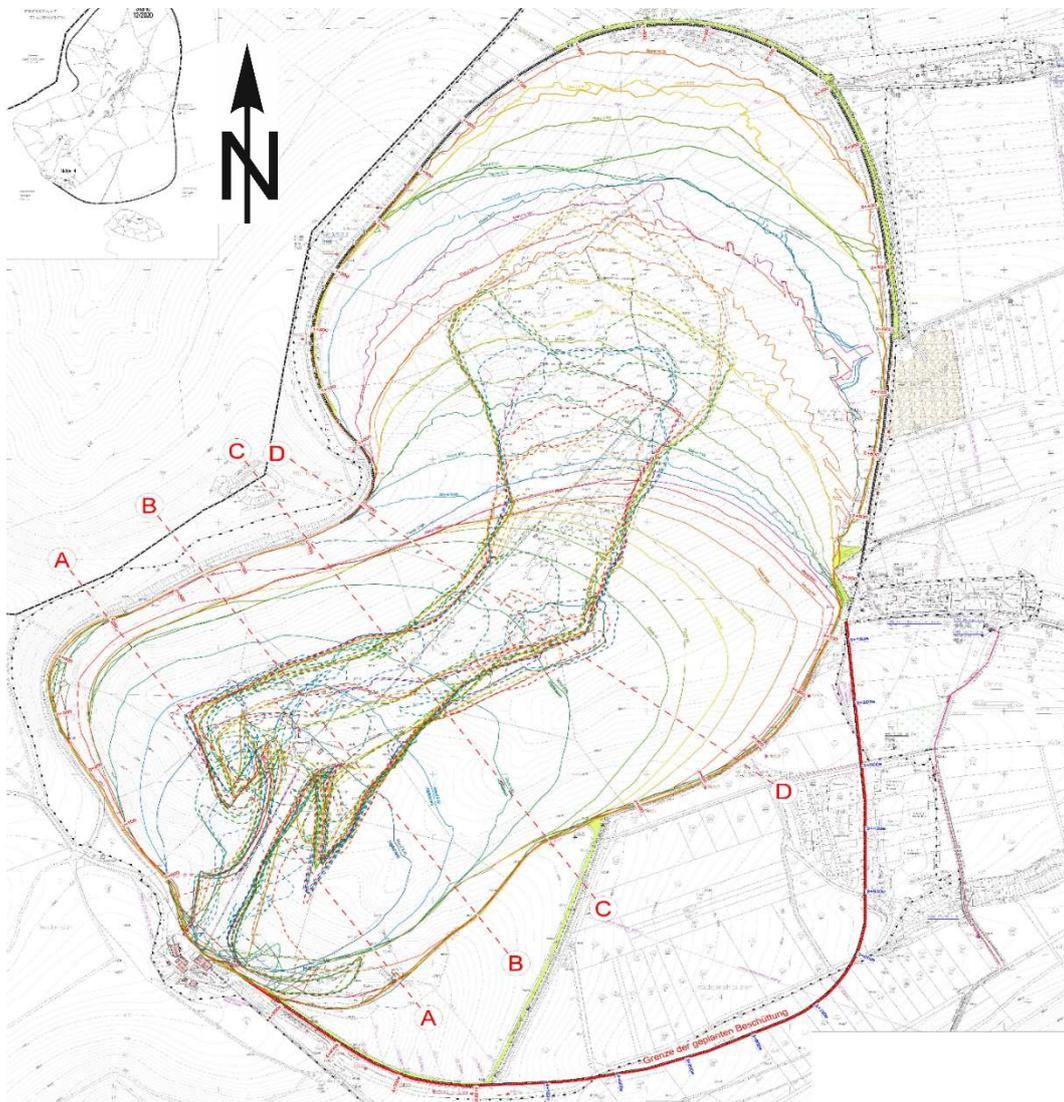


Bild 19: Lageplan der Rückstandshalde Wintershall mit Erkundungsschnitt C-C

4.3.1 Ergebnisse der geoelektrischen Messungen

Die geoelektrischen Messungen im Sommer 2021 an der Rückstandshalde Wintershall ergaben rd. 6.250 Messwerte im Bereich des Haldenkörpers. Aus den einzelnen Messwerten kann die Verteilung des scheinbaren spezifischen elektrischen Widerstands im Schnitt C-C der Rückstandshalde Wintershall abgeleitet werden (Bild 20). Zusätzlich ist die Beschüttung der Halde von 1988 bis April 2011 in Form von verschiedenfarbigen Haldenkonturlinien dokumentiert.

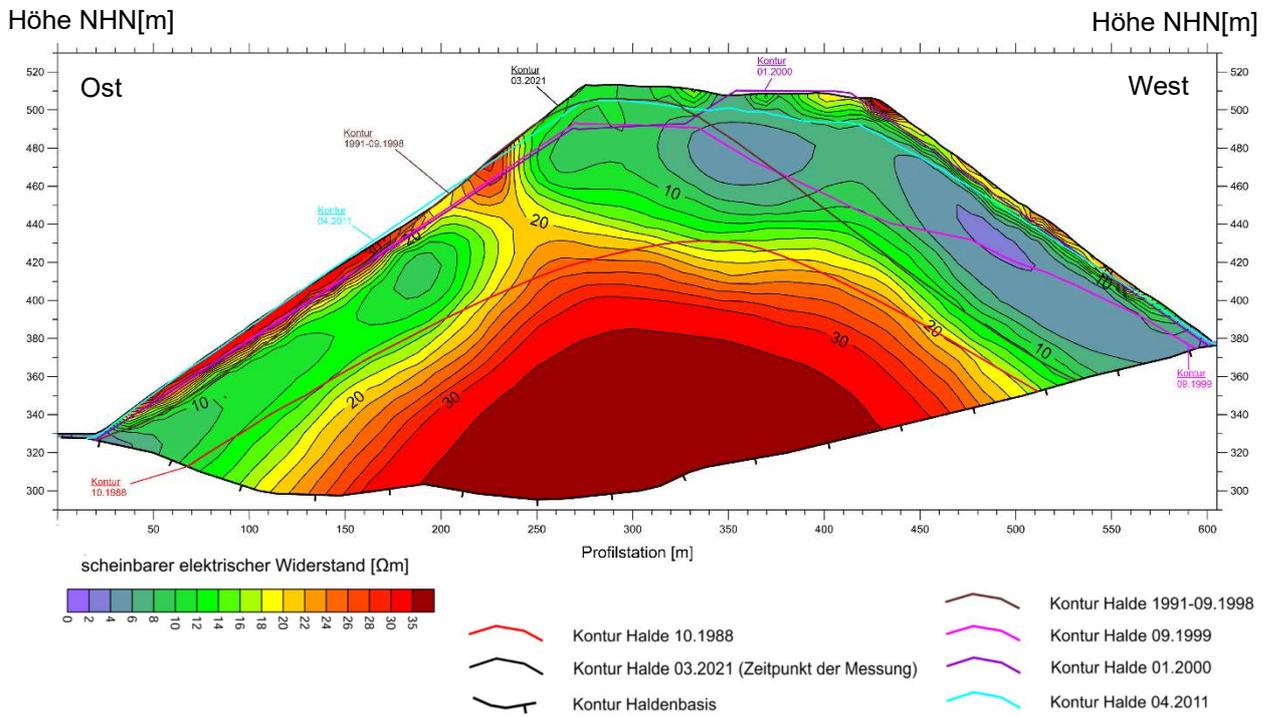


Bild 20: Verteilung des scheinbaren spezifischen elektrischen Widerstands gemäß [U2.5]

Im Schnitt C-C ist im Wesentlichen eine deutliche Zunahme des scheinbaren spezifischen elektrischen Widerstands (im Folgenden auch als elektrischer Widerstand bezeichnet) zum Haldeninneren zu beobachten. Im Bereich der östlichen Haldenflanke und schwächer ausgeprägt im Bereich der westlichen Haldenflanke wurden oberflächennah ebenfalls hohe elektrische Widerstände gemessen. Diese lassen sich auf Krustenbildung und Bereiche mit geringem Wassergehalt zurückführen. Ein geringerer Wassergehalt ergibt sich aus Verdunstung an der Haldenoberfläche und aus Versickerung in tieferliegende Haldenmantelbereiche.

Wie bereits in Kapitel 4.2.1 beschrieben, kennzeichnen Bereiche niedriger elektrischer Widerstände bzw. die in den geophysikalischen Messungen detektierten haldenoberflächennahen Bänder niedriger elektrischer Widerstände den Hauptströmungsverlauf des Haldenwassers.

4.3.2 Ergebnisse der seismischen Messungen

Im Modell wird die Verteilung der Kompressionswellengeschwindigkeit ermittelt und in Form von Konturplots dargestellt (Bild 21) [U2.5]. Zusätzlich ist die Beschüttung der Halde von 1988 bis April 2011 in Form von verschiedenfarbigen Haldenkonturlinien dokumentiert.

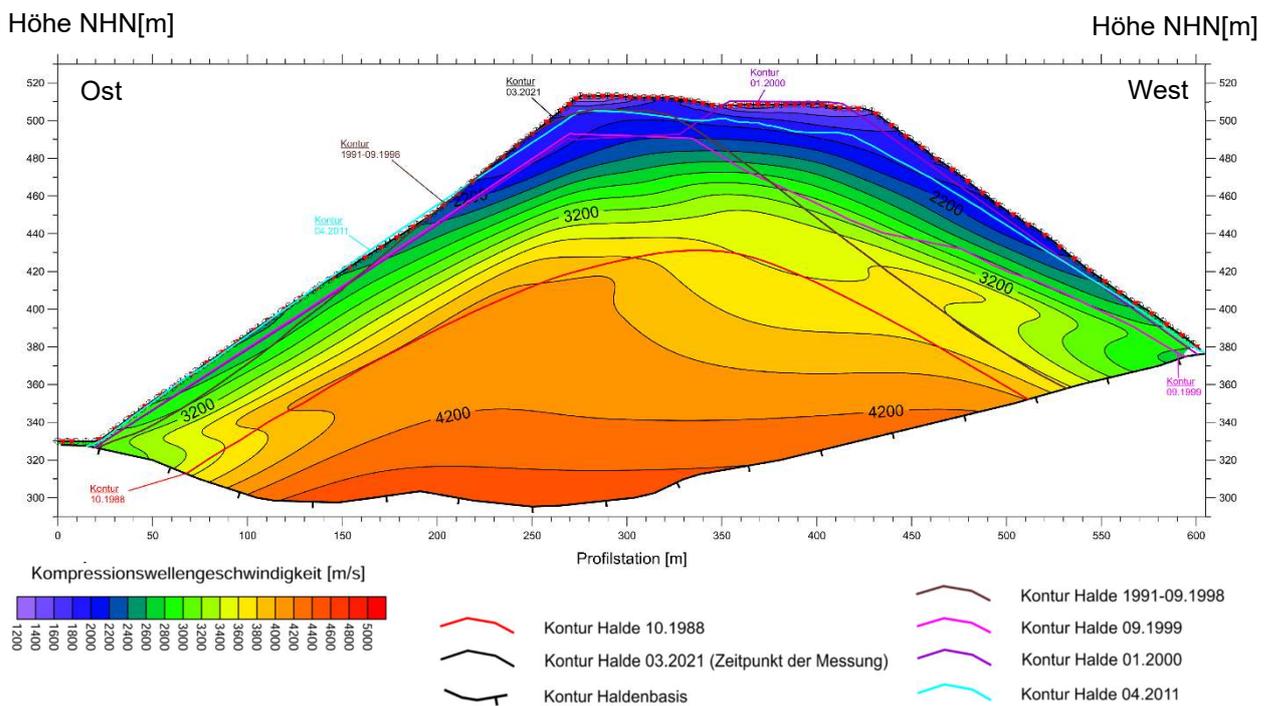


Bild 21: Verteilung der Kompressionswellengeschwindigkeit gemäß [U2.5]

Im Schnitt C-C wurden im gesamten Haldenkörper eine hohe Grundgeschwindigkeit der Kompressionswellen gemessen. Insgesamt weist eine hohe Grundgeschwindigkeit auf weitestgehend kompaktiertes Material mit nahezu Festgesteinscharakter hin [U2.5]. Oberflächennah wurden Kompressionswellengeschwindigkeiten von 1.200 m/s (Haldentop) gemessen; im inneren der Rückstandshalde wurden Kompressionswellengeschwindigkeiten von 4.500 m/s gemessen. Eine Zunahme der Kompressionswellengeschwindigkeiten zum Haldeninneren hin ist in Bild 21 sowohl horizontal als auch vertikal eindeutig zu erkennen.

Im Bereich des Haldentops und leicht ausgeprägt an der Westflanke wurden geringere Kompressionswellengeschwindigkeiten gemessen, die auf Konturausgleichsschüttungen am Haldentop und an der Westflanke zurückzuführen sind. Hieraus ist eine geringere Kompaktion und Dichte in diesen Bereichen abzuleiten.

Im Bereich des östlichen und westlichen Haldenfußes kommt es aufgrund des starken topographischen Einflusses und der geringeren Datendichten an den Rändern des Untersuchungsraums zu Inversionsartefakten bzw. Randeffekte. Basierend auf den Erfahrungen gemäß [U2.5] mit geophysikalischen Untersuchungen an Rückstandshalden lässt sich der idealisierte Verlauf (gestrichelte Linien) der Kompressionswellengeschwindigkeiten im Bereich des westlichen und östlichen Haldenfußes ableiten (Bild 22).

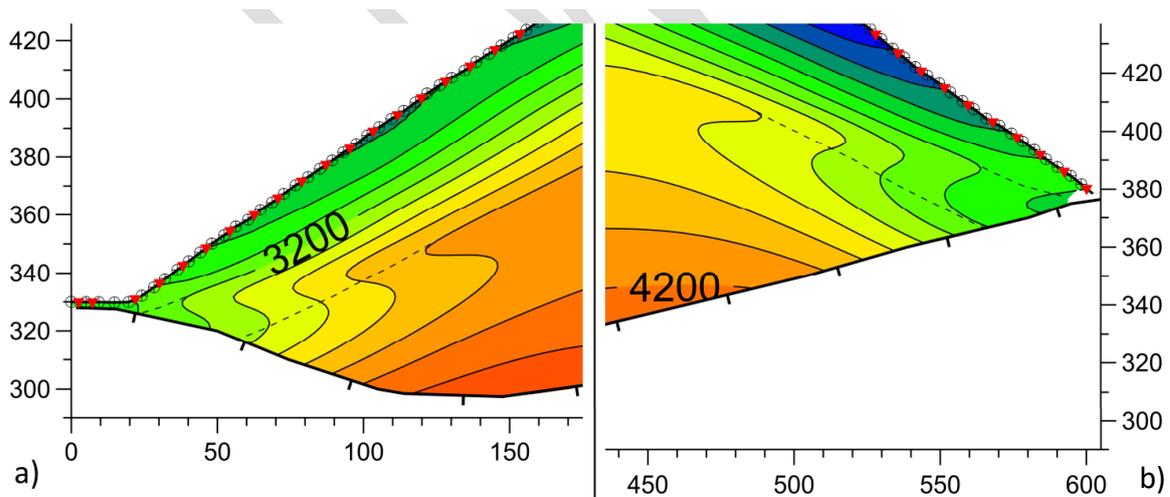


Bild 22: Verteilung der zu erwartenden, idealisierten Kompressionswellengeschwindigkeiten an der a) Ostflanke (3.200 m/s und 4.000 m/s) und b) Westflanke (3.000 m/s und 3.600 m/s) gemäß [U2.5] (Ausschnitte aus Bild 21)

Die Verteilung der gemessenen Kompressionswellengeschwindigkeit ist im Vergleich zu den Untersuchungen an der Halde Hattorf homogener und eindeutiger ausgeprägt.

4.3.3 Bewertung der geophysikalischen Erkundungen

Unter Berücksichtigung der geophysikalischen Ergebnisse wie des spezifischen elektrischen Widerstandes und der Kompressionswellengeschwindigkeit ergibt sich die Darstellung in Bild 23.

Die Ergebnisse der geoelektrischen und seismischen Messungen korrelieren miteinander. Sowohl die geoelektrischen als auch die seismischen Messungen spiegeln die Schütthistorie der Halde Wintershall wider. Der Bereich der Ostflanke zeichnet sich durch größer elektrische Widerstände und größere Kompressionswellengeschwindigkeiten aus. Im Bereich der jüngeren Westflanke

(Beschüttungszeitraum: 1999 bis 2000) und im Bereich des von Ausgleichsschüttungen beeinflussten Haldentop wurden geringere elektrische Widerstände und Kompressionswellengeschwindigkeiten gemessen als an der bereits 1991 beschütteten und somit stärker kompaktierten Ostflanke.

Der Einfluss der Schütthistorie, der bereits in den geophysikalischen Messungen an der Halde Hattorf detektiert wurde, konnte in Wintershall bestätigt werden. Auch in Wintershall werden in Bereichen jüngerer Schüttungen bzw. im Bereich von Ausgleichsschüttungen am Haldentop geringere elektrische Widerstände und kleinere Kompressionswellengeschwindigkeiten gemessen als in den übrigen Haldenbereichen. Die Verläufe der Kompressionswellengeschwindigkeit berücksichtigen im Haldenfußbereich die Angaben aus Bild 22 und ist mit den entsprechenden Messwerten beschriftet.

Zur detaillierten Bewertung der geophysikalischen Untersuchungen wurden in Bild 23 die Ergebnisse der elektrischen Widerstände als farbige Konturplots dargestellt. Die Ergebnisse der Kompressionswellengeschwindigkeit wurden als Linien dargestellt. Der Verlauf der Kompressionswellengeschwindigkeit ist mit den entsprechenden Messwerten beschriftet.

Die westliche Haldenflanke des Schnittes C-C entspricht annähernd den Randbedingungen (Haldenhöhe, Schüttflanke) des Haldenbereichs an der Ostflanke, der mit der Haldenbohrung B72/2014-WI erkundet wurde. Die Bohrung wurde daher in den Schnitt C-C projiziert (Bild 23).

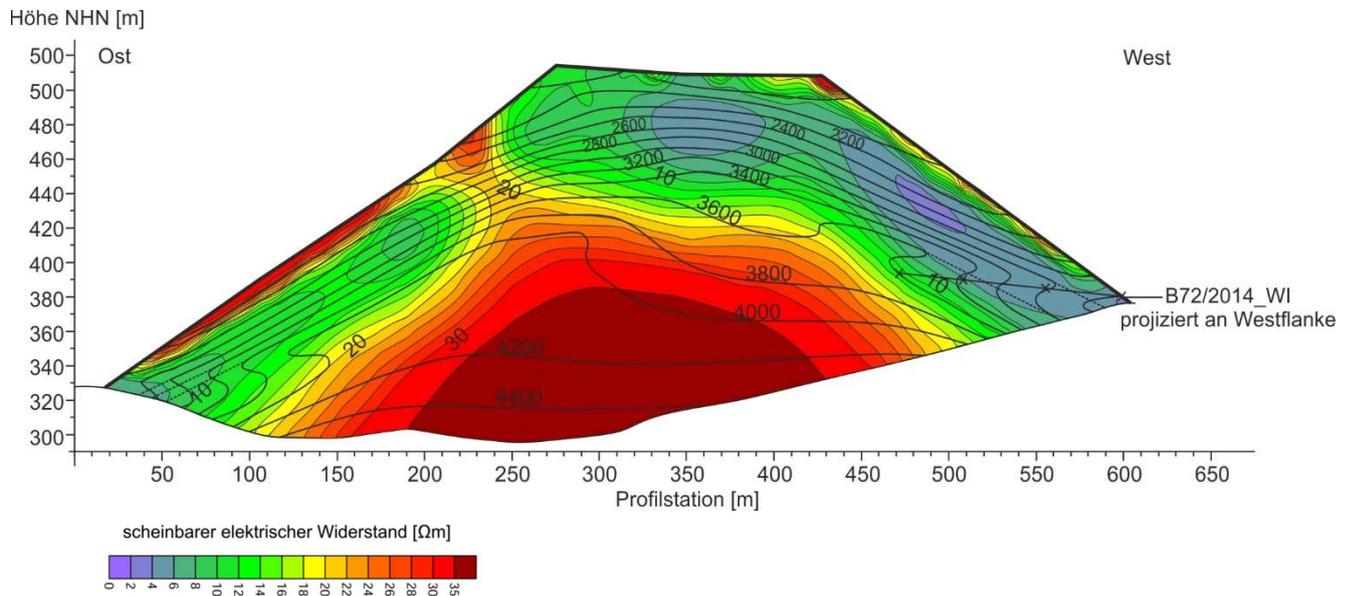


Bild 23: Vergleich der Verteilung der scheinbaren elektrischen Widerstände und der Verteilung der Kompressionswellengeschwindigkeiten an der Rückstandshalde Wintershall

Die in der Bohrung B72/2014-HA auf die Westflanke des Schnittes C-C projiziert erkundeten Tiefenlagen von Haldenmantel, Übergangszone und Haldenkern können den Ergebnissen der geophysikalischen Untersuchungen gemäß [U2.5] gegenübergestellt werden. Der Übersichtlichkeit halber wurde in Tabelle 18 nur die Tiefenlage der Schichtgrenzen zwischen Haldenmantel (HM) und Übergangszone (ÜZ) bzw. zwischen Übergangszone (ÜZ) und Haldenkern (HK) sowie die erreichte Bohrtiefe dargestellt.

	Bohrung 72/2014 WI (West, horizontal)		
	HM-ÜZ	ÜZ-HK	erreichte Bohrtiefe
Tiefe [m]	42	92	131
elektrischer Widerstand [Ωm]	6	6-8	12
Wellengeschwindigkeit [m/s]	3.000	3.600	3.600

Tabelle 17: Lage der Schichtgrenzen an der Halde Wintershall mit den zugehörigen elektrischen Widerständen und Kompressionswellengeschwindigkeiten

Bei einer Tiefenlage von rd. 42 m, die in der Horizontalbohrung B72/2014-WI der Schichtgrenze zwischen Haldenmantel und Übergangszone entspricht, ergibt sich einen elektrischen Widerstand von 6 Ω m. Bei der erkundeten Schichtgrenze zwischen Übergangszone und Haldenkern, d.h. bei einer Tiefe von 92 m, beträgt der elektrische Widerstand 6 Ω m bis 8 Ω m.

4.4 Zusammenfassung der Erkenntnisse zum Haldenkörperverhalten von Rückstandshalden anhand der geophysikalischen Untersuchungen

Mit den umfangreichen geophysikalischen Messungen an den Rückstandshalden Hattorf und Wintershall wird die Modellvorstellung zur Ausbildung des dichten Haldenkerns und die Zonierung des Haldenkörpers in Haldenmantel, Übergangszone und Haldenkern bestätigt.

Für die Bewertung der geophysikalischen Messungen sind in Tabelle 18 deren Ergebnisse an den Horizontalbohrungen B99/2013-HA und B72/2014-WI (projiziert an Westflanke) zusammengestellt. Diese beiden Bohrungen liegen in Haldenbereichen, die seit den Haldenbohrung nicht bzw. nur geringfügig durch weitere Beschüttung beeinflusst wurden. An der Westflanke der Halde Wintershall (Schnitt C-C) wurden lediglich Konturausgleiche mit geringer Überschüttung der Flanke vorgenommen.

Es ist zu berücksichtigen, dass die oben bereits mehrfach beschriebene geringe Datenbasis an der Westflanke Hattorf Einfluss auf die geophysikalischen Ergebnisse in diesem Bereich hat. In [U2.5] sind Empfehlungen zur Interpretation von Rand- und Inversionseffekten der seismischen Messungen enthalten (Bild 17). Diese können auf die Ergebnisse der geoelektrischen Messungen übertragen werden. Unter Berücksichtigung der Ergebnisse der geoelektrischen Messungen an den übrigen Böschungsfüßen lässt sich die in Bild 24 dargestellte Interpretation der geoelektrischen Widerstände am westlichen Haldenfuß der Halde Hattorf ableiten.

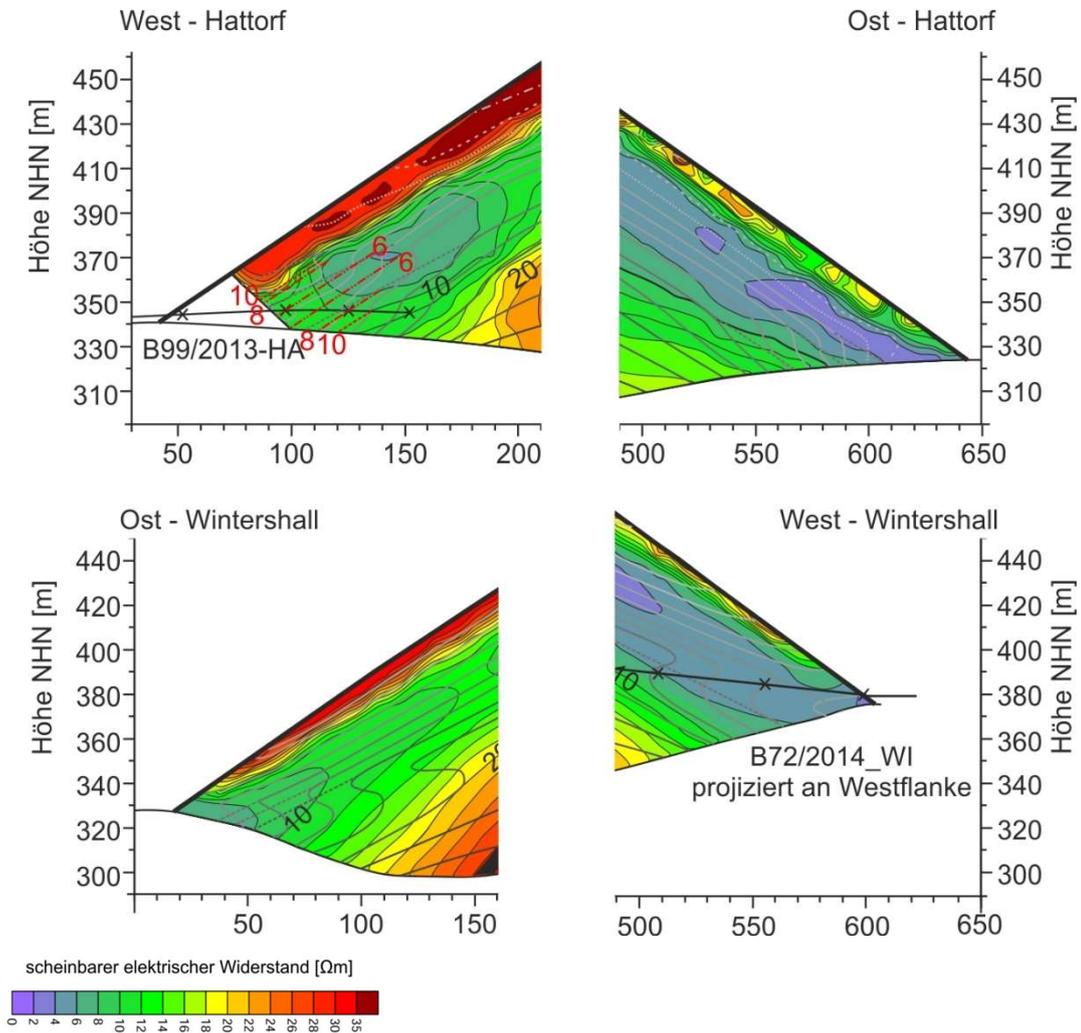


Bild 24: Vergleich der geoelektrischen Messergebnisse im Bereich der Haldenfüße der Halden Hattorf und Wintershall (Ausschnitte aus Bild 18 und Bild 23)

Es wird deutlich, dass am östlichen Haldenfuß der Halde Hattorf sowie an beiden Haldenfüßen der Halde Wintershall die geringsten elektrischen Widerstände gemessen werden. Diese reichen in allen genannten Bereichen bis zur Haldensohle. Bereiche geringer elektrischer Widerstände kennzeichnen den Hauptströmungsverlauf des Haldenwassers.

Dieses Ergebnis ist auf den westlichen Haldenfuß der Halde Hattorf prinzipiell übertragbar, woraus sich näherungsweise die rot gestrichelten Verläufe der elektrischen Widerstände im Bereich mit geringerer Datenbasis ergeben.

Auf Grundlage der o.g. Extrapolation ergeben sich die in Tabelle 18 dokumentierten Ergebnisse der geophysikalischen Messungen. Die Liegezeiten beziehen sich auf das Alter der Haldenbereiche bis zur geophysikalischen Erkundung im Jahr 2020 / 2021.

	Liegezeit	Haldenmantel-Übergangszone			Übergangszone-Haldenkern		
		Tiefe [m]	elektrischer Widerstand [Ω m]	Wellengeschwindigkeit [m/s]	Tiefe [m]	elektrischer Widerstand [Ω m]	Wellengeschwindigkeit [m/s]
B99/2013-HA (horizontal)	24 a bis 28 a	42	6	3.200	68	8	3.600
B72/2014-WI (projiziert an Westflanke) (horizontal)	24 a	42	6	3.000	92	6-8	3.600

Tabelle 18: Lage der Schichtgrenzen in den Horizontalbohrungen B99/2013-HA und B72/2014-WI mit den zugehörigen elektrischen Widerständen und Kompressionswellengeschwindigkeiten

Die Horizontalbohrungen B99/2013-HA und B72/2014-WI zeigen bei vergleichbarem Schüttalter trotz unterschiedlicher Böschungshöhe (B99/2013-HA Haldenhöhe rd. 140 m; B72/2014-WI Haldenhöhe rd. 125 m) an den jeweiligen Zonengrenzen gleiche bzw. annähernd gleiche Werte. Die Grenze zwischen Haldenmantel und Übergangszone liegt dabei bei beiden Halden etwa im Zentrum der randlichen minimalen elektrischen Widerstände. Hier ist entlang der geringsten elektrischen Widerstände von einer intensivsten Haldenwasserführung auszugehen. Da sich bis in diesen Teufenbereich nach den Ergebnissen der Haldenbohrungen in Hattorf und Wintershall die wesentlichen Dichtezunahmen sowie Porositätsabnahmen vollzogen haben und sich mit der weiteren Teufe nur noch geringe Änderungen vollziehen, ist die an diesem Grenzbereich festgestellte Konzentration der Strömungsprozessen im Sinne eines „Aufstau-effekts“ nachvollziehbar.

Gemäß [U2.5] sind Bereiche mit hohen elektrischen Widerständen von Bereichen mit niedrigen elektrischen Widerständen bzw. hoher elektrischer Leitfähigkeit umgeben. Der bei den Messungen aktivierte elektrische Strom durchströmt vorrangig Bereiche mit niedrigen elektrischen Widerständen bzw. hoher elektrischer Leitfähigkeit, woraus, im Sinne eines „Abschirm-effekts“, die scheinbaren elektrischen Widerstände in unterlagernden Bereichen (Haldenkern, untergeordnet Übergangszone) im Vergleich zur realen Situation geringer dargestellt werden und die Konturen der Zonen hoher Widerstände verschmieren.

In dem folgenden Bild 25 werden fiktiv die Grenzen auf der Basis der Bohrungen B99/2013-HA konturparallel für den gesamten Haldenquerschnitt Stand 2020 mit den Ergebnissen der geophysikalischen Untersuchungen überlagert. Die Haldenzonierung gemäß Bohrung B99/2013-HA spiegelt sich im grundsätzlichen Verlauf auch in den Ergebnissen der geophysikalischen Messungen an der Ostflanke wider.

Die an der Halde Hattorf durchgeführte Vertikalbohrung B98/2013-HA liegt im Bereich des Haldentops und ist somit sowohl von der Beschüttung der Ostflanke seit 2015 als auch von Ausgleichsschüttung am Haldentop beeinflusst. Die hier 2013 erkundeten Zonierungen korrelieren daher nicht mit den 2020 durchgeführten geophysikalischen Messungen.

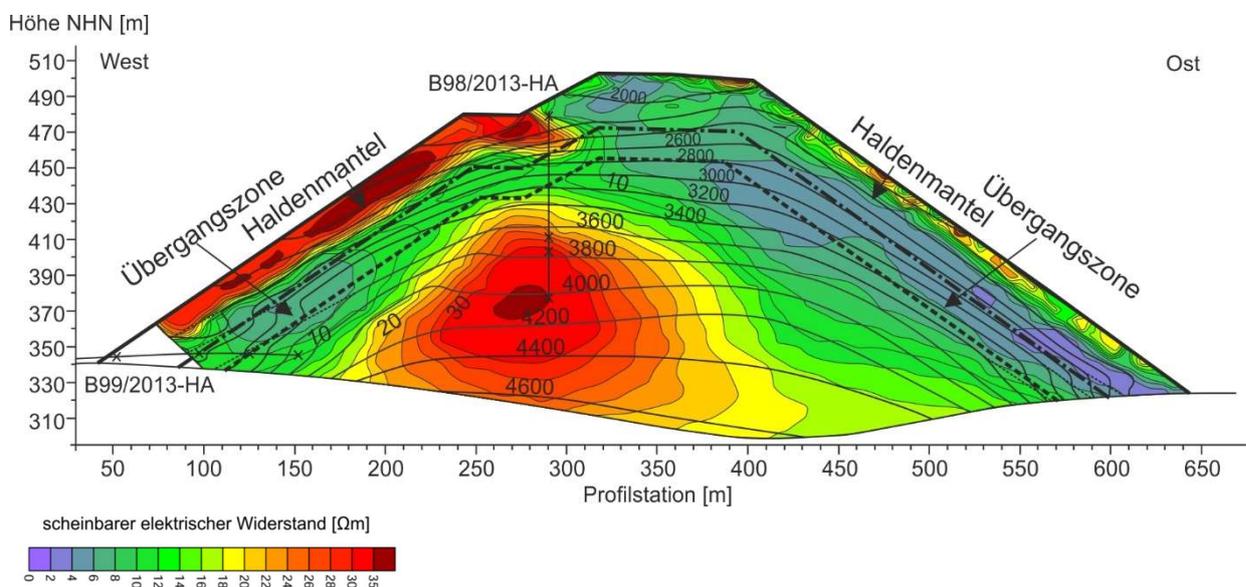


Bild 25: Haldenzonierung der Halde Hattorf gemäß Bohrung B99/2013-HA [U2.1] mit den Ergebnissen der geophysikalischen Messungen aus [U2.5]

Zur Verdeutlichung der Konservativität der gewählten Grenzkriterien werden diese in Bild 26 ergänzend zum Bild 25 für die Schichtgrenzen Haldenmantel-Übergangszone und Übergangszone-Haldenkern dargestellt (blaue Linienverläufe).

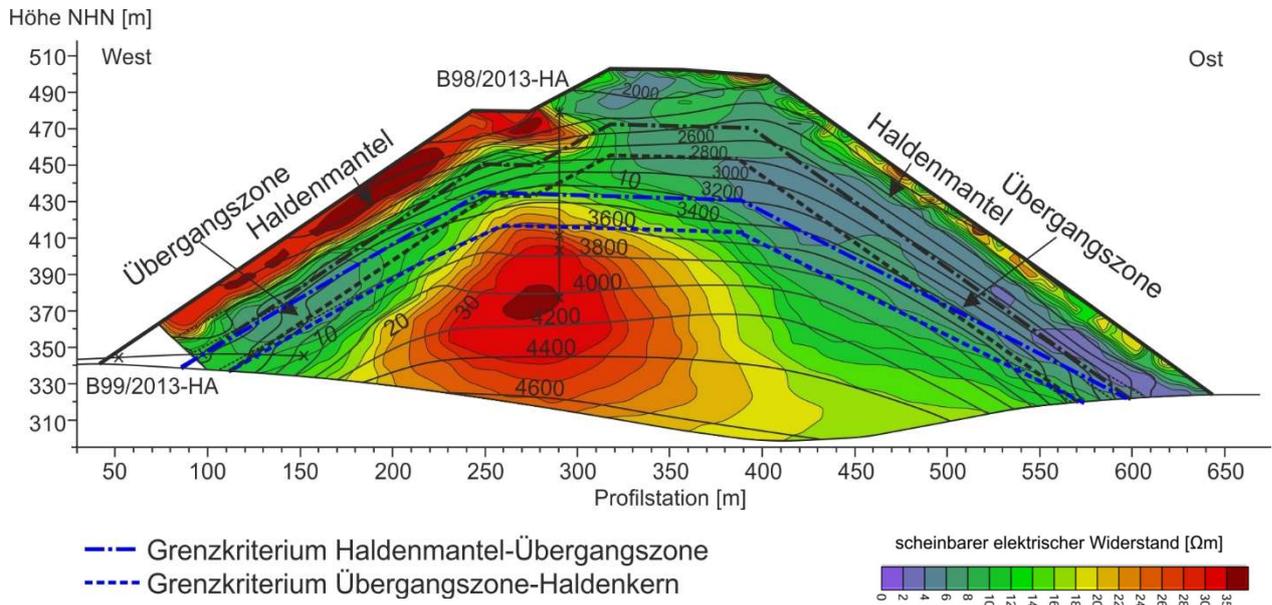


Bild 26: Haldenzonierung der Halde Hattorf gemäß Bohrung B99/2013-HA [U2.1] mit den Ergebnissen der geophysikalischen Messungen aus [U2.5] und den Grenzkriterien für HM-ÜZ sowie ÜZ-HK

Die gewählten Grenzkriterien für Haldenmantel-Übergangszone und Übergangszone-Haldenkern leiten sich aus den Erkundungsergebnisse der Haldenbohrung B99/2013-HA und B72/2014-WI ab. Es wird ersichtlich, dass die Kriterien, auch durch gleichwertige Berücksichtigung von elektrischem Widerstand und Kompressionswellengeschwindigkeit, ausreichend konservativ sind. Die durch die Grenzkriterien definierten Schichtgrenzen zwischen Haldenmantel-Übergangszone und Übergangszone-Haldenkern liegen unter den aus der Haldenbohrung B99/2013-HA erkundeten und auf den gesamten Haldenquerschnitt übertragenen Zonierungen.

Aus den festgelegten Grenzkriterien ergeben sich für die übrigen Haldenbereich, d.h. für das Haldentop im Bereich der Bohrung B98/2013-HA sowie an der östlichen Haldenflanke, die in Tabelle 19 dokumentierten Tiefenlagen der Schichtgrenzen Haldenmantel-Übergangszone und Übergangszone-Haldenkern. Die in der Horizontalbohrung B99/2013-HA erkundeten Tiefenlagen wurden in ihrer Größenordnung bestätigt und sind der Vollständigkeit halber ebenfalls in Tabelle 19 angeben.

	Haldenmantel-Übergangszone	Übergangszone-Haldenkern
	Tiefe unterhalb Bohrersatzpunkt gemäß Grenzkriterien $\geq 6 \Omega\text{m} / \geq 3.200 \text{ m/s}$	Tiefe unterhalb Bohrersatzpunkt gemäß Grenzkriterien $\geq 8 \Omega\text{m} / \geq 3.600 \text{ m/s}$
B98/2013-HA (vertikal)	45 m	65 m
östlicher Haldenfuß (horizontal)	55 m	80 m
	Tiefe unterhalb Bohrersatzpunkt gemäß [U2.1]	Tiefe unterhalb Bohrersatzpunkt gemäß [U2.1]
B99/2013-HA (horizontal)	42 m	92 m

Tabelle 19: Tiefenlage der Schichtgrenze zwischen Haldenmantel und Übergangszone bzw. Übergangszone und Haldenkern gemäß abgeleiteter Grenzkriterien für den elektrischen Widerstand und die Kompressionswellengeschwindigkeit an der Halde Hattorf

Die Tiefenlagen im Bereich des östlichen Haldenfußes werden horizontal rd. 2 m bis 3 m oberhalb des Böschungsfußes aus Bild 26 abgelesen.

In dem folgenden Bild 27 werden fiktiv die Zonengrenzen der Bohrungen B72/2014-WI konturparallel für den gesamten Haldenquerschnitt Stand 2020 mit den Ergebnissen der geophysikalischen Untersuchungen überlagert.

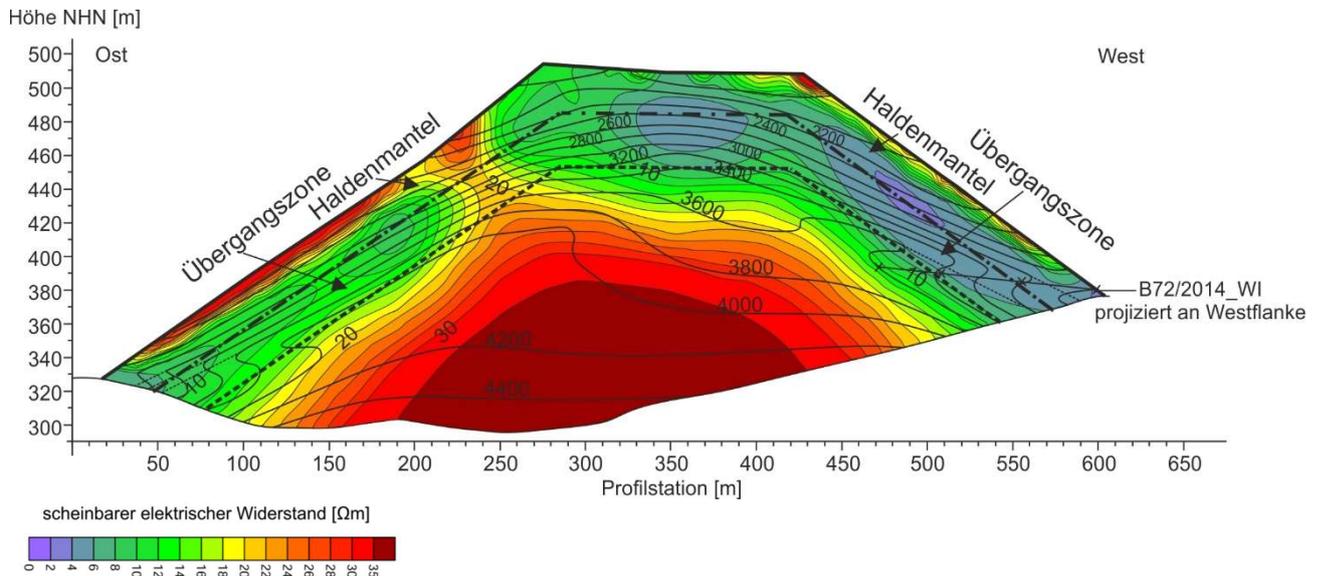


Bild 27: Haldenzonierung der Halde Wintershall gemäß Bohrung B72/2014-WI [U2.2] mit den Ergebnissen der geophysikalischen Messungen aus [U2.5]

	Haldenmantel-Übergangszone	Übergangszone-Haldenkern
	Tiefe unterhalb Bohrersatzpunkt gemäß Grenzkriterien $\geq 6 \Omega\text{m} / \geq 3.200 \text{ m/s}$	Tiefe unterhalb Bohrersatzpunkt gemäß Grenzkriterien $\geq 8 \Omega\text{m} / \geq 3.600 \text{ m/s}$
Haldentop	max. 60 m	70 m / 90 m
östlicher Haldenfuß (horizontal)	20 m	50 m
	Tiefe unterhalb Bohrersatzpunkt gemäß [U2.2]	Tiefe unterhalb Bohrersatzpunkt gemäß [U2.2]
B72/2014-WI (horizontal, projiziert an die Westflanke)	42 m	68 m

Tabelle 20: Tiefenlage der Schichtgrenze zwischen Haldenmantel und Übergangszone bzw. Übergangszone und Haldenkern gemäß abgeleiteter Grenzkriterien für den elektrischen Widerstand und die Kompressionswellengeschwindigkeit an der Halde Wintershall

Im Bereich des Haldentops wurden für die Tiefe der Schichtgrenze zwischen Übergangszone und Haldenkern zwei Werte angegeben, dies ist auf einen Versatz im Verlauf des Grenzkriteriums Übergangszone-Haldenkern (Bild 28) zurückzuführen. Zur jüngeren Westflanke hin ist eine größere Tiefe der genannten Schichtgrenze zu erkennen. Dieses Ergebnis der geophysikalischen Untersuchungen korreliert mit dem zeit- und lastabhängigen Kompaktions- und Verformungsverhaltens des Haldenkörpers.

In Tabelle 21 sind alle Tiefenlagen für die Schichtgrenzen Haldenmantel-Übergangszone und Übergangszone-Haldenkern zusammenfassend für die Halden Hattorf und Wintershall dokumentiert.

	Haldenmantel-Übergangszone	Übergangszone-Haldenkern
	Tiefe unterhalb Bohrersatzpunkt gemäß Grenzkriterien $\geq 6 \Omega\text{m} / \geq 3.200 \text{ m/s}$	Tiefe unterhalb Bohrersatzpunkt gemäß Grenzkriterien $\geq 8 \Omega\text{m} / \geq 3.600 \text{ m/s}$
Haldentop HA B98/2013-HA (vertikal)	45 m	65 m
östlicher Haldenfuß HA (horizontal)	55 m	80 m
Haldentop WI	max. 60 m	70 m / 90 m
östlicher Haldenfuß WI (horizontal)	20 m	50 m
	Tiefe unterhalb Bohrersatzpunkt gemäß [U2.1], [U2.2]	Tiefe unterhalb Bohrersatzpunkt gemäß [U2.1], [U2.2]
B99/2013-HA (horizontal)	42 m	92 m
B72/2014-WI (horizontal, projiziert an die Westflanke)	42 m	68 m

Tabelle 21: Tiefenlage der Schichtgrenze zwischen Haldenmantel und Übergangszone bzw. Übergangszone und Haldenkern an den Halden Hattorf und Wintershall

Aus den geophysikalischen Untersuchungen lässt sich eine maximale Dicke des Haldenmantels am Haldentop von 60 m ableiten. Dieses Maß bezieht sich auf das Haldentop der Halde Wintershall, das von 1999 bis 2000 beschüttet wurde und kontinuierlich von Ausgleichsschüttungen beeinflusst ist.

Aus den geophysikalischen Untersuchungen lässt sich eine maximale Tiefenlage der Schichtgrenze zwischen Übergangszone und Haldenkern am Haldentop von 90 m ableiten. Dieses Maß bezieht sich auf das Haldentop der Halde Wintershall, das von 1999 bis 2000 beschüttet wurde und kontinuierlich von Ausgleichsschüttungen beeinflusst ist.

Im Bereich der Haldenböschungen an den Halden Hattorf und Wintershall ergibt sich aus den geophysikalischen Untersuchungen eine maximale Dicke von Haldenmantel und Übergangszone von 55 m (Ostflanke Halde Hattorf). Außerdem beträgt die maximale Tiefenlage der Schichtgrenze zwischen Übergangszone und Haldenkern im Bereich der Haldenböschungen rd. 80 m.

Die aus den geophysikalischen Untersuchungen abgeleiteten Zonierungen bzw. Tiefenlagen der Schichtgrenzen zwischen Haldenmantel-Übergangszonen und Übergangszonen-Haldenkern für Haldenbereiche ohne direkte Aufschlüsse (Haldenbohrungen) resultieren aus den o.g. konservativen Grenzkriterien.

Zusätzlich lassen sich aus der Vertikalbohrung B98/2013-HA und den geophysikalischen Messungen Rückschlüsse auf eine zeitliche Entwicklung der Haldenzonierung infolge des Kompaktions- und Verformungsverhalten von Rückstandshalden ziehen. In einem Zeitraum von 7 Jahren (2013 (Bohrung) bis 2020 (geophysikalische Untersuchungen)) hat sich die Schichtgrenze Haldenmantel-Übergangszonen in der Bohrung B98/2013-HA um rd. 23 m in Richtung Haldentop verschoben, wie aus dem Vergleich der Tiefenlagen in der Tabelle 16 mit jenen in Tabelle 19 erkennbar ist. Die Schichtgrenze zwischen Übergangszonen und Haldenkern hat sich um rd. 13 m in Richtung Haldentop verschoben. Daraus resultiert ein größerer Haldenkern.

Ein vergleichbarer Effekt lässt sich im Bereich der Ostflanke der Bestandshalde Hattorf erkennen. Nach Überschüttung der Ostflanke im Jahr 2015/2016 mit einer Überschüttungsdicke von rd. 100 m (horizontal) ist bereits 2020 eine fortschreitende Zonierung nach Osten hin zu beobachten (Bild 26). Unter Berücksichtigung der sehr konservativen Grenzkriterien lässt sich hier eine Dicke von Haldenmantel und Übergangszonen von rd. 80 m aus den geophysikalischen Untersuchungen ableiten. Diese Tiefenlage liegt in der Bandbreite der erkundeten Schichtgrenze Übergangszonen-Haldenkern an den älteren Haldenflanken Hattorf und Wintershall. Hier wurde die Schichtgrenze zwischen Übergangszonen und Haldenkern in 92 m (B99/2013 HA, Alter der Flanke: 24 bis 28 Jahre) bzw. 68 m (B72/2014-WI, Alter der Flanke 24 Jahre) erkundet.

An beiden Rückstandshalden ist eine in seiner Größe fortgeschrittene Ausbildung des Haldenkerns in älteren Haldenbereichen bzw. an älteren Haldenflanken zu beobachten. Die jüngeren Haldenbereiche, d.h. die Ostflanke der Halde Hattorf und die Westflanke der Halde Hattorf sowie beide Haldentops, weisen i.d.R. größere Tiefenlagen der Schichtgrenze Übergangszonen-Haldenmantel auf. Dies korreliert eindeutig mit der Beschüttung der Halden.

Eine fortschreitende Ausbildung eines dichten Haldenkerns und die fortschreitende Verlagerung der Schichtgrenzen in Richtung jüngerer Haldenflanke ist an beiden Halden zu erwarten.

5 Vergleich der Haldenkernbohrungen und der geophysikalischen Untersuchungen an den Halden Hattorf und Wintershall

Zusammenfassend werden die Ergebnisse der Haldenbohrungen, Feld- und Laborversuche an den Halden Hattorf und Wintershall [U2.1], [U2.2] den Ergebnissen der geophysikalischen Untersuchungen in [U2.5] in Tabelle 22 gegenübergestellt.

		Liegezeit	Haldenmantel-Übergangszone	Übergangszone-Haldenkern
			geophysikalische Untersuchungen	
			Tiefe unterhalb Bohrersatzpunkt gemäß Grenzkriterien $\geq 6 \Omega\text{m} / \geq 3.200 \text{ m/s}$	Tiefe unterhalb Bohrersatzpunkt gemäß Grenzkriterien $\geq 8 \Omega\text{m} / \geq 3.600 \text{ m/s}$
Hattorf	Haldentop HA B98/2013-HA (vertikal)	19 a bis 21 a *)	45 m	65 m
	östlicher Haldenfuß HA (horizontal)	4 a bis 5 a	55 m	80 m
			Haldenbohrung	
			Tiefe unterhalb Bohrersatzpunkt gemäß [U2.1]	Tiefe unterhalb Bohrersatzpunkt gemäß [U2.1]
	B97/2013-HA (vertikal)	25 a bis 28 a	36 m	62 m
	B99/2013-HA (horizontal)	17 a bis 21 a	42 m	92 m
	B100/2013-HA (horizontal)	5 a bis 8 a	52 m	97 m
	B104-2013-HA (horizontal)	4 a bis 7 a	42 m	102 m
	VB B1-80 m (vertikal)	9 a bis 12 a	55 m	64 m
HB B1-80 m (horizontal)	9 a bis 12 a	25 m	55 m	

Fortsetzung siehe nächste Seite

Fortsetzung:

		Liegezeit	Haldenmantel-Übergangszone	Übergangszone-Haldenkern
			geophysikalische Untersuchungen	
			Tiefe unterhalb Bohrersatzpunkt gemäß Grenzkriterien $\geq 6 \Omega\text{m} / \geq 3.200 \text{ m/s}$	Tiefe unterhalb Bohrersatzpunkt gemäß Grenzkriterien $\geq 8 \Omega\text{m} / \geq 3.600 \text{ m/s}$
Wintershall	Haldentop WI	-	max. 60 m	70 m / 90 m **)
	östlicher Haldenfuß WI (horizontal)	30 a	20 m	50 m
			Tiefe unterhalb Bohrersatzpunkt gemäß [U2.1], [U2.2]	Tiefe unterhalb Bohrersatzpunkt gemäß [U2.1], [U2.2]
	B72/2014-WI (horizontal, projiziert an die Westflanke)	17 a bis 22 a ***)	42 m	68 m

*) weitere 2 bis 3 a bis zur seitlichen An-/Überschüttung bzw. 7 a bis geophysikalische Untersuchung

**) Versatz im Verlauf des Grenzkriteriums hin zur jüngeren Westflanke der Halde Wintershall

***) maßgebender Tiefbereich in B72/2014-WI bis 100m, an Westflanke im Schnitt C-C [U2.5] Liegezeit 21 a bis 22 a

Tabelle 22: Zusammenstellung der Haldenzonierungen gemäß Haldenbohrungen und geophysikalischen Untersuchungen an den Halden Hattorf und Wintershall

Die in Tabelle 22 angegebenen Liegezeiten beziehen sich auf das Alter der Haldenbereiche zum Zeitpunkt der jeweiligen Bohrung.

Die Haldenzonierungen der Bohrungen leiten sich aus den anhand der Feld- und Laboruntersuchungen abgeleiteten Grenzkriterien (siehe Kapitel 3.7) ab. Diese Grenzkriterien korrelieren u.a. mit den ermittelten Dichten, Porositäten, Durchlässigkeiten und Wassergehalte. Darüber hinaus wurden bei allen Bohrungen die Ergebnisse der Kamerabefahrungen, der Ausflussmessungen, chemische Zusammensetzungen etc. berücksichtigt.

Die Haldenzonierungen der übrigen Haldenbereiche, d.h. die nicht direkt durch Bohrungen aufgeschlossenen Haldenflanken und das Haldentop Wintershall, ergeben sich aus den Grenzkriterien der geophysikalischen Untersuchungen (siehe Kapitel 4.4). Die Grenzkriterien leiten sich aus den im Bereich der geophysikalischen Untersuchungen ausgeführten Horizontalbohrungen B99/2013-HA und B72/2014-WI ab.

In den Bildern 29 und 30 sind sowohl die Ergebnisse der Feld- und Laborversuche der Bohrungen an den Halden Hattorf und Wintershall (Dichte, Wassergehalt (105 °C Ofentrocknung), und Porosität), die Haldenzonierungen gemäß [U2.1] und [U2.2] sowie die sich aus den geophysikalischen Untersuchungen ergebenden Zonierungen für die übrigen Haldenbereiche dargestellt.

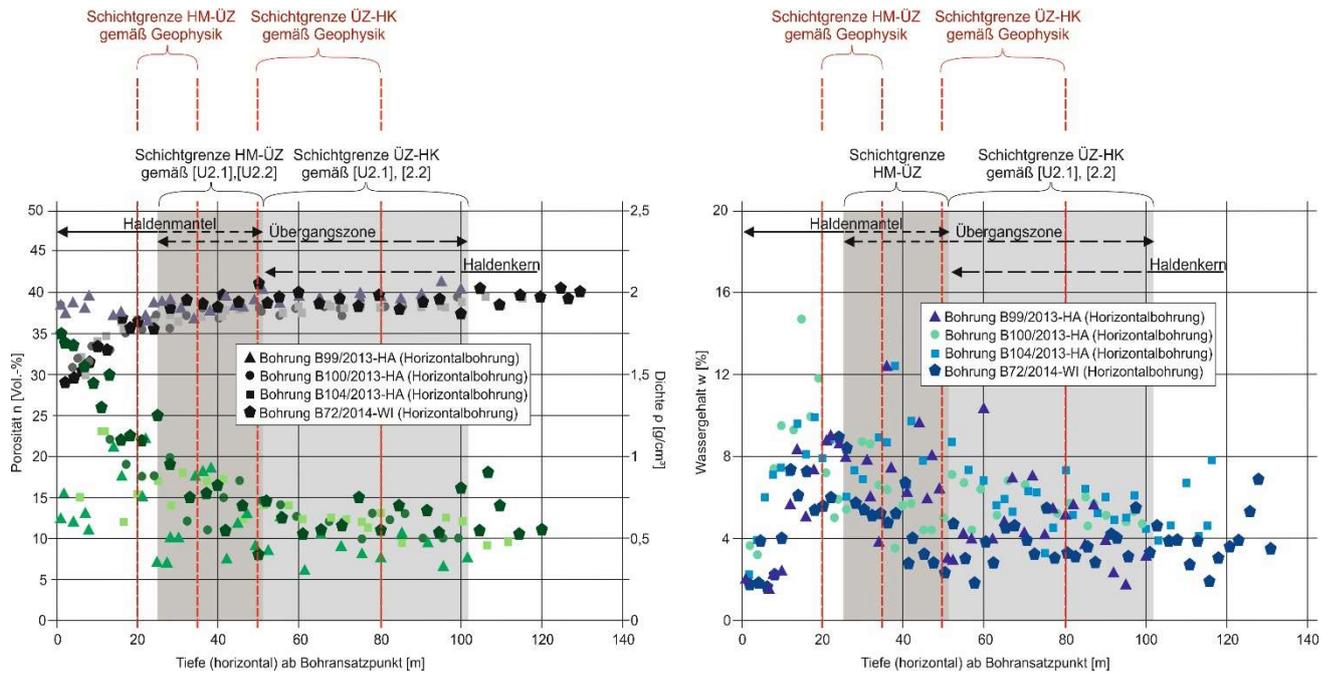


Bild 29: Zusammenstellung der Laborergebnisse der Horizontalbohrungen an den Halden Hattorf und Wintershall, der Haldenzonierungen gemäß [U2.1] und [U2.2] sowie der Haldenzonierungen gemäß geophysikalischer Untersuchungen

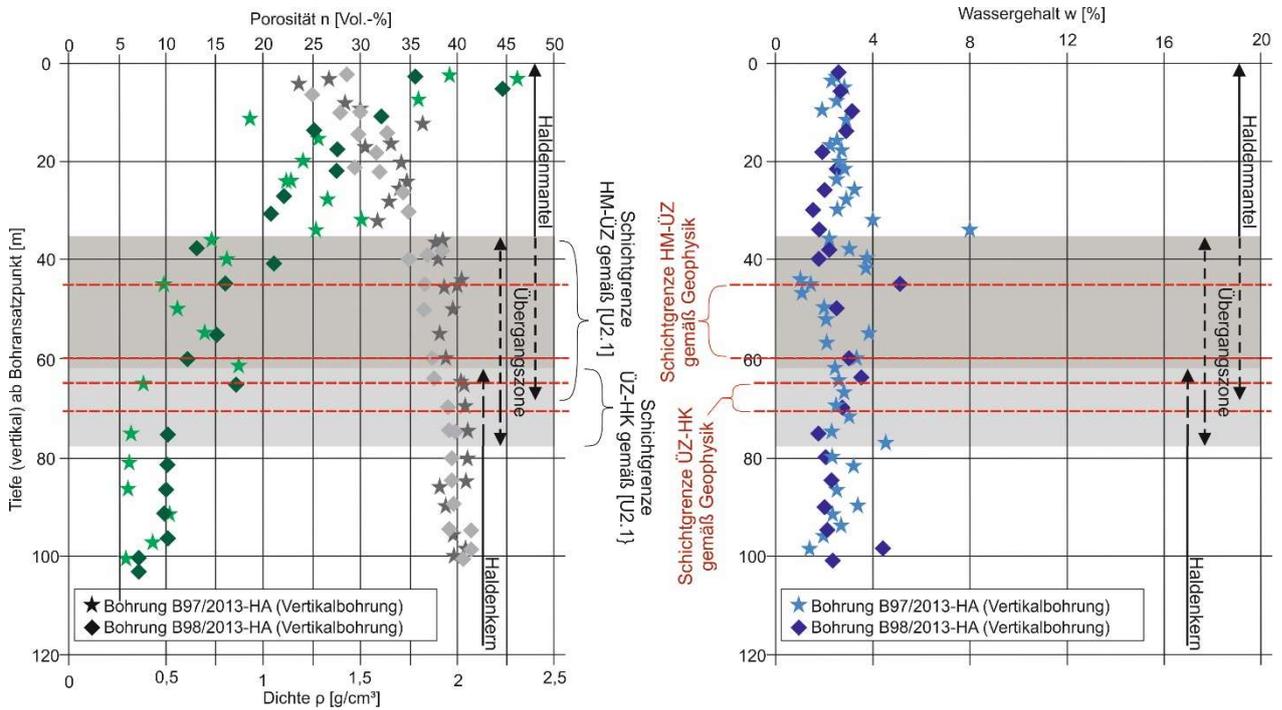


Bild 30: Zusammenstellung der Laborergebnisse der Horizontalbohrungen an der Halde Hattorf, der Haldenzonierungen gemäß [U2.1] sowie der Haldenzonierungen gemäß geophysikalischer Untersuchungen

Die aus den geophysikalischen Untersuchungen abgeleiteten Tiefenlagen der Schichtgrenzen zwischen Haldenmantel und Übergangszone bzw. zwischen Übergangszone und Haldenkern korrelieren sowohl in vertikaler als auch in horizontaler Richtung mit den aus den Bohrungen, Feld- und Laborversuchen Tiefenlagen. Sowohl für die Schichtgrenze Haldenmantel-Übergangszone als auch für die Schichtgrenze Übergangszone-Haldenkern liegen alle Ergebnisse, d.h. der geophysikalischen Untersuchungen wie auch der Bohrungen, in der selben Bandbreite.

6 Sachverständige Bewertung / Zusammenfassung

Aus sachverständiger Sicht kann die Modellvorstellung zum Haldenkörper mit der Ausbildung eines dichten, im Sinne der DIN 18130 nahezu undurchlässigen Haldenkerns bei Rückstandshalden nach Sichtung und Auswertung der bisher ausgeführten Haldenbohrungen bzw. Haldendurchörterung und den durchgeführten Feld- und Laborversuchen sowie den geophysikalischen Erkundungen an der Halde Hattorf bestätigt werden.

Diese Bestätigung stützt sich auf die nachfolgenden Punkte:

1. Haldenbohrungen und Haldendurchörterung:

Mit den umfangreichen Untersuchungen im Zuge der insgesamt 13 Haldenbohrungen an den Halden Niedersachsen-Riedel, Neuhoof-Ellers, Hattorf Wintershall und Zielitz sowie der Haldendurchörterung (Stollen) der Halden Bleicherode wurde bestätigt, dass mit zunehmender Bohrtiefe die Dichte zunimmt, die Porosität und die Durchlässigkeit abnimmt.

Aus den zahlreichen Feld- und Laborversuchen im Zuge der Haldenbohrungen und der Haldendurchörterung Bleicherode wurde die Modellvorstellung zur Ausbildung eines dichten Haldenkerns bei Rückstandshalden entwickelt.

Der dichte Haldenkern ist der Bereich im Haldeninneren, in dem im Vergleich zum gesamten Haldenkörper keine Strömungsprozesse stattfinden, und in dessen Haldenbasis damit auch keine für Auswirkungsprognosen relevante Restinfiltration eintritt. Im gegenständlichen Sachverständigen-Gutachten Nr. IK2014/01 wird synonym zum dichten Haldenkern auch „hydraulisch inaktiv“ oder „im bautechnischen Sinn dicht“ verwendet.

Die Modellvorstellung zur Ausbildung eines dichten Haldenkerns bei Rückstandshalden beruht auf:

- der Unterteilung des Haldenkörpers in Haldenmantel, Übergangszone und Haldenkern
- einem last- / zeitabhängigen Haldenkörperverhalten
- dem Einfluss der Kompaktion, Lösungsprozesse und Mineralumwandlungen auf das Haldenkörperverhalten
- dem Umstand, dass Wasserbewegungen i.d.R. im Haldenmantel und untergeordnet in der Übergangszone stattfinden
- einer zum Haldenkern hin abnehmenden, sehr geringen Porosität

- sehr geringen vertikalen Durchlässigkeiten im Haldenkern, d.h. auch keine Wasserbewegung selbst bei eingeschlossenen Laugenlinsen
- horizontale Durchlässigkeiten, die vielfach größer sind als die vertikalen Durchlässigkeiten

Ziel der Modellvorstellung zur Ausbildung des dichten Haldenkerns bei Rückstandshalden ist es, Aussagen zur Einteilung des Haldenkörpers in Haldenmantel, Übergangszone und Haldenkern, zu den Permeabilitäten des Haldenkörpers sowie zu hydraulisch aktiven Zonen treffen zu können. Diese dienen als Grundlage für die Prognose für Umweltauswirkungen einerseits und für die Entwicklung technischer Konzepte andererseits.

Auf Basis der zahlreichen Haldenbohrungen, Feld- und Laborversuche wird die Modellvorstellung zur Ausbildung des dichten Haldenkerns gemäß [U2.1] und [U2.2] sachverständigenseits bestätigt werden.

2. Befahrung der Haldendurchörterung Bleicherode:

Zur Verifizierung der Modellvorstellung zur Ausbildung des dichten Haldenkerns wurde ergänzend zu den Auswertungen der Haldenbohrung eine Befahrung der Haldendurchörterung Bleicherode durch den vereidigten geotechnischen Sachverständigen im Juli 2021 vorgenommen.

Hydraulisch aktive Zonen wurden bei der Befahrung der Haldendurchörterung Bleicheroden nur im äußeren Bereich des Stollens, d.h. im Bereich des Haldenmantels und der Übergangszone, erkundet. Der mittlere Stollenabschnitt und somit der Bereich des Haldenkerns war frei von Wasserwegsamkeiten sowie frei von wasserführenden Schichtgrenzen oder Wasser- bzw. Feuchteausstritten.

Auf Basis der Haldenbefahrung der Haldendurchörterung Bleicherode werden die Erkenntnisse aus den zahlreichen Haldenkernbohrungen sowie die darauf basierende Modellvorstellung zur Ausbildung eines dichten Haldenkerns gemäß [U2.1] und [U2.2] sachverständigenseits bestätigt. Mit dem durch die gesamte Halde verlaufenden Stollen wurde gezeigt, dass mechanische, chemische, hydrologische und hydrogeologische Erkenntnisse der Halden nicht nur lokal für den Bereich der einzelnen Haldenbohrungen gelten, sondern für den gesamten Querschnitt der Halde. Dabei ist zu berücksichtigen, dass alle Erkenntnisse aus der Befahrung bereits für eine Halde mit geringer Haldenhöhe von im Mittel 75 m und lokal maximal 100 m Gültigkeit haben.

3. Geophysikalische Untersuchungen an den Halden Hattorf und Wintershall:

Zur Bestätigung der Modellvorstellung zur Ausbildung eines dichten Haldenkerns wurden ergänzend geophysikalische Untersuchungen an den Bestandshalden Hattorf und Wintershall durchgeführt. Die Untersuchungsschnitte wurden so gewählt, dass die geophysikalischen Ergebnisse anhand von ausgeführten Haldenbohrungen verifiziert werden konnten.

Auch anhand der geophysikalischen Untersuchungen wurde die Modellvorstellung zur Ausbildung des dichten Haldenkerns bestätigt. Auf der Basis der geoelektrischen und seismischen Messungen lassen sich darüber hinaus Grenzkriterien für die Schichtgrenzen zwischen Haldenmantel und Übergangszone sowie zwischen Übergangszone und Haldenkern ableiten.

Die Festlegung der Grenzkriterien erfolgte anhand den horizontalen Haldenbohrungen B99/2013-HA und B72/2014-WI an den unbeeinflussten bzw. nicht durch weitere Überschüttung oder Lasteintrag beeinflussten Haldenflanken der Halden Hattorf und Wintershall. Die konservativ gewählten Grenzkriterien sind auf übrige Haldenbereiche übertragbar und liefern auf der sicheren Seite liegende Ergebnisse für die Tiefe der Schichtgrenzen zwischen Haldenmantel-Übergangszone bzw. Übergangszone-Haldenkern.

Aus den in Kapitel 4 dokumentierten Ergebnissen der geophysikalischen Untersuchungen ergibt sich in Haldenböschungsbereichen bzw. an Böschungsfüßen ohne direkte Aufschlüsse eine maximale Breite des Haldenmantels von **55 m** (Ostflanke Halde Hattorf). Im Bereich des Haldentops, welches an beiden Halden durch kontinuierliche Ausgleichsschüttung beeinflusst ist, ergibt sich eine maximale Breite des Haldenmantels von **60 m**.

Die Tiefenlage der Schichtgrenze zwischen Übergangszone und Haldenkern kann aus den geophysikalischen Untersuchungen für Haldenbereich ohne direkte Aufschlüsse/Bohrungen bei einer maximalen Tiefe (horizontal) ab Haldenflanke von **80 m** (Ostflanke Halde Hattorf) abgeleitet werden. Im Bereich des Haldentops, welches an beiden Halden durch kontinuierliche Ausgleichsschüttung beeinflusst ist, ergibt sich eine Tiefenlage der o.g. Schichtgrenze ab Haldentop von maximal **90 m**.

4. Fazit zum Komplex aller Untersuchungen:

Bezogen auf die Haldenaufstandsfläche ist der hydraulisch inaktive – d.h. im bautechnischen Sinn dichte – Haldenkern somit in einem mittleren Abstand zum Haldenfuß (horizontal) von rd. 70 bis 80 m anzutreffen. Dies wird durch die Ergebnisse der Befahrung der Haldendurchörterung Bleicherode bestätigt, wo bei deutlich geringeren Überschüttungshöhen vergleichbare Ergebnisse abgeleitet wurden.

Im Ergebnis der Auswertung der Haldenkörperbohrungen und der geophysikalischen Untersuchungen werden die bislang vorliegenden Abschätzungen zur Breite des hydraulisch aktiven Bereichs (Haldenmantel und Übergangszone) gemäß [2.4] mit rd. 90 m bis 110 m sachverständigen-seits als konservativ bestätigt.

Mit den geophysikalischen Messungen wurden außerdem eindeutig die last- und zeitabhängige Ausbildung des Haldenkerns und die Verlagerung von Übergangszone und Haldenmantel in Richtung Haldenflanken bzw. Haldentop bestätigt.

Mit den umfangreichen Feld-, Laboruntersuchungen und geophysikalischen Messungen wurde zweifelsfrei nachgewiesen, dass innerhalb des Haldenkörpers keine Hohlräume oder Klüfte vorhanden sind.

Mit allen Untersuchungsmethoden wurden die hydraulisch aktiven Zonen im äußeren Bereich, d.h. in der Haldenmantel und Übergangszone, der Rückstandshalden erkundet. In keiner Bohrung wurden vollständig gesättigte oder wasserführende Schichten angetroffen. Die Sättigung der im Labor untersuchten Rückstandssalzproben betrug < 50 Vol.-%.

Im Haldenkern können Wasserzutritte und Fließbewegungen auf Grund des hohen Anteils von Kristallwasser ausgeschlossen werden. Der Gesamtwassergehalt wird in diesem Bereich erwiesener Maßen maßgeblich durch Kristallwasser und nicht durch Porenwasser bestimmt. Die in den Bohrungen im Bereich des Haldenkerns ermittelten Porenwassergehalte liegen unter den Haftwassergehalten, d.h. unter dem Wassergehalt, der in den Poren entgegen der Schwerkraft gehalten werden kann. Diese Erkenntnis bestätigt die Modellvorstellung des hydraulisch inaktiven dichten Haldenkerns.

Abschließend ist sachverständigenseits auf der Basis der zur Verfügung stehenden Datenlage festzustellen, dass die Modellvorstellung zum Haldenkörper mit der Ausbildung eines dichten, im Sinne der DIN18130 nahezu undurchlässigen – im bautechnischen Sinne dichten – Haldenkerns bei Rückstandshalden zutreffend ist.

Projektbearbeitung: Eva Eden-Teutsch M.Sc.

Projektleitung: Prof. Dr.-Ing. Steffen Leppla

Katzenbach

Prof. Dr.-Ing. Rolf Katzenbach
-Vereidigter Sachverständiger

M. Seip

Dipl.-Ing. Matthias Seip
-Prüfsachverständiger nach HPPVO-

Verteiler:

- K+S Aktiengesellschaft
- z.d.A. (IK2014, Se)

5 x Original
2 x Kopie