

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

Band 3.17.4N der Antragsunterlage

Modellierung geohydraulischer Vorgänge in Rückstandshalden

Vorhabenträger:

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



Verfasser:

PD Dr.-Ing. habil. A. Palm
upi UmweltProjekt Ingenieurgesellschaft mbH
Breite Straße 30, 39576 Stendal

Dipl.-Hydrol. M. Tichatschke
IHU Gesellschaft für Ingenieur-, Hydro- und Umweltgeologie mbH, NL Dresden
Reichenbachstraße 55, 01069 Dresden



PD Dr.-Ing. habil. A. Palm



Dipl.-Hydrol. M. Tichatschke

Impressum

Fassung vom 13. Dezember 2021

Ansprechpartner: PD Dr.-Ing. habil. A. Palm
Telefon: +49-3931 6892 0
e-Mail: a.palm@upi-umweltprojekt.de
Web: <https://www.upi-umweltprojekt.de>

Ergebnisse im Überblick:

Die Erfahrungen und Vorstellungen der hydrodynamischen Prozesse in einem Rückstandskörper lassen sich mit HYDRUS 2D/3D (Version 3.01) unter Beachtung der getroffenen konservativen Annahmen und Randbedingungen plausibel abbilden.

Das Niederschlagswasser strömt an der Haldenoberfläche vertikal in die Mantelzone ein und fließt vorzugsweise in der Mantelzone in Richtung Böschungsbereich und Haldenfuß ab. Die auf diese Weise an den Haldenrandgräben an der West- und Ostseite des Haldengesamtmodells austretende Wassermenge beträgt rd. 96 % vom Modelloutput.

Dem zentralen Entwässerungselement EHG am Übergang von der Bestandshalde in die Haldenerweiterung, das im betrachteten Endzustand der Halde quasi im Haldenkern „eingebunden“ ist, tritt nur ein geringer Anteil von rd. 1,8 % des jährlichen Niederschlagsdargebots zu. Anhand der Fließrichtungen lässt sich jedoch auch ein Zustrom von der Bestandshalde erkennen, so dass für das EHG von einer langfristigen Entwässerungswirkung auf die Bestandshalde auszugehen ist.

Mit den Bilanzgrößen Haldenerweiterung System Basisabdichtung (SyBa) und Bestandshalde Basisdichtung (BA) wird die Restinfiltration an der Basis des Schnittes B2 (Unterkante SyBa bzw. BA) mit implementierten technischen Einrichtungen für die Gesamthalde, bestehend aus Bestands- und Erweiterungshalde, in einer Größe von rd. 2,6% berechnet. Modellberechnungen für den Schnitt B2 ohne implementierte technische Einrichtung bei vergleichbaren konservativen Ansätzen für den Haldenkörper ergeben eine Restinfiltration von ca. 3,5%. Es wird empfohlen, sie für die Berechnungen im Grundwassermodell zu verwenden.

Die hydraulischen Berechnungen stützen damit die bisherigen Erfahrungen und Kenntnisse bei der Beschreibung der Fließprozesse.

Bericht

Modellierung geohydraulischer Vorgänge in Rückstandshalden

Auftraggeber:

K+S Minerals and Agriculture GmbH
Standort Hattorf
Werk Werra
Postfach 1163
36267 Philippsthal

Auftragnehmer:

upi UmweltProjekt Ingenieurgesellschaft mbH
Breite Straße 30, 39576 Stendal

IHU Gesellschaft für Ingenieur-, Hydro- und Umweltgeologie mbH
Am Sportplatz 1, 99734 Nordhausen

Stand, 13.12.2021



Inhaltsverzeichnis

1	Veranlassung und Zielstellung	6
2	Zusammenfassung der dokumentierten standortspezifischen Erkenntnisse zum Haldenkörperverhalten	6
3	Modellierung	7
3.1	Beschreibung des Modells HYDRUS	7
3.2	Eignung und Grenzen der Anwendung von HYDRUS zur Beschreibung der haldeninternen Fließbewegungen	8
3.3	Modellaufbau, Modellrandbedingungen, Modellparameter	9
3.4	Berechnungsergebnisse	14
4	Ergebnisdiskussion	17
5	Zusammenfassung	17
6	Literaturverzeichnis	19

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schnitt B2 – Hattorf	10
Abbildung 2: Darstellung der Modellgeometrie des Schnitts B2 – Endzustand – Hattorf ..	11
Abbildung 3: Darstellung der Modellgeometrie des Schnitts B2 – Endzustand – Hattorf mit Haldenkern, zentrales Entwässerungselement (Kreiselement), Entwässerungsschicht (gelb), Basisabdichtung der Erweiterungsfläche (rotbraun) und Basisabdichtung der Bestandshalde (dunkelbraun)	12
Abbildung 4: Darstellung der Modellgeometrie des Schnitts B2 – Endzustand – Hattorf, Haldenrandgraben West, Böschungsfuß	13
Abbildung 5: Darstellung der Berechnungsergebnisse des Schnitts B2 – Endzustand – Hattorf, mit Abbildung der Fließgeschwindigkeiten und der Fließrichtung innerhalb der Haldenerweiterung sowie der Bestandshalde	14
Abbildung 6: Darstellung der Berechnungsergebnisse des Schnitts B2 – Endzustand – Hattorf, Zoom Westböschung, mit Abbildung der Fließgeschwindigkeiten, Fließrichtung und Schichtgrenzen (Legende siehe Abb.5).....	15
Abbildung 7: Darstellung der Berechnungsergebnisse des Schnitts B2 – Endzustand – Hattorf, Bilanzgrößen bei einem Jahresniederschlag von 815mm	16

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Parametertabelle der verwendeten Materialeigenschaften der Rückstandshalde	14
Tabelle 2: Tabelle der berechneten Haldenbilanzengrößen	16

1 Veranlassung und Zielstellung

Mit der Fortsetzung des Genehmigungsverfahrens zur Haldenerweiterung Hattorf für den Planfeststellungsabschnitt der Phase 3 soll für den Standort Hattorf des Werkes Werra der K+S Minerals and Agriculture GmbH ab Ende 2024 die Standortsicherung für die nächsten mindestens 11 Jahre erfolgen.

Die Strömungsprozesse und Bewegungen von Haldenwasser im Haldenkörper wurden, beziehungsweise werden, vor dem Hintergrund des mechanischen Haldenkörperverhaltens - beschrieben durch Kompaktion und Viskoplastizität - sowie des chemischen Haldenkörperverhaltens – beschrieben durch Lösungs- und Rekristallisationsvorgänge - kontrovers diskutiert. Es bestehen hierzu divergente fachtechnische Auffassungen zwischen der Planfeststellungsbehörde RP Kassel und ihren Fachgutachtern sowie der Vorhabenträgerin. Die in der Vergangenheit durchgeführten sehr umfangreichen Haldenbohrungen und Laboruntersuchungen zum mechanischen, chemischen und hydraulischen Haldenkörperverhalten an den unterschiedlichsten Standorten der K+S Minerals and Agricultural GmbH belegen die Zonierung des Haldenkörpers. Im Sommer und Herbst 2020 wurden zur Bestätigung der Modellvorstellung zur Ausbildung eines dichten Haldenkerns geophysikalische Untersuchungen an der Bestandshalde Hattorf durch die K-UTEC durchgeführt. Im darauffolgenden Jahr wurden zur Bestätigung ergänzende geophysikalische Untersuchungen an der Bestandshalde Wintershall durchgeführt. Die Ergebnisse sind im Band 3.17.2N dokumentiert³ und durch die Ingenieursozietät Professor Dr.-Ing. Katzenbach im Band 3.17.3N gutachterlich bewertet worden⁷. Das Haldenkörperverhalten führt zu differenzierten vertikalen und lateralen Strömungsprozessen im Haldenkörper die sich unter Verwendung des Programms HYDRUS-2D/3D (Version 3.01) plausibel darlegen lassen.

2 Zusammenfassung der dokumentierten standortspezifischen Erkenntnisse zum Haldenkörperverhalten

Das Haldenkörperverhalten lässt sich wie folgt beschreiben:

- Zeitabhängige Einflüsse infolge der Kompaktion des Rückstandes, der niederschlagsbedingten Lösungsprozesse und Mineralumwandlungen wirken auf den Haldenkörper und verändern diesen^{1,2,4}.
- Die Haldenkörperzonierung – Kernzone, Übergangszone und Mantelzone mit differenzierten Eigenschaften (ρ , k_f -Wert) ist durch eine Reihe von Untersuchungen plausibel nachgewiesen worden^{1,2,3}.
- Mineralumwandlungen finden im Haldenkörper statt, was durch die Neubildung von Sekundärphasen belegt ist^{1,2,4}.
- In Randbereichen erfolgt bevorzugt die Auslösung von Wertstoff-Resten und von Sekundärbildungen^{1,2,4}.
- Es bilden sich hydraulisch differenzierte, konturparallele Schichten/Zonen mit in horizontaler und vertikaler Richtung unterschiedlichen Durchlässigkeiten aus^{1,2,4}.
- Die vorstehenden dargelegten Prozesse führen zur Herausbildung eines Haldenkerns, der über geringe Porositäten und Durchlässigkeiten verfügt und als hydraulisch inaktiv aufgefasst werden kann^{1,2}.
- Die (Halden-)Wasserbewegungen vollziehen sich bevorzugt im Haldenmantel und untergeordnet in der Übergangszone^{1,2}.

- Wasserbewegungen (Strömungsprozesse) bilden sich entlang bevorzugter k_r -differenzierter Wegsamkeiten aus, diese stellen sich infolge der Lösungsprozesse sukzessive ein^{1,2}.
- Die Rückstandsrestfeuchte wird im stark verdichteten Haldenkern nicht vollständig ausgepresst, sondern ist als Haft- bzw. Kristallwasser gebunden^{1,2}.
- Die horizontalen Durchlässigkeiten übersteigen die vertikalen (k_r -Wert nimmt von oben nach unten ab und von innen nach außen zu, ρ nimmt von oben nach unten zu und von innen nach außen ab)^{1,2}.
- Es kommt zur Ausbildung schwebender Haldenwasserspiegel und einem Abfließen der Haldenwässer in der Haldenmantelzone^{1,2}.
- Gealterte und danach überschüttete Haldenoberflächen (Schüttflächen) wirken zunächst als initiale Wegsamkeiten, die sich mit zunehmender Kompaktion verschließen und dann nur noch eine untergeordnete hydraulische Wirksamkeit haben^{1,2}.
- Die Messungen der physikalischen Eigenschaften elektrischer spezifischer Widerstand und Geschwindigkeit weisen eine im Wesentlichen konturparallele Verteilung auf, was die Modellvorstellung eines zonierten Haldenaufbaus zur Erklärung der strömungstechnischen/-dynamischen Prozesse belegt³.
- Die im vorstehenden Haldenkernbereich gemessenen Kompressionswellengeschwindigkeiten (westlicher Untersuchungsbereich der Halde Hattorf) liegen im Bereich von Geschwindigkeiten wie im gewachsenen Salz³ und die im Haldenkernbereich gemessenen elektrischen Widerstände können ebenfalls nach Erfahrungs- und Literaturwerten in der Größenordnung mit denen im gewachsenen Salz (in der Lagerstätte) verglichen werden³.
- Die geometrische Kontur von Haldenkern, Übergangsbereich und Haldenmantel (horizontale Bohrung B99-2013-HA¹) wurde durch die Ergebnisse der Geoelektrik im Wesentlichen bestätigt³.

3 Modellierung

3.1 Beschreibung des Modells HYDRUS

Für die Ermittlung der vertikalen und horizontalen Fließprozesse in der Rückstandshalde Hattorf wurde das Programm HYDRUS-2D/3D (Version 3.01) verwendet. Das Programm ermöglicht es, die Bewegungen eines Fluids durch die ungesättigte und gesättigte Zone in einem porösen Medium nach den systembeschreibenden Differentialgleichungen (modifizierte Richards-Gleichung) zu berechnen. Die modifizierte Richards-Gleichung verknüpft die Kontinuitätsgleichung mit der Darcy-Gleichung (Darcy-Gesetz) und setzt die Fluidströmung sowie die Vorratsänderungen in Beziehung. Die nachfolgende Differentialgleichung zur Beschreibung der Fließprozesse ist in HYDRUS-2D/3D⁵ implementiert und wird pro variablem Zeitschritt numerisch gelöst.

Allgemeine Fließbewegungsgleichung

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{d}{dx_i} \left[K \left(K_{ij}^A \frac{dh}{dx_j} + K_{iz}^A \right) \right] - S \quad \text{Glg. 1}$$

$$K(h, x, y, z) = K_s(x, y, z) K_r(h, x, y, z)$$

..mit:

θ ...volumetrischer Wassergehalt in $[m^3/m^3]$

h ... Druckhöhe $[m]$

S ...Absenkungsterm $[d^{-1}]$

x_i ...Raumkoordinate $[m]$

t ...Zeit $[d]$

K_{ij}^A ...Komponenten des dimensionslosen Anisotropietensors K^A $[-]$

K ...ungesättigte hydraulische Leitfähigkeitsfunktion $[m/d]$

K_r ...relative hydraulische Leitfähigkeit $[-]$

K_s ...gesättigte hydraulische Leitfähigkeit $[m/d]$

Die ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeitsfunktionen werden durch die Parameter $\theta(h)$ und $K(h)$ beschrieben und sind im Allgemeinen nichtlineare Funktionen des Wassergehalts beziehungsweise des Wasserdrucks. Zur Beschreibung der nichtlinearen Funktion der Fließprozesse in der ungesättigten Zone werden die sogenannten van Genuchten-Parameter α und n verwendet. Weiterführende Informationen zum theoretischen Hintergrund können dem technischen Handbuch des Programmsystems HYDRUS 2D/3D entnommen werden⁵.

3.2 Eignung und Grenzen der Anwendung von HYDRUS zur Beschreibung der haldeninternen Fließbewegungen

Bei der numerischen Modellierung der vertikalen und lateralen Fließprozesse in einer Rückstandshalde sind auf Basis der verwendeten o.g. Gleichungen (siehe Glg.1) die Parameter auf die Bedingungen einer Rückstandshalde anzupassen. Das ist notwendig, um die komplexen physikalisch-chemischen Umwandlungs-, Verformungs- und Ablaugsprozesse der Halde Hattorf zu berücksichtigen. Insoweit ist das Programmsystem Hydrus geeignet, ein plausibles sowie belastbares Abbild der hydraulischen Fließprozesse abzuleiten, welches sich mit den umfangreichen Untersuchungen und Erfahrungen beim Betrieb von Rückstandshalden deckt. Hier sei auf die Ergebnisse der Haldenkörperbohrungen sowie aus den geophysikalischen Untersuchungen verwiesen.

Die hydraulischen Eigenschaften des Rückstandsmaterials einer Rückstandshalde unterscheiden sich von den physikalisch-chemischen Eigenschaften von denen herkömmlicher Böden. Für den Rückstand liegen keine van Genuchten-Parameter zur Beschreibung der nichtlinearen Funktion der Fließprozesse in der ungesättigten Zone vor. Darüber hinaus sind herkömmliche bodenhydrologische Untersuchungsmethoden und Versuchseinrichtungen für die Untersuchung von Rückstand in der Regel ungeeignet. Auf der Basis von Laborversuchen und Erfahrungswerten wurden entsprechende van-Genuchten-Parameter abgeleitet.

Nachfolgend sind rückstandstypischen Eigenschaften dargestellt:

- Die Rückstandshalde bildet eine Zonierung aus (Kern-, Übergangs- und Mantelzone), mit unterschiedlicher hydraulischer Leitfähigkeit in jeder Zone und einer Verringerung der Leitfähigkeit mit Zunahme der Haldenauflast.

- Die Porosität sinkt mit zunehmender Kompaktion.
- Die Permeabilität sinkt mit zunehmender Kompaktion.
- Die Dichte steigt mit zunehmender Kompaktion.
- Der kapillare Aufstieg von Haldenwasser im Rückstandskörper ist vernachlässigbar gering.
- Alterations- und Strömungsprozesse sind im oberflächennahen Haldenbereich in Verbindung mit den klimatischen Einflüssen besonders ausgeprägt.
- Der Lösungs-transport innerhalb der Salzhalde erfolgt in den Zwischenräumen der Salzkristalle auf Basis des gravitativen hydraulischen Gradienten sowie der hydraulischen Leitfähigkeitseigenschaften des Rückstandsmaterials.
- Das Material der Rückstandshalden weist ein viskoplastisches Verhalten auf.
- Bedingt durch Niederschlagsereignisse finden Ablaugungsprozesse statt.
- Die lateralen hydraulischen Durchlässigkeiten sind bis 60-fach größer als die vertikalen Durchlässigkeiten (großer Anisotropiekoeffizient).

Für die Abbildung der Durchsickerung des Haldenkörpers sowie die Berechnung der Restinfiltration ist primär das Verhältnis der horizontalen zur vertikalen hydraulischen Durchlässigkeit (Anisotropie des Rückstandsmaterials) relevant, welche maßgeblich vom Kompaktionsgrad des Rückstandsmaterials beeinflusst wird. Darüber hinaus weist, wie oben dargelegt, das Rückstandsmaterial komplexe physikalisch-chemische Prozesse auf, die das hydraulische Verhalten der Rückstandshalde beeinflussen.

Das Kompaktionsverhalten des Haldenkörpers, die (hydro-)chemische Zusammensetzung von Rückstandsmaterial und Salzlösung und die chemisch-mineralogischen Eigenschaften des Rückstands und damit letztlich auch die Ablaugungs- und Umwandlungsprozesse, die in einer Veränderung der Kristallstruktur resultieren, sind indirekt im gewählten Parametersatz erfasst, da sie zur Ausbildung des Gefüges und damit den Permeabilitäten und Anisotropien beitragen.

Hydraulische Untersuchungen von Schneider et al.⁶ zeigen, dass die hydraulische Modellierung Richards-Gleichung möglich ist von Nicht-Böden (z. B. Beton, Mörtel) auf Basis der herkömmlichen modifizierten.

Unter Beachtung der aufgeführten Vereinfachungen, Annahmen und Randbedingung kann daher grundsätzlich mit HYDRUS 2D/3D ein plausibles Abbild der hydraulischen Fließprozesse in Rückstandshalden ermittelt werden. Durch die Möglichkeit der flexiblen Modifizierung der hydraulischen Eigenschaften der einzelnen Schichten können die rückstandstypischen Eigenschaften nachgebildet werden.

3.3 Modellaufbau, Modellrandbedingungen, Modellparameter

Repräsentativer Schnitt

Der Modellaufbau erfolgt gemäß dem Schnitt B2 (siehe nachfolgende Abbildung 1), der sich an der Salzhaldentomographie³ orientiert. Die technischen Einrichtungen an der Haldenbasis, des Haldenrandgrabens, die Berücksichtigung der örtlichen Gefälleverhältnisse für den Endzustand einschließlich der Beschüttung der Haldenerweiterung Phase 1 inkl. einer 100 m breiten Berme wurden dabei berücksichtigt. Der Schnitt B2 kombiniert die Verhältnisse an der Bestandshalde im Schnitt B-B, in dem umfangreiche Untersuchungsergebnisse anhand von Haldenbohrungen (RBP HA-04/09,

Band 3.17) sowie einer Salzhaldentomographie² vorliegen, mit dem Geländeverlauf sowie der geplanten Kontur im Schnittbereich der geplanten Haldenerweiterung Phase 3.

Im Bereich der Erweiterungshalde wird die Basisabdichtung mit einer Gesamtmächtigkeit von 0,55 m berücksichtigt (untere Lage $d = 0,25 \text{ m}$, $k_f = 3,0 \times 10^{-10} \text{ m/s}$, obere Lage $d = 0,3 \text{ m}$, $k_f = 3,0 \times 10^{-10} \text{ m/s}$). Die Linienentwässerungselemente (EEÜ und EEM) bleiben in dem konservativen Modellansatz unberücksichtigt.

Als Basisabdichtung unter der Bestandshalde wurde eine tonmehlvergütete mineralische Dichtung mit einer Mächtigkeit von 0,3 m und einem $k_f = 1,0 \times 10^{-9} \text{ m/s}$ angesetzt.

Die Anbindung der Haldenerweiterung an die Bestandshalde wurde als Dränage mit $k_f = 1,0 \times 10^{-2} \text{ m/s}$ oberhalb der mineralischen Dichtung berücksichtigt.

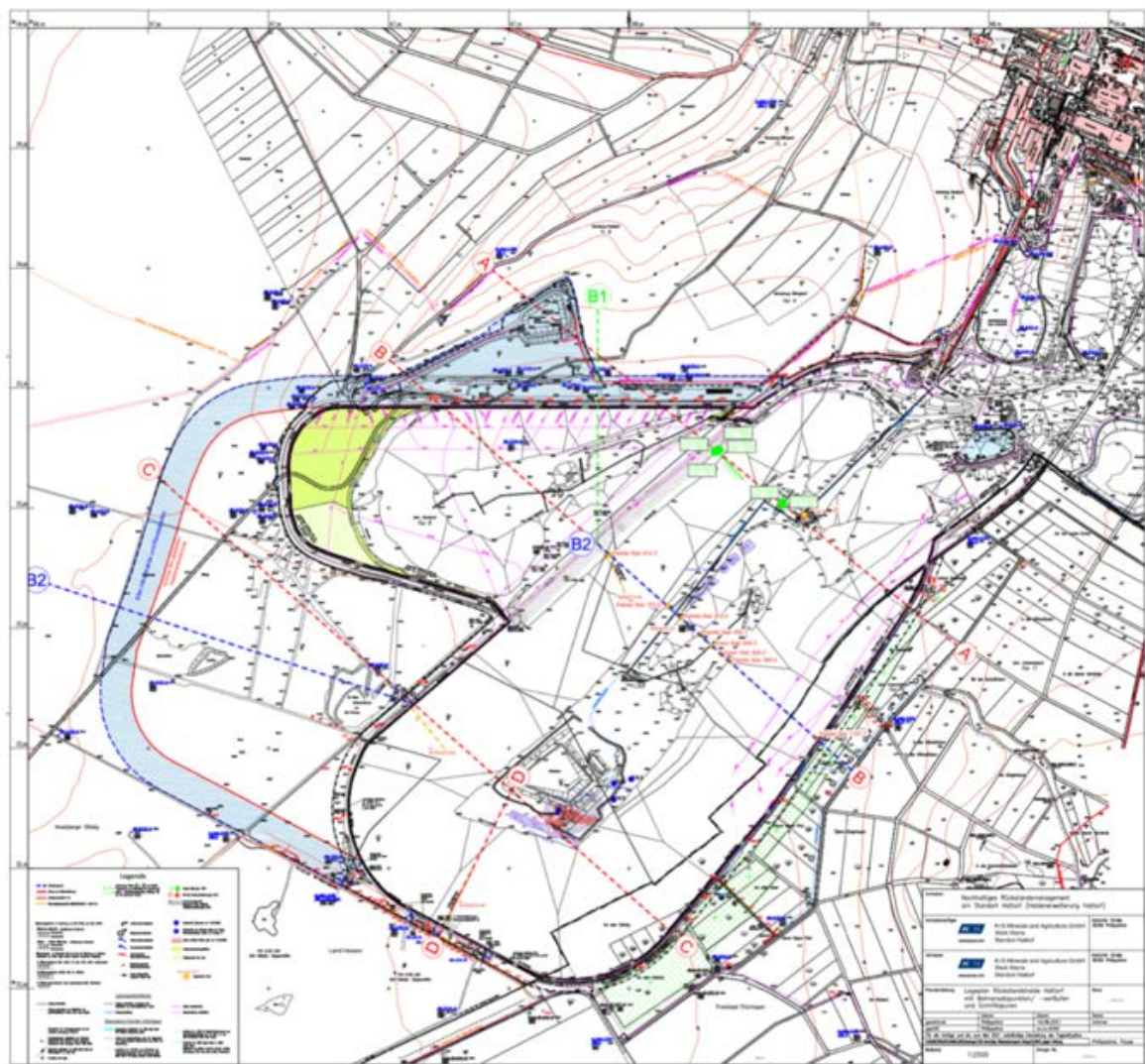


Abbildung 1: Schnitt B2 – Hattorf

Modellaufbau / Modellgeometrie

Für die geometrische Umsetzung des Haldenkörperaufbaus wurden die vorliegenden Daten des exemplarischen 2D-Schnitts B2 im Endzustand der Beschüttung der Erweiterung der Rückstandshalde Hattorf aufbereitet und unter Verwendung des graphischen

Präprozessors in HYDRUS 2D/3D implementiert. Die nachfolgende Abbildung 2 veranschaulicht das Ergebnis der festgelegten Haldenkörperzonierungen.

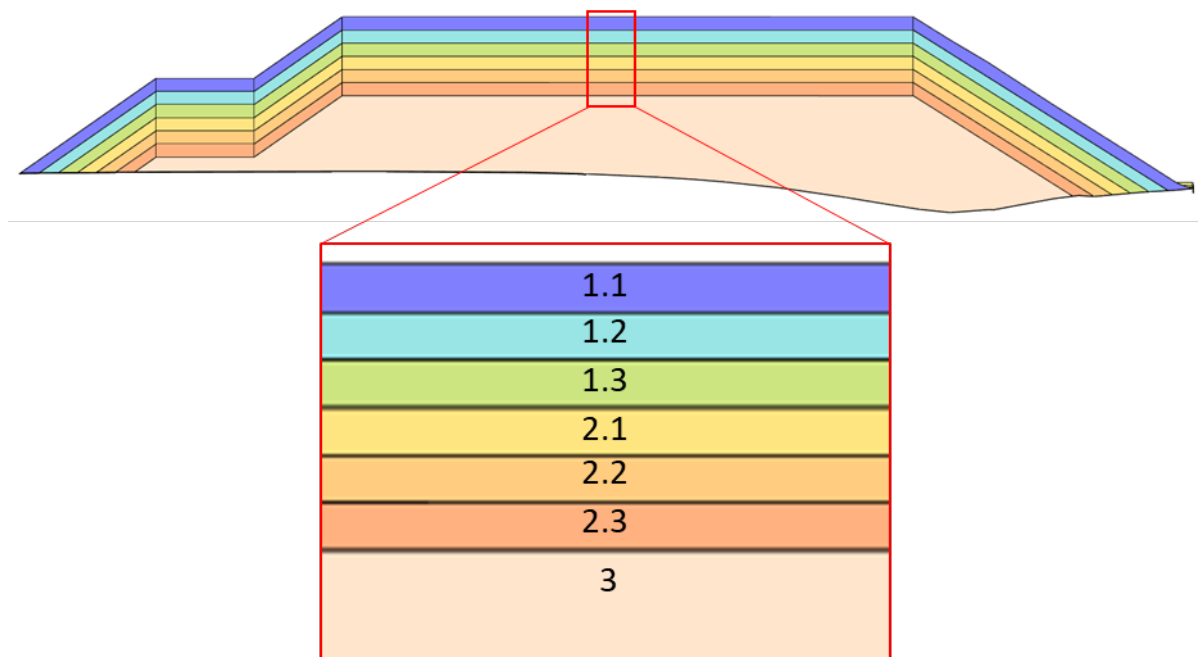


Abbildung 2: Darstellung der Modellgeometrie des Schnitts B2 – Endzustand – Hattorf

Die räumliche Diskretisierung der einzelnen Schichten basiert auf den Prozessvorstellungen zum Haldenkörperverhalten gemäß den vorstehenden Ausführungen. Die Schichtendimensionierung wurde wie folgt gewählt (von der Haldenoberkante beginnend nach unten):

- 1.1 Blaue Schicht: Haldenmantelzone (M1) bis 15 m uHaldenOK
- 1.2 Türkisfarbene Schicht: Haldenmantelzone (M2) bis 15 m uM1
- 1.3 Grüne Schicht: Haldenmantelzone (M3) bis 15 m uM2
- 2.1 Gelbe Schicht: Haldenübergangszone (Ü1) bis 15 m uM3
- 2.2 orangene Schicht: Haldenübergangszone (Ü2) bis 15 m unter Ü1
- 2.3 orange-rote Schicht: Haldenübergangszone (Ü3) bis 15 m unter Ü2
- 3. Hellorangene Schicht: Haldenkern, ab 90 m Mächtigkeit Auflast

Die Gesamtlänge des 2D-Schnitts beträgt ca. 1200 m. Die maximale vertikale Mächtigkeit ca. 220 m.

Zusätzlich zur Haldenkörperzonierung erfolgte die Implementierung der technischen Einrichtungen der Bestands- und Erweiterungshalde. In dem Modellteil der Bestandshalde wurde die Basisabdichtung und der Haldenrandgraben implementiert. Für die Erweiterungshalde wurde das System Basisabdichtung (mineralische Dichtungen Entwässerungsschicht) sowie der Haldenrandgraben berücksichtigt. Die nachfolgende

Abbildung 3 zeigt einen Zoom auf das zentrale Entwässerungselement an der Haldenbasis beim Übergang der Bestandshalde zur Erweiterungsfläche.

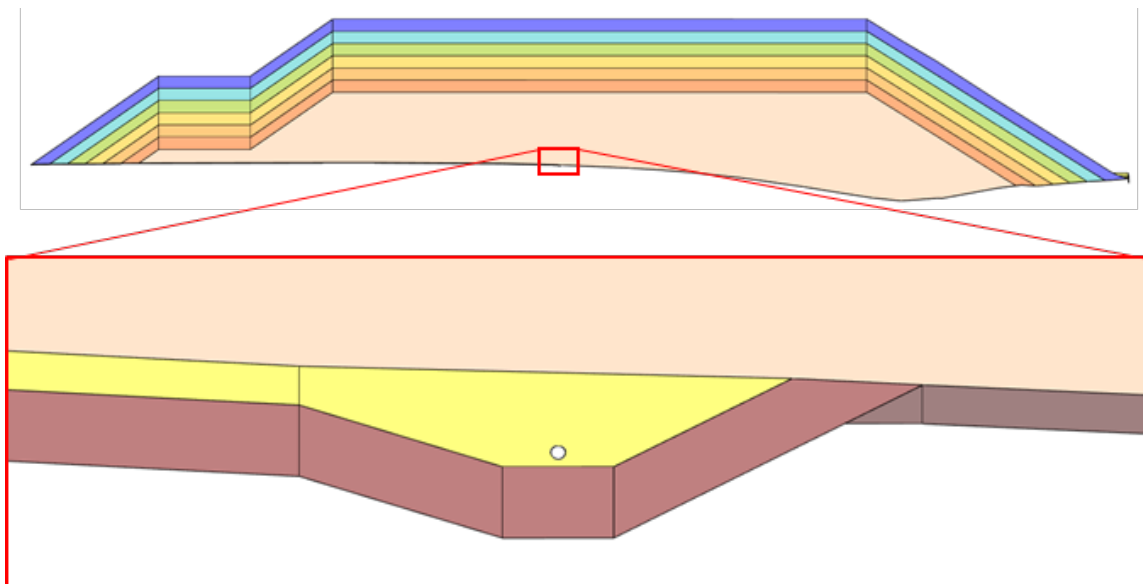


Abbildung 3: Darstellung der Modellgeometrie des Schnitts B2 – Endzustand – Hattorf mit Haldenkern, zentrales Entwässerungselement (Kreiselement), Entwässerungsschicht (gelb), Basisabdichtung der Erweiterungsfläche (rotbraun) und Basisabdichtung der Bestandshalde (dunkelbraun)

Die linienhaften Entwässerungselemente in der Erweiterungsfläche blieben unberücksichtigt und es wurde eine vertikale Mächtigkeit von 0,55 m für die mineralische Dichtungsschicht angesetzt. Die Mächtigkeit der Entwässerungsschicht entlang der Haldenerweiterungsfläche wurde mit 0,3 m festgelegt. Die Mächtigkeit der Basisabdichtung der Bestandshalde wurde auf 0,3 m festgelegt. Der Bereich des zentralen Entwässerungselementes zwischen Bestandshalde und Haldenerweiterung (EHG – Ertüchtigung Haldenrandgraben) ist in Abbildung 3 dargestellt.

Die geometrische Implementierung und Gestaltung der Haldenrandgräben, wie sie in der nachfolgenden Abbildung 4 dargestellt sind, wurde aus Erfahrungswerten der Modellierung vorgenommen und kann eine von der Realität abweichende geometrische Form annehmen. Die Haldenrandgräben West und Ost sind als Auslaufrandbedingung anzusehen, die die Fließprozesse im Haldenkörper nicht beeinflussen und eine störungsfreie Entwässerung des Haldenwassers ermöglichen.

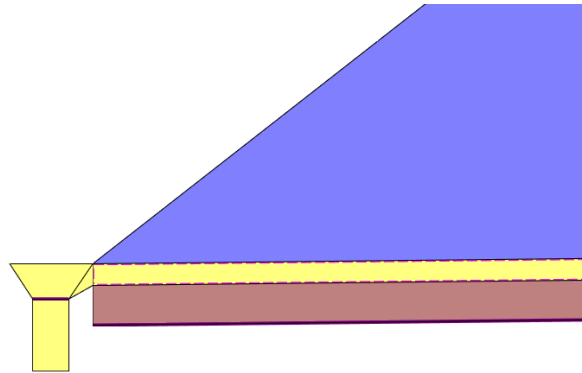


Abbildung 4: Darstellung der Modellgeometrie des Schnitts B2 – Endzustand – Hattorf, Haldenrandgraben West, Böschungsfuß

Modellrandbedingungen

Ziel der Modellierung war es, einen quasi-stationären Zustand zur Beschreibung der ungesättigten und gesättigten Strömungsprozesse im Haldenkörper zu berechnen. Hierfür wurde eine Simulationsdauer von 20 Jahren bei einem maximalen Berechnungszeitschritt von $\Delta t = 10$ d festgelegt. Die zeitliche Diskretisierung des Modellinputs (Niederschlag) beträgt $t = 1$ d. Die Anpassung der Zeitschrittweite der Modelleingangsparameter erfolgt durch HYDRUS 2D/3D automatisiert während der Simulation.

Als Modellrandbedingungen wurden nachfolgende Randbedingungen im Modell implementiert.

- Atmosphärische Randbedingung
- „Free Drainage“ – Randbedingung
- „Seepage“ – Randbedingung

Als atmosphärische Randbedingung wurde die komplette Haldenoberfläche festgelegt und ein konstanter Jahresniederschlag von 815 mm angenommen. Die tägliche Verteilung des Jahresniederschlags erfolgte gleichmäßig in Höhe von ca. 2,23 mm pro Tag. Eine Verdunstung auf der Haldenoberfläche wurde nicht simuliert.

Die Implementierung der Randbedingung „Free Drainage“ als Auslaufrandbedingung erfolgte an der Unterkante der Basisabdichtungen. Dies ermöglicht die direkte Berechnung und Abbildung der Restinfiltration. Die Randbedingung „Seepage“, die im vorliegenden Modell ebenfalls eine Auslaufrandbedingung ist, wurde auf die Entwässerungselemente Haldenrandgraben Ost und West sowie das zentrale Entwässerungselement im Übergang zwischen Haldenerweiterung und Bestandshalde festgelegt.

Modellanfangsbedingungen

Der Anfangswassergehalt in der Rückstandshalde wurde auf 0,05 analog des entsprechenden Wassergehalts bei Aufhaldung festgelegt. Abweichende Werte führten im Rahmen der Bearbeitung oft zu numerischen Instabilitäten. Aufgrund der Länge der Simulationsdauer von 20 Jahren ist der Einfluss der Anfangsbedingung auf das Berechnungsergebnis vernachlässigbar.

Modellparametrisierung

Für die hydraulische Berechnung der Strömungsprozesse der Rückstandshalde flossen die Erkenntnisse und Erfahrungen zu den bisherigen Untersuchungen zum

Rückstandsmaterial ein. In der nachfolgenden Tabelle sind die verwendeten Parametersätze dargestellt.

Der laterale Anisotropietensor K^A_{lat} wurde für den Rückstandskörper mit 30 angesetzt. Vor dem Hintergrund der Kenntnisse zur Anisotropie im Rückstandsmaterial ist dieser Wert als konservativ einzuschätzen.

Tabelle 1: Parametertabelle der verwendeten Materialeigenschaften der Rückstandshalde

Parameter Haldenbereich	Nr.	Breite/Höhe [m]	k_s [m/s]	Θ_r [Vol %]	Θ_s [Vol %]	K^A [-]
Haldenmantelzone HMZ	1	15	5E-05	0,01	0,35	30
	2	15	5E-06	0,01	0,2	30
	3	15	5E-07	0,01	0,13	30
Haldenübergangszone HÜZ	1	15	5E-08	0,01	0,1	30
	2	15	1E-08	0,01	0,08	30
	3	15	5E-09	0,01	0,06	30
Haldenkern HK		0-130	1E-09	0,01	0,05	30
Entwässerungsschicht		0,3	1E-02	0,045	0,43	1
Basisabdichtung Erweiterung		0,55	3E-10	0,01	0,05	1
Basisabdichtung Bestand		0,3	1E-09	0,01	0,05	1

mit k_s ...gesättigte Leitfähigkeit

Θ_r ...residualer Wassergehalt

Θ_s ...gesättigter Wassergehalt

K^A_{lat} ...lateraler Anisotropietensor

3.4 Berechnungsergebnisse

Im Ergebnis der numerischen Berechnung und unter den vorgenannten Annahmen und Randbedingungen stellt sich das Strömungsbild im quasi-stationären Endzustand am Schnitt B2, Halde Hattorf gem. Abbildung 5 dar.

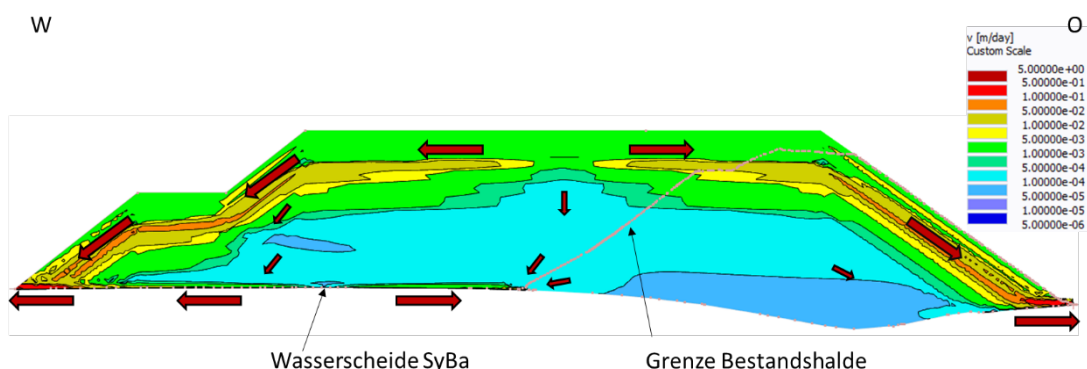


Abbildung 5: Darstellung der Berechnungsergebnisse des Schnitts B2 – Endzustand – Hattorf, mit Abbildung der Fließgeschwindigkeiten und der Fließrichtung innerhalb der Haldenerweiterung sowie der Bestandshalde

Die Haldenwasserbewegungen vollziehen sich bevorzugt im Haldenmantel sowie untergeordnet auch in der Übergangszone (siehe Abbildung 6). Der Haldenkern zeigt sich im Modell als nahezu inaktive Zone. Aufgrund der Morphologie des Urgeländes sind Fließrichtungen innerhalb der Entwässerungsschicht unter der Haldenerweiterung sowohl in Richtung des zentralen Entwässerungselements zwischen Bestandshalde und Haldenerweiterung als auch in Richtung Westen zum Fuß der Haldenerweiterung festzustellen. Die Wasserscheide der Entwässerungsschicht unter der Haldenerweiterung wird durch die kleine westliche dunkelblaue Einfärbung oberhalb der Entwässerungsschicht an der Haldenbasis markiert (Vgl. Abbildung 5). Die geringe hydraulische Leitfähigkeit des Haldenkerns sowie der Haldenübergangszone bewirken am Haldentop eine Ablenkung des Haldenwassers in östliche und westliche Richtung. Demnach versickert nur ein geringer Anteil des Niederschlagswassers in vertikale Richtung. Testrechnungen ohne zusätzliche laterale Anisotropietensoren belegen den gleichen physikalisch nachvollziehbaren Effekt. Aus bodenhydrologischer Sicht wirkt die nachgewiesene geringe Durchlässigkeit des Haldenkerns wie eine geringleitende Tonlinse, welche das vertikal versickernde Wasser in Richtung der lateralen Komponente ablenkt. Die anisotropischen Eigenschaften des Rückstandsmaterials verstärken den Effekt.

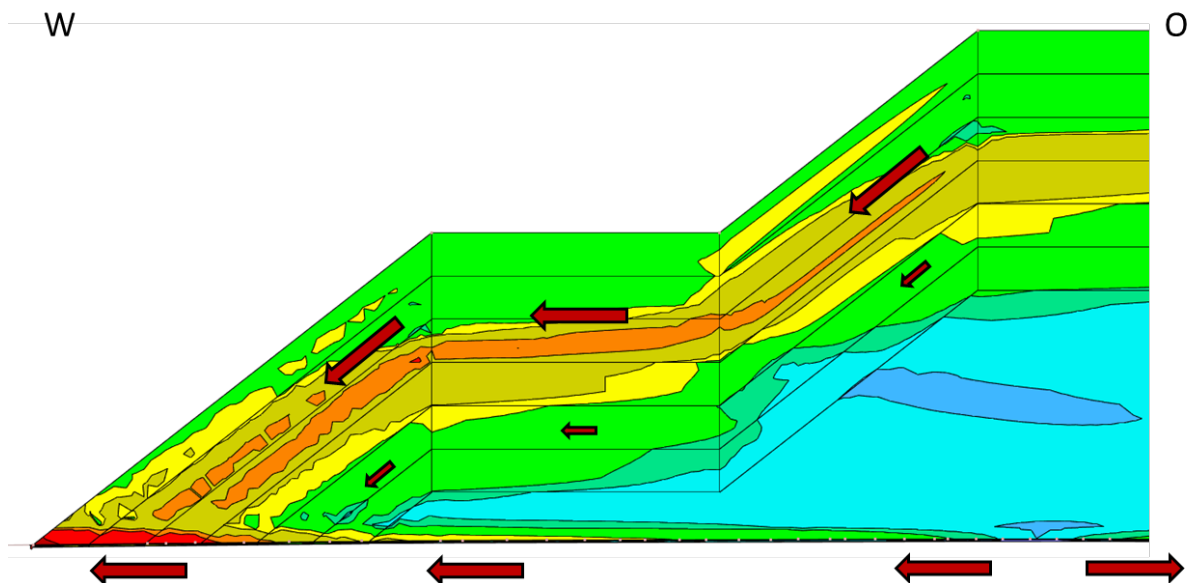


Abbildung 6: Darstellung der Berechnungsergebnisse des Schnitts B2 – Endzustand – Hattorf, Zoom Westböschung, mit Abbildung der Fließgeschwindigkeiten, Fließrichtung und Schichtgrenzen (Legende siehe Abb.5)

Die Abbildung 6 veranschaulicht die Fließbewegungen sowie die Schichtgrenzen (schwarze Linien gemäß Modellgeometrie) an der Westböschung der Erweiterungsfläche. Wie zu erkennen ist, sind die Fließbewegungen in der Haldenmantel- sowie Haldenübergangszone insbesondere in den geneigten Böschungsbereichen von den k-Wert-Sprüngen beeinflusst. Die Entwässerungsschicht entwässert aufgrund der Morphologie des Geländes von Ost nach West zum Haldenrandgraben. Die Wasserscheide ist am Bildrand rechts unten zu erkennen. Es strömt kein Haldenwasser aus der hydraulisch aktiven Zone unter den Haldenkern.

Ergänzend zu den visuellen Darstellungen der quasi-stationären Fließprozesse im Haldenkörper werden in der nachfolgenden Abbildung die Bilanzgrößen pro Jahr an den jeweiligen Randbedingungen beziehungsweise Bilanzgrößen dargestellt.

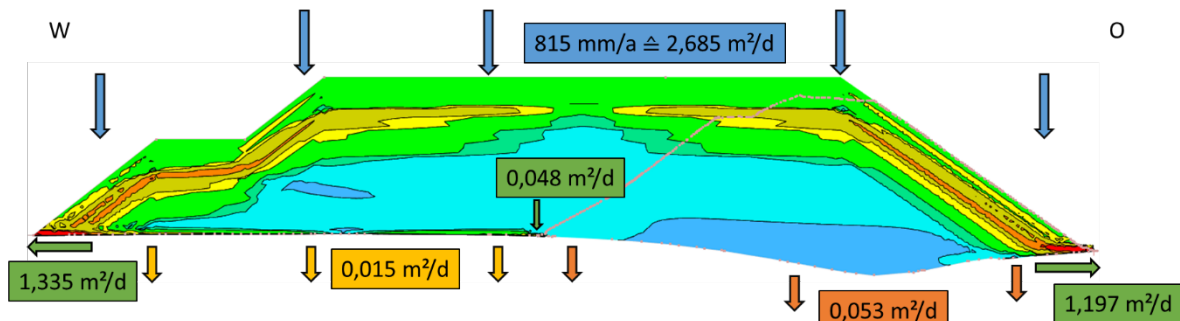


Abbildung 7: Darstellung der Berechnungsergebnisse des Schnitts B2 – Endzustand – Hattorf, Bilanzgrößen – Haldenerweiterung HRG (1,335 m³/d), Haldenerweiterung SyBa – RI (0,015 m³/d), Entwässerungselement – EEHG (0,048 m³/d), Bestandshalde BA – RI (0,053 m³/d), Bestandshalde – HRG (1,197 m³/d) - bei einem Jahresniederschlag von 815 mm (2,685 m³/d)

Die atmosphärische Randbedingung ist mit einem Jahresniederschlag von 815 mm (2,685 m³/d) blau hervorgehoben. Die grün hervorgehobenen berechneten Bilanzgrößen (flux in m³/d) umfassen den Abfluss aus dem Haldenrandgraben West (Haldenerweiterung - HRG), dem Haldenrandgraben Ost (Bestandshalde – HRG) und dem zentralen Entwässerungselement am Böschungsfuß (EEHG) der derzeitigen Bestandshalde. Diese Haldenwassermengen werden in den Fassungseinrichtungen gefasst. Die gelb und orange hervorgehobenen Bilanzgrößen weisen die Restinfiltration der Basisabdichtung der Erweiterungsfläche (Haldenerweiterung SyBa – RI, gelb) sowie der Bestandshalde (Bestandshalde BA – RI, orange) aus.

In der nachfolgenden Tabelle werden die von HYDRUS 2D/3D ermittelten „fluxes across mesh-lines“, d.h. die Haldenwasser-Anfallmengen für die jeweiligen Bilanzgrößen, gemäß Abbildung 7 dargelegt.

Tabelle 2: Tabelle der berechneten Haldenbilanzengrößen

Bilanzgröße	flux	flux
	[m³/d]	[%]
Haldenerweiterung HRG	1,335	50,40%
Haldenerweiterung SyBa - RI	0,015	0,60%
Entwässerungselement - EEHG	0,048	1,80%
Bestandshalde BA - RI	0,053	2,00%
Bestandshalde - HRG	1,197	45,20%
Summen	2,649	100,00%

Unter Verwendung des Programmsystems HYDRUS-2D/3D (Version 3.01) ergibt sich bezogen auf den Jahresniederschlag von 815 mm auf der Basis des Schnitts B2 mit implementierten technischen Einrichtungen für die Gesamthalde, bestehend aus Bestands- und Erweiterungshalde, eine Restinfiltration in Höhe von 2,6%. Modellberechnungen für den Schnitt B2 ohne implementierte technische Einrichtung bei vergleichbaren

konservativen Ansätzen ergeben eine Restinfiltration von ca. 3,5%. Diese ist insoweit hinreichend konservativ und es wird empfohlen, sie für die Berechnungen im Grundwassermodell zu verwenden.

4 Ergebnisdiskussion

Auf der Basis der Ergebnisse der Haldenkörperbohrungen und der Salzhaldentomographien sowie der langjährigen Erfahrungen in der Bewirtschaftung der Kalirückstandshalden lassen sich die hydrodynamischen Prozesse in einem Rückstandskörper mit HYDRUS 2D/3D unter Beachtung der getroffenen Annahmen und Randbedingungen plausibel abbilden. Das Niederschlagswasser strömt an der Haldenoberfläche vertikal in die Mantelzone ein und fließt vorzugsweise oberhalb von Übergangs- und Haldenkernzone in Richtung Böschungsbereich und Haldenfuß ab. Die hydraulischen Berechnungen stützen damit die bisherigen Erfahrungen und Kenntnisse bei der Beschreibung der Fließprozesse im Rückstandshaldenkörper. Vergleiche hierzu Abbildung 5 und Abbildung 6.

Die Modellannahmen zu den residualen und gesättigten Wassergehalten der einzelnen Schichten sind mit den differenzierten Messwerten der Gesamtwasseranteile von Rückstandshalden (freies Wasser, kristallin gebundenes Wasser, immobiles Wasser) nicht direkt vergleichbar. Insoweit wurden die residualen und gesättigten Wassergehalte in dem Modell so berücksichtigt, dass sie die Kompaktion des Rückstandsmaterials in den Modellschichten beachten. Im vorliegenden Modell sind alle hydraulisch aktiven Poren gleichmäßig miteinander verbunden. In der Realität nimmt der Anteil der hydraulisch aktiven Poren mit zunehmender Kompaktion jedoch ab und führt zu Bereichen inaktiver hydraulischer Aktivität. Deshalb entstehen im Modell virtuell überstaute Sättigungsbereiche.

Der wesentliche Einflussfaktor auf die Fließprozesse im 2D-Schnitt ist die hydraulische Leitfähigkeit k , die als k_f in die einzelnen Schichten der Mantel-, Übergangs- und Kernzone eingehen. Sie sind als die entscheidenden Summenparameter der dominierenden Fließprozesse in der Rückstandshalde anzusehen. Die Bestimmung des k -Werts erfolgte über Feld- und Laborversuche und ist belegt. Untersuchungen zeigen, dass der k -Wert des Haldenkerns geringer als der in Mantel- und Übergangszone ist.

In dem hier vorliegenden Modell und den darauf basierenden Berechnungen wurde der Haldenkern mit $k_f = 1\text{E-}09 \text{ m/s}$ angesetzt. Er ist, verglichen mit den Felduntersuchungen und den sich daraus ableitenden Ergebnissen, zu hoch, insoweit konservativ, angesetzt. Das modellierte Strömungsbild in der Rückstandshalde kann auf die Realität übertragen werden, das heißt, der Haldenwasseraustritt aus der Halde im Wesentlichen über die Mantel- und Übergangszone. Daran würde ein dichter Haldenkern nichts ändern, sondern dieser hätte eine Verringerung der Restinfiltration zur Folge. Die vorliegenden Berechnungen sind demnach als konservativ einzuschätzen und die ausgewiesene Restinfiltration ist der Größenordnung nach als auf der sicheren Seite anzusehen.

5 Zusammenfassung

Mit dem Programm HYDRUS 2D/3D wurde im Schnitt B2 ein Haldenkörpermodell erstellt, das bzgl. der Haldenendkontur und den Geländeverhältnissen repräsentativ einen Querschnitt durch die Bestandshalde und die geplante Haldenerweiterung Phase 3 abbildet und bzgl. der hydraulischen Materialparameter auf den Erkenntnissen der Haldenkörperbohrungen^{1,2} basiert. Die Erfahrungen und Vorstellungen der hydrodynamischen Prozesse in einem Rückstandskörper^{1 bis 4} lassen sich mit HYDRUS 2D/3D (Version 3.01) unter Beachtung der getroffenen konservativen Annahmen und

Randbedingungen plausibel abbilden. Das Niederschlagswasser strömt an der Haldenoberfläche vertikal in die Mantelzone ein und fließt dort vorzugsweise, oberhalb von Übergangszone und Haldenkern, in Richtung Böschungsbereich und Haldenfuß ab. Die auf diese Weise an den Haldenrandgräben an der West- und Ostseite des Haldengesamtmodells austretende Wassermenge beträgt rd. 96 % vom Modelloutput.

Dem zentralen Entwässerungselement EHG am Übergang von der Bestandshalde in die Haldenerweiterung, das im betrachteten Endzustand der Halde quasi im Haldenkern „eingebunden“ ist, tritt dazu im Vergleich nur ein geringer Anteil von rd. 1,8 % zu. Anhand der Fließrichtungen (siehe Abbildung 5) lässt sich jedoch auch ein Zustrom von der Bestandshalde erkennen, so dass für das EHG von einer langfristigen Entwässerungswirkung auf die Bestandshalde auszugehen ist.

Mit den Bilanzgrößen Haldenerweiterung SyBa und Bestandshalde BA wird die Restinfiltration an der Basis des Schnittes B2 (UK SyBa bzw. BA) mit implementierten technischen Einrichtungen für die Gesamthalde, bestehend aus Bestands- und Erweiterungshalde, in einer Größe von rd. 2,6% berechnet (Vergleiche Tabelle 2, Spalte 3, Zeile 3 und 5). Modellberechnungen für den Schnitt B2 ohne implementierte technische Einrichtung bei vergleichbaren konservativen Ansätzen für den Haldenkörper ergeben eine Restinfiltration von ca. 3,5%. Diese ist insoweit hinreichend konservativ und es wird empfohlen, sie für die Berechnungen im Grundwassermodell zu verwenden.

Die hydraulischen Berechnungen stützen damit die bisherigen Erfahrungen und Kenntnisse bei der Beschreibung der Fließprozesse in Rückstandshalden und in der Größenordnung auf der sicheren Seite liegend die errechneten Restinfiltrationen.

6 Literaturverzeichnis

- 1 „Nachhaltiges Rückstandsmanagement am Standort Hattorf (Haldenerweiterung Hattorf) – Phase 3“, Band 3.17.1 der Antragsunterlage, Haldenkörperbohrungen am Standort Hattorf – Ergebnisbericht, Werk WE, 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, Werk WE, 29.03.2018
- 3 „Nachhaltiges Rückstandsmanagement am Standort Hattorf (Haldenerweiterung Hattorf) – Phase 3“, Band 3.17.2N der Antragsunterlage, Geophysikalische Erkundung – Tomographie der Bestandshalden in Hattorf und Wintershall mittels Geoelektrik und Seismik - Teil 1 Hattorf, K-UTEC AG Salt Technologies, Dezember 2021
- 4 Empirische Erfahrungen
- 5 HYDRUS – Technical Manual, Version 3.01, PC-Progress, 2018
- 6 Determining hydraulic properties of concrete and mortar by inverse modelling, Schneider et al., 2012
- 7 „Nachhaltiges Rückstandsmanagement am Standort Hattorf (Haldenerweiterung Hattorf) – Phase 3“, 3.17.2N der Antragsunterlage, Bewertung der Modellvorstellung zur Ausbildung eines dichten Haldenkerns an Rückstandshalden - Prüfung und Bewertung von ausgeführten und dokumentierten Haldenbohrungen und geophysikalischen Untersuchungen, Ingenieursozietät Professor Dr.-Ing. Katzenbach GmbH, Dezember 2021