

OTEC – Geology

Gefährdungsabschätzung Althalde Siegfried-Giesen - Wasserhaushaltsbilanz

Abteilung Hydro-/Environmental Geology
im Auftrag der K+S Minerals and Agriculture GmbH

Kassel, 04.02.2021

Inhaltverzeichnis

1	Zusammenfassung	6
2	Veranlassung und Zielstellung	6
3	Haldenstandort und Beschreibung der Althalde SG	7
3.1	Naturräumliche Einordnung und Abgrenzung des Untersuchungsgebietes	7
3.2	Standort der Althalde Siegfried-Giesen	8
4	Methodik der Bearbeitung	8
4.1	Einordnung der Aufgabe und methodisches Vorgehen	8
4.2	Modellvorstellung	9
4.3	Zweistufiger Bearbeitungsansatz der Wasserhaushaltsbilanz	10
4.3.1	Stufe 1 der Wasserhaushaltsbilanz	10
4.3.2	Stufe 2 der Wasserhaushaltsbilanz	14
4.4	Berechnungsgrundlagen der zweistufigen Haldenwasserbilanz	15
4.4.1	Grundlegende Bilanzgleichung	15
4.4.2	Grundlegende Strömungsgleichung	17
5	Parameter zur Aufstellung der Haldenwasserbilanz	18
5.1	Übersicht	18
5.2	Zeitlicher Verlauf der Aufhaldung	19
5.2.1	Produktion des Werkes Siegfried-Giesen	19
5.2.2	Entwicklung der Halde Siegfried-Giesen	19
5.3	Geometrische und physikalische Parameter	20
5.3.1	Informationen aus Haldenbohrungen	20
5.3.2	Angaben zur Beschaffenheit der Haldensohle	21
5.4	Zusammensetzung des Rückstandes und des Haldenwassers	21
5.5	Niederschlag	22
5.6	Verdunstung auf der Halde	23
5.6.1	Vorbemerkung zu Rückstandshalden	23
5.6.2	Spezifische Bedingungen kieseritischer Halden	23
5.6.3	Relative Luftfeuchte	24
5.6.4	Gleichgewichtsfeuchte und Deliqueszenzfeuchte	24
5.6.5	Werte der Evaporation	26
5.6.6	Messung der Haldenwasserabflüsse	27
5.6.7	Anteil „Freies Wasser“ am anfallenden Rückstand und Aufsatzung	27
6	Haldenwasserbilanz	29
6.1	Ermittlung der Aufstandsfläche	29
6.2	Berechnung der Haldenwasserbilanz für den Beobachtungszeitraum	29

6.3	Berechnung der Haldenwasserbilanz für den gesamten Untersuchungszeitraum	30
7	Gesamtsalzfracht	31
8	Sensitivitätsbetrachtungen	32
8.1	Methodischer Ansatz	32
8.2	Niederschlag	32
8.3	Verdunstung	33
8.4	Bandbreite der Restinfiltration in der Prognose	34
9	Literatur und Arbeitsgrundlagen	36

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Lage Althalde Siegfried-Giesen und ehemaliges Kaliwerk zwischen Giesen im Süden und der west- bis nördlich bei Ahrbergen verlaufenden Innerste (Bildquelle: google.maps)	7
Abbildung 2:	Einordnung der Wasserhaushaltsbilanz in den Bearbeitungszyklus der Gefährdungsabschätzung	8
Abbildung 3:	Modellvorstellung der Strömungs- und Wasserhaushaltsprozesse der Althalde SG 2020	10
Abbildung 4:	Stufe 1 der Bilanzierung – Boxmodell (Mess- und Beobachtungsdaten 2003 – 2018) GIS-gestützte Ermittlung der Aufstandsflächen für den Gesamtzeitraum in Jahresscheiben	11
Abbildung 5:	Schema zur Bestimmung des Aufsatzungsfaktors und Berechnungsbeispiel	12
Abbildung 6:	Schematische Darstellung des idealisierten Haldenmodells für die Bilanzierung des Beobachtungszeitraums in Stufe 1 der Wasserhaushaltsbilanz	13
Abbildung 7:	Stufe 2 der Bilanzierung RI-Berechnung nach Darcy für den Gesamtzeitraum.	14
Abbildung 8:	Schematische Darstellung des Ansatzes für die Berechnungen mit dem Deponieansatz in Stufe 2 der Wasserhaushaltsbilanz	15
Abbildung 9:	Haldenwasseraustritt am Haldenfuß, neuer Haldenrandgraben	16
Abbildung 10:	Einfluss des hydraulischen Gradienten i auf die Filtergeschwindigkeit und k -Werte bei einem ausgeprägten plastischen Ton unter Verwendung verschiedener Prüfflüssigkeiten [26]	18
Abbildung 11:	Schematischer Schnitt der hydrostratigraphischen Einheiten, verändert nach Fugro 2014 [4] links Lage von Bohr- und Ansatzpunkten (Bohrungen und Rammsondierungen) rechts	21
Abbildung 12:	Zusammensetzung des Produktionsrückstandes (Probe Friedrichshall) und des Haldenwassers aus dem Haldenrandgraben der Althalde Siegfried-Giesen (Daten IW, Mittelwert 1998 – 2017)	22
Abbildung 13:	Ganglinie des Niederschlags für den Standort der Althalde Siegfried-Giesen (DWD-REGNIE)	23
Abbildung 14:	Beprobung Halde Siegfried-Giesen 5/1980 aus [13]; Grafik bearbeitet	24
Abbildung 15:	Gleichgewichtsfeuchten im System $\text{Na}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}$; stabile Gleichgewichte: durchgezogene Kurven, metastabile Gleichgewichte: gestrichelte Kurven [24]	26
Abbildung 16:	Niederschlag und gemessener Haldenwasseranfall im Beobachtungszeitraum	27
Abbildung 17:	Summe freies Wasser (mineralisiert) im Rückstand und niederschlagsbedingter Haldenwasseranfall (mineralisiert) im aktiven Zeitraum	28
Abbildung 18:	Ermittelte Restinfiltration im gesamten Untersuchungszeitraum	30
Abbildung 19:	Ermittelte Salzfrachten im gesamten Untersuchungszeitraum	32
Abbildung 20:	Lage der Vergleichspunkte	34

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Angaben zur Ausbildung von Haldenzonen (Mittelwerte) aus Haldenbohrungen	20
Tabelle 2:	Ergebnisse zur Dichte und Durchlässigkeit aus Bohrungen	20
Tabelle 3:	Stabile und metastabile Phasen des Natriumsulfats nach Steiger und Schwarz [24]	25
Tabelle 4:	Mittelwerte der Analyseergebnisse Haldenwasser Siegfried-Giesen 1998 - 2017	28
Tabelle 5:	Mittlere Stoffgehalte des Haldenwassers 1998 - 2017	31
Tabelle 6:	Vergleich der Angaben zur GWN aus GROWA 18 und Klimaprojektionen nach WETTREG 2010	34
Tabelle 7:	Ergebnisse für RI und Gesamtsalzfracht	34

Anlagenverzeichnis

Anlage 1:	Übersichtslageplan 1:10.000
Anlage 2:	Zeitliche Entwicklung der Produktion 1925 bis 1987
Anlage 3:	Flächenentwicklung Althalde, Haldenzonen 1925 bis 2020
Anlage 4:	Jährliche Flächenbelegung der Rückstandshalde
Anlage 5:	Hydraulischer Gradient für die Berechnung der Restinfiltration
Anlage 6:	Jährliche Restinfiltration in den Jahren 1925 bis 2050
Anlage 7:	Jährliche Gesamtsalzfracht des Sickerwassers in den Jahren 1925 bis 2050

1 Zusammenfassung

Für die Beurteilung der Auswirkungen der Althalde Siegfried-Giesen auf das Grundwasser war deren Wasserhaushalt, als Teil der Gefährdungsabschätzung, zu beurteilen. Der Haldenwasserhaushalt beschreibt Anteile von Wasser aus Niederschlägen und aus aufgehaldetem Rückstand, der innerhalb der Althalde Siegfried-Giesen zur Bildung des Haldenwassers führt, im Haldenrandgraben gesammelt und über eine Rohrleitung zum Vorfluter Innerste abgeführt wird bzw. als Restinfiltration (RI) ins Grundwasser versickert. Ziel der Aufstellung der Haldenwasserbilanz war eine Abschätzung der ins Grundwasser eingetragenen jährlichen Gesamtsalzfracht.

Die Aufstellung der Haldenwasserbilanz wurde in zwei Stufen realisiert. In der ersten Stufe wurde die Bilanzierung auf der Grundlage von Klimadaten und Messwerten für einen Beobachtungszeitraum vorgenommen, für den belastbare Daten zum Haldenwasserabfluss im Haldenrandgraben vorliegen. Ausgehend von den historischen Recherchen zum Kaliwerk Siegfried-Giesen wurde die zeitliche Entwicklung der Althalde-Siegfried Giesen nachvollzogen und eine Flächenbilanz in Jahresscheiben für die weiteren Betrachtungen aufgestellt. Ausgehend von der Größe der hydraulisch aktiven Bereiche Haldenmantelzone mit Haldenvorfeld und Übergangszone wurde für die zweite Stufe ein Berechnungsverfahren angewendet, das bei der Abschätzung der Restinfiltration von Deponien zur Anwendung kommt. Mit Hilfe dieses Verfahrens wurde eine Haldenwasserbilanz für den gesamten Betriebs- und Nachbetriebszeitraum sowie für den Prognosezeitraum bis 2050 aufgestellt.

Das Haldenwasser wird bei seinem Weg durch die Halde durch die abgelagerten Salze mineralisiert. Die berechnete Restinfiltration und damit die Salzfracht schwankt mit den Produktionszahlen des Kaliwerkes Siegfried-Giesen und der damit verbundenen Rückstandsaufhaltung und der Größe der Aufstandsfläche der Halde. Die höchste Restinfiltration für ein Jahr wurde 1975 mit rechnerisch $31.835 \text{ m}^3/\text{a}$ ermittelt. Das entspricht unter den getroffenen Annahmen einer Gesamtsalzfracht von 9.200 t/a . Nach Einstellung des Betriebs des Kaliwerkes Siegfried-Giesen ergeben sich rechnerisch $7.880 \text{ m}^3/\text{a}$ und 2.271 t/a . Dieser Wert sinkt in der Prognose aufgrund der realisierten Sanierungsmaßnahmen an der Halde noch leicht auf $7.523 \text{ m}^3/\text{a}$ und 2.174 t/a . Auf der Grundlage der kontinuierlichen Messungen des Abflusses im bis Ende 2019 neu gebauten Haldenrandgraben mit dem ebenfalls neu eingerichteten Messsystem wird in Relation zu den Klimadaten weiter beobachtet, ob Restinfiltration und Gesamtsalzfracht sich aufgrund der Verbesserungen am System Halde-Haldenrandgraben ggf. noch verringern.

2 Veranlassung und Zielstellung

Während der Betriebsphase des Kaliwerkes Siegfried-Giesen zwischen 1910 und 1987 wurde neben einem umfangreichen Versatz ein Teil des anfallenden Rückstandes übertägig aufgehaldet. Die seit 1925 betriebene Rückstandshalde wird fortlaufend hinsichtlich ihrer Einflüsse auf die Umwelt überwacht. Die Nachsorgemaßnahmen beinhalten die qualitative und quantitative Überwachung des Anfalls der Haldenwässer sowie deren Einleitung in den Vorfluter Innerste durch langjährige messtechnische Überwachung.

Die Beobachtung der Auswirkungen der Althalde Siegfried-Giesen auf das Grundwasser durch die Restinfiltration (RI) von Haldenwässern ist Aufgabe des langfristigen Grundwassermonitorings. Die Haldenwasserbilanz dient als Grundlage für die Beurteilung des möglichen Stoffeintrags bei der vertiefenden Untersuchung der Stoffausbreitung im Grundwasser mittels numerischer Modellierung sowie der Gefährdungsabschätzung.

3 Haldenstandort und Beschreibung der Althalde SG

3.1 Naturräumliche Einordnung und Abgrenzung des Untersuchungsgebietes

Im vorliegenden Dokument wird die Wasserhaushaltsbilanz aufgestellt und näher erläutert. Allgemeine Angaben zum Standort und dessen Umfeld werden nur insofern gegeben, als es für die Bilanzierung und das Grundverständnis von Belang ist. Es wird auf den umfassenden Bericht zur Gefährdungsabschätzung der Fugro Germany Land GmbH verwiesen, welcher das Untersuchungsgebiet umfassend beschreibt [5].

Der Standort Althalde Siegfried-Giesen befindet sich im Süden Niedersachsens, im Norden von Hildesheim im gleichnamigen Landkreis Hildesheim. Naturräumlich zählt der Standort zum Zentraleuropäischen Mittelgebirgsland und wird dem beim Bundesamt für Naturschutz unter der Nr. 36 geführten naturräumlichen Großlandschaft „Unteres Weserbergland und Oberes Weser-Leinebergland“ zugeordnet.



Abbildung 1: Lage Althalde Siegfried-Giesen und ehemaliges Kaliwerk zwischen Giesen im Süden und der west- bis nördlich bei Ahrbergen verlaufenden Innerste (Bildquelle: google.maps)

Das Untersuchungsgebiet umfasst im Wesentlichen den Standort der Althalde am Werk Siegfried-Giesen und dessen Umfeld (**Abbildung 1**). Von besonderem Interesse ist dabei der Bereich zwischen Althalde und Innerste, welche die Vorflut des Gebietes bildet. Der unmittelbare Betrachtungsraum der Haldenwasserbilanz umfasst die Althalde Siegfried-Giesen sowie die für den Transport des Haldenwassers relevanten Bestandteile der Infrastruktur, wie Haldenrandgraben, Speicher, Becken etc.

3.2 Standort der Althalde Siegfried-Giesen

Die Althalde liegt unmittelbar östlich des früheren Betriebsgeländes des ehemaligen Kaliwerkes und erstreckt sich von der nördlichen bis zur südlichen Grundstücksgrenze. Sie befindet sich auf den Flurstücken 58/14, 58/16, 58/17, 96 Flur 1 der Gemarkung Groß Giesen.

Die Althalde Siegfried-Giesen belegte bis 2019 eine Fläche von ca. 17,3 ha, einschließlich Haldenvorfeld. Das Volumen wurde mit ca. 5,2 Mio. m³ angegeben. Im Jahr 2019 erfolgte die Erneuerung des Haldenrandgrabens und der messtechnischen Überwachung sowie der gesamten Wasserführung bis zur Zuleitung zur Innerste. Die Funktionstüchtigkeit und Schadensfreiheit der Zuleitung wurden ebenfalls überprüft. Teile des Haldenvorlandes wurden saniert und neu geordnet. Mit dem neuen Haldenrandgraben mit angeschlossenen Dränagen wird das anfallende Haldenwasser besser gefasst. Zusätzlich wurde eine Tiefendränage im Bereich des Haldenrandgrabens angelegt. Die aktuelle Vermessung des Haldenareals durch die K+S 2020 ergab eine Gesamtfläche von 17,9 ha.

4 Methodik der Bearbeitung

4.1 Einordnung der Aufgabe und methodisches Vorgehen

Die Wasserhaushaltsbilanz zur Althalde Siegfried-Giesen ist ein Teil und Grundlage der weitergehenden Gefährdungsabschätzung. Die einzelnen Elemente der Gefährdungsabschätzung bauen dabei aufeinander auf.

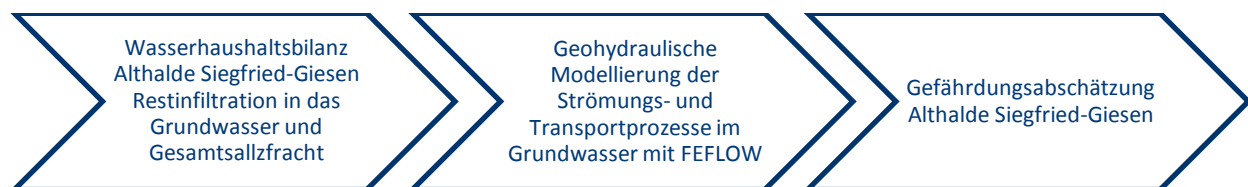


Abbildung 2: Einordnung der Wasserhaushaltsbilanz in den Bearbeitungszyklus der Gefährdungsabschätzung

Die Erstellung der Wasserhaushaltsbilanz hat folgende wesentliche Ziele:

- Abschätzung des Anfalls von mineralisiertem Haldenwasser (historisch/ rezent/ perspektivisch),
- Abschätzung der Restinfiltration (RI) durch die natürliche Basisabdichtung der Althalde Siegfried-Giesen,
- Bereitstellung eines Eingangsdatensatzes für die nachfolgende Gefährdungsabschätzung (RI und Salzfracht als Input für das Grundwasserströmungs- und Transportmodell) als Grundlage zur Ermittlung und Bewertung der potenziellen Auswirkungen auf das Schutzgut Grundwasser.

Weitere Beurteilungsgrundlagen für die Gefährdungsabschätzung sind die Ergebnisse des Grundwassermonitorings im Haldenumfeld sowie der geophysikalischen/ geoelektrischen Untersuchungen. Die Methodik folgt bewährten Ansätzen, die bei der Bearbeitung von Haldenwasserbilanzen an anderen K+S-Haldenstandorten angewendet wurden. Neben der Erstellung der Wasserhaushaltsbilanz nach der hier beschriebenen Methodik werden weitere Anstrengungen unternommen, um standortspezifische Daten in höherer Qualität zu gewinnen und das Prozessverständnis weiter zu verbessern. So wurde im Zuge der Sanierung des Haldenrandgrabens ein neues Messsystem installiert, welches die vom Haldenrandgraben aufgenommene und abgeführte Menge an Haldenwasser registriert.

Die für die Bearbeitung der Haldenwasserbilanz angewendete Methodik wird nachfolgend erläutert.

4.2 Modellvorstellung

Die Methodik der Wasserhaushaltsbilanz geht davon aus, dass über Teilbereiche der Aufstandsfläche der Althalde Siegfried-Giesen Salze aufgrund der Restinfiltration von Haldenwasser in den Untergrund und das Grundwasser eingetragen werden. Die Wasserhaushaltsprozesse, Sickervorgänge und Migrationsprozesse in einer Rückstandshalde sind dabei komplexer als in Böden oder Bodensubstraten und unterscheiden sich ebenfalls von denen in Deponien, insbesondere durch die speziellen Eigenschaften von Salzen, Wasser in die Kristallstruktur einzubinden oder Lösungen zu bilden. Die wasserbindenden Eigenschaften sind für jedes Salz spezifisch und variieren bei Anwesenheit mehrerer Salze im Rückstand. Spezifische Prozesse, wie die Volumenzunahme von Wasser beim Aufsalzungsprozess müssen bei der Betrachtung von Wasserhaushaltsbilanzen berücksichtigt werden. Die Grundlage der Bearbeitung der Wasserhaushaltsbilanz ist im Wesentlichen die Auswertung von Klimadaten und Messdaten zum Haldenwasseranfall für einen Beobachtungszeitraum (Zeitraum für den belastbare Messergebnisse vorliegen). Die gewonnenen Erkenntnisse werden auf den gesamten Untersuchungszeitraum bezogen.

Die Althalde Siegfried-Giesen wird seit Abschluss der Aufhaldung von Rückstand 1987 hinsichtlich ihrer Umweltauswirkungen überwacht. Die Althalde wird aufgrund der speziellen Zusammensetzung des Rückstandes als kieseritische Halde bezeichnet. Das heißt, dass im frischen Rückstand neben NaCl (Halit) ein nicht unerheblicher Anteil MgSO_4 (Kieserit) vorhanden war. Durch den niederschlagsbedingten Auslaugungsprozess bildet der Natriumsulfatanteil den Hauptanteil der Haldenoberfläche. Aufgrund der speziellen wasserbindenden Eigenschaften des NaSO_4 in seinen Hydratstufen (Gleichgewichtsfeuchte, Deliqueszenzfeuchte) wird im Vergleich zu reinen Steinsalzhalden von einer höheren Verdunstung von der Oberfläche kieseritischer Halden ausgegangen (siehe Abschnitt 5.6.2).

Nach den Erkenntnissen aus Untersuchungen der K+S in den letzten Jahrzehnten bilden sich in Rückstandshalden Zonen unterschiedlicher Dichte und Durchlässigkeit aus. Dies wurde durch Haldenbohrungen an verschiedenen Standorten, wie in Neuhoof-Ellers und Hattorf nachgewiesen [8] [10] [23]. Auf Untersuchungen zum Standort Neuhoof-Ellers wird im Rahmen des vorliegenden Berichts unter anderem Bezug genommen, da es sich bei der Rückstandshalde Neuhoof-Ellers ebenfalls um eine Halde mit höheren Kieseritgehalten handelt und somit von Analogien der beobachteten Prozesse ausgegangen werden kann.

Die genannten Untersuchungen führten zu einer Modellvorstellung der Rückstandshalden mit einem als undurchlässig anzusehenden Haldenkern, einer sogenannten Übergangszone und einer Mantelzone. Der Haldenkern wird über einen längeren Zeitraum durch Verdichtung gebildet. Der Vorgang ist durch das hohe Eigengewicht der Halde bedingt. Durch die Verdichtungs Vorgänge sinkt die Durchlässigkeit des aufgehaldeten Rückstandsmaterials. Der Haldenkern muss aufgrund der Bohrerergebnisse an mehreren Rückstandshalden als undurchlässig angesehen werden. Die äußere Mantelzone ist der Bereich mit der höchsten Durchlässigkeit. Hier finden die wesentlichen Wasserbewegungen statt. Zwischen Haldenkern und Mantelzone ist eine Übergangszone ausgebildet, die weniger durchlässig ist als die Mantelzone.

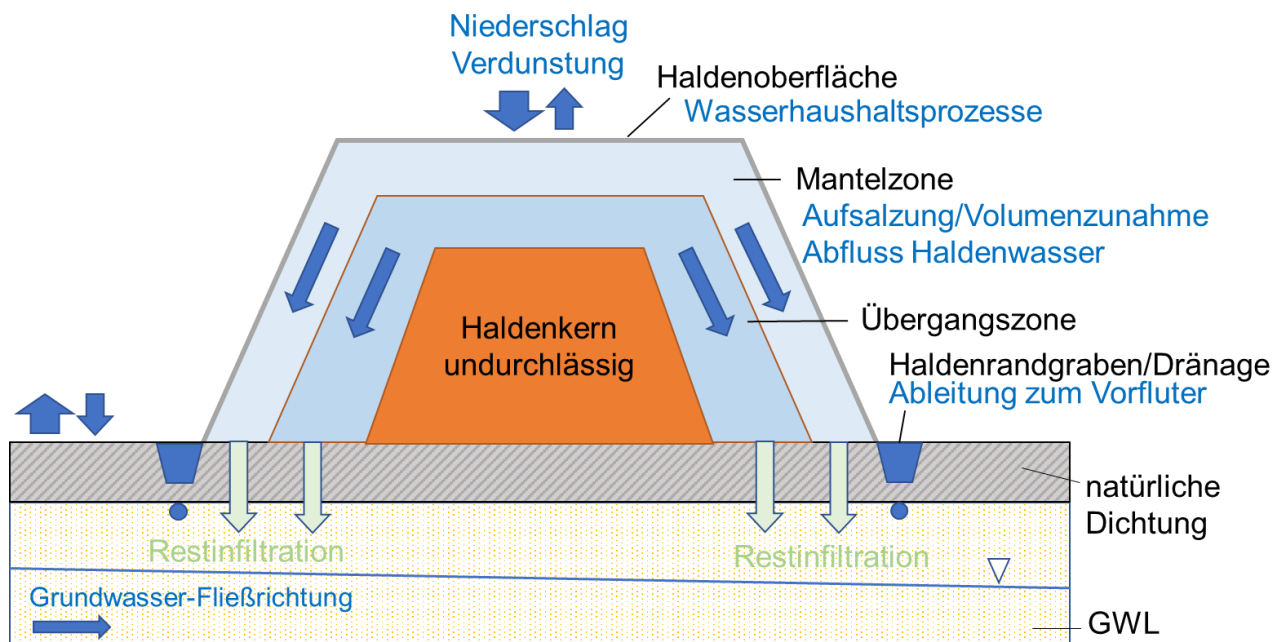


Abbildung 3: Modellvorstellung der Strömungs- und Wasserhaushaltsprozesse der Althalde SG 2020

Durch den oberen Bereich der Mantelzone gelangen Anteile des Niederschlags in die Halde, gleichzeitig verdunstet ein Teil des Niederschlags und gebundenen Wassers. An der Halde Siegfried-Giesen wurden bei Niederschlagsereignissen kein Oberflächenabfluss beobachtet. Im unteren Bereich des Haldenmantels kommt es zu Austritten von stark mineralisiertem Wasser, das im Haldenrandgraben aufgefangen wird. Es wird davon ausgegangen, dass Salzeinträge durch Restinfiltration im Bereich des Haldenmantels, des Übergangsbereiches und im Haldenvorfeld erfolgen können. Die Größe der Restinfiltration ist dabei von den örtlichen Bedingungen, insbesondere vom Untergrund abhängig. Die Althalde Siegfried-Giesen steht auf natürlich anstehendem bindigem Material (überwiegend lehmigen Schichten – Lösslehm), verfügt also über eine natürliche Dichtung im Sohlbereich [18][19].

4.3 Zweistufiger Bearbeitungsansatz der Wasserhaushaltsbilanz

4.3.1 Stufe 1 der Wasserhaushaltsbilanz

Für die erste Stufe der Bilanzierung wird die Halde als sogenanntes Boxmodell betrachtet. Es werden vorhandene Messdaten des Beobachtungszeitraums ausgewertet. **Abbildung 4** zeigt die idealisierte Betrachtungsweise des Boxmodells und die Verfahrensschritte in der ersten Stufe der Bilanzierung.

Auswertung historischer Daten zur Althalde Siegfried-Giesen

Für die Bearbeitung der Stufe 1 der Haldenwasserbilanz wird unter anderem auf die umfangreiche betriebshistorische Erkundung zurückgegriffen [2]. Anhand der Angaben zur Entwicklung des Werkes und den angegebenen Produktionszahlen wird in Verbindung mit Luftbildern aus verschiedenen Jahren und historischen Fotos die zeitliche Entwicklung der Halde nachvollzogen. Insbesondere durch die Weltkriege gab es Zeiten mit Produktionsstillstand bzw. stark verminderter Produktion, in denen sich keine wesentlichen Veränderungen des Haldenvolumens und der Fläche ergeben haben dürften. In Zeiten höherer Produktionszahlen, wie nach dem Zweiten

Weltkrieg, erfolgte ein stärkeres Wachstum der Rückstandhalde mit entsprechender Flächeninanspruchnahme. Eine Übersicht zum Betrieb des Werkes (Rohsalzproduktion) zeigt Anlage 2. Für die jüngere Vergangenheit konnten zusätzlich Vermessungsdaten der Markscheiderei der K+S (Inaktive Werke) für die Ermittlung der Aufstandsfläche herangezogen werden.



Abbildung 4: Stufe 1 der Bilanzierung – Boxmodell (Mess- und Beobachtungsdaten 2003 – 2018)

GIS-gestützte Ermittlung der Aufstandsflächen für den Gesamtzeitraum in Jahresscheiben

Mit Hilfe von QGIS wurden die Informationen für die Bilanzierung aufbereitet. Die verfügbaren georeferenzierten Luftbilder aus verschiedenen Jahren und aktuelle Vermessungen bilden dabei die Stützstellen für die Ermittlung der Aufstandsflächen. Die Aufstandsfläche der Halde wird für jedes Jahr ermittelt und rechnerisch der Anteil der Mantelzone, der Übergangszone und des Haldenkerns bestimmt. Zusätzlich wird das Haldenvorfeld berücksichtigt, das mit mindestens 3 m um die Aufstandsfläche angenommen wird. Die Ergebnisse der QGIS-Bearbeitung werden in Tabellenform für die Bilanzierung abgelegt.

Auswertung von Daten zum Untergrund Bohrprofile, Berichte

Zum Standort liegen Untersuchungen vor, die Rückschlüsse auf den Untergrund der Halde ermöglichen [17][18][19][20][21][22]. Auf dieser Grundlage werden die mittlere Mächtigkeit der natürlichen Dichtung sowie die Durchlässigkeit dieser Barriere beurteilt.

Bilanzierung N-E-Abfluss (Graben) für den beobachteten Zeitraum und Berücksichtigung der Aufsalzung und Ermittlung der Einstauhöhe

In der Stufe 1 der Wasserhaushaltsbilanz erfolgt zunächst eine Betrachtung und Bilanzierung von Niederschlag, Verdunstung und im Haldenrandgraben gefasstem Haldenwasser für den Beobachtungszeitraum (2003-2018). Grundlage sind Messdaten, Klimadaten des DWD sowie fachlich begründete Annahmen zur Verdunstung von der Haldenoberfläche, die unter anderem

aus früheren Einschätzungen und Lysimeterversuchen zur ebenfalls kieseritischen Rückstandshalde Neuhoof-Ellers abgeleitet wurden [11].

Das in die Halde eindringende Niederschlagswasser und der Anteil des sogenannten freien Wassers im Rückstand erfährt durch den Aufenthalt in und die Passage durch die Halde eine Mineralisierung durch die abgelagerten Salze. Dieser Prozess der Aufsalzung ist mit einer Volumenzunahme des Haldenwassers verbunden. Diese Volumenzunahme wird mit dem Aufsalzungsfaktor berechnet. Dieser Faktor beschreibt das Verhältnis der Dichte von reinem Wasser und der Dichte des Anteils reinen Wassers in einem definierten Volumen hochmineralisiertem Haldenwasser wie nachfolgend beispielhaft dargestellt.

$$F_{Aufsalz} = \frac{\rho_W}{\rho_{W_{HH}}} = \frac{1 \frac{g}{cm^3}}{0,91 \frac{g}{cm^3}} = 1,11$$

$f_{Aufsalz}$ Aufsalzungsfaktor
 ρ_W Dichte von Wasser in g/cm^3
 $\rho_{W_{HH}}$ Dichte des Anteils reinen Wassers im Haldenwasservolumen in g/cm^3

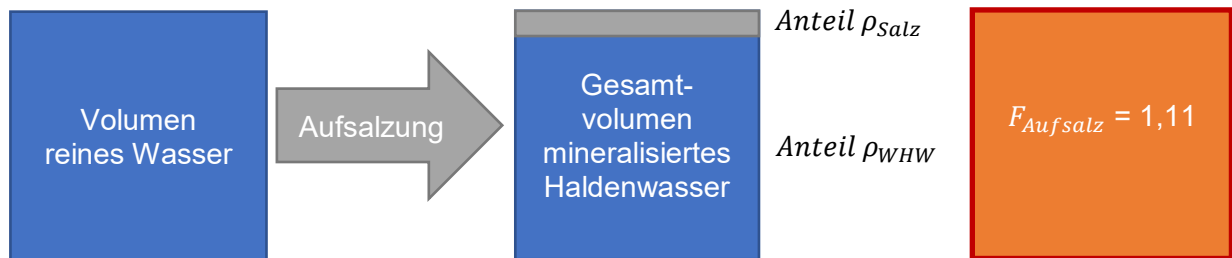


Abbildung 5: Schema zur Bestimmung des Aufsalzungsfaktors und Berechnungsbeispiel

Die Größe dieses Aufsalzungsfaktors wird aus der Zusammensetzung des Haldenwassers bestimmt [23]. In verschiedenen neueren Bearbeitungen der K+S wurde der Aufsalzungsfaktor mit 1,11 angegeben [8] [10] [12].

In der Stufe 1 der Wasserhaushaltsbilanz wird für den Beobachtungszeitraum aus den bekannten oder abgeleiteten Bilanzgrößen ein mittlerer Wert für die Restinfiltration (RI) mineralisierten Wassers in den Grundwasserleiter (GWL) bestimmt.

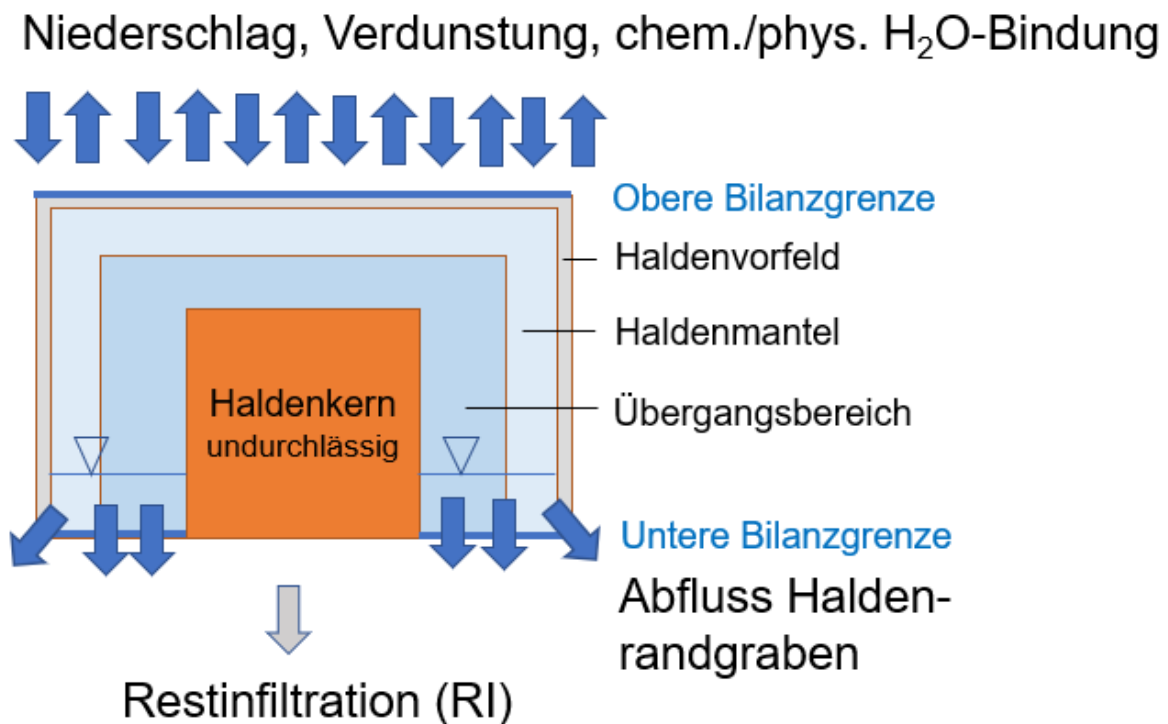


Abbildung 6: Schematische Darstellung des idealisierten Haldenmodells für die Bilanzierung des Beobachtungszeitraums in Stufe 1 der Wasserhaushaltsbilanz

Ergebnis - Mittelwerte der Parameter für die Darcy-Berechnung und RI für den beobachteten Zeitraum

Die weitere Betrachtungsweise erfolgt in Anlehnung an die Methodik zur Beurteilung der Sickerwassermengen von Deponien (Deponieansatz). Die Methodik geht vom Überstaukonzept aus. Das bedeutet, dass das Volumen der sich bildenden Haldenwassermenge als Überstau auf die Fläche bezogen wird, durch die das Haldenwasser sich in Richtung Grundwasser bewegen kann. Im Fall der Rückstandshalden sind diese Flächen die Sohle der Mantelzone (rechnerisch mit Vorfeld) und der Übergangszone. Die Berechnung erfolgt dementsprechend nach dem Darcygesetz für einen mittleren Wasserstand (Überstau).

Aus dem mittleren Wasserdargebot für den Beobachtungszeitraum (2003 bis 2018), also dem sich im Mittel jährlich bildenden Haldenwasservolumen wird eine mittlere Einstauhöhe in der Mantelzone und Übergangszone bestimmt. Die Parameter der Darcyberechnung werden innerhalb des gültigen Wertebereichs soweit angepasst, bis sich eine möglichst gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Bilanz für den Beobachtungszeitraum im Sinne einer Kalibrierung darstellen lässt.

4.3.2 Stufe 2 der Wasserhaushaltsbilanz

In der zweite Stufe der Bilanzierung wird für die Halde der Gedanke des Boxmodells weitergeführt.

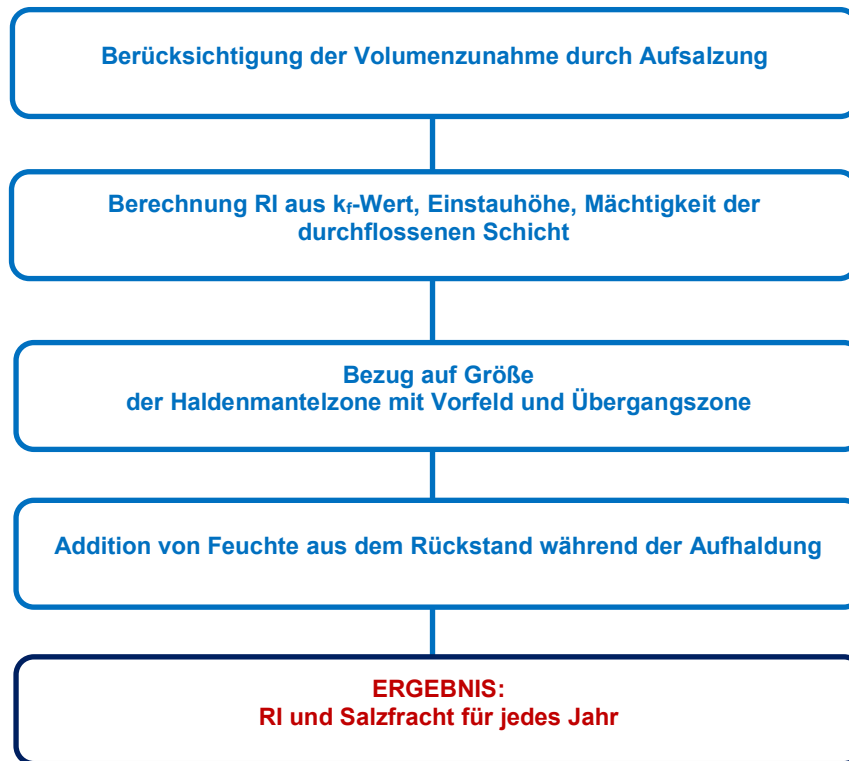


Abbildung 7: Stufe 2 der Bilanzierung RI-Berechnung nach Darcy für den Gesamtzeitraum

Berücksichtigung der Volumenzunahme durch Aufsalzung

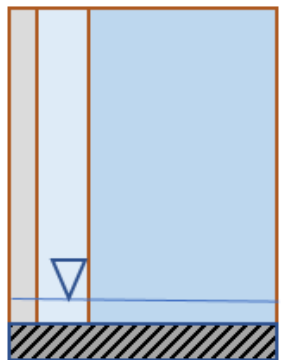
Die Ermittlung Volumenzunahme entspricht dem Vorgehen in **Abbildung 5**.

Berechnung RI aus k_f -Wert, Einstauhöhe, Mächtigkeit der durchflossenen Schicht

Die Methode der Berechnung der Restinfiltration (RI) aus den mittleren Einstauhöhen mithilfe der Darcygleichung wird im nächsten Arbeitsschritt für den gesamten Untersuchungszeitraum angewendet.

Bezug auf Größe der Haldenmantelzone mit Vorfeld und Übergangszone

Aus den Erkenntnissen der ersten Bearbeitungsstufe wird für die Berechnung der Restinfiltration der k_f -Wert für den jeweils betrachteten Flächenanteil angewendet. Insbesondere bei Halden, die bereits vor längerer Zeit in Betrieb genommen wurden, können sehr unterschiedliche Bedingungen bezüglich der Sohleigenschaften vorliegen, da der Untergrund ggf. anfangs unverändert überschüttet und später im Zuge von Haldenerweiterungen mit bindigem Material verdichtet wurde. Die Verhältnisse der Althalde Siegfried-Giesen werden diesbezüglich nur von den bindigen Lagen des natürlichen Untergrundes bestimmt. Die Verhältnisse vor Ort wurden im Zuge der Haldenerweiterung behördlich begutachtet [18][19].



RI

[m³/(ha*a)]

Salzfrachten

Abbildung 8: Schematische Darstellung des Ansatzes für die Berechnungen mit dem Deponieansatz in Stufe 2 der Wasserhaushaltsbilanz

Addition von Feuchte aus dem Rückstand während der Aufhaltung

Um die Restinfiltration (RI) zu berechnen, wird für den Betriebszeitraum aus dem freien Wassergehalt des Reststoffes eine zusätzliche abflusswirksame Komponente für jedes Jahr berechnet, die zur Größe der Flächenanteile von Mantelzone mit Vorfeld und Übergangszone in Beziehung gebracht wird. Das im Labor bestimmte freie Wasser im Rückstand ist für die Bilanzierung als reines, nicht mineralisiertes Wasser anzusehen. Für die Berechnung der Restinfiltration wird hier, wie für den Haldenwasseranteil aus Niederschlägen, die Volumenzunahme ebenfalls mittels Aufsalzungsfaktor bestimmt. Dieses zusätzliche Haldenwasservolumen wird rechnerisch, der Überstauhöhe zugeschlagen.

Ergebnis - RI und Salzfracht für jedes Jahr

Für die Flächenanteile von Mantelzone mit Vorfeld und Übergangszone wird die spezifische Restinfiltration aus dem Gradienten und dem Durchlässigkeitskoeffizient bestimmt. Die spezifische Restinfiltration ist auf eine Flächengröße von 1 Hektar bezogen. Sind Flächen unterschiedlicher Durchlässigkeit zu betrachten, sind für diese Flächen jeweils spezifische Restinfiltrationen zu bestimmen (z.B. für vergütete Flächen oder natürliche unvergütete Flächen mit deutlich differierendem Durchlässigkeitskoeffizienten).

Aus dem Mittelwert der Salzkonzentration des Haldenwassers und der Restinfiltration wird eine Gesamtsalzfracht [kg/m³] abgeleitet. Die Multiplikation der spezifischen Restinfiltration mit der Gesamtsalzfracht ergibt eine spezifische Salzfracht, die auf die gewählte Einheitsfläche bezogen ist [kg/(ha*a)].

4.4 Berechnungsgrundlagen der zweistufigen Haldenwasserbilanz

4.4.1 Grundlegende Bilanzgleichung

Nachdem bereits das grundsätzliche Vorgehen sowie die methodischen Schritte der Berechnungen erläutert wurden, werden die grundlegenden Gleichungen näher beschrieben. Die

grundlegende Bilanzgleichung beschreibt die den Haldenwasserhaushalt bestimmenden Größen und Prozesse.

Unter dem Begriff Haldenwasseranfall (HWA) wird diejenige Wassermenge verstanden, die durch die Differenz von Niederschlag (N) und Evaporation (E) zuzüglich freiem Wasser aus frischem Rückstand in der Halde entsteht (siehe **Abbildung 3**). Das Haldenwasser erfährt durch den Aufsalzungsprozess während der Passage der Halde eine Volumenvergrößerung. Diese wird durch den Aufsalzungsfaktor beschrieben (siehe **Abbildung 5**).



Abbildung 9: Haldenwasseraustritt am Haldenfuß, neuer Haldenrandgraben

Das mineralisierte Haldenwasser wird nach Passage durch den Haldenkörper und Austritt an verschiedene Stellen des Haldenmantels im Haldenrandgraben gesammelt und abgeführt. Der verbleibende Anteil, welcher durch die Haldensole in das Grundwasser gelangt, wird als Restinfiltration (RI) bezeichnet. Die Speicheränderung ΔS ist nicht direkt messbar und kann im Zuge der Betrachtung von jährlichen Mittelwerten der beschriebenen Größen vernachlässigt werden. Es wird davon ausgegangen, dass sich kurzfristige Speicheränderungen mittelfristig ausgleichen. Überjährlich sind rechnerisch negative Bilanzen in einigen Jahren aufgrund der Speicherwirkung und aufgrund von Unschärfen in Messwerten nicht auszuschließen. Nachfolgend wird für den Standort Siegfried-Giesen die Bilanzgleichung dargestellt.

$$\text{HWA} = (\text{N} - \text{E}) * \text{F}_{\text{Aufsalz}} * \text{A} + \text{WG}_{\text{frei}} * \text{F}_{\text{Aufsalz}} = \text{q}_{\text{Graben}} + \text{RI} \pm \Delta \text{S}$$

HWA	Haldenwasseranfall in m³/a
N	Niederschlag in m³/(ha*a)
E	Evaporation in m³/(ha*a)
F _{aufsalz}	Aufsalzungsfaktor
A	Aufstandsfläche der Rückstandshalde in ha
WG _{frei}	Freies Wasser der jährlich anfallenden Rückstandsmenge in m³/a
q _{Graben}	Abfluss im Haldenrandgraben (gemessen) / Einleitung Innerste in m³/a
RI	Restinfiltration in m³/a
ΔS	Änderung des Haldenspeicherinhaltes

Für die Gefährdungsabschätzung ist vor allem der Anteil des Haldenwassers relevant, der das Grundwasser beeinflusst (RI). Demzufolge wird die allgemeine Bilanzgleichung unter Vernachlässigung der Speicheränderung nach RI umgestellt.

$$RI = (N-E) \cdot F_{\text{Aufsalz}} \cdot A + W G_{\text{frei}} \cdot F_{\text{Aufsalz}} - q_{\text{Graben}}$$

Für die Bilanzierung, die in Jahresschritten erfolgt, muss die jeweilige Flächengröße der Rückstandshalde ermittelt werden (Anteile des Haldenkerns, der Übergangszone sowie der Mantelzone und des Vorlands).

4.4.2 Grundlegende Strömungsgleichung

Die Aufstellung der grundlegenden Bilanzgleichung für RI ist nur für den Beobachtungszeitraum möglich, in dem die einzelnen Bilanzglieder durch Messungen und Untersuchungen oder fachlich begründete Abschätzungen angegeben werden können (siehe Abschnitt 4.4.1).

Für den gesamten Untersuchungszeitraum ist dies aufgrund fehlender Daten nicht möglich. Die Bilanzierung erfolgt daher auf der Basis der Berechnung einer Darcystromung durch die Haldensole. Grundannahme ist eine Wasserbewegung durch die Haldensole aufgrund eines Potentialgefälles. Für diesen Ansatz wird die rechnerisch ermittelte mittlere Überstauhöhe aus dem Beobachtungszeitraum für die Bildung des Gradienten zugrunde gelegt.

$$q \text{ (m}^3/\text{a)} = RI = k_f \cdot i \cdot A \cdot F_z$$

RI	-	Restinfiltration (m ³ /a)
k _f	-	Durchlässigkeitskoeffizient der Haldensole (m/s)
i	-	Gradient = $\Delta y / \Delta x = h / M$
h	-	rechnerischer Überstau über der Haldensole
M	-	mittlere Mächtigkeit der natürlichen bindigen Dichtung unter der Haldensole
A	-	wirksame Fläche Haldenmantelzone + Übergangszone + Vorland (m ²)
F _z	-	= 365 * 86400 Faktor zur Umrechnung in von m ³ /s in m ³ /a

Die Ermittlung der Restinfiltration, die auf die Flächenanteile der Mantelzone und Übergangszone bezogen wird, wird nach den Empfehlungen des LANUV-Fachbericht 25 [16] für die Bestimmung von Deponiesickerwassermengen umgesetzt. Der dort beschriebene Ansatz berücksichtigt bzw. korrigiert die Überschätzung der Wasserleitfähigkeit, die auf der Methodik der laborativen k_f-Wert-Bestimmung von Deponieabdichtmaterial beruht. Diese erfolgt im Labor bei einem Gradienten von I=30 bei vollkommener Wassersättigung. Die realen Bedingungen weichen bei Deponien und auch in der Natur in der Regel vom Labormaßstab ab. Bei sehr feinkörnigen bindigen Böden wird unterhalb des so genannten „Stagnationsgradienten“ i₀ davon ausgegangen, dass die Wasserbewegung in Porensystemen aufgrund von Molekularkräften zum Stillstand kommt [26].

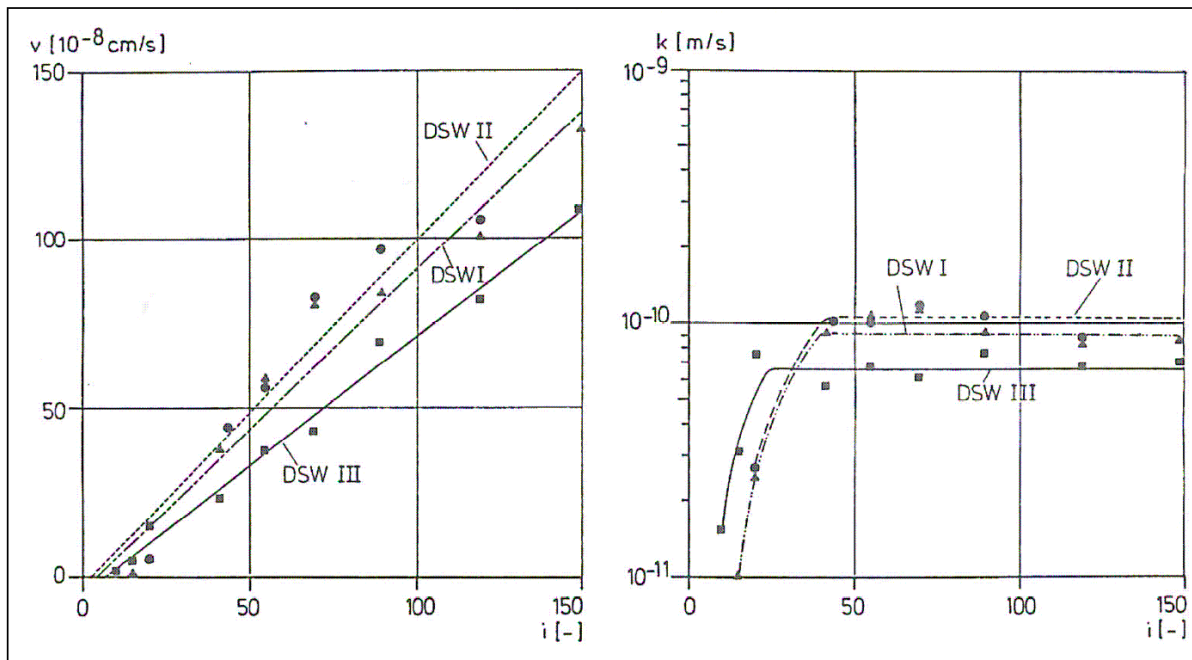


Abbildung 10: Einfluss des hydraulischen Gradienten i auf die Filtergeschwindigkeit und k -Werte bei einem ausgeprägten plastischen Ton unter Verwendung verschiedener Prüfflüssigkeiten [26]

Der Gradient i wird auf der Grundlage eines angenommenen Überstaus über der bindigen Schicht unter der Haldensohle bestimmt. Dieser ergibt sich aufgrund der Bilanzierung der Größe von RI im Beobachtungszeitraum und der Fläche durch die eine Infiltration/vertikale Wasserbewegung möglich ist (Fläche Haldenmantelzone + Übergangszone + Vorland). Der so bestimmte rechnerische Überstau h über der Sohle und die Mächtigkeit der Dichtung M gehen in den Gradienten ein:

$$i = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{h}{M}$$

Diese Verfahrensweise folgt den Empfehlungen des Fachberichts 25 des LANUV zur Bestimmung von Deponiesickerwassermengen für sehr feinkörnige Materialien [16].

Ausgehend von der Voraussetzung, dass beide Berechnungsmethoden grundsätzlich für die Berechnung der Restinfiltration geeignet sind, muss eine hinreichende Annäherung der Ergebnisse für RI nach beiden Methoden für den Beobachtungszeitraum im Sinne einer Kalibrierung erreicht werden. Die Annäherung kann durch die iterative Veränderung von Variablen der grundlegenden Strömungsgleichung in zulässigen Größen erfolgen. Für den konkreten Fall des Standortes der Althalde SG wären das die Variation des k_f -Wertes innerhalb zulässiger Grenzen unter Annahme einer mittleren Mächtigkeit M der natürlichen bindigen Dichtungsschicht. Ist die Anpassung vertretbar, kann eine Ermittlung von RI für den Epignosezeitraum und den Prognosezeitraum erfolgen.

5 Parameter zur Aufstellung der Haldenwasserbilanz

5.1 Übersicht

Im Zuge der Bearbeitung wurden die die Althalde Siegfried-Giesen betreffenden relevanten Informationen aus Unterlagen und Messdaten zusammengetragen. Grundlagen sind neben

Kenntnissen und Erfahrungen zum Verständnis der Prozesse und zum Aufbau von Rückstandshalden sowie Daten für die Erstellung der Haldenwasserbilanz (historisch/ rezent/ perspektivisch):

- der zeitliche Verlauf der Aufhaldung seit 1925 auf Basis historischer Unterlagen
- geometrische und physikalische Parameter der Halde
- Zusammensetzung von Rückstand und Haldenwasser
- Daten zu Niederschlag und Verdunstung
- Daten zur Bilanzierung der zeitabhängig anfallenden, mineralisierten Abflüsse (Messung der Abflüsse im Haldenrandgraben)

Nachfolgend werden die betreffenden Daten dargestellt und deren Erhebung erläutert.

5.2 Zeitlicher Verlauf der Aufhaldung

5.2.1 Produktion des Werkes Siegfried-Giesen

Grundlagen für die Ermittlung des zeitlichen Verlaufs der Aufhaldung sind die

- *Auswertung historischer Daten zur Althalde SG und die*
- *GIS-gestützte Ermittlung der Aufstandsflächen für den Gesamtzeitraum in Jahresscheiben*

Die historische Recherche geht bis in das Jahr 1906 zurück [2]. Zu diesem Zeitpunkt wurde das Abteufen des ersten Schachtes begonnen. Der Beginn der Nutzsalförderung wird mit dem Jahr 1910 angegeben. Die Aufhaldung von Rückstand auf der Fläche der heutigen Althalde Siegfried-Giesen begann im Jahr 1925. Die alte Teufhalde wurde von 1910 bis 1925 genutzt und etwa im Zeitraum zwischen 1925 und 1928 abgetragen. Während der gesamten Zeit des Betriebs des Werkes Siegfried-Giesen wurde ein sehr hoher Anteil des Reststoffs unterirdisch versetzt. Dies war vor allem durch die spezifischen geometrischen Eigenschaften der ausgebeuteten Lagerstätte möglich. Die Produktion lief über die Jahre diskontinuierlich. Zum Produktionsausfall kam es insbesondere durch die Weltkriege. Die höchsten Produktionszahlen wurden 1974/75 mit einer Förderung und Verarbeitung von ca. 2 Mio. t Rohsalf jährlich erreicht. Die Produktion wurde 1987 eingestellt.

Laut historischer Recherche wurden seit Beginn insgesamt ca. 53.060.000 Tonnen Kali- und Steinsalf gefördert. Eine Übersicht der aus den historischen Zahlen abgeleiteten Produktionsmengen zeigt Anlage 2.

5.2.2 Entwicklung der Halde Siegfried-Giesen

Die Halde wurde am gegenwärtigen Standort segmentweise geschüttet. Es liegen Vermessungsdaten aus dem Jahr 2007 vor, anhand derer ein Volumen von ca. 5.200.000 m³ ermittelt werden konnte. Die Entwicklung der Aufstandsfläche der Halde wird anhand von Luftbildern, Planungs- und Bestandsunterlagen, historischen Fotografien und der Fakten über die historische Entwicklung des Bergwerkes und der Kalifabrik in Siegfried-Giesen abgeleitet. Ausgehend von verfügbaren Luftbildern aus den Jahren 1945/ 1969/ 1975/ 1978/ 1979/ 1983/ 1988/ 2001/ 2010 konnte in Kombination mit historischen Fotos und Unterlagen Aufstandsflächen für den gesamten Produktionszeitraum und darüber hinaus bis zum Jahr 2020 abgeleitet werden. Mit der Einstellung des Betriebes des Werkes Siegfried-Giesen 1987 gab es nur noch Einflüsse durch Umlagerungen bzw. Beräumungen im Zuge der Altlastensanierung.

Die Aufstandsfläche der Rückstandshalde wurde von den Luftbildern, Vermessungsdaten und Zeichnungen in QGIS übertragen und die jeweiligen Flächengrößen bestimmt. Zwischen den Luftbildern aus den genannten Jahren wurden Jahresscheiben abgeleitet. Hinweise hierzu liefern auch die in Anlage 2 dargestellten Produktionszahlen.

5.3 Geometrische und physikalische Parameter

5.3.1 Informationen aus Haldenbohrungen

Die Erkenntnisse zum prinzipiellen Aufbau von Rückstandshalden werden durch verschiedene Bohrkampagnen der jüngeren Vergangenheit belegt. Nachfolgende **Tabelle 1** zeigt Angaben zur Haldenzonierung (Mittelwerte) für die Halden Hattorf und Wintershall [27] [28].

Tabelle 1: Angaben zur Ausbildung von Haldenzonen (Mittelwerte) aus Haldenbohrungen

	Hattorf	Wintershall
Breite (m)		
Haldenmantel	45 m	42
Übergangsbereich	65 m	50
Haldenvorland	3	3

In **Tabelle 2** wurden Aussagen zur Dichte und zum Durchlässigkeitskoeffizienten zusammengefasst. Die Angaben stammen aus verschiedenen Untersuchungsberichten zu den Halden Neuhoof-Ellers, Wintershall, Hattorf und Zielitz [14] [28] [27] [9].

Tabelle 2: Ergebnisse zur Dichte und Durchlässigkeit aus Bohrungen

	Neuhoof-Ellers		Wintershall		Hattorf		Zielitz	
Bereich	Dichte ρ (t/m ³)	k_f -Wert (m/s)	Dichte ρ (t/m ³)	k_f -Wert (m/s)	Dichte ρ (t/m ³)	k_f -Wert (m/s)	Dichte ρ (t/m ³)	k_f -Wert (m/s)
Mantelzone	ca. 1,9	ca. $1 \cdot 10^{-7}$ - $2 \cdot 10^{-7}$	ca. 1,2- 1,8	bis $1,1 \cdot 10^{-4}$	ca. 1,2- 1,8	ca. 10^{-6} - 10^{-4}	ca. 1,5 bis 1,6	ca. $1 \cdot 10^{-7}$ bis $1 \cdot 10^{-5}$
Übergangszone			ca. 1,8- 1,9	ca. 10^{-9} - 10^{-7}	ca. 1,8- 1,9	ca. 10^{-9} - $7 \cdot 10^{-7}$	> 1,7	mit Schicht ca. $1 \cdot 10^{-6}$ vertikal < $1 \cdot 10^{-7}$
Haldenkern	ca. 2,1	sehr gering ca. $3 \cdot 10^{-9}$	ca. 2,0	ca. 10^{-10} - 10^{-9}	ca. 1,9- 2,0	ca. 10^{-10} - 10^{-9}	ca. 1,9 bis 2	bis ca. $1 \cdot 10^{-8}$

Die Untersuchungen zu verschiedenen Standorten kommen übereinstimmend zu dem Schluss, dass die Dichte des Haldenkörpers von oben nach unten und von außen nach innen größer wird und der Durchlässigkeitsbeiwert entsprechend abnimmt. Die höchste Wasserdurchlässigkeit ist demnach in der Mantelzone zu erwarten. Hier finden die wesentlichen Strömungsvorgänge statt, in der Übergangszone aufgrund der geringeren Durchlässigkeit in geringerem Maße. Das Haldenwasser in der Mantelzone kommt auf bevorzugten Sickerwegen zum Abfluss und tritt zu einem großen Teil im Bereich der Böschung und des Haldenfußes aus. Dieser Anteil des Haldenwassers wird im Haldenrandgraben gesammelt und zur Innerste abgeführt, der verbleibende Teil bildet die Restinfiltration.

Für die Bilanzierung und Berechnungen des Haldenwassers der Althalde Siegfried-Giesen wurden äquivalent zur Bearbeitungen für andere Haldenstandorte der K+S folgende Größen für die einzelnen Haldenzonen angesetzt [8] [10] [12]:

- Haldenmantel 45 m
- Übergangsbereich 65 m

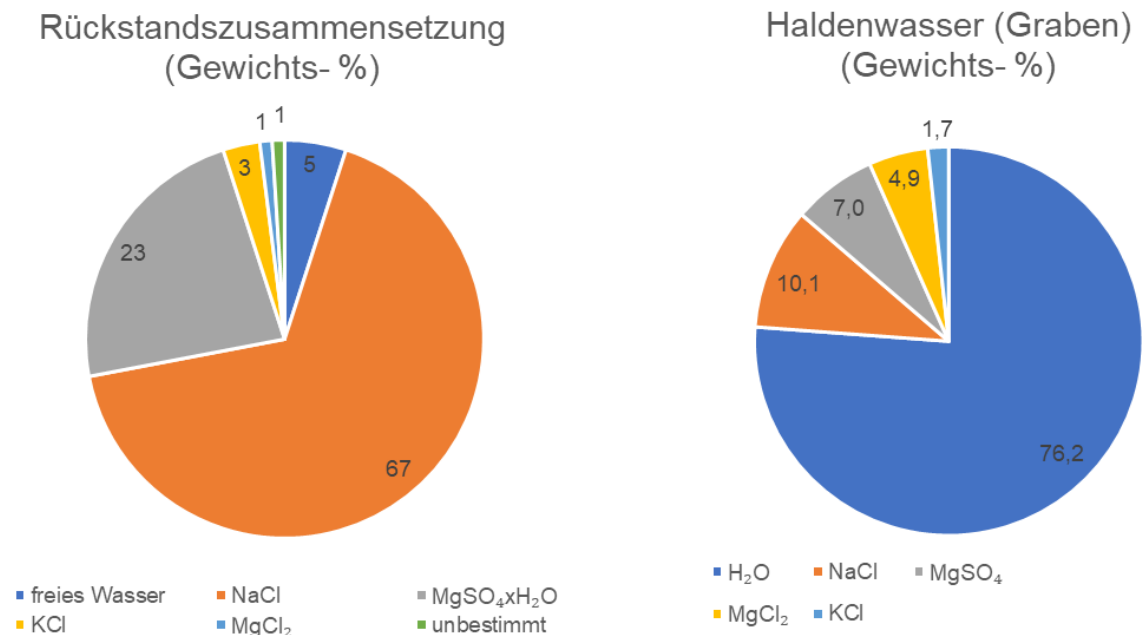


Abbildung 12: Zusammensetzung des Produktionsrückstandes (Probe Friedrichshall) und des Haldenwassers aus dem Haldenrandgraben der Althalde Siegfried-Giesen (Daten IW, Mittelwert 1998 – 2017)

5.5 Niederschlag

Im Umfeld der Althalde Siegfried-Giesen sind oder waren verschiedene Stationen des DWD vorhanden. Folgende Daten waren zum Zeitpunkt der Bearbeitung auf der Internetseite des DWD verfügbar [15]:

– Station 2206 Hildesheim	01.01.1905 – 29.02.2008
– Station 13776 Hildesheim-Drissenstedt	01.03.2008 – 31.12.2010
– Station 02014 Hannover	01.01.1856 – 31.08.2020
– REGNIE-Daten (N als ASCII GRID)	01.01.1931 – 02.09.2020

Die Daten unterscheiden sich nicht nur in der Zeitspanne, sondern auch in der Genauigkeit. Ältere Datensätze sind i.d.R. nicht geprüft bzw. nicht prüfbar und werden vom DWD niedrigeren Qualitätsniveaus zugeordnet. Die Daten der Stationen Hildesheim und Hildesheim-Drissenstedt zeigen tendenziell höhere Niederschläge als Hannover. In den Unterlagen „Antrag auf Planfeststellung Hartsalzwerk Siegfried-Giesen, Planfeststellungsunterlage zum Rahmenbetriebsplan“ wurden Daten der Station Hildesheim ausgewertet [4].

Für die aktuelle Aufgabe der Gefährdungsabschätzung SG ist ein Zeitraum bis Ende 2019 zu betrachten. Daher wurden rasterbasierte REGNIE-Daten des DWD verwendet. Die REGNIE-Daten sind regionalisierte Niederschlagsdaten, die z.B. als Tageswerte abgerufen werden können. Ein für die Haldenwasserbilanz Siegfried-Giesen verwertbares Format wurde aus den Rasterdaten des DWD geschrieben und als Ganglinie dargestellt (siehe **Abbildung 13**).

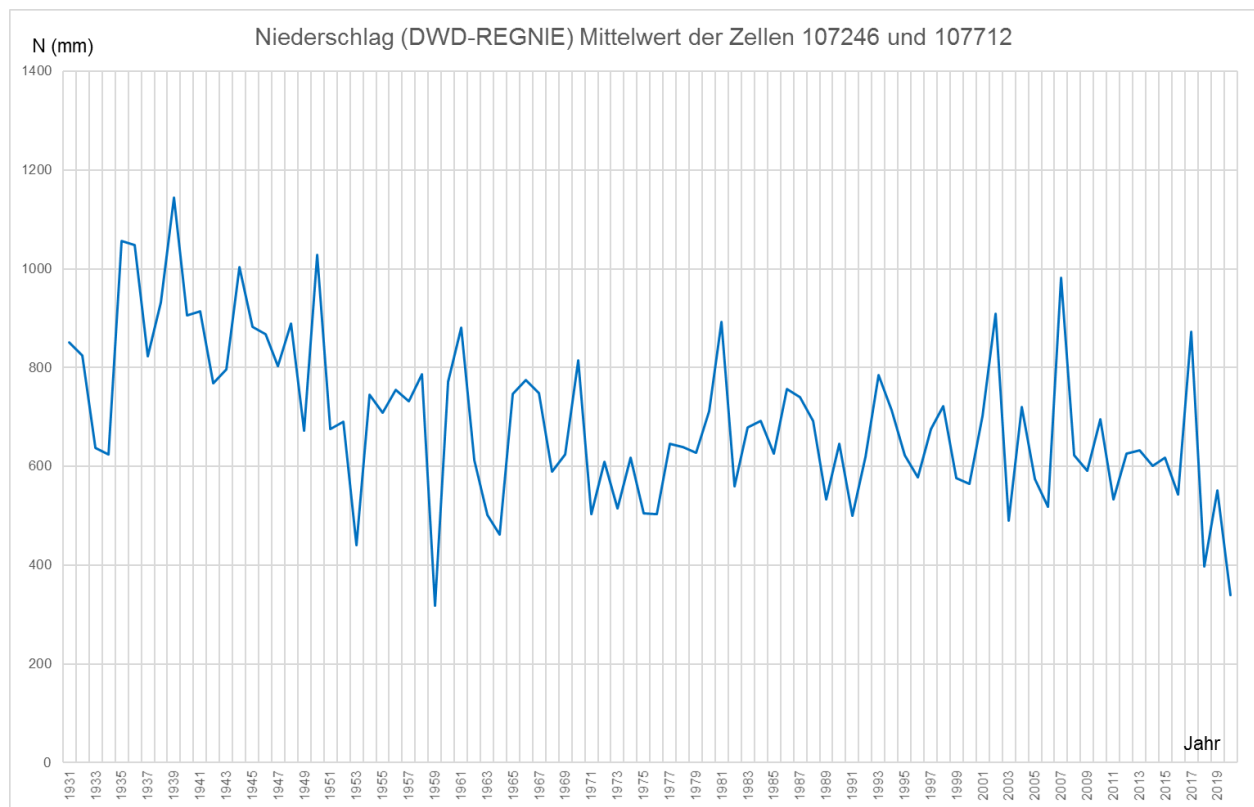


Abbildung 13: Ganglinie des Niederschlags für den Standort der Althalde Siegfried-Giesen (DWD-REGNIE)

Aus der dargestellten sehr langen Zeitreihe von 1931 bis 2019 ergibt sich ein mittlerer Jahresniederschlag von 697 mm. Die Daten weisen auf einen abnehmenden Trend der Niederschlagshöhe hin.

5.6 Verdunstung auf der Halde

5.6.1 Vorbemerkung zu Rückstandshalden

Die Evaporation auf Halden weicht von den natürlichen Prozessen in Böden aufgrund der spezifischen Eigenschaften der Salze ab und ist von verschiedenen Aspekten abhängig. Neben dem verfügbaren Wasser aus Niederschlägen, dem Wind und dem Globalstrahlungsangebot ist das chemisch/physikalische Wasserbindevermögen der im Rückstand enthaltenen Salze von Bedeutung (Einbindung von Wasser in das Kristallgitter oder Bildung von Salzlösungen). Allgemein wird davon ausgegangen, dass die Verdunstung durch die Anwesenheit von Salzen oder über Salzlösungen vermindert ist. Demgegenüber steht die Tatsache, dass auf Halden besondere Bedingungen herrschen, wie beispielsweise im Vergleich zur Umgebung der Halde erhöhte Sommertemperaturen auf der Haldenoberfläche, welche die Verdunstung begünstigen sowie die windexponierte Lage.

5.6.2 Spezifische Bedingungen kieseritischer Halden

Die Althalde Siegfried-Giesen wird, wie in Abschnitt 4.2 bereits erwähnt, als Kieserithalde bezeichnet. Aufgrund der spezifischen Auslaugungsvorgänge wird davon ausgegangen, dass ein deutlich größerer Anteil des Niederschlags verdunsten kann, als das beispielsweise bei reinen Steinsalzhalde (NaCl – Halit) der Fall ist. Durch den niederschlagsbedingten Auslaugungsprozess geht MgCl_2 in Lösung, während NaSO_4 als Thenardit bzw. Mirabelit in der äußeren

Haldenzone verbleibt und mit weiteren Bestandteilen wie Mineralkörnern die Haldenoberfläche bildet. Na_2SO_4 ist, wie aus **Abbildung 14** ersichtlich, damit an der Oberfläche der Althalde SG bis in ca. 80 cm Tiefe das signifikante Salz. Potenziell ist es in der Lage, Wasser zu binden und wieder abzugeben. Durch die wetterbedingte Änderung der Färbung der Haldenoberfläche wird dieser Prozess sichtbar. Es ist davon auszugehen, dass der Prozess der Auswaschung weiter fortgeschritten ist und sich die Zone mit hohem Natriumsulfatanteil im Vergleich zum damaligen Zustand noch vergrößert haben könnte.

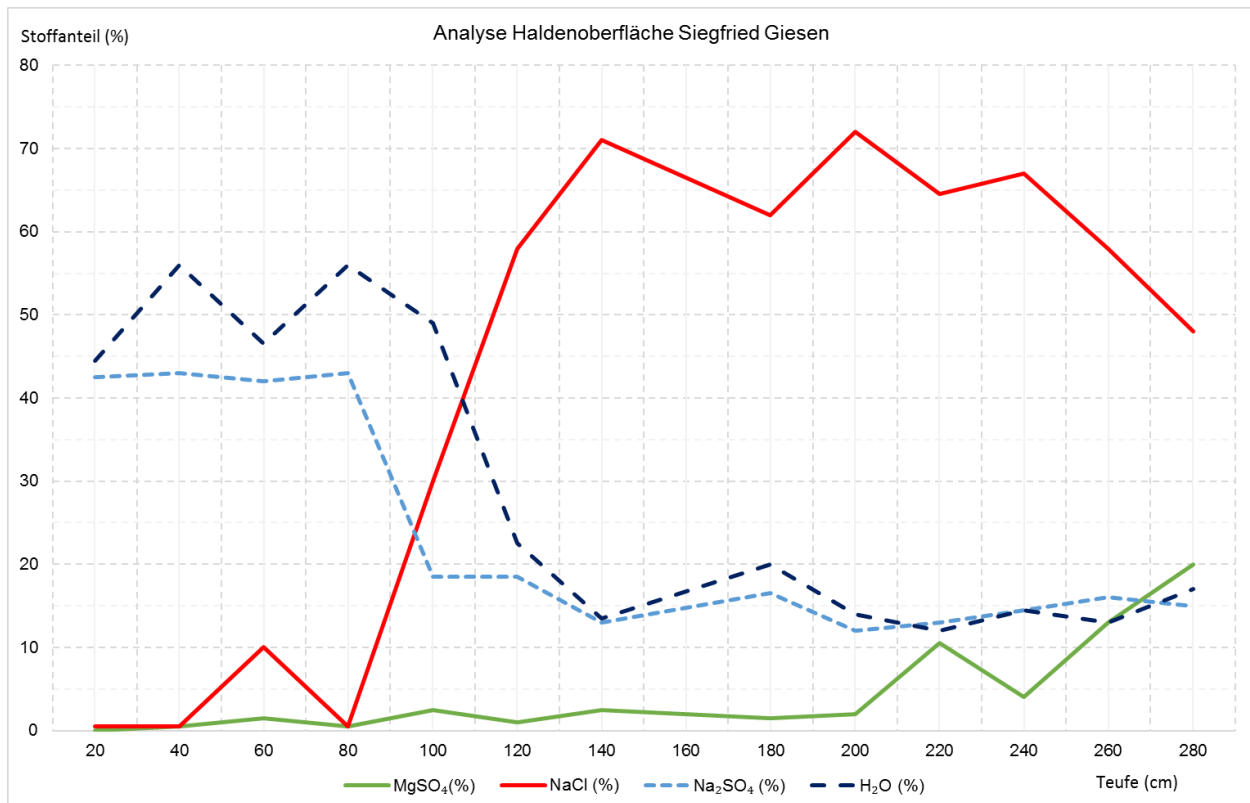


Abbildung 14: Beprobung Halde Siegfried-Giesen 5/1980 aus [13]; Grafik bearbeitet

5.6.3 Relative Luftfeuchte

Die relative Luftfeuchte beschreibt den aktuellen Wassergehalt der Luft im Verhältnis zum maximal möglichen Wassergehalt bei entsprechender Temperatur. Bei verschiedenen Temperaturen wird bei gleicher relativer Luftfeuchte ein unterschiedlicher absoluter Wassergehalt beschrieben. Die Wasseraufnahmefähigkeit der Luft steigt mit der Temperatur. Bei 30°C und 100 % relativer Luftfeuchte beträgt der Wassergehalt ca. 30 g/m³, bei 0°C und 100 % relativer Luftfeuchte nur 5 g/cm³. Die relative Luftfeuchte ist im Zusammenhang mit den Prozessen der Wasseraufnahme und -abgabe von Salzen bedeutsam (z.B. Überschreiten oder Unterschreiten der Deliqueszenzfeuchte).

5.6.4 Gleichgewichtsfeuchte und Deliqueszenzfeuchte

Die Wasseraufnahme und Abtrocknung der Althalde SG ist je nach Wetterlage optisch gut erkennbar. Die trockene Halde ist weiß, die feuchte Halde grau. Grundsätzlich wird davon ausgegangen, dass, abgesehen vom Wassertransport in den besser durchlässigen Bereichen (Spalten bzw. Risse), die maßgeblichen Wasserhaushaltsprozesse, die grob mit denen in Böden verglichen werden können, in den oberen Zentimetern der Haldenoberfläche stattfinden. In diesem Bereich wurden bei früheren Untersuchungen in Siegfried-Giesen nach **Abbildung 14**

neben einem hohen Anteil von ca. 50% H₂O mehr als 40 % Na₂SO₄ und NaCl nur in sehr geringen Mengen festgestellt.

Die Prozesse der Wasseraufnahme und -abgabe von Salzen wird durch die Gleichgewichts- bzw. Deliqueszenzfeuchte beschrieben. Die Gleichgewichtsfeuchte kennzeichnet dabei die Übergänge verschiedener Hydratphasen eines Salzes. Unter der Deliqueszenzfeuchte versteht man den Wert der relativen Luftfeuchte, an welchem ein Gleichgewicht zwischen einem Salz in festem, kristallinem Zustand und seiner Lösung sowie das Gleichgewicht zwischen flüssigem Wasser der Lösung und Wasserdampf herrscht. Nach dieser für verschiedene Salze experimentell bestätigten Theorie wird unterhalb dieses Punktes Wasser an die Atmosphäre abgegeben, oberhalb wird Wasser aus der feuchten Luft aufgenommen. Für verschiedene Salze wird die Deliqueszenzfeuchtigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur angegeben. Die Komplexität dieser Prozesse wird für das System Na₂SO₄-H₂O in **Abbildung 15** dargestellt.

Nach Steiger und Schwarz [24], die zu Salzschiäden an Kulturgütern (Gebäuden) gearbeitet haben, ist die Deliqueszenzfeuchtigkeit von NaCl (Halit) nahezu temperaturunabhängig und wird mit 75% der relativen Luftfeuchte angegeben. Steiger und Schwarz weisen darauf hin, dass mittels Beobachtungen, Laboruntersuchungen und Modellrechnungen in diversen Studien gezeigt wurde, dass die für reine Salze gefundenen Deliqueszenzfeuchten nicht für Gemische von Salzen gelten. Sie beschreiben weiter am Beispiel des Natriumsulfats - Na₂SO₄ - die Komplexität der Gleichgewichts- und Löslichkeitsprozesse. Neben den stabilen Phasen des Natriumsulfats Thenardit und Mirabelit wurden weitere metastabile Phasen beschrieben.

Tabelle 3: Stabile und metastabile Phasen des Natriumsulfats nach Steiger und Schwarz [24]

Stabile Phasen	Metastabile Phasen
Na ₂ S ₄ O ₄ (V) (Thenardit)	Na ₂ SO ₄ ·7H ₂ O (Heptahydrat)
Na ₂ SO ₄ ·10H ₂ O (Mirabilit)	Na ₂ SO ₄ (III) (metastabile wasserfreie Phase)

Ausgehend von der Aussage in **Abbildung 14** über das nahezu ausschließliche Vorhandensein von Natriumsulfat in den obersten Zentimetern der Haldenoberfläche kann davon ausgegangen werden, dass die maßgebliche Deliqueszenzfeuchte entsprechend der Kurven 1 und 2 nach **Abbildung 15** zwischen ca. 86 und 100 % relativer Luftfeuchte liegt und die beschriebenen Prozesse auf der Halde theoretisch sehr stark von der herrschenden Temperatur abhängig sind.

In der nachfolgenden Grafik nach Steiger und Asmussen (2008) werden die Deliqueszenzfeuchten für die verschiedenen Phasen des Natriumsulfats sowie die Hydratgleichgewichte dargestellt [25].

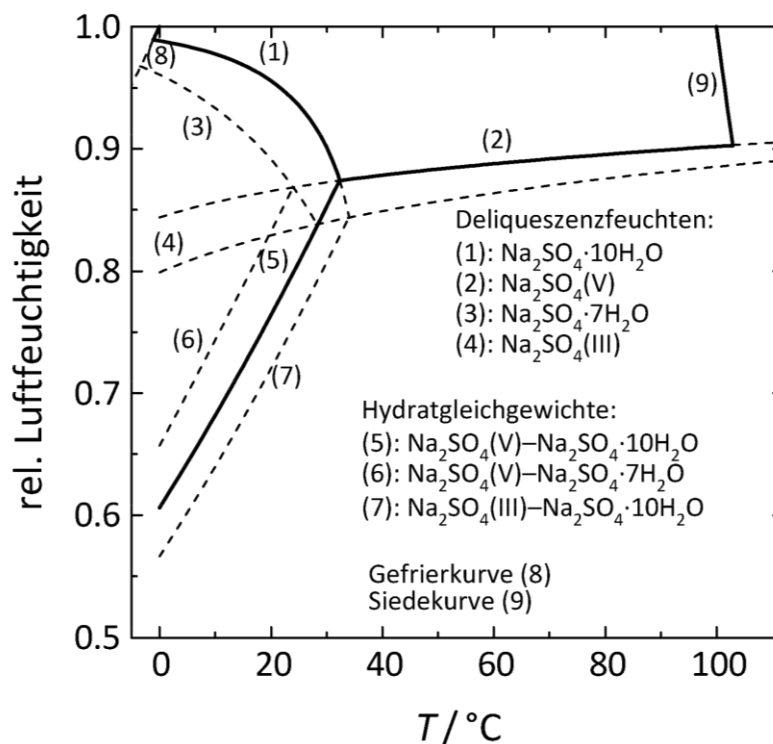


Abbildung 15: Gleichgewichtsfeuchten im System $\text{Na}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}$; stabile Gleichgewichte: durchgezogene Kurven, metastabile Gleichgewichte: gestrichelte Kurven [24]

Geht man davon aus, dass die Temperaturen auf der Haldenoberfläche im Sommer aufgrund der Wirkung direkter Sonneneinstrahlung noch deutlich höher sind als sie von Messstationen im Haldenumfeld gemessen werden und gleichzeitig niedrige relative Luftfeuchten herrschen, dürfte sommerlicher Niederschlag zu einem größeren Teil verdunsten, als bislang angenommen.

5.6.5 Werte der Evaporation

Die Evaporation auf der vegetationslosen Halde ist nicht direkt messbar. Für die Althalde Siegfried-Giesen werden fachlich begründete Ansätze auf der Basis von Analogieschlüssen getroffen. Dazu werden Untersuchungsergebnisse zur vergleichbaren Halde Neuhoof-Ellers herangezogen. Mit dem Ziel, einer Verbesserung der Datenlage für die Haldenwasserbilanz wurden im aktiven Werk Neuhoof-Ellers Lysimeter unmittelbar auf dem Haldentop errichtet und Stoff-Wasser-Bilanzen erstellt. Die dort durchgeführten Untersuchungen dienten vor allem dazu, zu überprüfen, ob und in wie weit durch Einmischung von Additiven in den Rückstand eine hohe Verdunstungsrate erreicht werden kann, ohne zusätzlich Schadstoffe zu mobilisieren. Der Versuch wurde gleichzeitig mit vier Haldenlysimetern durchgeführt, von denen ein Lysimeter mit unverändertem Rückstand befüllt wurde. Aus den Messdaten eines Jahres wurde für das Referenzlysimeter ein Verdunstungswert für zwei Zeiträume zwischen 42% und 52% ermittelt [11].

Daher wird für die nachfolgenden Berechnungen ein mittlerer Verdunstungswert von 40% zugrunde gelegt, der den Bedingungen einer kieseritischen Halde nach heutiger Einschätzung zugeschrieben werden kann. Der Parameter Verdunstung und die Auswirkungen abweichender Ansätze werden im Abschnitt 8 im Rahmen von Sensitivitätsbetrachtungen beleuchtet.

5.6.6 Messung der Haldenwasserabflüsse

Am Standort Siegfried-Giesen wird das im Haldenrandgraben gesammelte Wasser über eine Rohrleitung zur Innerste transportiert. Die Abgabe des Haldenwassers an die Innerste wird überwacht und dokumentiert. Die Ergebnisse werden turnusmäßig an die zuständigen Behörden gemeldet. Mit der Erneuerung des Haldenrandgrabens wurde auch das Messsystem überarbeitet. Hier dargestellte Daten stammen noch aus der Zeit vor Inbetriebnahme des neuen Systems.

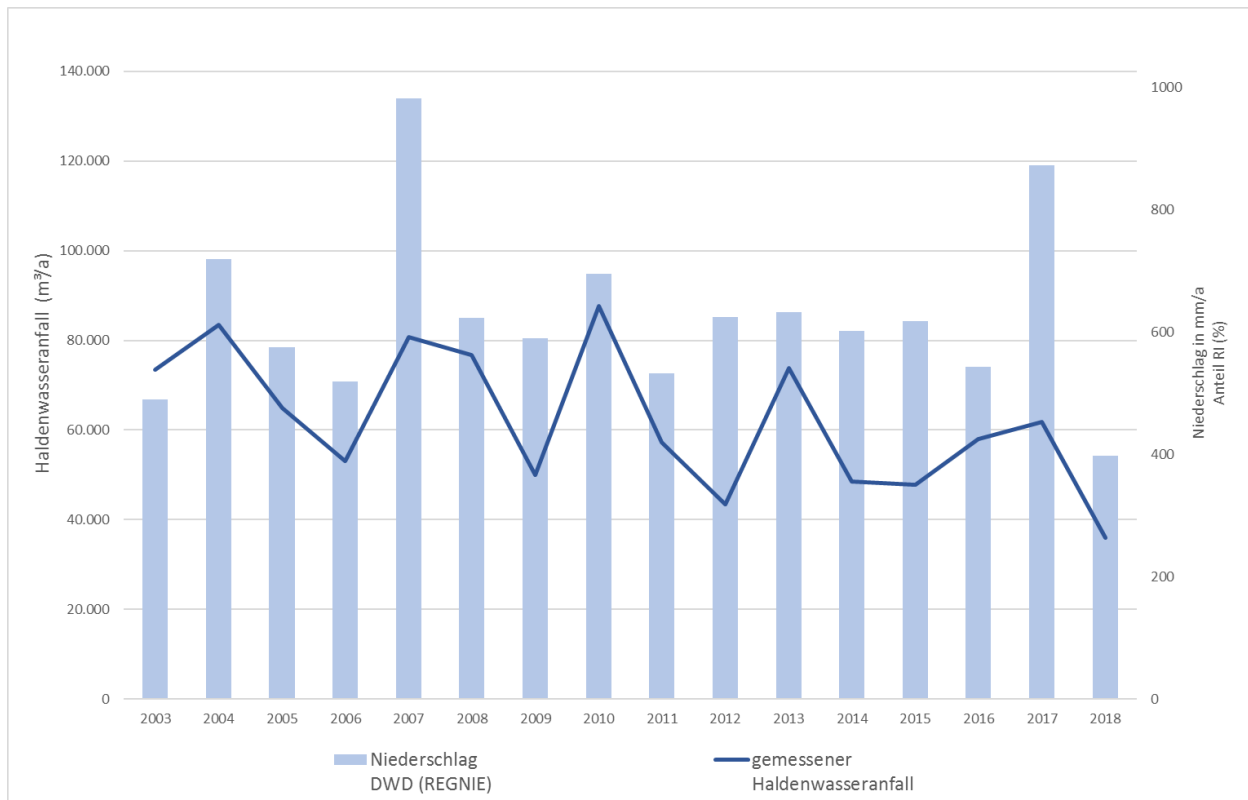


Abbildung 16: Niederschlag und gemessener Haldenwasseranfall im Beobachtungszeitraum

Die hier dargestellten Niederschlags- und Haldenwasserdaten sind Bilanzgrößen für die Aufstellung der Haldenwasserbilanz in der Stufe 1. Die Daten wurden hinsichtlich ihres Zusammenhangs (Korrelation) geprüft. Der Korrelationskoeffizient ist ein Maß für den linearen Zusammenhang zweier Datensätze. Ergibt sich der Korrelationskoeffizient zu „1“ ist der statistische Zusammenhang absolut eindeutig, beträgt er „0“ besteht kein linearer statistischer Zusammenhang zwischen den Daten. Der Korrelationskoeffizient beträgt in diesem Fall für die Jahre 2003 bis 2018 0,51. Ein statistischer Zusammenhang ist damit gegeben.

Es ist davon auszugehen, dass mit dem neuen Messsystem zur Erfassung der Haldenabwässer eine Verbesserung der Datenqualität einhergehen wird und dass sich langfristig damit auch der statistische Zusammenhang zwischen Niederschlag und Haldenwasseranfall besser abbilden lässt.

5.6.7 Anteil „Freies Wasser“ am anfallenden Rückstand und Aufsalzung

Wasser wird in Salzen chemisch und physikalisch gebunden. Es entstehen das sogenannte Kristallwasser (Einbindung in die Kristallstruktur von Salzen) sowie Lösungen. Ein Anteil des Wassers im Rückstand, der abflusswirksam wird als „freies Wasser“ bzw. abflusswirksames Haftwasser bezeichnet.

In die Bilanzierung fließt dieser Teil des Wassers ein und bildet zusammen mit dem aus Niederschlägen stammenden Wasser das Haldenwasser, also das Wasserdargebot im System Halde. Wie für das Niederschlagswasser muss auch für das freie Wasser, welches im Labor als nichtmineralisiertes reines Wasser bestimmt wird, die Volumenzunahme mittels Aufsalzungsfaktor berechnet werden (vergl. Abschnitt 4.3.1). Der Anteil von „freiem Wasser“ im aufgehalteten Rückstand wurde in der Datenzusammenstellung für die Althalde Siegfried-Giesen mit im Mittel 5% angegeben [7]. Der Aufsalzungsfaktor wird aufgrund des Anteils von „reinem“ Wasser (Laboranalyse) an der Zusammensetzung des Haldenwassers berechnet.

Tabelle 4: Mittelwerte der Analyseergebnisse Haldenwasser Siegfried-Giesen 1998 - 2017

Anteil	g/l
H ₂ O	924
NaCl	123
MgSO ₄	85
MgCl ₂	60
KCl	21
Salze, ges.	289
Summe	1213

$$F_{Aufsalz} = \frac{\rho_w}{\rho_{WHW}} = \frac{1 \frac{g}{cm^3}}{0,924 \frac{g}{cm^3}} = 1,08$$

Der Aufsalzungsfaktor ergibt sich zu 1,08. Das bedeutet, nicht mineralisierte Wässer, welche die Halde passieren erfahren eine Volumenzunahme von im Mittel 8%.

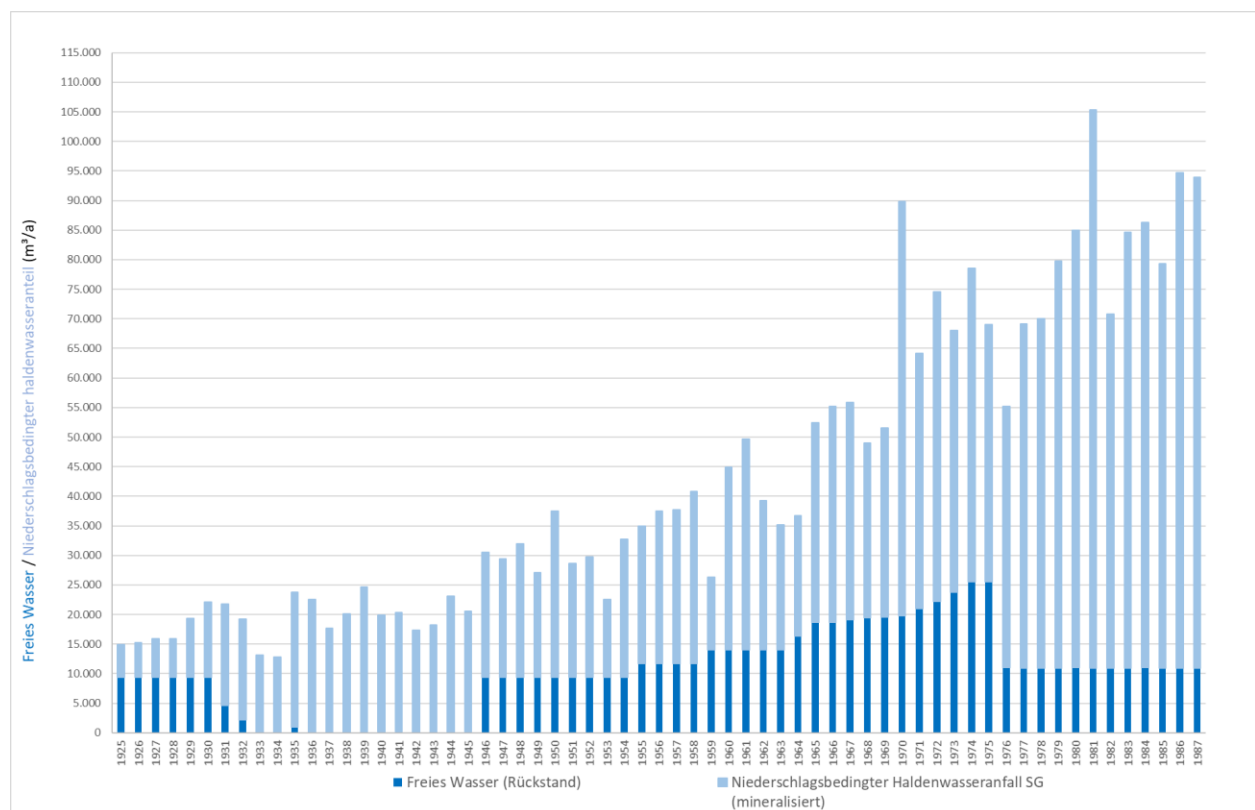


Abbildung 17: Summe freies Wasser (mineralisiert) im Rückstand und niederschlagsbedingter Haldenwasseranfall (mineralisiert) im aktiven Zeitraum

6 Haldenwasserbilanz

6.1 Ermittlung der Aufstandsfläche

Die Ermittlung der Aufstandsfläche erfolgte durch Auswertung historischer Daten. Dazu wurden Luftbilder aus den Jahren 1945/ 1969/ 1975/ 1978/ 1979/ 1983/ 1988/ 2001/ 2010 herangezogen. Zusätzlich wurden weitere historische Fotos des Werkes und der Rückstandshalde in die Betrachtungen einbezogen. Anlage 2 zeigt die aus den historischen Recherchen abgeleiteten Produktionszahlen (Rohsalzförderung), die ebenfalls Rückschlüsse auf die zeitliche Verteilung der Rückstandsaufhaltung zulassen. Auf der Basis der Luftbilder wurden mit Hilfe von QGIS die jeweiligen Aufstandsflächen für die Jahre 1925 bis 2020 bestimmt. Entsprechend **Tabelle 1** wurden basierend auf Haldenbohrungen und analog zu den Bearbeitungen zu den Halden Neuhoof- Ellers, Hattorf und Wintershall folgende Berechnungsgrößen für die Breiten der einzelnen Haldenzonen festgelegt [8] [10] [12]:

- Mantelzone 45 m,
- Übergangszone 65 m

Das Haldenvorland wird i.d.R. mit einer Breite von 3 m angenommen. Zu Zeiten mit einer größeren Ausdehnung wurde diese aus Vermessungsdaten übernommen (Flächen-Shapes der K+S-Markscheiderei, Standort IW). Insbesondere durch die in den vergangenen Jahren im Zusammenhang mit der Sanierung des Haldenrandgrabens geleistete Arbeit wurden Teilflächen saniert und das Haldenvorfeld verkleinert.

Ausgehend von der jeweiligen Form und Größe der Aufstandsfläche wurde mittels GIS eine formale geometrische Abgrenzung der Haldenzonen vorgenommen. Die Haldenzonen sind eine Grundlage für die Haldenwasserbilanz. Eine Übersicht für alle Jahresscheiben von 1925 bis 2020 zeigen grafisch die Anlage 3 und tabellarisch die Anlage 4. Die Zonen verschieben sich nach diesem Ansatz mit der wachsenden Halde. Für einzelne Zeiträume konnte keine Differenzierung in Jahresscheiben erfolgen. Die jeweiligen Flächen-Shapes repräsentieren hierbei einen Zeitabschnitt über mehrere Jahre ohne wesentliche Veränderungen der Aufstandsfläche. Das liegt darin begründet, dass die Halde weiter in die Höhe geschüttet wurde oder nach Abschluss des Haldenbetriebs Vermessungen nur in größeren Abständen erfolgten. Die wesentlichen Veränderungen an der Halde wurden jedoch vermessungstechnisch erfasst.

6.2 Berechnung der Haldenwasserbilanz für den Beobachtungszeitraum

Entsprechend Abschnitt 4.3.1 wurde eine Bilanzierung der Restinfiltration (RI) durch die Ermittlung der Größen Niederschlag, Verdunstung und Abfluss im Haldenrandgraben für den Zeitraum 2003 bis 2018 vorgenommen (Anlage 5). Die Evaporation wurde nach den Ergebnissen nach [11] als fachlich begründete Einschätzung mit 40% des Niederschlags angenommen (vergl. Abschnitt 5.6.5). Da im Beobachtungszeitraum der Haldenbetrieb bereits eingestellt war, ergibt sich in Anlage 5 kein Tabellenwert für den freien Wasseranteil aus dem Rückstand. Das heißt, das Wasserdargebot bildet sich in diesem Zeitraum nur niederschlagsbedingt. Für die Überführung in die Methodik der Stufe 2 ist das nicht nachteilig, da der Wasserdargebotsanteil aus dem freien Wasser für Jahre mit Aufhaltung gesondert berücksichtigt. Die Differenz zwischen dem so ermitteltem Wasserdargebot und dem gemessenen Haldenwasseranfall im Haldenrandgraben ergibt die Restinfiltration (RI). In der Tabelle in Anlage 5 sind einige Werte für die Restinfiltration (RI) negativ. Das bedeutet, es fließt theoretisch im Haldenrandgraben mehr Wasser ab, als sich aus dem rechnerischen Wasserdargebot ergibt. Hier sind zwei Effekte ursächlich, einerseits die Speicherung von Wasser in der Halde, die innerhalb eines Jahres nicht immer ausgeglichen ist, sowie Messfehler bei der Abflusserfassung in der Vergangenheit.

Aus dem Haldenwasseranfall wird für den Beobachtungszeitraum die mittlere theoretische Einstauhöhe im potenziell hydraulisch wirksamen Bereich (Übergangszone und Mantelzone mit Haldenumfeld) und daraus der Gradient für die RI-Bestimmung mittels Darcygleichung berechnet (siehe Anlage 5).

6.3 Berechnung der Haldenwasserbilanz für den gesamten Untersuchungszeitraum

Der mittlere hydraulische Gradient wurde für die Berechnungen nach der Methodik der Stufe 2 um den Anteil des Wasserdargebots aus dem freien Wasser für das jeweilige Aufstauungsjahr ergänzt. Damit wird die jährliche Restinfiltration für jedes Jahr berechnet. Die Ergebnisse sind in Anlage 6 nach den einzelnen Haldenzonen flächenbezogen aufgelistet. Die Summe der Restinfiltration in m^3/a stellt die am Ort der Beurteilung (Sohle der Halde, untere Bilanzgrenze) in das Grundwasser übergehende Menge mineralisierten Wassers dar.

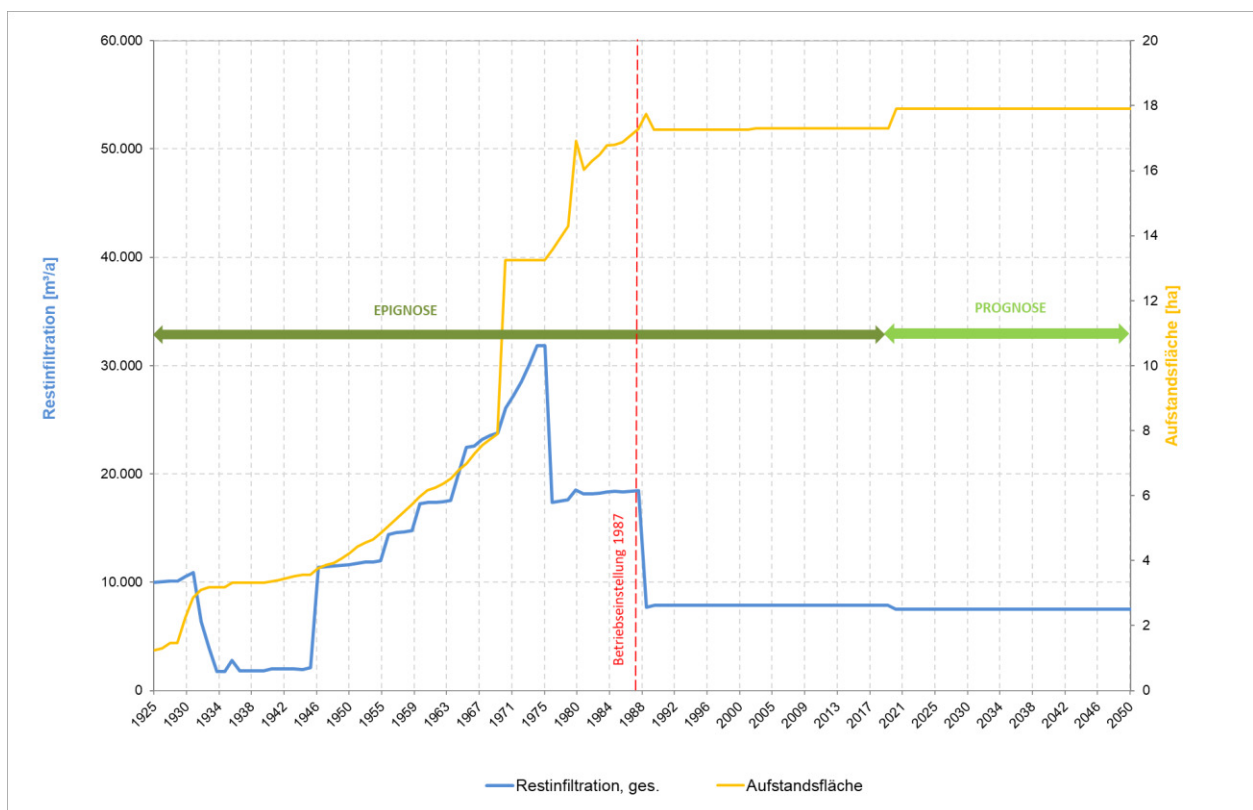


Abbildung 18: Ermittelte Restinfiltration im gesamten Untersuchungszeitraum

Die Grafik in **Abbildung 18** zeigt die Entwicklung der Aufstandsfläche und die ermittelte Restinfiltration. Der gerade Verlauf der Entwicklung der Haldenfläche und der Restinfiltration zeigen die Situation nach Einstellung des Haldenbetriebes 1987 (ohne freies Wasser aus dem Rückstand).

Die berechnete Restinfiltration schwankt mit den Produktionszahlen des Kaliwerkes Siegfried-Giesen und der damit verbunden Rückstandsaufhaltung und der Größe der Aufstandsfläche der Halde. Der höchste Haldenwasseranfall wurde 1975 mit rechnerisch $31.835 \text{ m}^3/\text{a}$ ermittelt. Nach Einstellung des Betriebs des Kaliwerkes Siegfried-Giesen ergeben sich rechnerisch $7.880 \text{ m}^3/\text{a}$. Dieser Wert sinkt in der Prognose aufgrund der realisierten Sanierungsmaßnahmen an der Halde noch leicht auf $7.523 \text{ m}^3/\text{a}$.

7 Gesamtsalzfracht

Unter der Gesamtsalzfracht wird hier die jährliche Menge an Salz verstanden, welche aufgrund der Restinfiltration gelöst im Haldenwasser in den Grundwasserleiter migriert. Die Gesamtsalzfracht wird aus der Haldenwasserzusammensetzung des Zeitraums 1998-2017 (vergl. **Abbildung 12**, rechts) und der Restinfiltration (RI) für jedes Jahr berechnet. Dafür wurde wie folgt vorgegangen:

- Bestimmung des Salzgehaltes (Salze, ges.) aus den Analysen des Haldenwassers (**Tabelle 5**)
- Umrechnung der Restinfiltration [m^3/a] auf eine in eine spezifische Restinfiltration [$\text{m}^3/(\text{ha} \cdot \text{a})$] (Bezug auf die Flächeneinheit 1 ha)
- Berechnung der spezifischen Salzfracht aus dem Produkt der spezifischen Restinfiltration [$\text{m}^3/(\text{ha} \cdot \text{a})$] mit dem mittleren Salzgehalt des Haldenwassers [kg/m^3] (Bezug auf die Flächeneinheit 1 ha)
- Berechnung der Jahresfrachten durch Multiplikation der spezifischen Salzfracht [$\text{t}/(\text{ha} \cdot \text{a})$] mit den für das jeweilige Jahr ermittelten Flächenanteilen (ha) von
 - Mantelzone
 - Übergangszone
 - Haldenvorfeld
- Bildung der Summe der Jahresfrachten der Flächenanteile der genannten Haldenzonen.

Tabelle 5: Mittlere Stoffgehalte des Haldenwassers 1998 - 2017

Inhaltsstoff	Anteil [g/l oder kg/m^3]	Gewichts-%
H_2O	924	76,2
NaCl	123	10,1
MgSO_4	85	7,0
MgCl_2	60	4,9
KCl	21	1,7
Salze, ges.	289	

In Anlage 7 sind die Salzfrachten für die Flächenanteile der einzelnen Haldenzonen sowie die Gesamtsalzfracht [t/a] tabellarisch dargestellt. **Abbildung 19** zeigt den zeitlichen Verlauf.

Das Ergebnis ist im Rahmen der Gefährdungsabschätzung Grundlage für die Stofftransportberechnungen mit dem bei K+S vorgehaltenen Grundwassermodell auf der Basis des Programmsystems FEFLOW.

Die berechnete Salzfracht schwankt mit der Größe der Restinfiltration. Die höchste Gesamtsalzfracht von 9.200 t/a wird für das Jahr 1975 berechnet. Nach Einstellung des Betriebs 1987 ergeben sich rechnerisch 2.271 t/a. Dieser Wert sinkt in der Prognose aufgrund der realisierten Sanierungsmaßnahmen an der Halde auf 2.174 t/a.

Auf der Grundlage der kontinuierlichen Messungen des Abflusses im bis Ende 2019 neu gebauten Haldenrandgraben mit dem ebenfalls neu eingerichteten Messsystem wird in Relation zu den Klimadaten weiter beobachtet, ob Restinfiltration und Gesamtsalzfracht sich aufgrund der Verbesserungen am System Halde-Haldenrandgraben ggf. noch verringern.

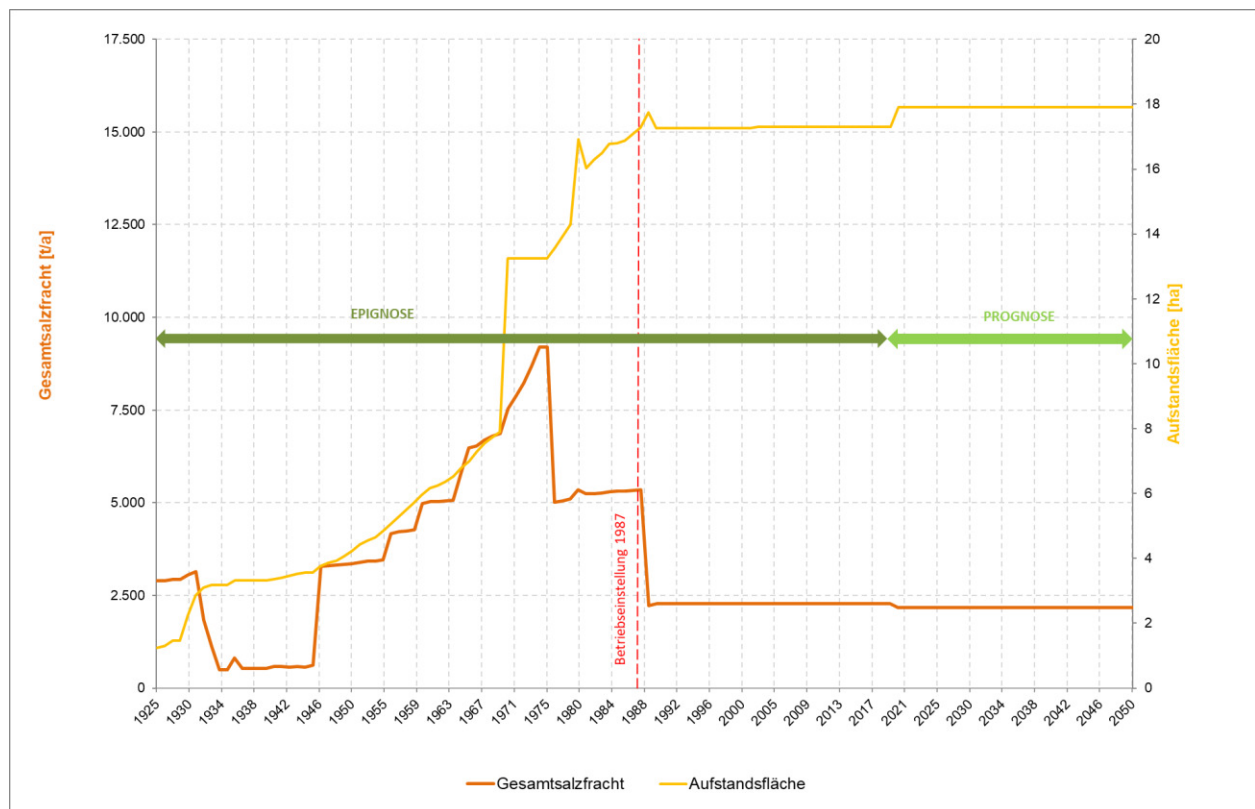


Abbildung 19: Ermittelte Salzfrachten im gesamten Untersuchungszeitraum

8 Sensitivitätsbetrachtungen

8.1 Methodischer Ansatz

In diesem Bericht wurde der methodische Weg zur Aufstellung der Haldenwasserbilanz beschrieben, ebenso Unsicherheiten, die in den zur Verfügung stehenden Daten liegen. Mit der im Abschnitt 4 beschriebenen Methodik werden Restinfiltration und mittlere jährliche Salzeinträge eingeschätzt. Die Salzfracht wird für die weitere Gefährdungsabschätzung hinreichend genau erfasst. Die Sensitivitätsbetrachtung richtet sich auf die Größe der Restinfiltration, die sich durch unterschiedliche Ansätze zur Größe der Verdunstung ergibt.

8.2 Niederschlag

Der Niederschlag ist nach Abschluss des Haldenbetriebs wichtigste Quelle des Wasserdargebots der Althalde Siegfried-Giesen. Nach Abschnitt 4.3.1 ist er für den Beobachtungszeitraum in der Bilanz Ausgangsgröße für die Bestimmung des anfallenden Haldenwassers und der Überstauhöhe für die weitere Berechnung von RI. Abweichungen könnten sich unter anderem aus Abweichungen der Messungen von den tatsächlichen Niederschlagswerten ergeben, so für den Prognosezeitraum der Haldenwasserbilanz.

Das Niedersächsische Ministerium für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz stellt auf seiner Internetplattform Ergebnisse aus Klimaprojektionen dar. Die Berechnungen (2071 bis 2100) beruhen auf dem Klimaszenario A1B des Weltklimarates IPPC. Neben einem Ansteigen der Temperatur um 3 K bis zum Jahr 2100 wird mit einer Verringerung der Frosttage und einer Verlängerung der Vegetationsperiode ausgegangen. Der Niederschlag selbst wird sich nach der Projektion in der Jahressumme nur wenig ändern, im Bereich der Althalde Siegfried-Giesen wird

ein Anstieg von 1 bis 2 % berechnet. Beschrieben wird jedoch eine Änderung der zeitlichen Verteilung der Niederschläge. Der Projektion nach werden im Sommer deutlich geringere und im Winter deutlich erhöhte Niederschläge zu verzeichnen sein [29], was sich auf die Verdunstung auswirken kann.

8.3 Verdunstung

In der Haldenwasserbilanz wurde die Verdunstung mit einer Größe von 40% als fachlich begründeter Wert angesetzt. Diese Größe scheint anhand der vorliegenden Erkenntnisse aus den Lysimeteruntersuchungen in Neuhoof- Ellers und den Bilanzen in Siegfried-Giesen plausibel. Erhöht man für die Berechnungen den Schätzwert für die Verdunstung innerhalb begründbarer Größen iterativ, entstehen für die Verdunstung in einigen Jahren negative Werte für RI in der insgesamt positiven Bilanz.

Diese Ergebnisse könnten zum Teil mit systematischen Fehlern in der Datenerfassung in der Vergangenheit und der nicht bekannten Speicherwirkung der Halde begründet werden. Aufgrund der noch unzureichenden Datenlage lässt sich hierzu noch keine gesicherte Aussage treffen. Eine Verdunstung > 40 % der Niederschläge lässt sich derzeit nicht aus den verfügbaren Daten ableiten. Hierzu sollten Untersuchungen und Daten der kommenden Jahre weiteren Aufschluss geben.

Die oben beschriebenen klimatischen Veränderungen wirken sich gegebenenfalls auch auf die Verdunstung aus. Anhaltspunkte zu grundsätzlichen Tendenzen dazu finden sich in den Daten des LBEG zur Grundwasserneubildung (GWN), welche auf dem NIBIS-Kartenserver abrufbar sind. Dort sind einerseits Daten zur GWN aus GROWA18 für die Perioden 1961-1990, 1971-2000 und 1981-2010 sowie aus den Ergebnissen von Klimamodellen projizierte Daten zur Grundwasserneubildung veröffentlicht.

In den 30jährigen Messperioden wird die GWN im Umfeld der Halde auf den landwirtschaftlichen Flächen mit >100 bis 150 mm angegeben. Geht man hier von einem Mittelwert der GWN von 125 mm aus und vergleicht mit den Mittelwerten der Klimaensembles, GWN 2021-2050 122,5 mm und GWN 2071-2100 118 mm, so ist von einer geringfügigen Abnahme der GWN auszugehen. Es kann angenommen werden, dass die Restinfiltration ebenfalls leicht abnimmt. Die Ergebnisse aus GROWA18 und der WETTREG 2010-Projektionen lassen aufgrund der angegebenen Bandbreiten und unterschiedlichen Ergebnissen aus diversen Klimaszenarien jedoch ein breiteres Ergebnisspektrum zu (siehe **Tabelle 6** und **Abbildung 20**).

Die Verdunstung wird sich bei Realisierung der geplanten Maßnahmen zur Haldenabdeckung weiter verringern. Das ist abhängig von der Art der Abdeckung und einer ggf. möglichen Begründung der Haldenoberfläche. Über Abdeckungen von Halden und Deponien und die damit verbundene Verringerung des Wasserzutritts in den Haldenkörper liegen umfangreiche Kenntnisse vor. Untersuchungen für eine Abdeckung der Althalde Siegfried-Giesen sind nicht Gegenstand dieses Berichts und sollten im Rahmen des entsprechenden Betriebsplans durchgeführt werden.



Abbildung 20: Lage der Vergleichspunkte

Tabelle 6: Vergleich der Angaben zur GWN aus GROWA 18 und Klimaprojektionen nach WETTREG 2010

Ortspunkte auf landwirtschaftliche Flächen	GWN 1961-1990 (mm)	GWN 1971-2000 (mm)	GWN 1981-2010 (mm)	GWN 2021-2050 (mm) Ensemblewerte mittel / min / max	GWN 2071-2100 (mm) Ensemblewerte mittel / min / max
nördlich	> 100-150	> 100-150	> 100-150	126 / 83 / 160	122 / 68 / 177
östlich	> 100-150	> 100-150	> 100-150	141 / 94 / 178	137 / 76 / 197
südlich	> 100-150	> 100-150	> 100-150	97 / 63 / 121	92 / 50 / 135
westlich	> 100-150	> 100-150	> 100-150	125 / 83 / 158	121 / 68 / 174

8.4 Bandbreite der Restinfiltration in der Prognose

Nachfolgend werden in **Tabelle 7** für eine mögliche Bandbreiten der Verdunstung (E) zwischen 30 und 45 % RI und Gesamtsalzfracht dargestellt.

Tabelle 7: Ergebnisse für RI und Gesamtsalzfracht

N (%) / E (% von N)	Summe RI (m³/a)	Gesamtsalzfracht (t/a)
100 / 30	18687	5401
100 / 35	13105	3787
100 / 40	7523	2174
100 / 45	1940	561



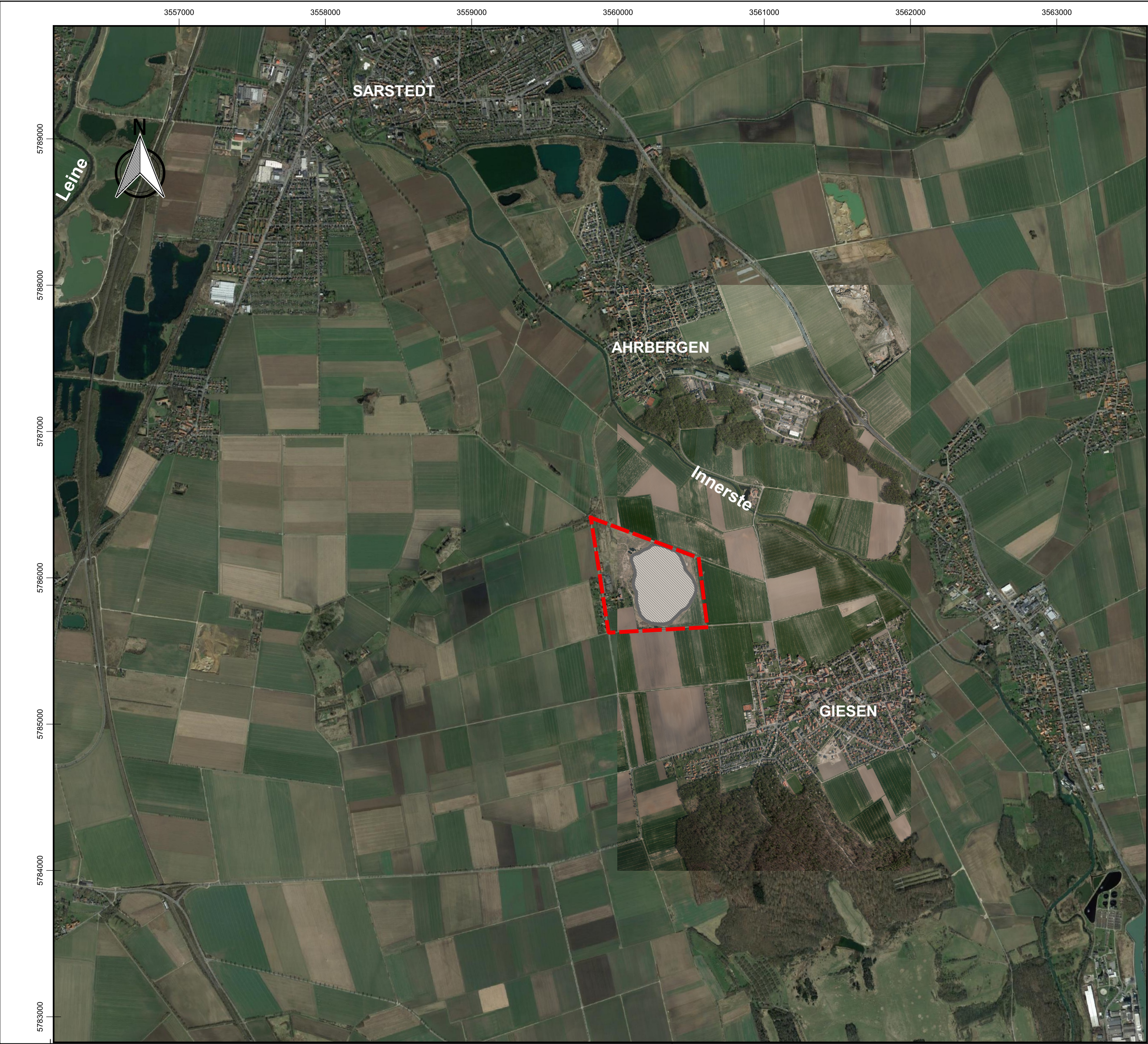
Entsprechend der im Abschnitt 4 erläuterten Bearbeitungsmethodik wurden für die Sensitivitätsbetrachtungen für unterschiedliche Verdunstungsraten hydraulische Gradienten abgeleitet und damit die Berechnung für den Prognosezeitraum vorgenommen. Die gemessenen Abflusswerte im Haldenrandgraben wurden dabei nicht verändert.

9 Literatur und Arbeitsgrundlagen

Für die Bearbeitung wurden verschieden K+S interne und externe Gutachten sowie Richtlinien und Empfehlungen verwendet.

- [1] TU BA Freiberg/IBeWa (2014): Wiederinbetriebnahme des Hartsalzwerkes Siegfried-Giesen, Haldenwasserbilanz Althalde. 03.02.2014 (Abstimmungsexemplar)
- [2] Dr. Pelzer und Partner (1996): Betriebshistorische Erkundung Kaliwerk Siegfried-Giesen (ohne Halde) 30.09.1996
- [3] Fugro Germany Land GmbH (2018): Hartsalzwerk Siegfried-Giesen, Kurzbericht Grund- und Oberflächenwasser. 28.06.2018 und Entwurf 2020
- [4] Fugro Consult GmbH (2014): Planfeststellungsunterlage zum Rahmenbetriebsplan Hartsalzwerk Siegfried-Giesen - Unterlage J-1: Monitoringkonzept Grund- und Oberflächenwasser 17.12.2014
- [5] Fugro Germany Land GmbH (2019): Vorläufige Gefährdungsabschätzung Werk Siegfried-Giesen Althalde. Torgau 25.03.2019
- [6] K+S Aktiengesellschaft, ICL GmbH, IHU GmbH (2014): Hartsalzwerk Siegfried-Giesen, Planfeststellungsunterlage zum Rahmenbetriebsplan, Unterlage- Bearbeitungsgrundlagen, I-11 Teil 1 Haldenwasserbilanzierung. 15.01.2014
- [7] K+S Aktiengesellschaft (2007): Althalden der Kaliindustrie in Niedersachsen, Althalde Siegfried-Giesen Datenrecherche und geologisch-hydrogeologische Beschreibung. Kassel 12.2007
- [8] upi GmbH (2020): Erarbeitung der Haldenwasserbilanz für die Rückstandshalde und den Standort Neuhoof-Ellers der K+S KALI GmbH - Haldenwasserbilanz NE. Stendal 05.05.2020 *unveröffentlicht*
- [9] upi Umwelt Projekt Ingenieurgesellschaft mbH, K+S Kali GmbH, Werk Zielitz (2017): Bergrechtliches Planfeststellungsverfahren „Haldenkapazitätserweiterung II Werk Zielitz (HKE II)“ Band 7 der Antragsunterlage - Fachgutachten System Basisabdichtung
- [10] uip mbH (2019): Nachhaltiges Rückstandsmanagement am Standort Hattorf (Haldenerweiterung Hattorf) Band 1.3E der Antragsunterlage, Haldenwasserbilanz. Stendal 15.05.2018
- [11] upi GmbH (2020): Reduzierung von Haldenwasser der Halde Neuhoof-Ellers Betrieb eines Probefeldes und einer Lysimeteranlage auf dem Haldentop zur Etablierung und zum Nachweis einer Innovativen Erosionsschutzschicht (IES). Zweiter Zwischenbericht zum Probefeld- und Lysimeterbetrieb (November 2019 bis Mai 2020). Stendal Juli 2020
- [12] upi GmbH (2019): Nachhaltiges Rückstandsmanagement am Standort Wintershall (Haldenerweiterung Wintershall), Band 1.3 der Antragsunterlage Haldenwasserbilanz. Stendal Juni 2019
- [13] Sessler, Wolfgang (1996): Die Wirkung salzhaltiger Mineralien auf den Wasserhaushalt der Rückstandshalden. Kassel 05.06.1996
- [14] Sessler, Wolfgang (1996): Zusammenfassende Information über Rückstandshalden. Kassel 02.07.1996
- [15] DWD – Klimadaten der Messtationen Station 2206 Hildesheim, 13776 Hildesheim-Drispenstedt 02014 Hannover, REGNIE-Daten www.dwd.de (Stand 03.09.2020)

- [16] Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (2010): Langzeitbeständigkeit mineralischer Deponieabdichtungen LANUV-Fachbericht 25. Recklinghausen 2010
- [17] Dr.-Ing. Meierhorst und Partner (1988): Kali und Salz AG – Werk Giesen, Entnahme von Boden- und Wasserproben zur Untersuchung auf Salz. Hannover 26.05.1988
- [18] Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung (1967): Ingenieurgeologisches Gutachten für die Standsicherheit einer Kaliversatzhalde Groß Giesen. Hannover 20.12.1967
- [19] Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung (1975): Ingenieurgeologisches Gutachten für die Standsicherheit einer Kaliversatzhalde Groß Giesen. Hannover 28.10.1975
- [20] Dr. Pelzer und Partner (1996): Orientierende Baugrunderkundung für das Kaliwerk Siegfried-Giesen. Bericht Grundwassermessstellen. 30.06.2011
- [21] Dr. Pelzer und Partner (2011): Orientierende Baugrunduntersuchung für das Kaliwerk Siegfried-Giesen. Hildesheim 07./30.06.2011
- [22] Dr. Pelzer und Partner (2016): Sanierung Haldengraben Althalde Siegfried Giesen, Geotechnische und umweltgeologische Untersuchungen. Hildesheim 15.09.2016
- [23] Torsten Fenke (2013): Modellierung des Wasserhaushalts der Rückstandshalde des Kaliwerks Neuhoof-Ellers bei Fulda. Masterarbeit 2013
- [24] Hans-Jürgen Schwarz, Michael Steiger (2008): Salzschiiden an Kulturgütern - Stand des Wissens und Forschungsdefizite, Ergebnisse des DBU Workshops im Februar 2008 in Osnabrück).
- [25] Michael Steiger, Sönke Asmussen (2008): Crystallization of sodium sulfate phases in porous materials: The phase diagram Na₂SO₄–H₂O and the generation of stress. Geochimica et Cosmochimica Acta 1. September 2008
- [26] Reuter (2008): Vom Durchlässigkeitsbeiwert zur Systemdurchlässigkeit – Langzeiterfahrungen mit mineralischen Deponieabdichtungen. 4. Leipziger Deponiefachtagung 19./20. Febr. 2008
- [27] K+S (2014): Nachhaltiges Rückstandsmanagement am Standort Hattorf (Haldenerweiterung Hattorf) Band 3.17 der Antragsunterlage Haldenkörperbohrungen am Standort Hattorf – Ergebnisbericht Hattorf 03.06.2014
- [28] K+S (2018): 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. Hattorf 29.03.2018
- [29] Internetseite des Niedersächsischen Ministeriums für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz (11.12.2020):
https://www.umwelt.niedersachsen.de/startseite/themen/klima/klimawandel_und_anpassung/klimawandel_in_niedersachsen/klimaszenarien_fur_niedersachsen/klimaszenarien-in-niedersachsen-134406.html
- [30] Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (2019): GeoBerichte 36 Grundwasserneubildung von Niedersachsen und Bremen, Berechnungen mit dem Wasserhaushaltsmodell mGROWA18. Hannover 17.07.2019




LEGENDE



ehem. Werksgelaende



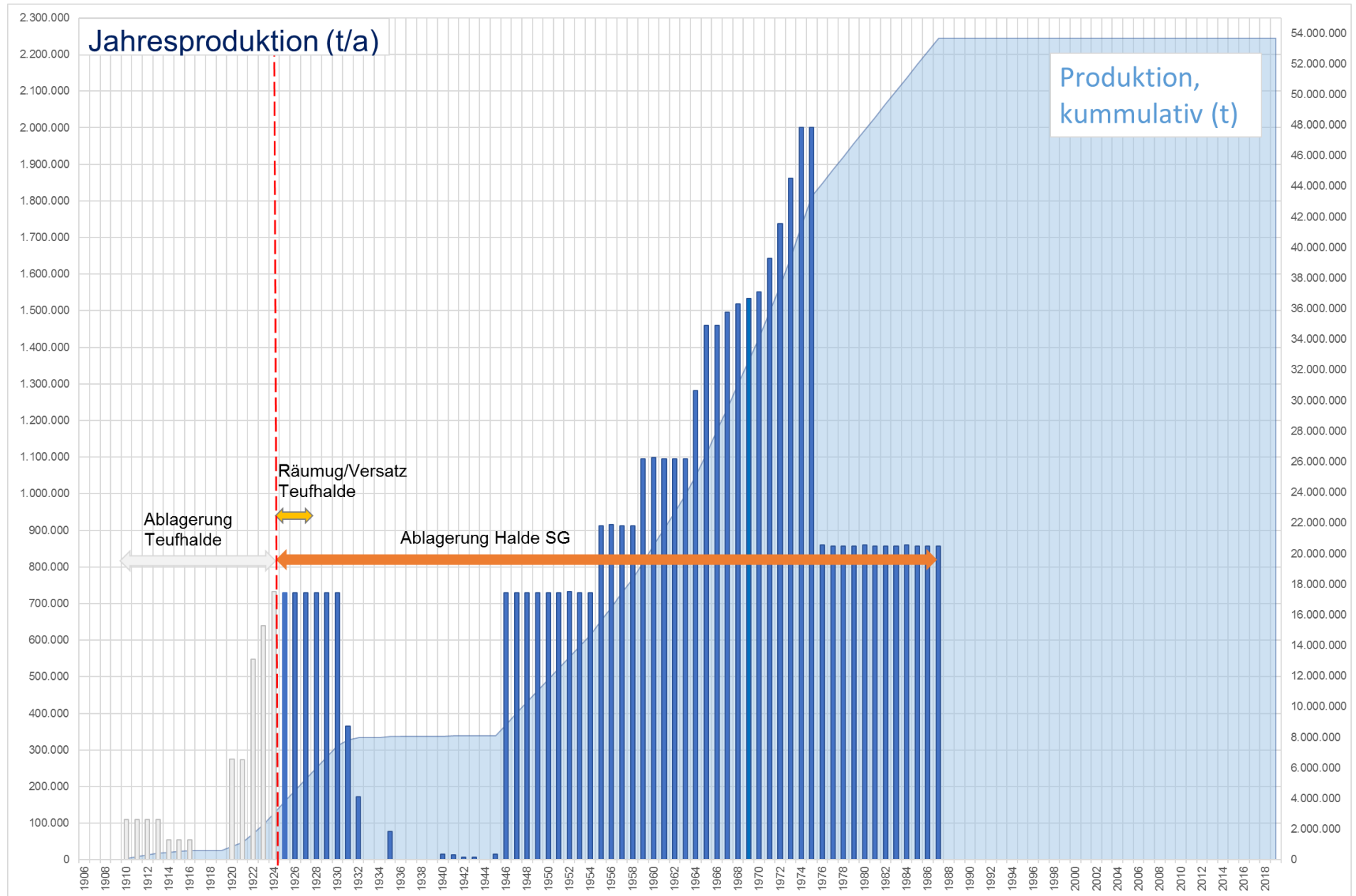
Haldenumriss 2020

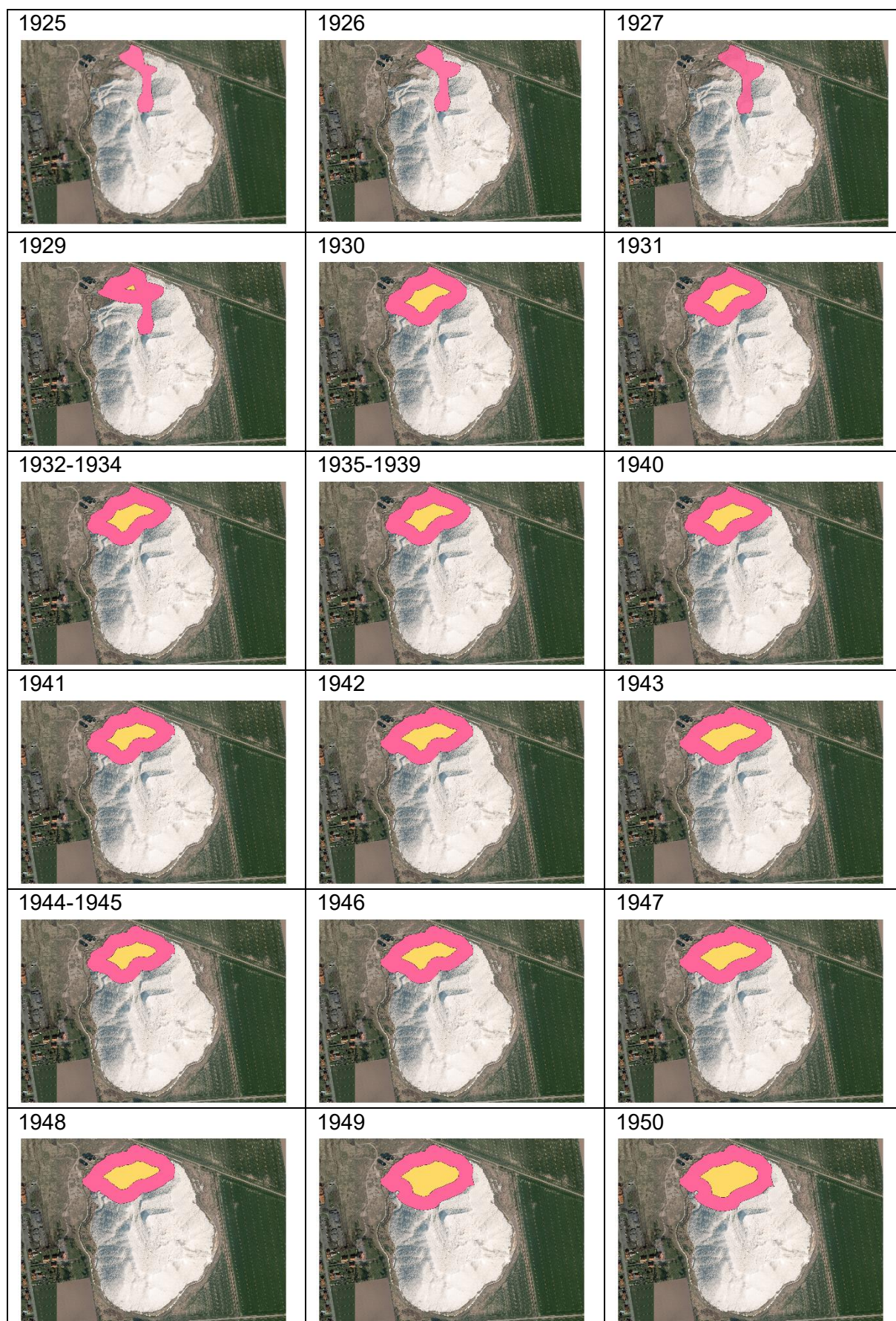
K+S Aktiengesellschaft		
Gefährdungsabschätzung Althalde Siegfried-Giesen Wasserhaushaltsbilanz		
Übersichtslageplan		
Maßstab 1:25.000		
T-GH	Anlage 1	Kassel: 2020-12-17
Standort: Siegfried Giesen		Katalog: Hydrogeologie
Nr. 001	Bearb.: T-GH	GIS: T-GH

Haldenwasserbilanz Althalde SG

Anlage 2: Zeitliche Entwicklung der Produktion 1925 bis 1987

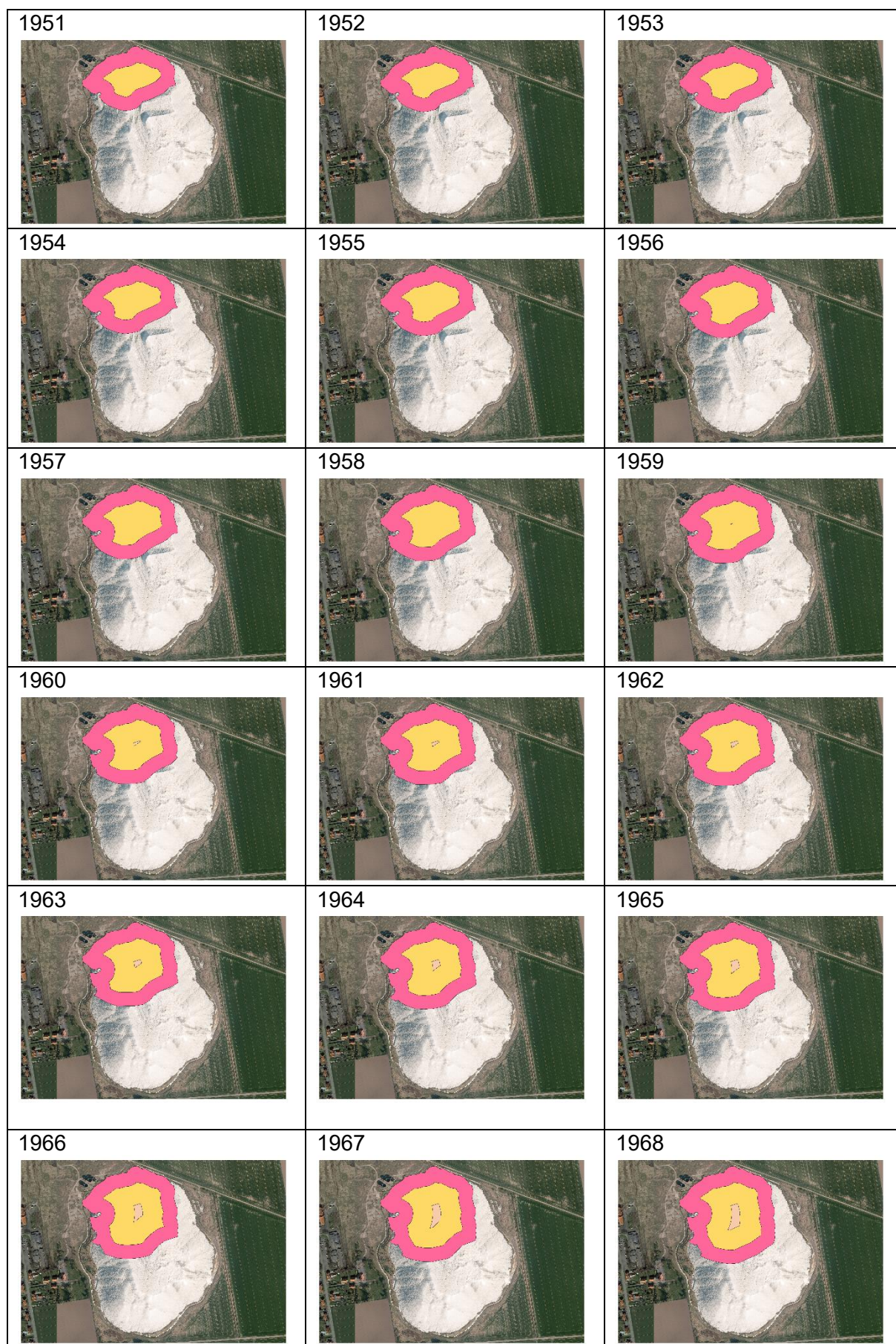
Seite 1





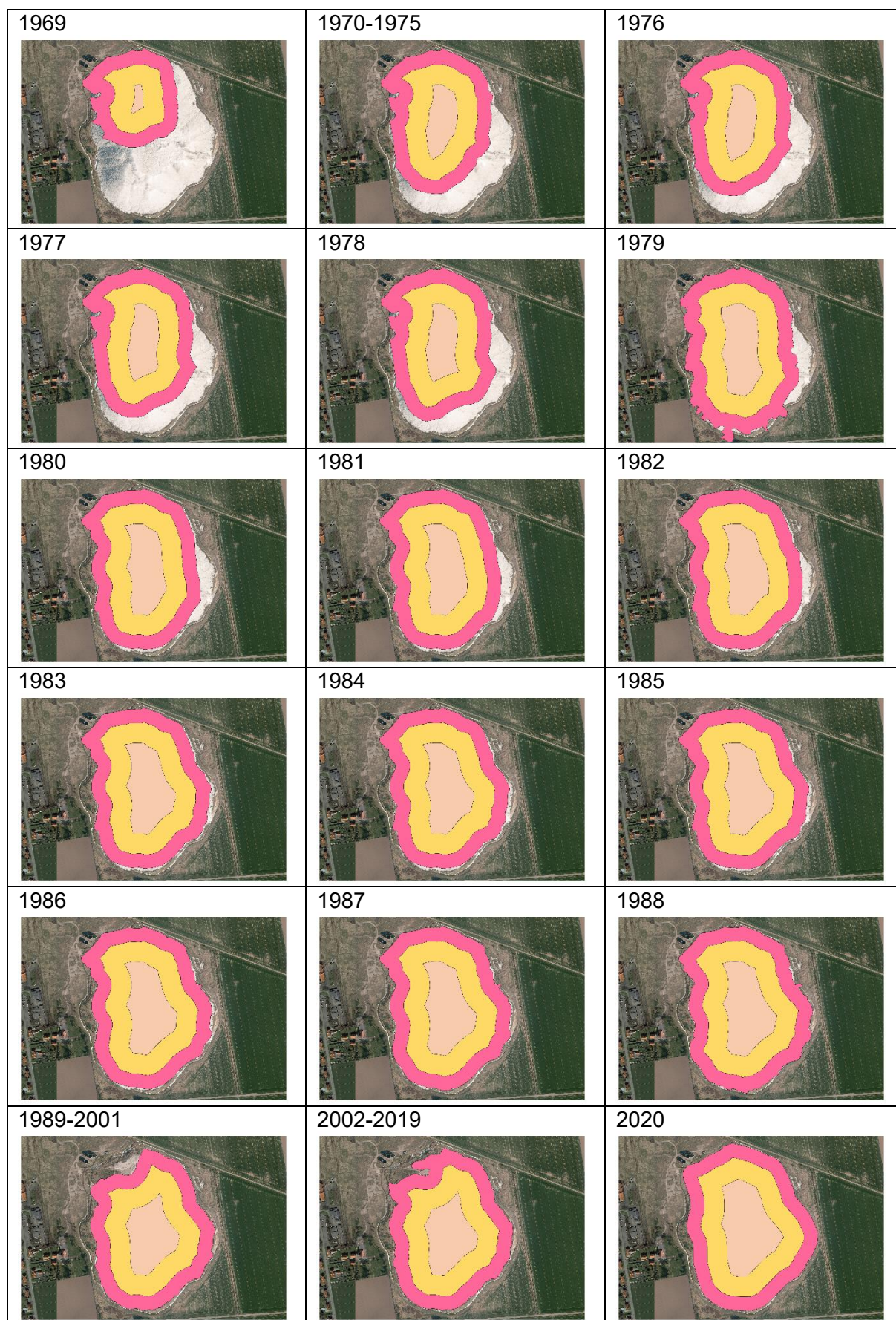
LEGENDE

Haldenkern
 Übergangszone
 Haldenmantelzone



LEGENDE

Haldenkern
 Übergangszone
 Haldenmantelzone



LEGENDE

Haldenkern
 Übergangszone
 Haldenmantelzone

Anlage 4: Jährliche Flächenbelegung der Rückstandshalde

Datum		Aufstandsfläche Haldenkern		Aufstandsfläche Übergangszone		Aufstandsfläche Haldenmantel		Aufstandsfläche Haldenvorfeld	Aufstandsfläche Gesamt
		[ha]		[ha]		[ha]		[ha]	[ha]
31.12.1925		0,00		0,00		1,06		0,18	1,25
31.12.1926		0,00		0,00		1,12		0,19	1,30
31.12.1927		0,00		0,00		1,28		0,19	1,47
31.12.1928		0,00		0,00		1,28		0,19	1,47
31.12.1929		0,00		0,03		1,98		0,23	2,24
31.12.1930		0,00		0,24		2,37		0,24	2,85
31.12.1931		0,00		0,39		2,48		0,24	3,11
31.12.1932		0,00		0,57		2,39		0,21	3,18
31.12.1933		0,00		0,57		2,39		0,21	3,18
31.12.1934		0,00		0,57		2,39		0,21	3,18
31.12.1935		0,00		0,63		2,48		0,21	3,32
31.12.1936		0,00		0,63		2,48		0,21	3,32
31.12.1937		0,00		0,63		2,48		0,21	3,32
31.12.1938		0,00		0,63		2,48		0,21	3,32
31.12.1939		0,00		0,63		2,48		0,21	3,32
31.12.1940		0,00		0,64		2,50		0,22	3,36
31.12.1941		0,00		0,65		2,54		0,22	3,41
31.12.1942		0,00		0,67		2,57		0,22	3,46
31.12.1943		0,00		0,70		2,60		0,23	3,52
31.12.1944		0,00		0,71		2,63		0,23	3,56
31.12.1945		0,00		0,71		2,63		0,23	3,56
31.12.1946		0,00		0,78		2,75		0,23	3,77
31.12.1947		0,00		0,88		2,74		0,23	3,86
31.12.1948		0,00		0,92		2,77		0,24	3,93
31.12.1949		0,00		1,01		2,82		0,24	4,07
31.12.1950		0,00		1,10		2,88		0,25	4,23
31.12.1951		0,00		1,24		2,93		0,25	4,42
31.12.1952		0,00		1,31		2,99		0,26	4,55
31.12.1953		0,00		1,36		3,03		0,26	4,65
31.12.1954		0,00		1,48		3,11		0,27	4,86
31.12.1955		0,00		1,60		3,19		0,27	5,06
31.12.1956		0,00		1,71		3,28		0,28	5,27
31.12.1957		0,00		1,83		3,38		0,28	5,49
31.12.1958		0,00		1,94		3,49		0,29	5,72
31.12.1959		0,00		2,10		3,57		0,30	5,96
31.12.1960		0,02		2,22		3,63		0,30	6,17
31.12.1961		0,02		2,26		3,67		0,30	6,25
31.12.1962		0,03		2,32		3,71		0,31	6,37
31.12.1963		0,04		2,40		3,77		0,31	6,52
31.12.1964		0,06		2,53		3,87		0,32	6,78
31.12.1965		0,08		2,64		3,93		0,33	6,98
31.12.1966		0,12		2,80		4,03		0,33	7,29
31.12.1967		0,18		2,93		4,11		0,34	7,56
31.12.1968		0,22		3,04		4,15		0,34	7,75
31.12.1969		0,25		3,11		4,19		0,34	7,90
31.12.1970		1,79		5,32		5,70		0,44	13,25
31.12.1971		1,79		5,32		5,70		0,44	13,25
31.12.1972		1,79		5,32		5,70		0,44	13,25
31.12.1973		1,79		5,32		5,70		0,44	13,25
31.12.1974		1,79		5,32		5,70		0,44	13,25
31.12.1975		1,79		5,32		5,70		0,44	13,25
31.12.1976		1,91		5,44		5,77		0,45	13,56
31.12.1977		2,00		5,59		5,88		0,45	13,92
31.12.1978		2,06		5,76		6,01		0,46	14,29
31.12.1979		3,11		6,47		6,75		0,59	16,93
31.12.1980		2,94		6,45		6,19		0,46	16,04
31.12.1981		3,11		6,50		6,23		0,46	16,30
31.12.1982		3,20		6,56		6,27		0,47	16,50
31.12.1983		3,29		6,64		6,37		0,47	16,77
31.12.1984		3,28		6,67		6,37		0,47	16,79
31.12.1985		3,34		6,68		6,38		0,47	16,88
31.12.1986		3,42		6,75		6,43		0,48	17,08
31.12.1987		3,51		6,81		6,48		0,49	17,29
31.12.1988		3,64		6,91		6,67		0,51	17,74
31.12.1989		2,91		6,20		6,27		1,89	17,27
31.12.1990		2,91		6,20		6,27		1,89	17,27
31.12.1991		2,91		6,20		6,27		1,89	17,27
31.12.1992		2,91		6,20		6,27		1,89	17,27
31.12.1993		2,91		6,20		6,27		1,89	17,27

Datum		Aufstandsfläche Haldenkern		Aufstandsfläche Übergangszone		Aufstandsfläche Haldenmantel		Aufstandsfläche Haldenvorfeld	Aufstandsfläche Gesamt
		[ha]		[ha]		[ha]		[ha]	[ha]
31.12.1994		2,91		6,20		6,27		1,89	17,27
31.12.1995		2,91		6,20		6,27		1,89	17,27
31.12.1996		2,91		6,20		6,27		1,89	17,27
31.12.1997		2,91		6,20		6,27		1,89	17,27
31.12.1998		2,91		6,20		6,27		1,89	17,27
31.12.1999		2,91		6,20		6,27		1,89	17,27
31.12.2000		2,91		6,20		6,27		1,89	17,27
31.12.2001		2,91		6,20		6,27		1,89	17,27
31.12.2002		2,89		6,27		6,49		1,63	17,29
31.12.2003		2,89		6,27		6,49		1,63	17,29
31.12.2004		2,89		6,27		6,49		1,63	17,29
31.12.2005		2,89		6,27		6,49		1,63	17,29
31.12.2006		2,89		6,27		6,49		1,63	17,29
31.12.2007		2,89		6,27		6,49		1,63	17,29
31.12.2008		2,89		6,27		6,49		1,63	17,29
31.12.2009		2,89		6,27		6,49		1,63	17,29
31.12.2010		2,89		6,27		6,49		1,63	17,29
31.12.2011		2,89		6,27		6,49		1,63	17,29
31.12.2012		2,89		6,27		6,49		1,63	17,29
31.12.2013		2,89		6,27		6,49		1,63	17,29
31.12.2014		2,89		6,27		6,49		1,63	17,29
31.12.2015		2,89		6,27		6,49		1,63	17,29
31.12.2016		2,89		6,27		6,49		1,63	17,29
31.12.2017		2,89		6,27		6,49		1,63	17,29
31.12.2018		2,89		6,27		6,49		1,63	17,29
31.12.2019		2,89		6,27		6,49		1,63	17,29
31.12.2020		4,15		6,87		6,41		0,47	17,90
31.12.2021		4,15		6,87		6,41		0,47	17,90
31.12.2022		4,15		6,87		6,41		0,47	17,90
31.12.2023		4,15		6,87		6,41		0,47	17,90
31.12.2024		4,15		6,87		6,41		0,47	17,90
31.12.2025		4,15		6,87		6,41		0,47	17,90
31.12.2026		4,15		6,87		6,41		0,47	17,90
31.12.2027		4,15		6,87		6,41		0,47	17,90
31.12.2028		4,15		6,87		6,41		0,47	17,90
31.12.2029		4,15		6,87		6,41		0,47	17,90
31.12.2030		4,15		6,87		6,41		0,47	17,90
31.12.2031		4,15		6,87		6,41		0,47	17,90
31.12.2032		4,15		6,87		6,41		0,47	17,90
31.12.2033		4,15		6,87		6,41		0,47	17,90
31.12.2034		4,15		6,87		6,41		0,47	17,90
31.12.2035		4,15		6,87		6,41		0,47	17,90
31.12.2036		4,15		6,87		6,41		0,47	17,90
31.12.2037		4,15		6,87		6,41		0,47	17,90
31.12.2038		4,15		6,87		6,41		0,47	17,90
31.12.2039		4,15		6,87		6,41		0,47	17,90
31.12.2040		4,15		6,87		6,41		0,47	17,90
31.12.2041		4,15		6,87		6,41		0,47	17,90
31.12.2042		4,15		6,87		6,41		0,47	17,90
31.12.2043		4,15		6,87		6,41		0,47	17,90
31.12.2044		4,15		6,87		6,41		0,47	17,90
31.12.2045		4,15		6,87		6,41		0,47	17,90
31.12.2046		4,15		6,87		6,41		0,47	17,90
31.12.2047		4,15		6,87		6,41		0,47	17,90
31.12.2048		4,15		6,87		6,41		0,47	17,90
31.12.2049		4,15		6,87		6,41		0,47	17,90
31.12.2050		4,15		6,87		6,41		0,47	17,90

Anlage 5: Hydraulischer Gradient für die Berechnung der Restinfiltration

Jahr	Niederschlag DWD (REGNIE)	Evaporation % von N	belegte Aufstandsfläche (Gesamtfläche einschließlich Haldenvorfeld)	Niederschlagsbedingter Haldenwasseranfall SG (mineralisiert)	freier Wasseranteil SG am Rückstand (5%; Faufsalz 1,08)	Wasserangebot (Summe Niederschlags- bedingter + freier Haldenwasseranteil)	gemessener Haldenwasseranfall	Differenz Wasserangebot minus gemessener Haldenwasseranfall U-Boote (RI) [m³/a]	Fläche Haldenmantel, Vorfeld und Übergangszone SG [ha]	mittlere Einstauhöhe	Mittlerer hydraulischer Gradient aus mittl. Einstau
[a]	[mm/a]	[m²/(ha*a)]	[ha]	m³/a	m³/a	m³/a	[m³/a]	[m³/a]	[ha]	[cm]	[-]
2003	490	1.958	17,29	54.865	0	54.865	73.384	-18.519	14,40	-13	-0,0429
2004	720	2.879	17,29	80.650	0	80.650	83.507	-2.857	14,40	-2	-0,0066
2005	575	2.300	17,29	64.446	0	64.446	64.838	-392	14,40	0	-0,0009
2006	519	2.075	17,29	58.143	0	58.143	53.140	5.003	14,40	3	0,0116
2007	982	3.928	17,29	110.032	0	110.032	80.738	29.294	14,40	20	0,0678
2008	623	2.493	17,29	69.836	0	69.836	76.709	-6.873	14,40	-5	-0,0159
2009	591	2.362	17,29	66.177	0	66.177	49.933	16.245	14,40	11	0,0376
2010	696	2.782	17,29	77.949	0	77.949	87.628	-9.679	14,40	-7	-0,0224
2011	533	2.133	17,29	59.751	0	59.751	57.323	2.428	14,40	2	0,0056
2012	625	2.500	17,29	70.049	0	70.049	43.365	26.684	14,40	19	0,0618
2013	632	2.529	17,29	70.850	0	70.850	73.815	-2.964	14,40	-2	-0,0069
2014	602	2.406	17,29	67.416	0	67.416	48.467	18.948	14,40	13	0,0439
2015	618	2.471	17,29	69.236	0	69.236	47.866	21.370	14,40	15	0,0495
2016	543	2.171	17,29	60.821	0	60.821	58.007	2.814	14,40	2	0,0065
2017	873	3.493	17,29	97.857	0	97.857	61.895	35.962	14,40	25	0,0832
2018	397	1.590	17,29	44.538	0	44.538	35.929	8.609	14,40	6	0,0199
Mittelwert											0,0182

Haldenwasserbilanz Althalde SG

Anlage 6: Jährliche Restinfiltration in den Jahren 1925 bis 2050

Datum	Restinfiltration Haldenkern	Restinfiltration Übergangszone	Restinfiltration Haldenmantel	Restinfiltration Haldenvorfeld	Restinfiltratio n Gesamt
	[m³/a]	[m³/a]	[m³/a]	[m³/a]	[m³/a]
31.12.1925	0,0	0,0	8.542,1	1.471,3	10.013
31.12.1926	0,0	0,0	8.601,0	1.443,4	10.044
31.12.1927	0,0	0,0	8.815,0	1.319,8	10.135
31.12.1928	0,0	0,0	8.815,0	1.319,8	10.135
31.12.1929	0,0	140,7	9.341,5	1.071,9	10.554
31.12.1930	0,0	914,8	9.074,9	899,1	10.889
31.12.1931	0,0	800,4	5.081,9	482,7	6.365
31.12.1932	0,0	711,3	2.967,2	258,9	3.937
31.12.1933	0,0	314,2	1.310,4	114,3	1.739
31.12.1934	0,0	314,2	1.310,4	114,3	1.739
31.12.1935	0,0	530,7	2.101,5	182,0	2.814
31.12.1936	0,0	342,7	1.357,0	117,5	1.817
31.12.1937	0,0	342,7	1.357,0	117,5	1.817
31.12.1938	0,0	342,7	1.357,0	117,5	1.817
31.12.1939	0,0	342,7	1.357,0	117,5	1.817
31.12.1940	0,0	383,8	1.510,1	130,4	2.024
31.12.1941	0,0	386,6	1.511,7	130,4	2.029
31.12.1942	0,0	384,2	1.473,7	126,8	1.985
31.12.1943	0,0	399,8	1.491,6	129,2	2.021
31.12.1944	0,0	385,9	1.438,8	123,3	1.948
31.12.1945	0,0	422,8	1.576,7	135,1	2.135
31.12.1946	0,0	2.368,7	8.315,7	709,4	11.394
31.12.1947	0,0	2.607,2	8.140,6	693,8	11.442
31.12.1948	0,0	2.703,1	8.086,9	689,4	11.479
31.12.1949	0,0	2.860,6	8.015,5	682,8	11.559
31.12.1950	0,0	3.027,3	7.938,6	677,5	11.643
31.12.1951	0,0	3.287,8	7.798,2	664,4	11.750
31.12.1952	0,0	3.402,0	7.778,0	665,4	11.845
31.12.1953	0,0	3.471,3	7.741,1	663,5	11.876
31.12.1954	0,0	3.651,6	7.681,3	655,6	11.989
31.12.1955	0,0	4.555,2	9.103,3	772,6	14.431
31.12.1956	0,0	4.728,8	9.081,7	770,2	14.581
31.12.1957	0,0	4.876,3	9.031,8	760,5	14.669
31.12.1958	0,0	5.029,0	9.014,7	750,2	14.794
31.12.1959	0,0	6.076,2	10.326,7	855,1	17.258
31.12.1960	0,0	6.268,0	10.281,8	850,5	17.400
31.12.1961	0,0	6.302,8	10.253,9	847,4	17.404
31.12.1962	0,0	6.389,9	10.228,1	845,7	17.464
31.12.1963	0,0	6.493,3	10.203,9	844,2	17.541
31.12.1964	0,0	7.559,5	11.534,5	955,9	20.050
31.12.1965	0,0	8.587,8	12.791,1	1.058,6	22.438
31.12.1966	0,0	8.826,4	12.705,7	1.047,8	22.580
31.12.1967	0,0	9.209,0	12.895,1	1.061,4	23.165
31.12.1968	0,0	9.491,7	12.974,8	1.065,9	23.532
31.12.1969	0,0	9.666,1	13.041,3	1.071,7	23.779
31.12.1970	0,0	12.115,8	12.979,0	1.004,3	26.099
31.12.1971	0,0	12.657,2	13.559,1	1.049,2	27.265
31.12.1972	0,0	13.226,8	14.169,3	1.096,4	28.493
31.12.1973	0,0	13.956,7	14.951,1	1.156,9	30.065
31.12.1974	0,0	14.778,5	15.831,5	1.225,0	31.835
31.12.1975	0,0	14.778,5	15.831,5	1.225,0	31.835
31.12.1976	0,0	8.099,1	8.597,3	664,9	17.361
31.12.1977	0,0	8.196,7	8.617,0	664,6	17.478
31.12.1978	0,0	8.310,0	8.669,0	666,0	17.645
31.12.1979	0,0	8.674,7	9.049,3	793,4	18.517
31.12.1980	0,0	8.940,3	8.574,0	638,5	18.153
31.12.1981	0,0	8.958,1	8.578,0	638,5	18.175
31.12.1982	0,0	8.999,8	8.592,2	639,5	18.232
31.12.1983	0,0	9.033,1	8.657,3	644,6	18.335
31.12.1984	0,0	9.069,5	8.663,1	644,9	18.378
31.12.1985	0,0	9.065,6	8.655,2	643,8	18.365
31.12.1986	0,0	9.107,6	8.671,3	650,3	18.429
31.12.1987	0,0	9.136,5	8.704,3	654,1	18.495
31.12.1988	0,0	3.780,2	3.649,8	280,7	7.711
31.12.1989	0,0	3.392,6	3.428,2	1.036,6	7.857
31.12.1990	0,0	3.392,6	3.428,2	1.036,6	7.857
31.12.1991	0,0	3.392,6	3.428,2	1.036,6	7.857
31.12.1992	0,0	3.392,6	3.428,2	1.036,6	7.857
31.12.1993	0,0	3.392,6	3.428,2	1.036,6	7.857

Haldenwasserbilanz Althalde SG

Anlage 6: Jährliche Restinfiltration in den Jahren 1925 bis 2050

Datum		Restinfiltration Haldenkern		Restinfiltration Übergangszone		Restinfiltration Haldenmantel	Restinfiltration Haldenvorfeld	Restinfiltratio n Gesamt
		[m³/a]		[m³/a]		[m³/a]	[m³/a]	[m³/a]
31.12.1994		0,0		3.392,6		3.428,2	1.036,6	7.857
31.12.1995		0,0		3.392,6		3.428,2	1.036,6	7.857
31.12.1996		0,0		3.392,6		3.428,2	1.036,6	7.857
31.12.1997		0,0		3.392,6		3.428,2	1.036,6	7.857
31.12.1998		0,0		3.392,6		3.428,2	1.036,6	7.857
31.12.1999		0,0		3.392,6		3.428,2	1.036,6	7.857
31.12.2000		0,0		3.392,6		3.428,2	1.036,6	7.857
31.12.2001		0,0		3.392,6		3.428,2	1.036,6	7.857
31.12.2002		0,0		3.433,4		3.552,8	893,3	7.880
31.12.2003		0,0		3.433,4		3.552,8	893,3	7.880
31.12.2004		0,0		3.433,4		3.552,8	893,3	7.880
31.12.2005		0,0		3.433,4		3.552,8	893,3	7.880
31.12.2006		0,0		3.433,4		3.552,8	893,3	7.880
31.12.2007		0,0		3.433,4		3.552,8	893,3	7.880
31.12.2008		0,0		3.433,4		3.552,8	893,3	7.880
31.12.2009		0,0		3.433,4		3.552,8	893,3	7.880
31.12.2010		0,0		3.433,4		3.552,8	893,3	7.880
31.12.2011		0,0		3.433,4		3.552,8	893,3	7.880
31.12.2012		0,0		3.433,4		3.552,8	893,3	7.880
31.12.2013		0,0		3.433,4		3.552,8	893,3	7.880
31.12.2014		0,0		3.433,4		3.552,8	893,3	7.880
31.12.2015		0,0		3.433,4		3.552,8	893,3	7.880
31.12.2016		0,0		3.433,4		3.552,8	893,3	7.880
31.12.2017		0,0		3.433,4		3.552,8	893,3	7.880
31.12.2018		0,0		3.433,4		3.552,8	893,3	7.880
31.12.2019		0,0		3.433,4		3.552,8	893,3	7.880
31.12.2020		0,0		3.757,3		3.507,7	257,5	7.523
31.12.2021		0,0		3.757,3		3.507,7	257,5	7.523
31.12.2022		0,0		3.757,3		3.507,7	257,5	7.523
31.12.2023		0,0		3.757,3		3.507,7	257,5	7.523
31.12.2024		0,0		3.757,3		3.507,7	257,5	7.523
31.12.2025		0,0		3.757,3		3.507,7	257,5	7.523
31.12.2026		0,0		3.757,3		3.507,7	257,5	7.523
31.12.2027		0,0		3.757,3		3.507,7	257,5	7.523
31.12.2028		0,0		3.757,3		3.507,7	257,5	7.523
31.12.2029		0,0		3.757,3		3.507,7	257,5	7.523
31.12.2030		0,0		3.757,3		3.507,7	257,5	7.523
31.12.2031		0,0		3.757,3		3.507,7	257,5	7.523
31.12.2032		0,0		3.757,3		3.507,7	257,5	7.523
31.12.2033		0,0		3.757,3		3.507,7	257,5	7.523
31.12.2034		0,0		3.757,3		3.507,7	257,5	7.523
31.12.2035		0,0		3.757,3		3.507,7	257,5	7.523
31.12.2036		0,0		3.757,3		3.507,7	257,5	7.523
31.12.2037		0,0		3.757,3		3.507,7	257,5	7.523
31.12.2038		0,0		3.757,3		3.507,7	257,5	7.523
31.12.2039		0,0		3.757,3		3.507,7	257,5	7.523
31.12.2040		0,0		3.757,3		3.507,7	257,5	7.523
31.12.2041		0,0		3.757,3		3.507,7	257,5	7.523
31.12.2042		0,0		3.757,3		3.507,7	257,5	7.523
31.12.2043		0,0		3.757,3		3.507,7	257,5	7.523
31.12.2044		0,0		3.757,3		3.507,7	257,5	7.523
31.12.2045		0,0		3.757,3		3.507,7	257,5	7.523
31.12.2046		0,0		3.757,3		3.507,7	257,5	7.523
31.12.2047		0,0		3.757,3		3.507,7	257,5	7.523
31.12.2048		0,0		3.757,3		3.507,7	257,5	7.523
31.12.2049		0,0		3.757,3		3.507,7	257,5	7.523
31.12.2050		0,0		3.757,3		3.507,7	257,5	7.523

Haldenwasserbilanz Althalde SG

Anlage 7: Jährliche Gesamtsalzfracht des Sickerwassers in den Jahren 1925 bis 2050

Datum		Salzfracht Haldenkern		Salzfracht Übergangszone		Salzfracht Haldenmantel		Salzfracht Haldenvorfeld	Gesamtsalzfracht
		[t/a]		[t/a]		[t/a]		[t/a]	[t/a]
31.12.1925		0,0		0,0		2.468,7		425,2	2.893,9
31.12.1926		0,0		0,0		2.485,7		417,1	2.902,8
31.12.1927		0,0		0,0		2.547,5		381,4	2.928,9
31.12.1928		0,0		0,0		2.547,5		381,4	2.928,9
31.12.1929		0,0		40,7		2.699,7		309,8	3.050,1
31.12.1930		0,0		264,4		2.622,7		259,9	3.146,9
31.12.1931		0,0		231,3		1.468,7		139,5	1.839,5
31.12.1932		0,0		205,6		857,5		74,8	1.137,9
31.12.1933		0,0		90,8		378,7		33,0	502,6
31.12.1934		0,0		90,8		378,7		33,0	502,6
31.12.1935		0,0		153,4		607,3		52,6	813,3
31.12.1936		0,0		99,0		392,2		34,0	525,2
31.12.1937		0,0		99,0		392,2		34,0	525,2
31.12.1938		0,0		99,0		392,2		34,0	525,2
31.12.1939		0,0		99,0		392,2		34,0	525,2
31.12.1940		0,0		110,9		436,4		37,7	585,0
31.12.1941		0,0		111,7		436,9		37,7	586,3
31.12.1942		0,0		111,0		425,9		36,7	573,6
31.12.1943		0,0		115,6		431,1		37,3	583,9
31.12.1944		0,0		111,5		415,8		35,6	563,0
31.12.1945		0,0		122,2		455,7		39,1	616,9
31.12.1946		0,0		684,6		2.403,2		205,0	3.292,8
31.12.1947		0,0		753,5		2.352,6		200,5	3.306,6
31.12.1948		0,0		781,2		2.337,1		199,2	3.317,5
31.12.1949		0,0		826,7		2.316,5		197,3	3.340,5
31.12.1950		0,0		874,9		2.294,3		195,8	3.364,9
31.12.1951		0,0		950,2		2.253,7		192,0	3.395,9
31.12.1952		0,0		983,2		2.247,8		192,3	3.423,3
31.12.1953		0,0		1.003,2		2.237,2		191,8	3.432,1
31.12.1954		0,0		1.055,3		2.219,9		189,5	3.464,7
31.12.1955		0,0		1.316,4		2.630,8		223,3	4.170,6
31.12.1956		0,0		1.366,6		2.624,6		222,6	4.213,8
31.12.1957		0,0		1.409,3		2.610,2		219,8	4.239,2
31.12.1958		0,0		1.453,4		2.605,2		216,8	4.275,4
31.12.1959		0,0		1.756,0		2.984,4		247,1	4.987,6
31.12.1960		0,0		1.811,5		2.971,4		245,8	5.028,7
31.12.1961		0,0		1.821,5		2.963,4		244,9	5.029,8
31.12.1962		0,0		1.846,7		2.955,9		244,4	5.047,0
31.12.1963		0,0		1.876,6		2.948,9		244,0	5.069,5
31.12.1964		0,0		2.184,7		3.333,5		276,2	5.794,4
31.12.1965		0,0		2.481,9		3.696,6		305,9	6.484,4
31.12.1966		0,0		2.550,8		3.672,0		302,8	6.525,6
31.12.1967		0,0		2.661,4		3.726,7		306,7	6.694,8
31.12.1968		0,0		2.743,1		3.749,7		308,0	6.800,9
31.12.1969		0,0		2.793,5		3.768,9		309,7	6.872,2
31.12.1970		0,0		3.501,5		3.750,9		290,2	7.542,6
31.12.1971		0,0		3.657,9		3.918,6		303,2	7.879,7
31.12.1972		0,0		3.822,6		4.094,9		316,9	8.234,3
31.12.1973		0,0		4.033,5		4.320,9		334,3	8.688,7
31.12.1974		0,0		4.271,0		4.575,3		354,0	9.200,3
31.12.1975		0,0		4.271,0		4.575,3		354,0	9.200,3
31.12.1976		0,0		2.340,7		2.484,6		192,2	5.017,4
31.12.1977		0,0		2.368,9		2.490,3		192,1	5.051,2
31.12.1978		0,0		2.401,6		2.505,3		192,5	5.099,4
31.12.1979		0,0		2.507,0		2.615,3		229,3	5.351,5
31.12.1980		0,0		2.583,7		2.477,9		184,5	5.246,1
31.12.1981		0,0		2.588,9		2.479,1		184,5	5.252,5
31.12.1982		0,0		2.600,9		2.483,2		184,8	5.268,9
31.12.1983		0,0		2.610,6		2.502,0		186,3	5.298,8
31.12.1984		0,0		2.621,1		2.503,6		186,4	5.311,1
31.12.1985		0,0		2.620,0		2.501,4		186,1	5.307,4
31.12.1986		0,0		2.632,1		2.506,0		187,9	5.326,0
31.12.1987		0,0		2.640,5		2.515,6		189,0	5.345,0
31.12.1988		0,0		1.092,5		1.054,8		81,1	2.228,4
31.12.1989		0,0		980,5		990,8		299,6	2.270,8
31.12.1990		0,0		980,5		990,8		299,6	2.270,8
31.12.1991		0,0		980,5		990,8		299,6	2.270,8
31.12.1992		0,0		980,5		990,8		299,6	2.270,8

Haldenwasserbilanz Althalde SG

Anlage 7: Jährliche Gesamtsalzfracht des Sickerwassers in den Jahren 1925 bis 2050

Datum			Salzfracht Haldenkern			Salzfracht Übergangszone			Salzfracht Haldenmantel			Salzfracht Haldenvorfeld			Gesamtsalzfracht
			[t/a]			[t/a]			[t/a]			[t/a]			[t/a]
31.12.1993			0,0			980,5			990,8			299,6			2.270,8
31.12.1994			0,0			980,5			990,8			299,6			2.270,8
31.12.1995			0,0			980,5			990,8			299,6			2.270,8
31.12.1996			0,0			980,5			990,8			299,6			2.270,8
31.12.1997			0,0			980,5			990,8			299,6			2.270,8
31.12.1998			0,0			980,5			990,8			299,6			2.270,8
31.12.1999			0,0			980,5			990,8			299,6			2.270,8
31.12.2000			0,0			980,5			990,8			299,6			2.270,8
31.12.2001			0,0			980,5			990,8			299,6			2.270,8
31.12.2002			0,0			992,3			1.026,8			258,2			2.277,2
31.12.2003			0,0			992,3			1.026,8			258,2			2.277,2
31.12.2004			0,0			992,3			1.026,8			258,2			2.277,2
31.12.2005			0,0			992,3			1.026,8			258,2			2.277,2
31.12.2006			0,0			992,3			1.026,8			258,2			2.277,2
31.12.2007			0,0			992,3			1.026,8			258,2			2.277,2
31.12.2008			0,0			992,3			1.026,8			258,2			2.277,2
31.12.2009			0,0			992,3			1.026,8			258,2			2.277,2
31.12.2010			0,0			992,3			1.026,8			258,2			2.277,2
31.12.2011			0,0			992,3			1.026,8			258,2			2.277,2
31.12.2012			0,0			992,3			1.026,8			258,2			2.277,2
31.12.2013			0,0			992,3			1.026,8			258,2			2.277,2
31.12.2014			0,0			992,3			1.026,8			258,2			2.277,2
31.12.2015			0,0			992,3			1.026,8			258,2			2.277,2
31.12.2016			0,0			992,3			1.026,8			258,2			2.277,2
31.12.2017			0,0			992,3			1.026,8			258,2			2.277,2
31.12.2018			0,0			992,3			1.026,8			258,2			2.277,2
31.12.2019			0,0			992,3			1.026,8			258,2			2.277,2
31.12.2020			0,0			1.085,9			1.013,7			74,4			2.174,0
31.12.2021			0,0			1.085,9			1.013,7			74,4			2.174,0
31.12.2022			0,0			1.085,9			1.013,7			74,4			2.174,0
31.12.2023			0,0			1.085,9			1.013,7			74,4			2.174,0
31.12.2024			0,0			1.085,9			1.013,7			74,4			2.174,0
31.12.2025			0,0			1.085,9			1.013,7			74,4			2.174,0
31.12.2026			0,0			1.085,9			1.013,7			74,4			2.174,0
31.12.2027			0,0			1.085,9			1.013,7			74,4			2.174,0
31.12.2028			0,0			1.085,9			1.013,7			74,4			2.174,0
31.12.2029			0,0			1.085,9			1.013,7			74,4			2.174,0
31.12.2030			0,0			1.085,9			1.013,7			74,4			2.174,0
31.12.2031			0,0			1.085,9			1.013,7			74,4			2.174,0
31.12.2032			0,0			1.085,9			1.013,7			74,4			2.174,0
31.12.2033			0,0			1.085,9			1.013,7			74,4			2.174,0
31.12.2034			0,0			1.085,9			1.013,7			74,4			2.174,0
31.12.2035			0,0			1.085,9			1.013,7			74,4			2.174,0
31.12.2036			0,0			1.085,9			1.013,7			74,4			2.174,0
31.12.2037			0,0			1.085,9			1.013,7			74,4			2.174,0
31.12.2038			0,0			1.085,9			1.013,7			74,4			2.174,0
31.12.2039			0,0			1.085,9			1.013,7			74,4			2.174,0
31.12.2040			0,0			1.085,9			1.013,7			74,4			2.174,0
31.12.2041			0,0			1.085,9			1.013,7			74,4			2.174,0
31.12.2042			0,0			1.085,9			1.013,7			74,4			2.174,0
31.12.2043			0,0			1.085,9			1.013,7			74,4			2.174,0
31.12.2044			0,0			1.085,9			1.013,7			74,4			2.174,0
31.12.2045			0,0			1.085,9			1.013,7			74,4			2.174,0
31.12.2046			0,0			1.085,9			1.013,7			74,4			2.174,0
31.12.2047			0,0			1.085,9			1.013,7			74,4			2.174,0
31.12.2048			0,0			1.085,9			1.013,7			74,4			2.174,0
31.12.2049			0,0			1.085,9			1.013,7			74,4			2.174,0
31.12.2050			0,0			1.085,9			1.013,7			74,4			2.174,0