

Dr.habil. Ralf E. Krupp
Flachsfeld 5
31303 Burgdorf

Telefon: 05136 / 7846 — e-mail: ralf.krupp@cretaceous.de

25 years
Anniversary

KALIMALDE NEUHOF-ELLERS
EIN FAKTENCHECK

Gutachten im Auftrag der Bi-Umwelt Neuhof



Burgdorf, 15.09.2025
(redaktionell überarbeitet am 21.12.2025)

Dr.habil. Ralf E. Krupp
(Dipl.-Geologe, Geochemiker)

Inhaltsverzeichnis

Veranlassung.....	4
Einführung.....	4
Die Kalihalde Neuhoof-Ellers.....	6
Geologie des Haldenuntergrundes.....	6
Haldenkörper.....	9
Entwicklung des Haldenkörpers.....	9
Zusammensetzung der Rückstandshalde.....	11
Haldenwasserbilanz.....	12
Struktur und Hydrologie des Haldenkörpers.....	13
Alte Wiese.....	14
Geoelektrische Untersuchungen und Anomalien.....	16
Grundlagen.....	16
Erste Archie-Gleichung.....	17
Zweite Archie-Gleichung.....	18
Elektrischer Widerstand – Leitfähigkeit – Salzgehalte.....	18
Geoelektrik im Umfeld der Kalihalde Neuhoof-Ellers.....	19
Skalen und Farbcodierungen.....	19
Gleichstrom-Geoelektrik.....	19
Airborne-Elektromagnetik (SkyTEM).....	29
Fakten zur Hydrologie der Haldenkörper.....	31
Auswertung der Archie-Gleichungen im Hinblick auf Kalihalden.....	31
Haldenbohrungen und Tunnel.....	34
Kalihalde Neuhoof-Ellers.....	34
Kalihalde Hattorf.....	35
Kalihalde Wintershall.....	35
Kalihalde Zielitz.....	36
Tunnel durch Rückstandshalde Bleicherode.....	36
Wasserandrang in horizontalen Haldenbohrungen und dem Haldentunnel.....	37
Seismische p-Wellengeschwindigkeiten.....	39
Kanadische Kalihalden.....	42
Zeitliche Veränderungen des Haldenkörpers.....	42
Zusammenfassung und Kritik.....	43
BREFs („Best Available Techniques Reference Documents“.....)	43
Haldenmodelle der Kali-Industrie.....	44
Realitätsnahes Kalihalden-Modell.....	47
Geochemie.....	50
Grundlagen.....	50
Geochemische Systematik der Salzwässer.....	50
Chemische Zusammensetzung beteiligter Mineralphasen.....	51
Mineral-Lösungs-Gleichgewichte (Phasengleichgewichte).....	52
Haldenwässer.....	53
Oberflächennahe Haldenwässer (Verwitterungslösungen).....	54
Haldenwässer (Verwitterungslösungen), Neuhoof-Ellers.....	58
Haldensickerwässer (Halden-Laugen), Neuhoof-Ellers.....	59
Korrelationen.....	61
Ausgewählte Messstellen.....	63
Ergebnisse, Schlussfolgerungen, Empfehlungen.....	81

Zitierte Quellen.....	86
Anhang 1.....	92
Strategiewechsel für einen nachhaltigen Kalibergbau.....	92
Anhang 2.....	94
Fotodokumentation zu den Kalihalden Friedrichshall und Ronnenberg.....	94
Anhang 3.....	95
Zu Abbildung 14: Tomographische Schnitte durch die Halden Hattorf (oben) und Wintershall (unten).....	95

Veranlassung

Am 21.05.2025 beauftragte die Bürgerinitiative Umwelt Neuhof e.V. den Verfasser mit der Bewertung übermittelter bodengebundener geoelektrischer Messungen im Bereich der Kalihalde des Werks Neuhof-Ellers der K+S Minerals and Agriculture GmbH. Der Auftrag erfolgte vor dem Hintergrund einer vom Betreiber K+S beabsichtigten Abdeckung der Kalihalde mit bergbaufremden Abfallstoffen, die nach dessen Aussage eine Minderung der Einträge von Salzen und weiteren mobilisierten Schadstoffen in die Gewässer bewirken soll. Von diesen ursprünglichen Plänen wurde zwischenzeitlich Abstand genommen, doch werden Varianten einer Abdeckung weiterhin geprüft .

Für eine Haldenabdeckung wie auch für andere Optionen zur Stilllegung und Sanierung der Kalihalde stellt die Alte Wiese Quelle und der überschüttete Bachlauf der Altewiese eine besondere Problematik dar, die auf Grundlage der verfügbaren Berichte und Daten ebenfalls betrachtet werden soll. Zu diesem Zweck erfolgte am 18.07.2025 eine weitere Beauftragung des Verfassers, verbunden mit der Übermittlung umfangreicher Unterlagen, diesmal auch zur Airborne-Geophysik, Hydrogeologie und Hydrogeochemie. Diese Unterlagen sind die Grundlage für das vorliegende erweiterte Gutachten, das aber auch Ergebnisse und Erkenntnisse aus anderen Kalihalden-Projekten einarbeitet.

Einführung

Die im Zechstein entstandene Kali-Lagerstätte von Neuhof-Ellers besteht aus den zwei flach lagernden Kaliflößen „Thüringen“ und „Hessen“, die in eine ca. 250 m mächtige Steinsalz-Abfolge des Werra-Salinars eingeschaltet sind und in der Fläche eine Ausdehnung von ca. 150 km² haben. Im Grubenfeld Neuhof-Ellers findet der Bergbau in Tiefen zwischen 540 und 780 m Tiefe statt, wobei hauptsächlich das Flöz Hessen in Abbau stand (Krupp, 2011), seit 2002 auch Teile des Flözes Thüringen (Heimat- und Geschichtsverein Rommerz). Die Kaliförderung begann 1910 auf dem „Werk Neuhof“ und 1921 auf dem „Werk Ellers“, wurde 1926 eingestellt und 1954 im neuen „Werk Neuhof-Ellers“ wieder aufgenommen.

Das geförderte Rohsalz ist überwiegend ein kieseritisches Hartsalz (**Tabelle 1**).

Tabelle 1 – Rohsalz-Zusammensetzung, Neuhof-Ellers (Gew. Prozent)	
Steinsalz (NaCl)	57,5
Sylvin (KCl)	15
Carnallit (KMgCl ₃ · 6H ₂ O)	2,9
Kieserit (MgSO ₄ · H ₂ O)	20,7
Ton und Anhydrit (CaSO ₄)	3,9

Aus den unter Tage im Bergwerk gewonnenen Rohsalzen (ca. 4 Mio. t/a) werden in der Kalifabrik jährlich rund 1,3 Millionen Tonnen Produkte, hauptsächlich Mineraldünger hergestellt, etwa 70 Prozent der Förderung fallen hierbei als Rückstände an. Die Aufbereitung der Kalirohsalze erfolgte früher durch das Heißlöseverfahren, ab 1954 auch durch Flotation, und ab 1974 dann hauptsächlich durch das neue „trockene“ elektrostatische Aufbereitungsverfahren (ESTA-Verfahren), das ohne Wasser arbeitet. (Trotzdem müssen die Rückstände zur Vermeidung von Staub für den Transport und Umschlag angefeuchtet werden.) Seit der Wiederinbetriebnahme des Werkes im Jahre 1954 werden die angefeuchteten festen Salzabfälle auf einer Rückstandshalde (umgangssprachlich „Kalihalde“) deponiert. Inzwischen liegen über 140 Millionen Tonnen Rückstände, die überwiegend aus Steinsalz bestehen, auf Halde.

Durch Niederschläge, durch hygroscopisch aufgenommene Luftfeuchtigkeit und durch aussickerndes Haftwasser (Restfeuchte) entstehen große Mengen sogenannter Haldenwässer, bei denen es sich um konzentrierte bis gesättigte Salzlösungen handelt. Diese fließen zum Teil oberflächlich ab und werden in den Ringgräben gesammelt, in Stapelbecken zwischengespeichert und zur „Entsorgung“ abgeführt. Ein großer Teil der Haldenwässer sickert jedoch durch den Haldenkörper in den Untergrund und damit ins Grundwasser.

Die Entsorgung der Kaliabwässer (Haldenwässer und Produktionsabwässer) erfolgt bis heute zu Lasten der Umwelt. Soweit die Haldenwässer nicht unter der Halde versickern, sondern in Randgräben gefasst werden, findet gemeinsam mit den Produktionsabwässern eine „Salzlast-gesteuerte“ Einleitung in die Flüsse statt. Lokal ist dies die Fliede, aber die Hauptlast trägt heute die Werra. Dabei wird die eingeleitete Salzmenge abhängig von der Wasserführung des Flusses so gesteuert, dass behördlich festgesetzte Grenzwerte zu jedem Zeitpunkt möglichst vollständig ausgeschöpft werden, so dass der Grenzwert zum Normalwert wird.

Bis vor wenigen Jahren hat K+S seine Abwässer der Standorte Wintershall, Hattorf und NeuhoF-Ellers noch durch „Versenkung“ in Schichten des Rotliegenden sowie in den ca. 15 m mächtigen Zechstein-Plattendolomit („Leine-Karbonat“) „entsorgt“. Der Plattendolomit ist eine poröse und klüftige Gesteinsschicht oberhalb des Zechstein-Salinars und unterhalb des mächtigen Buntsandsteins. Dieser Entsorgungsweg beruht auf der Verdrängung natürlicher saliner Formationswässer durch unter Druck eingeleitete Kaliabwässer, die in höhere Grundwasserstockwerke abwandern und dort zu massiven Versalzungen von Süßwasser-Ressourcen und schließlich zu Rückläufen von Versenkungen bis zur Oberfläche führen. Aufgrund der daraus folgenden Umweltschäden musste die Abwasserversenkung im Werra-Kalirevier 2021 endgültig eingestellt werden. Für das Werk NeuhoF-Ellers wurde die Versenkung von Kaliabwässern bereits im Jahr 2007 eingestellt. Seither wurden die Kaliabwässer zunehmend in Kesselwagen per Bahn zu anderen Standorten transportiert und werden seit 2013 über eine 65 km lange Sole-Pipeline nach Philippsthal umgeleitet, wo bis heute eine Einleitung in die Werra erfolgt.

Neben den akuten und sichtbaren Umweltbelastungen durch die Entsorgung der laufend anfallenden Haldenwässer besteht ein noch viel größeres Problem in den mit der Zeit kumulierenden Salzeinträgen ins Grundwasser, die erst enden wenn die Kalihalde völlig verschwunden sind, sei es durch natürliche Niederschläge in einigen tausend Jahren, oder frühzeitig durch Rückbau. Der formidable Unterschied besteht in den bis dahin jeweils eingetragenen Salzmengen und der Dimension der vernichteten Süßwasser-Ressourcen.

Die bestehenden Vorstellungen über Kalihalden und die von diesen verursachten Versalzungsprozesse bedürfen einer dringenden Korrektur. Dies gilt insbesondere für den Wasserhaushalt und die Hydrologie der Haldenkörper und ihren zunehmend störenden Einfluss auf die regionalen hydrogeologischen Verhältnisse.

Eine ressourcen- und umweltschonende („nachhaltige“) Kaliproduktion und Entsorgung der festen Rückstandssalze und der Salzabwässer ist grundsätzlich möglich (Krupp, 2011; 2014; 2017; 2019), wird aber seitens der Kali-Industrie seit Jahrzehnten abgelehnt und konterkariert, seitens der Behörden nicht vorgeschrieben und seitens der Politik nicht verlangt und durchgesetzt. An der umweltschädlichen und nicht nachhaltigen Produktionsweise im Kalibergbau hat sich bis heute nicht viel geändert.

Die Kalihalde Neuhof-Ellers

Geologie des Haldenuntergrundes

Die oberflächennahe Geologie des Haldenumfeldes (**Abbildung 1**) und die Aufstandsfläche der Halde selbst werden durch die mächtigen Schichten des Buntsandsteins geprägt, die im Wesentlichen horizontal gelagert sind und tektonisch von einem System saxonischer Verwerfungen mit geringen Versatzbeträgen gestört sind. Erst am Salzhang, der im Südosten in etwa 0,6 Kilometer Entfernung vom Haldenrand verläuft, ist aufgrund der Subrosion des Salinars mit stärker gestörtem Deckgebirge zu rechnen. Die Zerrüttung des Deckgebirges führt in kompetenten (festen) Gesteinen wie denjenigen des Buntsandsteins zu erhöhten Durchlässigkeiten, infolge eines gut vernetzten Kluftsystems (Fritsche, 2016). Im näheren Umfeld der Halde sind Subrosionsvorgänge auf die Bildung lokaler kleinerer Senken beschränkt.

Lithologisch ist der Haldenuntergrund von Sandsteinen und Sandstein-/Schluffstein-Wechselfolgen geprägt, die sich hydrogeologisch unterschiedlich verhalten. Insbesondere der oft über 25 m mächtige Volpriehausen-Sandstein (früher „Eichsfeld-Sandstein“) spielt als Haupt- Grundwasserleiter (HGWL) sowohl wasserwirtschaftlich als auch für die Ausbreitung der Haldenwässer eine wichtige Rolle. Es handelt sich um bankige Mittel- bis Grobsandsteine, die sowohl Poren- als auch Kluft-Grundwasserleiter sind. Die im Hangenden folgende Volpriehausen-Wechselfolge aus Feinsandsteinen und Schluffsteinen wirkt eher Grundwasser-stauend. Auch die aus Feinsandstein mit bis zu 4 m mächtigen Ton- und Schluffeinschaltungen bestehende Bernburg-Folge im Liegenden des Volpriehausen-Sandsteins ist vergleichsweise gering leitend.

Die nach Südosten zur Fliede hin entwässernden Bäche Lützbach, Altewiese und Rippbach sind in den Volpriehausen-Sandstein eingeschnitten, jedoch ohne dessen Basis zu erreichen. Als Vorfluter im Haldenbereich kommunizieren sie also unmittelbar mit dem Hauptgrundwasserleiter.

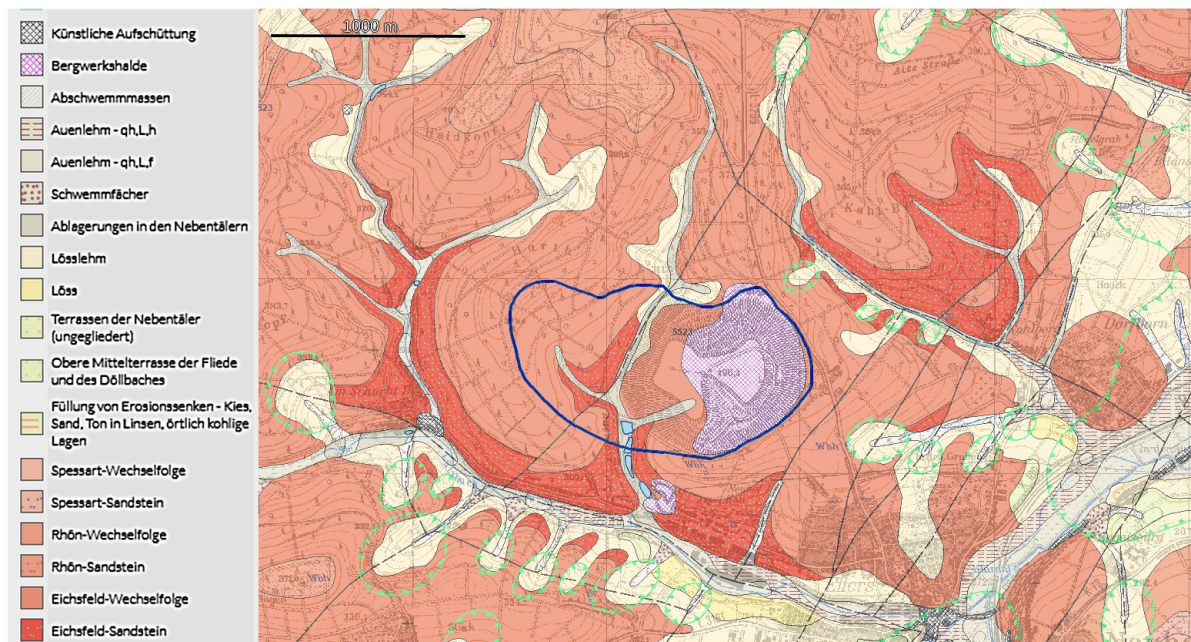


Abbildung 1 – Geologische Karte des Umfeldes der Kalihalde Neuhoof-Ellers (nach HLNUG, 2025). Grün: Subrosionssenken. Der Volpriehausen-Sandstein (früher Eichsfeld-Sandstein) als wichtiger Grundwasserleiter wurde vom Verfasser farblich hervorgehoben. Die blaue Linie markiert den aktuellen Umriss (Ringgraben) der Haldenfläche. Die Parallelstörungen SE der Halde liegen bereits im Einflussbereich des Salzhangs.

Der Haldenkörper selbst ist seit 1954 zunächst im Osten über dem Hügel „Strickei“, auf der Volpriehausen-Wechselfolge aufgeschüttet worden und wurde seither in westlicher Richtung erweitert. Dabei wurde seit den 1990er Jahren auch der im Altewiese-Tal austreichende Volpriehausen-Sandstein mit Fabrikrückständen überschüttet. Seither besteht dort ein direkter und großflächiger Kontakt des Haldenkörpers mit dem Hauptgrundwasserleiter. Zugleich wird die Entlastung des Grundwassers aus dem Volpriehausen-Sandstein in den Vorfluter Altewiese blockiert, wodurch ein Aufstau des Grundwassers, also ein Ansteigen des Grundwasserspiegels zu erwarten ist.

Der Kontakt der Haldenbasis mit der Aufstandsfläche ist in den älteren Abschnitten durch direktes Überschütten des baumbestandenen Bodens mit Rückstandssalzen zustande gekommen (**Abbildung 2**). Eine Basisabdichtung ist unter den älteren östlichen Teilen der Kalihalde Neuhoof-Ellers, insbesondere im Bereich des überschütteten Strickei-Hügels und des zugeschütteten Altewiese-Tals, nicht vorhanden.

Seit 2003 musste westlich auf der Erweiterungsfläche eine definierte Flächenvorbereitung zur „Basisabdichtung“ erfolgen. Die behördlichen Vorgaben bestehen in einer Entfernung der Stubben und einer Verdichtung des Untergrunds auf eine Proctordichte von mindestens 97%. Die Durchlässigkeitsbeiwerte dürfen den Wert von $k_f = 10^{-9}$ m/s nicht überschreiten und müssen ggf. durch weitere Bodenverbesserungen eingehalten werden. Die langfristige Gebrauchstauglichkeit und Wirksamkeit dieser Maßnahme ist jedoch nicht erwiesen. Bereits vor 2003 wurde der Altewiese Bach im Verlauf seines Bachbetts verrohrt und überschüttet.

Halde Neuhof-Ellers 1955



Abbildung 2 – Kalihalde Neuhof-Ellers im Jahr 1955. Die Rückstände wurden ohne Vorbereitung der Aufstandsfläche ins Gelände geschüttet. (Quelle: K+S, 2024)

Haldenkörper

Entwicklung des Haldenkörpers

Mit einer Basisfläche von 1,05 km², einer Höhe über Grund bis 190 m (+500m NHN) und einer Masse von 138 Millionen Tonnen (Stand 2023) zählt die Halde zu den größten Kalihalde in Deutschland. **Abbildung 3** zeigt Entwicklungsstadien der Halde (Basisfläche) von 1964 bis 2021.

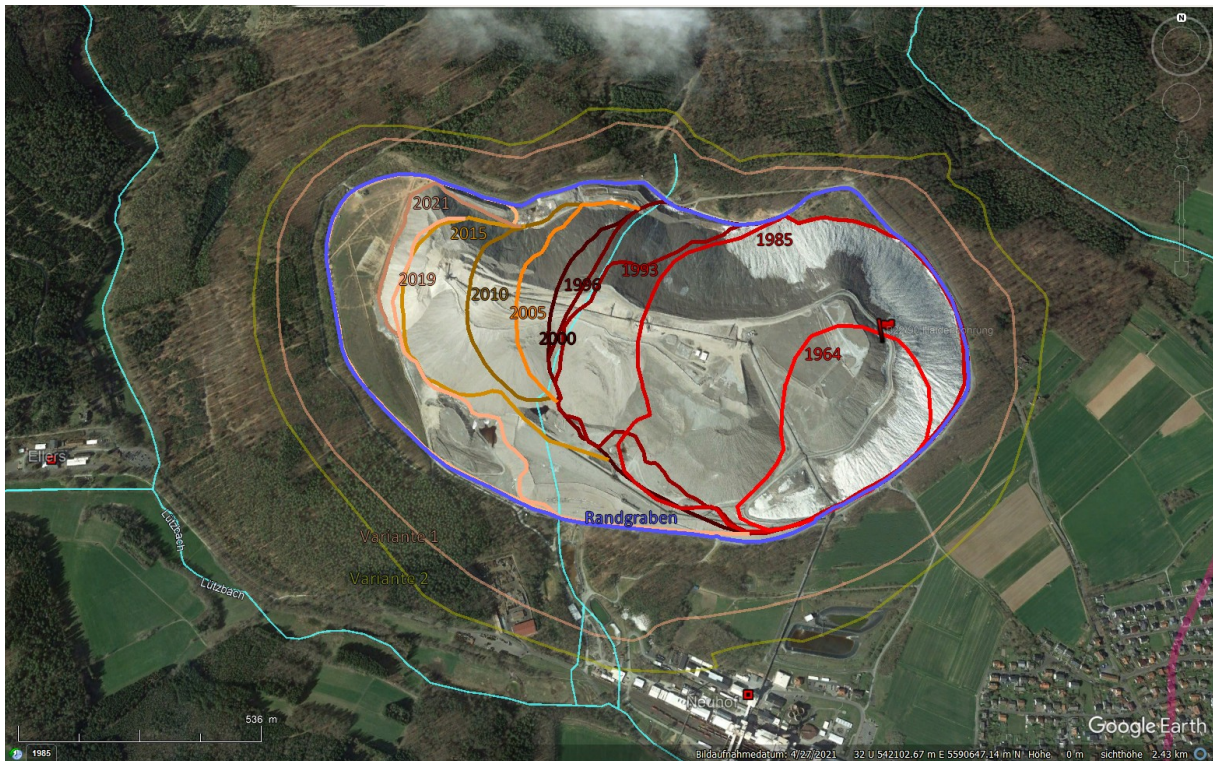


Abbildung 3 – Kalihalde Neuhoof-Ellers. Entwicklung der überschütteten Fläche. Blau: Randgraben; rosa und oliv: Umrisse der geplanten Abdeckung, Varianten 1 und 2; Flagge: Ansatzpunkt der Haldenbohrung B22/1990. (Luftbild: Google Earth)

Die **Abbildung 4** zeigt einen Schnitt von West nach Ost durch den Haldenkörper nebst Untergrund, mit den überschütteten Landschaftselementen. Man kann erkennen, dass im Westen die vorbereitete Schüttfläche für die Kalihalde (noch) nicht über die Wasserscheide unter dem Harth-Hügel hinaus reicht, eine Beeinträchtigung des Lützbachs und des ihm zuströmenden Grundwassers durch Haldenwässer war daher zunächst nicht anzunehmen und soll laut Betreiber (K+S 2019) in den Grundwasser-Messstellen GWM 3, 5 und 2 (Halde Neuhoof) auch nicht nachweisbar sein. Inzwischen sind aber zumindest bei GWM 2 in den geoelektrischen Schnitten P02 und auch P03A Anzeichen für eine Versalzung vorhanden, die seit 2022 auch geochemisch nachgewiesen ist. Die Versalzung reicht hier im Südwesten der Halde bereits bis ins Lützbachtal (Siehe unten).

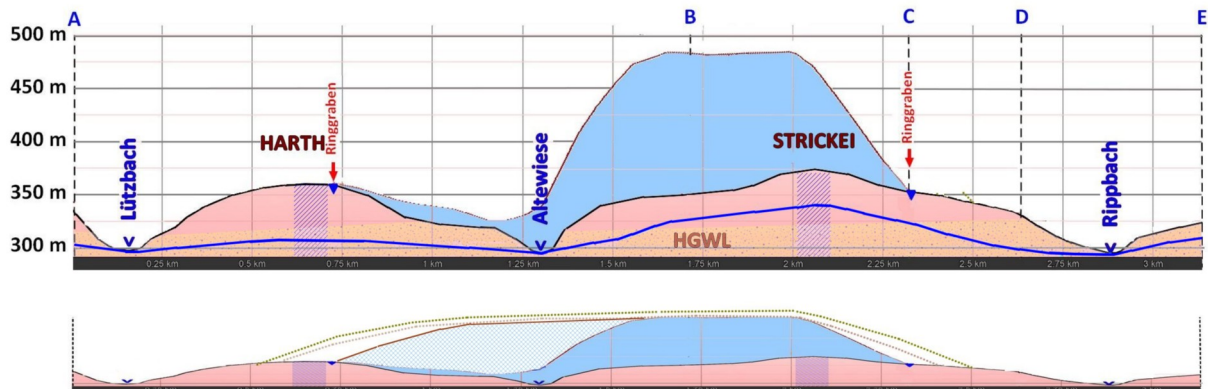


Abbildung 4 – West-Ost-Profil (natürlich und überhöht) durch die Rückstandshalde Neuhofer-Ellers (Stand 28.02.2025). **Oben:** Lage des Profils. Blau: Ringgraben. Rosa und oliv: Planungsvarianten 1 und 2 für eine Haldenabdeckung. Rot: Kalischächte. **Mitte:** Überhöhter Schnitt mit Vorflutern und rekonstruierter Morphologie des überschütteten Untergrunds sowie des früheren Grundwasserspiegels (blau). Blaue Schraffur: Grundwasserscheiden. **Unten:** Schematische Konturen der fertigen und abgedeckten Halde im Endzustand. (Luftbild: Google Earth)

Auch durch die geplante Haldenabdeckung würde die Wasserscheide unter dem Harth-Rücken nach Westen hin überschritten (**Abbildung 4**). Da eine dauerhafte und vollständig dichte Haldenabdeckung praktisch nicht realisierbar erscheint (siehe unten), müsste mit zusätzlichen Einträgen weiterer Schadstoffe aus den Abdeckungsmassen in das von der Halde abfließende und versickernde Haldenwasser gerechnet werden.

Im älteren, östlichen Teil der Halde ist der ehemalige Hügel „Strickei“ (ca. +372 m NHN) bereits vollständig bis zur Erreichung der Halden-Endhöhe (ca. +500 m NHN) überschüttet, wobei auch die unter dieser Anhöhe liegende Grundwasserscheide nach Osten hin überschritten worden ist. Als Folge ist das dem Rippbach zuströmende Grundwasser durch Haldenwasser

salzbelastet, wie die geoelektrischen Profile und Horizontalschnitte ebenso wie die Wasseranalysen deutlich zeigen (Siehe unten).

Das Profil (**Abbildung 4**) zeigt weiter den ehemaligen Taleinschnitt und Bachlauf der Altewiese, die eine Vorflut-Funktion hatte und Anfang der 1990er Jahre im Rahmen der westlichen Haldenerweiterung mit Rückstandsalzen verschüttet wurde. Das gleiche gilt für einige Teiche, die entlang der Altewiese aufgestaut waren, wie historische Messtischblätter (TK25 5523 Neuhof, 1986) belegen.

Die grundlegende Problematik von Kalihalden, die sie von typischen Bergbauhalden aus inerten Gesteinsabfällen unterscheidet, ist ihre fast vollständige Wasserlöslichkeit. Durch Niederschläge und andere Einwirkungen von Wasser lösen sich die Halden über Zeiträume von Jahrhunderten bis Jahrtausenden auf und verbreiten ihre „lebensfeindliche“ Salzfracht in die Umwelt. Es kann abgeschätzt werden (Krupp, 2003), dass bei typischen Jahresniederschlägen eine Kalihalde durch Salzauflösung jährlich etwa 10 cm an Höhe verliert und eine beispielsweise 100 m hohe Halde somit in etwa 1000 Jahren aufgelöst wird.

Am Ende der Auflösungszeit wäre die Halde verschwunden, die Oberflächengewässer würden entlastet, aber im Grundwasser wäre die maximale Salzfracht angekommen. Dort können wegen der nur langsamen Grundwasserneubildung und den geringen Strömungsgeschwindigkeiten nur über geologische Zeiträume hinweg wieder Süßwasserkörper entstehen, indem das versalzene Wasser nach und nach ersetzt und verdünnt wird und über die Vorfluter ins Meer gelangt. Besonders die schleichenden, aber massiven, weitreichenden und für geologische Zeiträume verbleibenden Versalzungen der Süßwasser-Ressourcen im Grundwasser sind unter keinen Umständen zu verantworten.

Zusammensetzung der Rückstandshalde

Die Rückstandshalde Neuhof-Ellers (im Volksmund „Monte Kali“) besteht aus nicht verwerteten Bestandteilen des vom Bergwerk geförderten, in der Kalifabrik verarbeiteten Rohsalzes. Es handelt sich somit nicht um Abraum oder sonstige Bergbauabfälle aus inerten Gesteinen, sondern um wasserlösliche Rückstände aus einem chemischen Prozess zur Herstellung kaliumhaltiger Düngemittel (nach EU-Recht). Die typischen Zusammensetzungen der Fabrik-Rückstände sind in den **Tabellen 2 und 3** zusammengestellt.

Tabelle 2 – Chemische Zusammensetzung der Rückstandshalde Neuhof-Ellers (Gew.-%)	
NaCl	80,1
KCl	2,3
MgCl ₂	0,9
MgSO ₄	7,3
CaSO ₄	1,0
Restfeuchte (H ₂ O)	6 - 8

Tabelle 3 – Mineralische Zusammensetzung der Rückstandshalde Neuhof-Ellers (Gew.-%) (SIG, 2007)

Steinsalz	NaCl	77,9 - 86,9
Kieserit *	MgSO ₄ · H ₂ O	7,0 - 13,0
Langbeinit *	K ₂ SO ₄ · 2MgSO ₄	2,0 - 5,0
Sylvin *	KCl	1,0 - 2,2
Anhydrit	CaSO ₄	1,0
Ton	Alumosilikate	1,0
* Wertstoff-Reste (Verluste)		

Die Angaben zur Höhe der Restfeuchte von 6 bis 8 Gewichtsprozent erscheinen erklärungsbedürftig, weil sie angeblich nur aus Wasserzugaben zur Staubvermeidung beim Transport der trockenen ESTA-Rückstände resultieren. Aufgrund der Dichteunterschiede entspricht der Wassergehalt etwa 15 Volumenprozent, so dass schon fast ein fließfähiger Salzbrei entsteht. In Anbetracht der notorischen Entsorgungseingpässe kann man an dieser Stelle einen kreativen Entsorgungsweg für Salzabwässer nicht ausschließen.

Haldenwasserbilanz

Bis heute wurden von K+S für keinen Haldenstandort nachvollziehbare Haldenwasserbilanzen vorgelegt, aus denen das Ausmaß der Salzfrachten in die Oberflächengewässer und insbesondere in das Grundwasser verlässlich hervorgeht. Entscheidend für die Umweltschäden ist ohnehin nicht das Wasser selbst, sondern die im Salzwasservolumen gelösten Salzfrachten (Konzentrationen).

Für die Halde Neuhof-Ellers liegen die Angaben zu „Haldenwassermengen“ (die hinsichtlich Bezugsfläche und Salzkonzentrationen zu definieren wären) seit 1997 im Mittel praktisch unverändert bei rund 550.000 m³/a, obwohl die mit Salz bedeckte Haldenfläche und die Haldenmasse seither deutlich zugenommen haben (Vgl. **Abbildung 3**).

Wenn in den für aussagefähig gehaltenen Daten der Jahre 2022 und 2023 die gesamte Fläche von 105 ha innerhalb des umlaufenden Randgrabens mit Rückstandssalz bedeckt war und das „Haldenwasservolumen“ den Oberflächenabfluss dieser Fläche meint, kann folgender Ansatz für eine Jahresbilanz gemacht werden:

$$\text{Jahresniederschlag} + \text{Haftwasser} + \text{hygroskopische Kondensation} - \text{Haldenwasservolumen} - \text{Versickerung} - \text{Verdunstung} - \text{Speicherung} = 0$$

Die hygroskopische Kondensation und die Verdunstung sind bisher nicht quantifiziert worden, ihr Einfluss wird seitens des Betreibers als nachrangig angesehen. Eine Speicherung von Wasser innerhalb des wachsenden Haldenkörpers findet nachweislich statt, dürfte aber mengenmäßig etwa dem Eintrag durch Haftwasser vergleichbar sein. Nach Abschluss der Aufhaltung entfällt der Haftwasserterm und der Speicherungsterm erreicht einen stationären Wert. Nach dieser Zeit vereinfacht sich die Bilanz-Gleichung entsprechend. Für eine

unabgedeckte Kalihalde gilt dann näherungsweise: Jahresniederschlag – Haldenwasservolumen – Versickerung = 0

Setzt man die unbekannt Größen (Kondensation, Verdunstung und Speicherung) bis auf Weiteres also gleich null, so ergeben sich im Mittel der beiden Jahre ein Niederschlagsvolumen von 850.000 m³/a, ein Oberflächenabfluss von 511.000 m³/a und als Differenz eine Versickerung von ca. 339.000 m³/a in den Untergrund, also ins Grundwasser. Dieses Verhältnis von 60 % Abfluss zu 40 % Versickerung erscheint recht plausibel.

Da in den Bezugsjahren 2022 und 2023 die restliche genehmigte Aufstandsfläche bereits seit einigen Jahren gemäß den Auflagen des Planfeststellungsbeschlusses (vom 24. April 2003) vorbereitet war, kann das Verhältnis von 60 % Abfluss zu 40 % Versickerung auch für die Zukunft angenommen werden. Die Versickerung ist hier wohlgemerkt die durch die Aufstandsfläche hindurch tretende Lösungsmenge und beinhaltet nicht weitere Salzlösungen, die durch Auflösung an der Haldenbasis durch Grundwasser aus dem Volpriehausen-Sandstein und aufgrund des blockierten Abstroms aus dem Einzugsgebiet des Altwiese-Tals entstehen (Siehe unten).

Struktur und Hydrologie des Haldenkörpers

Der interne Aufbau von Kalihalden wird weiter unten detailliert diskutiert, zumal eine Revision bestehender Haldenmodelle notwendig ist. Zum Innenaufbau der Rückstandshalde Neuhof-Ellers ist bekannt (Diekmann, 2005), dass durch eine Haldenbohrung (B22/1990) in 15 m und 44 m Tiefe Lösungsvorkommen erbohrt wurden. Durch Pumpversuche wurden im Haldenkörper kf-Werte von $1 \cdot 10^{-7}$ bis $2 \cdot 10^{-7}$ m³/m²s ermittelt, die hinsichtlich der Wasserdurchlässigkeit mit Feinsanden bis Schluffen vergleichbar sind. An Kernproben wurden Durchlässigkeiten von $k_f = 3 \cdot 10^{-9}$ m³/m²s (entspricht Ton) bis zu $1,1 \cdot 10^{-3}$ m³/m²s (entspricht Mittelkies) bestimmt. Die Ganglinien des oberen Lösungsvorkommens korrespondierten mit Niederschlagsereignissen. Somit liegen auch für die Halde Neuhof-Ellers Beweise für die Existenz eines aktiven (im zeitlichen Mittel quasi stationären) Haldenwasserkörpers vor.

Kalihalden sitzen nicht einfach als unbeteiligte Fremdkörper auf dem überschütteten Gelände, sondern sind aufgrund ihrer Ausdehnung und Höhe hydraulisch gesehen wie Landschaftsbestandteile anzusehen, mit ihrem eigenen Wasserhaushalt und, zumindest nach einer Übergangszeit, mit einem ständigen hydraulischen Kontakt zum regionalen Grundwasser. Aufgrund der Höhenlage (Potentialhöhe) des Haldenwasserspiegels über dem Grundwasserspiegel des Haldenumfelds werden hohe hydraulische Gradienten in alle Himmelsrichtungen wirksam. Diese Gradienten werden aufgrund der um 20 bis 30 Prozent höheren Dichte von salzgesättigten Haldenlösungen gegenüber dem gering mineralisierten regionalen Grundwasser noch weiter verstärkt.

Die Kalihalde NeuhoF-Ellers bestätigt diese Erkenntnis „lehrbuchmäßig“ durch die Ausbreitung von Haldenwässern

- in Grundwasserleitern entgegen der regionalen Grundwasserströmung (nördlich der Halde),
- quer zu ehemals wirksamen Grundwasserscheiden unter der Hardt und unter dem Strickei-Hügel,
- als Unterströmung von Vorflutern (Lützbach, Rippbach) quer zu deren Achse, innerhalb des Hauptgrundwasserleiters (Volpriehausen-Sandstein).

Alte Wiese

Der Bach „Altewiese“ war ein nördlicher Seitenarm des Lützbachs, mit einem eigenen Einzugsgebiet, das von der Einmündung etwa 2,5 km nach Norden reicht(e). Die Altewiese ist ein Vorfluter, der sowohl von diffusen Grundwasseraustritten, hauptsächlich aus dem angeschnittenen Volpriehausen-Sandstein, als auch von mehreren diskreten Quellen gespeist wird. Die Hauptquelle ist die permanent schüttende, bedeutende „Alte Wiese Quelle“ direkt nördlich der Halde. Etwas nordwestlich davon treten die nicht kontinuierlich fließenden „März-Quellen“ aus.

Ab den 1990er Jahren hat K+S den mittleren Abschnitt des Altewiese-Tals durch die weiter nach Westen vorrückende Kalihalde mit Fabrikrückständen zugeschüttet. Das damals markante und tief eingeschnittene Tal des Altewiese Baches erstreckte sich zwischen der Anhöhe „Die Harth“ (+383,1 m NHN) im Nordwesten und dem heute ebenfalls überschütteten Berg „Strickei“ (ca. +375 m NHN) im Osten. Die noch existierende, aber hydromorphologisch degradierte „Alte Wiese Quelle“ liegt auf einer Höhe von +325m NHN, knapp nördlich der heute etwa +500 m NHN hohen Kalihalde. Die Quelle würde aber im Rahmen einer von K+S geplanten Haldenabdeckung („Dickschicht-Abdeckung“) ebenfalls zugeschüttet werden.

Die Entwässerung des Altewiese Baches und der Alte Wiese Quelle erfolgt heute durch eine dem ehemaligen Bachverlauf folgende Rohrleitung unter der Halde, über deren Zustand und verbleibende Nutzungsdauer nichts bekannt ist. Im Verlauf des ehemaligen Altewiese-Tals ist auch weiterhin mit Grundwasseraustritten aus dem im Talgrund und den unteren Hangabschnitten ausstreichenden Volpriehausen-Sandstein (Vgl. **Abbildungen 1 und 4-Mitte**) zu rechnen, die zu einer Salzauflösung an der Haldenbasis führen. Die dort verlegte Rohrleitung kann diese Wasserzutritte nicht fassen, selbst bzw. gerade wenn ein völlig intakter Zustand der Rohrleitung unterstellt wird.

Die Alte Wiese Quelle ist mit ihrer starken Schüttung von ca. 154.000 m³/a für den Wasserhaushalt bedeutend. Sie stellt etwa die Hälfte aller gefassten und wegen Versalzung entsorgten Quellwässer dar. Neben der Alte Wiese Quelle sind weitere, teilweise überschüttete Quellen an der Speisung des Altewiese Baches beteiligt. Das oberflächliche Einzugsgebiet (**Abbildung 5**) erstreckt sich nach Norden und hat insgesamt eine Fläche von ca. 2,25km², wovon der Abschnitt nördlich der Halde etwa 1,24 km² einnimmt.

Auf das nördlich der Halde gelegene Teileinzugsgebiet fallen bei einer mittleren jährlichen Niederschlagsmenge von 671 mm/a 832.040 m³/a Niederschlag. Die Schüttung der Alte Wiese Quelle von ca. 154.000 m³/a entspricht 19 Prozent dieser Menge und speist sich

wahrscheinlich überwiegend aus Oberflächenabfluss und oberflächennahem Zwischenabfluss, auch aus sandigen Partien der Volpriehausen Wechselfolge („schwebende Grundwasserkörper“; Vgl. Sessler, 1996). Ein weiterer Anteil von schätzungsweise ca. 20 bis 30 Prozent des Niederschlags wird als Grundwasserneubildung versickern und in den Hauptgrundwasserleiter eintreten.

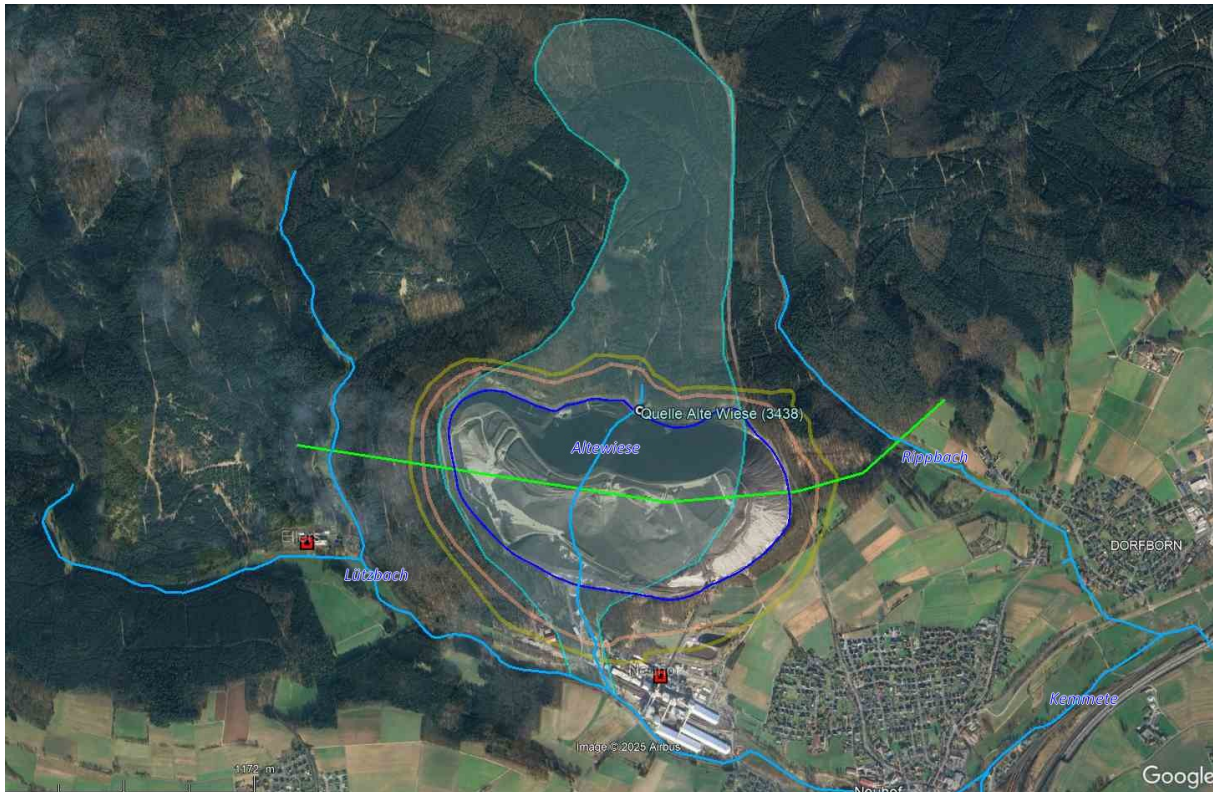


Abbildung 5 – Einzugsgebiet des Altewiese Bachs (türkis). Vorfluter hellblau, Ringgraben der Halde dunkelblau, Profillinie (Vgl. Abbildung 4) grün, Konturen der Abdeckungs-Varianten 1 und 2 rosa bzw. oliv. Schächte Ellers und Neuhof rot.

Sessler's (1996) Überlegungen und Bedenken bezüglich einer Verschüttung oder Verlegung der Alte Wiese Quelle werden grundsätzlich geteilt, aber sie adressieren nur einen Teil des Problems. Es wird nämlich auch weiterhin einen unterirdischen Abstrom des im nördlichen Teileinzugsgebiet neugebildeten Grundwassers geben, der jedoch über den verschütteten Altewiese Bach nicht mehr frei abfließen kann. Dadurch steigt der Wasserspiegel im Hauptgrundwasserleiter (Volpriehausen Sandstein) an und es entsteht im überschütteten Teil ein großflächiger Kontakt von gering mineralisiertem Grundwasser mit den Rückstandssalzen an der Haldenbasis.

Im überschütteten Teil des Altewiese Tals können daher an der Haldenbasis unkontrollierte Salzauflösungen stattfinden. Hierfür stehen im Mittel etwa 120.000 bis 240.000 m³/a Süßwasser zur Verfügung, woraus sich ein Lösepotential von ca. 43.000 t/a bis 86.000 t/a NaCl errechnet. Als Folge der Salzauflösung wird es an der Haldenbasis zu karstähnlichen instabilen Hohlräumbildungen kommen, in der Größe einer Turnhalle jedes Jahr, und an der Haldenoberfläche werden Erdfälle und Schlucklöcher entstehen. Aus diesem Grund ist eine

langfristige Stabilität des Haldenkörpers und etwaiger Abdeckungen oder Aufbauten mit Sicherheit nicht gegeben.

Eine Fassung der Alte Wiese Quelle und die Ableitung ihres Wasser durch einen Stollen würde das Problem nur partiell lösen, weil die Alte Wiese Quelle nicht die alleinige Speisung des Altewiese Bachs darstellt. Das Grundwasser steigt trotzdem in den Haldenkörper auf und verbindet sich hydraulisch mit dem Sickerwasser des Haldenwasserkörpers.

Obwohl die Alte Wiese Quelle hangaufwärts der Kalihalde liegt, zeigt sie dennoch eine starke Versalzung. Dies ist eine Folge der Erhöhung des hydraulischen Potentials innerhalb des hoch aufgetürmten Haldenkörpers. Dadurch können Haldensickerwässer entgegen dem natürlichen Gefälle nach Norden in den Quellbereich strömen. Dies ist durch den versalzene Chemismus des Quellwassers und auch in den geoelektrischen Profilen P22 und P24 (s.u.) zu erkennen.

Geoelektrische Untersuchungen und Anomalien

Grundlagen

Das Umfeld der Kalihalde Neuhof-Ellers wird seit 2010 von spezialisierten Auftragnehmern geoelektrisch vermessen. Zu diesem Zweck wurden einerseits Airborne-Elektromagnetik in Form des Helikopter-gestützten „SkyTEM“-Systems, und andererseits bodengebundene Gleichstrom-Verfahren eingesetzt, die beide zum Ziel haben, die Verteilung der spezifischen elektrischen Widerstände im Untergrund zu bestimmen. Aus der Widerstandsverteilung können dann wiederum Rückschlüsse auf die Verteilung von Salzwässern gezogen werden.

In den Gesteinen des Untergrunds (fachsprachlich oft als „Gebirge“ bezeichnet) wird der elektrische Widerstand stark durch die elektrolytische Leitfähigkeit des Kluft- und Porenwassers bestimmt, die wiederum von der Lösungskonzentration der dissoziierten Salze abhängt. Die Gesteinsmatrix der hier verbreiteten siliziklastischen Sedimentgesteine hat im trocknen Zustand selbst hohe elektrische Widerstandswerte.

Einen Sonderfall stellen die Kalihalden dar, die fast ausschließlich aus kristallinen Salzen bestehen, die als Ionen-Kristalle bekanntlich elektrische Nichtleiter („Isolatoren“) sind und als Festkörper in trockenem Zustand sehr hohe spezifische Widerstände haben. Soweit die Kalihalden in den Messungen dennoch als Strukturen mit geringen Widerständen erscheinen, liegt dies ausschließlich an darin gespeicherten, in aller Regel gesättigten Salzlösungen.

Eine exakte und direkte Berechnung der Salzkonzentrationen von Porenwässern aus den gemessenen Gebirgswiderständen über physikalisch-chemische Gesetze ist nicht praktikabel. In der Geophysik findet stattdessen der Formationsfaktor (F) nach den Archie-Gleichungen (Archie, 1942) Anwendung, die eine empirische Relation zwischen den spezifischen Widerständen des Gebirges (der „Formation“) und des Porenfluids herstellen und auf petrophysikalische Parameter zurückführen.

Erste Archie-Gleichung

Für lösungsgesättigte Gesteine findet die erste Archie-Gleichung Anwendung:

$$\rho_0 / \rho_F = F = a / \phi^m$$

ρ_0	Spezifischer elektrischer Widerstand der lösungsgesättigten Probe [Ωm]
ρ_F	Spezifischer elektrischer Widerstand der Lösung [Ωm]
F	Formationsfaktor [-]
a	Tortuositätsfaktor [-]
ϕ	Porosität [-]
m	Zementationsexponent [-]

Der Gebirgs-widerstand ρ_0 muss also durch den dimensionslosen Formationsfaktor geteilt werden, um einen Schätzwert für den Fluidwiderstand ρ_F zu erhalten. Der Formationsfaktor F ist immer größer 1, und für natürliche Gesteine liegen übliche Werte zwischen 10 und 500.

Für lockere Sande kann der Tortuositätsfaktor $a = 1$ gesetzt werden. Für Gesteine mit intergranularer Porosität wurden Werte für a von knapp unter 1, für Gesteine mit einem hohen Anteil an gut vernetzter Matrixporosität bis knapp über 1 berichtet. Üblicherweise wird a jedoch als empirischer Faktor mit $a = 1$ angenommen (TU Freiberg, 2019; Reichling, 2014).

Der Term ϕ^m , der für die „effektive Porosität“ steht, ist der für Lösungs- und elektrolytischen Ladungstransport geeignete Anteil der Gesamtporosität ϕ . Die Werte des Zementationsexponenten m liegen bei Sanden häufig zwischen 1,3 und 1,4, bei Sandstein zwischen 1,5 bis 2,2, und bei Karbonatgesteinen wurden Zementationsexponenten von 1,9 bis 2,3 (extrem bis zu 5,4) bestimmt. Hohe Zementationsexponenten ($m > 3$) bedeuten kleine effektive Porositäten und sind durch eine geringe Vernetzung der Poren bedingt. Für Gesteine mit Rissen (Klüften) wurden Werte von m zwischen 1,0 und 1,4 ermittelt, wobei bei durchgängigen Rissen eine Tendenz zu $m = 1$ festgestellt werden konnte (TU Freiberg, 2019; Reichling, 2014).

Tabelle 4 – Formationsfaktoren F nach dem 1. Gesetz von Archie			
Porosität Φ	0,1	0,2	0,3
$m = 1,3$	19,95	8,10	4,78
$m = 1,4$	25,12	9,52	5,40
$m = 1,5$	31,62	11,18	6,09

Als „Faustwert“ kann in vielen Fällen ein geschätzter Formationsfaktor von etwa 10 bis 20 verwendet werden.

Zweite Archie-Gleichung

In teilgesättigten Gesteinen, bei denen der Porenraum nicht vollständig durch wässrige Lösungen, sondern anteilig durch Gase (z.B. Luft, Erdgas) und/oder nichtleitende Fluide (z.B. Erdöl, überkritisches CO₂) gefüllt ist, gilt die zweite Archie-Gleichung:

$$\rho_{TS} / \rho_F = F = a / (\phi^m \cdot S_w^n)$$

ρ_{TS}	Spezifischer elektrischer Widerstand der teilgesättigten Probe [Ωm]
ρ_F	Spezifischer elektrischer Widerstand der Lösung [Ωm]
F	Formationsfaktor [-]
a	Tortuositätsfaktor [-]
ϕ	Porosität [-]
m	Zementationsexponent [-]
S_w	Wassersättigung [-]
n	Sättigungsexponent [-]

Der Term S_w^n kann als „effektiver Sättigungsgrad“ bezeichnet werden. Der Exponent n wird vor allem von der Benetzbarkeit der Porenoberfläche beeinflusst. Liegt eine gute Benetzbarkeit mit Elektrolytlösung vor, verbleibt auch bei geringen Sättigungsgraden ein durchgehender Lösungsfilm an der Porenwand, wodurch ein Ladungstransport ermöglicht wird. Typische Werte für den Sättigungsexponenten liegen bei $n \approx 2,0$: Sand $n = 2,0$, Sandsteine $n = 1,8$, Kalksteine $n = 1,6$ bis $5,7$ (TU Freiberg, 2019; Reichling, 2014).

Eine Auswertung der Archie-Gleichungen im Hinblick auf Kalihalden erfolgt weiter unten.

Elektrischer Widerstand – Leitfähigkeit – Salzgehalte

Der elektrische Leitwert (Einheit: „Siemens“; im angelsächsischen Raum häufig „mho“) ist der Kehrwert des elektrischen Widerstandes (Einheit: Ohm bzw. Ω). Die spezifische elektrische Leitfähigkeit (Einheit: Siemens/Meter) verhält sich zum spezifischen elektrischen Widerstand (Einheit: Ohm·Meter) wie folgt: Es gilt die Definition: $1 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1} = 1 \text{ } \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$. Es besteht also ein nicht-linearer (hyperbolischer) Zusammenhang zwischen den beiden Größen.

Gebäuchlicher sind Angaben in $\mu\text{S}/\text{cm}$ oder mS/m .

$1 \text{ S}/\text{m}$ entspricht somit $10^3 \text{ mS}/\text{m}$ oder $10^4 \text{ } \mu\text{S}/\text{cm}$.

Beispiel (Wieviel $\mu\text{S}/\text{cm}$ sind $5 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$?): $1/(5 \text{ } \Omega \cdot \text{m}) = 0,2 \text{ S}/\text{m} = 2000 \text{ } \mu\text{S}/\text{cm}$

In hochkonzentrierten Salzlösungen werden spezifische elektrische Leitfähigkeiten von einigen hunderttausend $\mu\text{S}/\text{cm}$ gemessen. Beispielsweise haben Haldenlösungen der Kalihalde Neuhoof-Ellers elektrische Leitfähigkeiten bis zu $195.000 \text{ } \mu\text{S}/\text{cm}$.

Von Interesse ist auch die Frage, bei welchem Gebirgs-widerstand der Grenzwert der Trinkwasserverordnung ($2.790 \text{ } \mu\text{S}/\text{cm}$ (25°C), entsprechend $3,58 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$, entsprechend $250 \text{ mg}/\text{L}$ Cl als NaCl)) eingehalten wird. Um den zugehörigen Gebirgs-widerstand zu erhalten,

wird der Grenzwert mit dem Formationsfaktor (hier 10) multipliziert und man erhält einen Wert für den Gebirgs widerstand von rund $36 \Omega \cdot m$.

Geoelektrik im Umfeld der Kalihalde Neuhof-Ellers

Skalen und Farbcodierungen

Die in den Messergebnissen (Karten und Profile) geringsten dargestellten spezifischen Gebirgs widerstände um $0,5 \Omega \cdot m$ würden bei einem Formationsfaktor $F = 10$ etwa einem Fluid-Widerstand von ca. $0,05 \Omega \cdot m$ entsprechen. Eine reine gesättigte NaCl-Lösung hat einen nahezu übereinstimmenden spezifischen Widerstand von $0,0403 \Omega \cdot m$. Dies lässt den Schluss zu, dass die geringsten Werte des spezifischen Gebirgs widerstands um $0,5 \Omega \cdot m$ hochkonzentrierte bis gesättigte saline Porenwässer anzeigen, wie sie gerade in unverdünnten Haldenlösungen zu erwarten sind.

GGL (2025) definiert die Grenze für die von mineralisierten Wässern stärker beeinflussten Bereiche (niederohmige Bereiche) bei $50 \Omega \cdot m$. Bereiche mit Werten unter $10 \Omega \cdot m$ weisen auf extrem starke Mineralisation hin. Von mineralisierten Wässern wenig bis gar nicht beeinflussten Bereichen werden spezifische elektrische Widerstände von $>150 \Omega \cdot m$ zugeordnet.

Vorsorglich wird an dieser Stelle auf die unterschiedlich und teilweise gegenläufig farbcodierten Widerstands-Skalen in den einzelnen GGL-Berichten (Mess-Kampanien) und auch gegenüber den SkyTEM-Berichten hingewiesen, die unten in den **Abbildungen 6 bis 10** unverändert reproduziert sind. Es sind daher bei Vergleichen immer die zugewiesenen $\Omega \cdot m$ -Werte zu verwenden. Leider sind auch die Profilbezeichnungen teilweise inkonsistent, indem gleiche Namen (wie z.B. „P05“) für unterschiedliche Profile verwendet worden sind. Auch sind die Länge und Stationierung (Entfernungsangaben entlang des Profils) von wiederholt vermessenen Profilen teilweise verschieden. Schließlich sind auch die Blickrichtungen auf die Profile, mal von Süden, mal von Norden und mal von Osten, mal von Westen uneinheitlich. Für Vergleiche wurden Profile daher vom Verfasser wenn nötig gespiegelt dargestellt.

Gleichstrom-Geoelektrik

Das Umfeld der Kalihalde Neuhof-Ellers wurde durch die *GGL Geophysik und Geotechnik Leipzig GmbH* in mehreren Mess-Kampanien und entlang zahlreicher Vertikalprofile geoelektrisch vermessen um die Verteilung der spezifischen elektrischen Widerstände im Untergrund zu erkunden. Bei hinreichend dichter Lage der vertikalen Messprofile konnten durch Interpolierung auch horizontale Schnitte der elektrischen Widerstände in bestimmten Tiefenlagen angefertigt werden. Insoweit liefern die bodengebundenen Messungen grundsätzlich vergleichbare Ergebnis-Darstellungen wie sie aus der flächendeckenden Airborne-Elektromagnetik (z.B. SkyTEM) bekannt sind. Gegenüber letzteren ergibt sich aus den seit 2010 erfolgten Bodenmessungen allerdings erst nach und nach ein lückenhaftes,

„patchwork-artiges“ und nicht synchrones Gesamtbild, das veränderte Zustände zu verschiedenen Zeitpunkten nicht berücksichtigt und zudem unter den veränderlichen Messbedingungen (z.B. Grundwasserstände) leidet. Außerdem können bei den gewählten Elektroden-Auslagen die spezifischen elektrischen Widerstände im Untergrund nur bis zu einer Tiefe von etwa 60 Meter gemessen werden. Von Vorteil ist allerdings die bessere räumliche Auflösung der Bodenmessungen.

Eine hydrogeologische Interpretation der zahlreichen bis *dato* gemessenen geoelektrischen Widerstandsprofile und Horizontalschnitte zeigt dennoch sehr deutlich, dass von der Kalihalde starke Widerstandsanomalien ins Haldenumfeld ausgehen, die durch entsprechende Salzeinträge in flach lagernde Grundwasserleiter, insbesondere den Hauptgrundwasserleiter (HGWL) erklärbar sind. Am deutlichsten gehen die Zusammenhänge aus den von der Kalihalde radial ins Umfeld orientierten Vertikalschnitten hervor (**Abbildungen 6 bis 10**).

Der Hauptgrundwasserleiter ist im Niveau des überwiegend grobkörnigen Volpriehausen-Sandsteins (Mittlerer Buntsandstein) bis an die Grenze zu dem darunter liegenden und feinkörnigeren Unteren Buntsandstein ausgebildet. Der Volpriehausen-Sandstein zeigt schwankende Mächtigkeiten von 10 bis 30 m. Die darüber lagernde Volpriehausen-Wechselfolge ist aufgrund zahlreicher feinklastischer Lagen und wegen generell geringeren Korngrößen kein guter Grundwasserleiter (ein Geringleiter), kann aber gelegentlich in vereinzelt sandigen Partien schwebende Grundwasservorkommen speichern. An dieser Stelle sollte auch angemerkt werden, dass die Grenzziehung zwischen den definierten stratigraphischen Formationen des Buntsandsteins in der Praxis aufgrund der petrographischen Ausbildung mitunter schwierig und teilweise unsicher und unscharf sein kann. Bei vorliegenden Versalzungen bilden die geoelektrischen Anomalien den HGWL vermutlich genauer ab als geologische Kartierungen und stratigraphisch interpretierte Bohrkerne.

Es liegt in der Natur der Sache, dass die im Aquifer sich ausbreitenden Haldenlösungen mit zunehmender Entfernung stärker verdünnt werden und der Kontakt zu nicht versalztem Grundwasser verschimmt. Die Festlegung einer „Versalzungsgrenze“ ist daher manchmal etwas unscharf.

Ausgewählte Profilschnitte

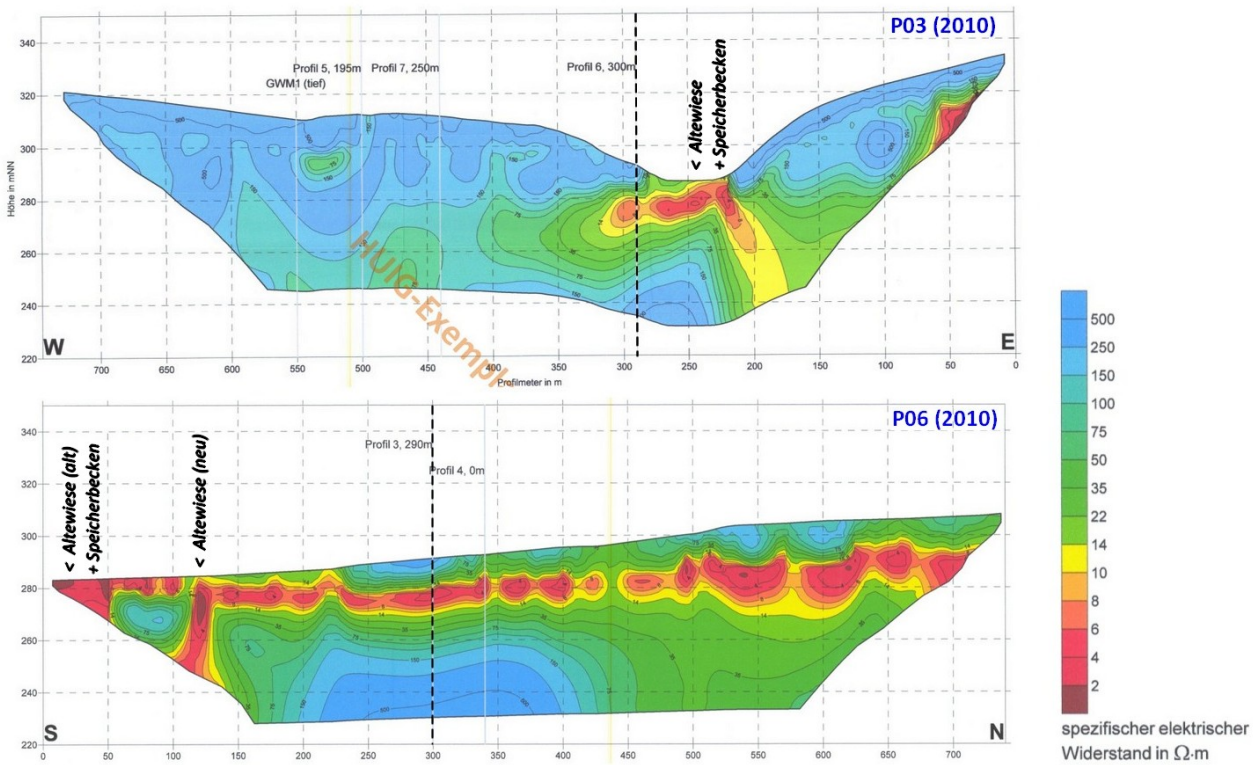
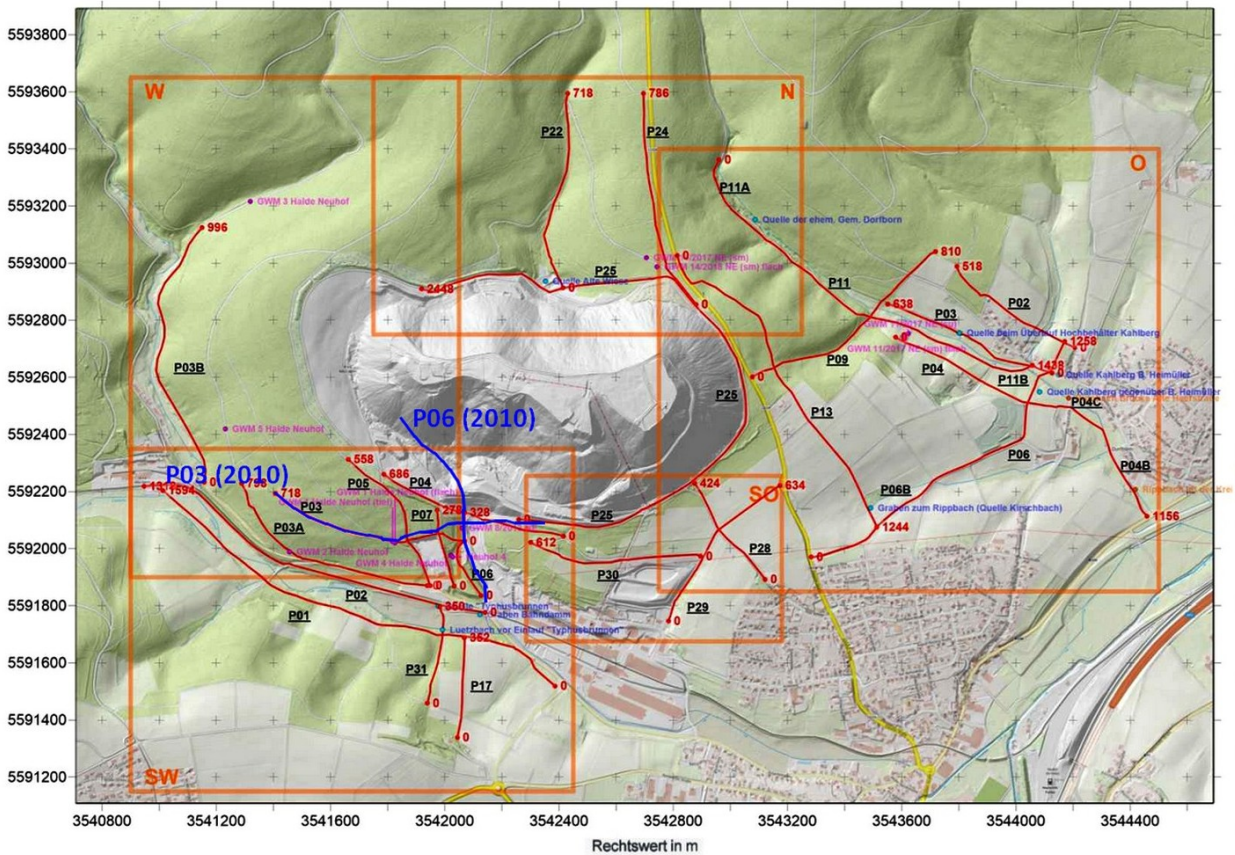


Abbildung 6 – Lagekarte der Messprofile P03 und P06 (blaue Linien) im Südwesten der Halde und zugehörige Vertikalschnitte. (Aus:GGL 2024, 2010)

In **Abbildung 6** ist im N-S verlaufenden Schnitt P06 (unten), der noch vor der Überschüttung mit Rückstandssalzen vermessen worden ist, eine 10 bis 20 m mächtige Zone mit spezifischen Widerständen unter ca. $15 \Omega\text{m}$ ausgebildet, die dem Hauptgrundwasserleiter (unter Quartär-Bedeckung) folgt und sehr hoch mineralisierte Porenwässer führt, die als Versalzungsfahne der noch fernen Kalihalde anzusehen sind.

Die in den Schritten blau dargestellten Bereiche zeigen Süßwasser an, insbesondere fern der Halde sowie im Nahbereich, in der obersten Bodenschicht. Hoch mineralisierte Wässer (hier rot) folgen einer gut Grundwasser leitenden Schicht, dem Volpriehausen Sandstein, in Richtung des hydraulischen Gefälles zum nächsten Vorfluter hin, hier der Lützbach. Südlich des Endpunkts des Profils 06 treten hoch mineralisierte Wässer im Lützbachgrund an die Oberfläche. Die komplexe „doppelte“ Anomalie am Südende des Profils ist wahrscheinlich in der früheren Verlegung des Altewiese Unterlaufs nach Westen begründet.

Auch im W-E-Schnitt P03 ist im Bereich des Altewiese-Tals eine Anomalie im Talgrund zu beobachten, die nach Westen hin ein Stück weit dem Volpriehausen-Sandstein folgt, in den das Altewiese-Tal hier einschneidet. Die westliche Salzwasser-Ausbreitung erfolgt hier entgegen dem nach Osten gerichteten natürlichen hydraulischen Gefälle zum Vorfluter Altewiese hin. Dies ist der Potential-erhöhenden höheren Dichte der Salzwässer geschuldet. Der östliche Ast der Anomalie taucht nach Osten zur Tiefe ab. Er befindet sich im Bereich eines ehemaligen Speicherbeckens, das zwischen 2011 und 2016 verfüllt wurde und offenbar undicht war.

Aufgrund der um 20 bis 30 Prozent höheren Dichte der Haldensickerwässer gegenüber Süßwasser neigen die Salzwässer dazu, Süßwasser führende Bereiche zu unterschichten. Ihr Absinken wird aber beim Erreichen gering durchlässiger Horizonte gehemmt, so dass sich die Salzwässer oberhalb solcher Stauhorizonte in besser durchlässigen Schichten lateral ausbreiten. Dabei findet mit zunehmender Entfernung eine Mischung mit Süßwasser und somit eine Verdünnung der Salzgehalte statt.

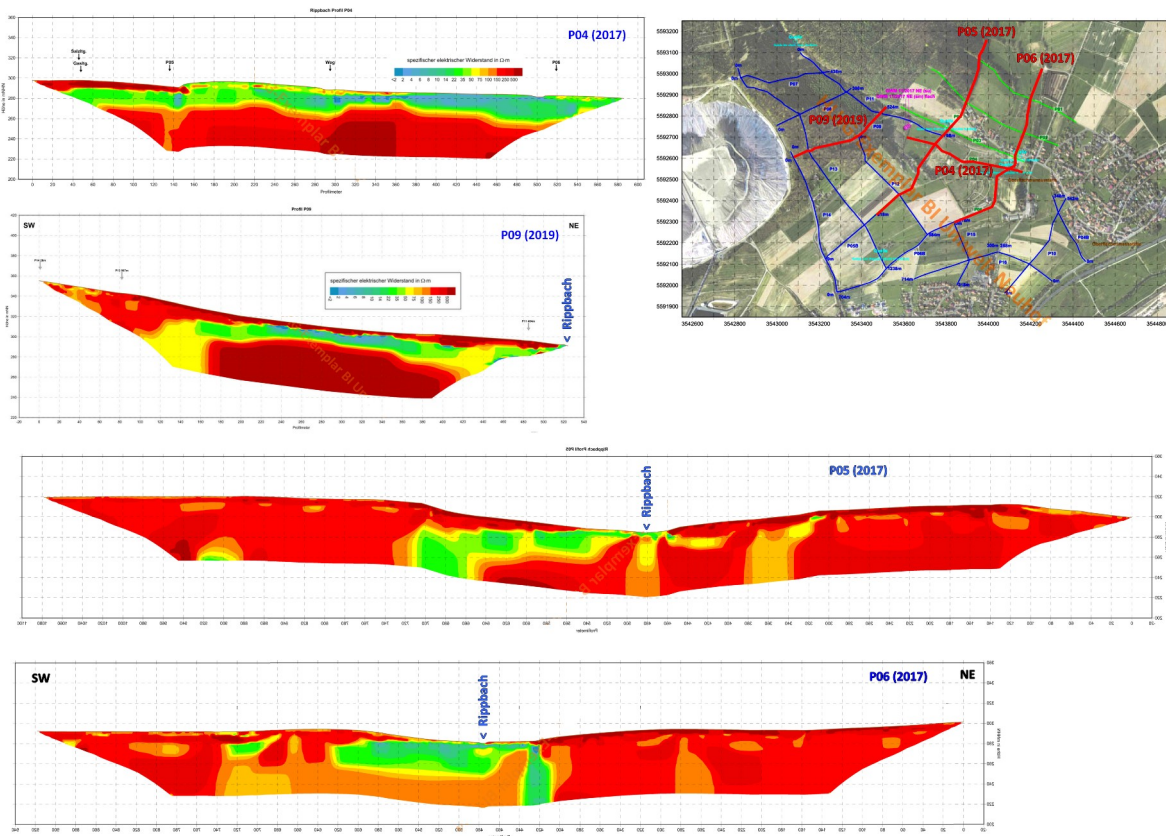


Abbildung 7 – Lagekarte der Messprofile östlich der Halde (rote Linien) und dazu gehörige Vertikalschnitte. (Aus: GGL 2017, 2019)

In den beiden oberen Schnitten (P04 und P09) der **Abbildung 7**, die radial von der Kalihalde aus nach Osten gerichtet sind, ist eine ca. 20 m mächtige, schichtförmige Anomalie mit spezifischen Widerständen überwiegend unter $50 \Omega\text{m}$ erkennbar, die dem Hauptgrundwasserleiter (hauptsächlich Volpriehausen Sandstein) zugeordnet wird. Dieser wird in Haldennähe von Gesteinen der Volpriehausen Wechselfolge und stellenweise von geringmächtigem Quartär überlagert. In Hochlagen, wie hier am Ost-Abhang des überschütteten Strickei-Berges, bilden bzw. halten sich daher Süßwasserkappen über den schwereren Salzlösungen der Versalzungsfahne.

Die Sickerlösungen der Halde tauchen Dichte-getrieben weiter in die Tiefe ab und breiten sich (auch aufgrund des Gefälles) über den Hauptgrundwasserleiter seitlich aus. Im Bereich des Rippbach-Tals, das in den flach lagernden Volpriehausen Sandstein einschneidet, tritt die Versalzungsfahne der Kalihalde am Talgrund (P09) und an der westlichen Talflanke (P04) aus. Die Versalzungsfahne unterquert hier stellenweise auch das Rippbach-Tal nach Osten (P05 und P06), was durch die Dichte-Unterschiede in Verbindung mit dem gut durchlässigen Volpriehausen-Aquifer ermöglicht wird. Östlich des Rippbach-Tals wirkt der Dichte-getriebenen Salzwasserausbreitung zunehmend die entgegengesetzt gerichtete Grundwasserströmung entgegen. Vgl. **Abbildung 8**.

zunehmende Verdünnung der Salzkonzentrationen über eine Distanz von etwa einem halben Kilometer. Die Ausbreitung der Salzwässer erfolgt hier also ein Stück weit entgegen der regionalen Grundwasserströmung, die ursprünglich dem topographischen Gradienten folgend nach Süden verläuft.

Die Alte Wiese Quelle befindet sich am südlichen Ende des Profils P22 und wird aus dem Anomalie-Bereich gespeist. Die starke Quelle, die ca. 154.000 m³/a Salzwässer ausschüttet, hat heute eine chemische Signatur die dem Haldenwasser der Kalihalde entspricht. Quellwasser-Analysen aus der Zeit vor der Haldenaufschüttung liegen bisher nicht vor. Die Salzgehalte der Quelle liegen bei etwa 4 Prozent der Gehalte im Haldenwasser.

Insbesondere die in **Abbildung 9** offensichtliche Ausbreitung der mineralisierten Haldenwässer im Hauptgrundwasserleiter entgegen der regionalen Grundwasserströmung ist bemerkenswert und bestätigt erneut eine vom Verfasser seit langem vertretene Auffassung über die Auswirkung von Kalihalde auf die hydraulischen Gradienten und somit auf die Grundwasserströmung. In der Kalihalde Neuhof-Ellers wurde bereits vor Jahrzehnten die Existenz eines Haldenwasserkörpers durch Haldenbohrungen nachgewiesen (Diekmann, 2005), aber in ihrer Relevanz anscheinend nicht erkannt bzw. fehlgedeutet. Mittlerweile existieren zahlreiche Belege dafür, dass größere Kalihalde nach einer Übergangszeit einen eigenen Haldenwasserkörper / Grundwasserkörper beherbergen, der mit dem natürlichen Grundwasser ein hydraulisches Kontinuum bildet und lokal als ausgeprägter Potentialberg die Grundwasserströmung bestimmt.

Wiederholungsmessungen

Durch geoelektrische Wiederholungsmessungen sind in einigen Profilen deutliche zeitliche Veränderung der Anomalien (Zunahme der Versalzung) dokumentiert.

In **Abbildung 10** ist die zunehmende Versalzung entlang der südlichen Peripherie der Haldenfläche erkennbar. Hier ist besonders die markante Zunahme der Grundwasser-Versalzung seitlich und unterhalb des Altewiese-Tals zu bemerken, nachdem dieses weiter nördlich bereits verschüttet worden ist. Hier lassen sich also auch in den Widerstandsprofilen zeitlich ansteigende Versalzungstrends im Grundwasser nachweisen.

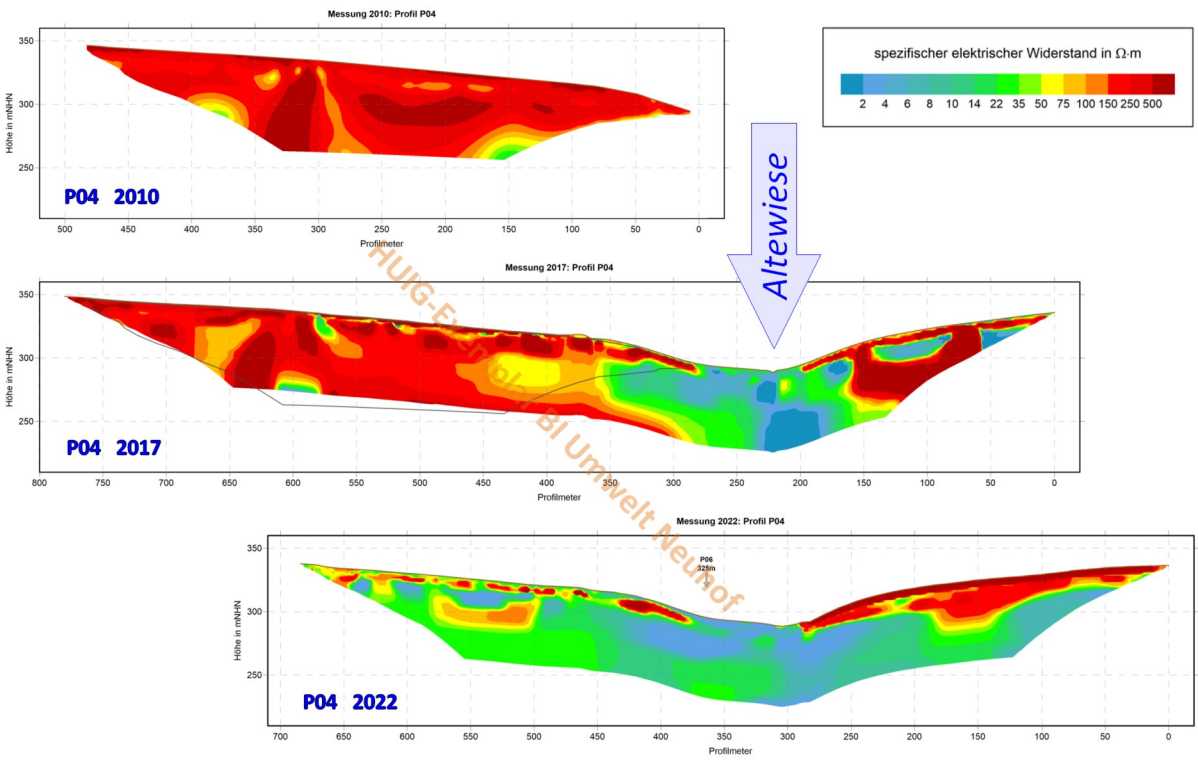
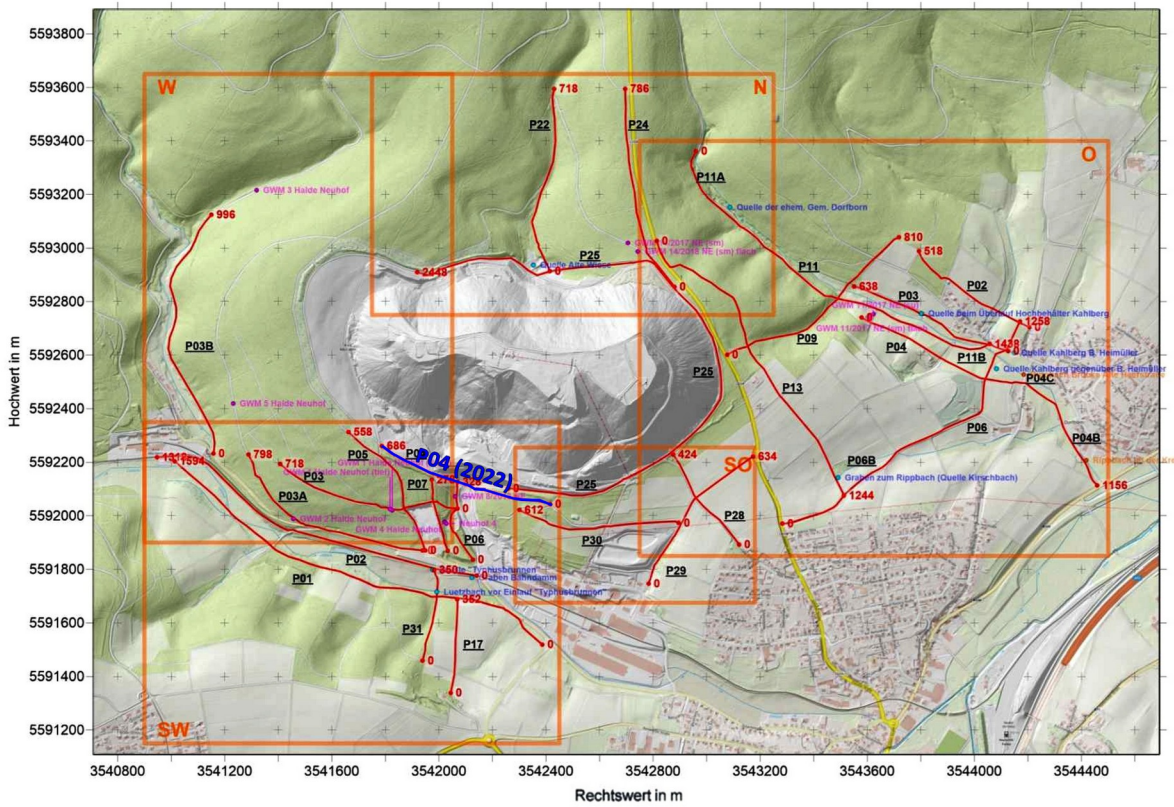


Abbildung 10 – Lagekarte des Messprofils P04 (blaue Linie) und zeitlich gestaffelte Vertikalschnitte. (Nach GGL 2025)

Aktuelle Ausdehnung der Versalzungsfahne

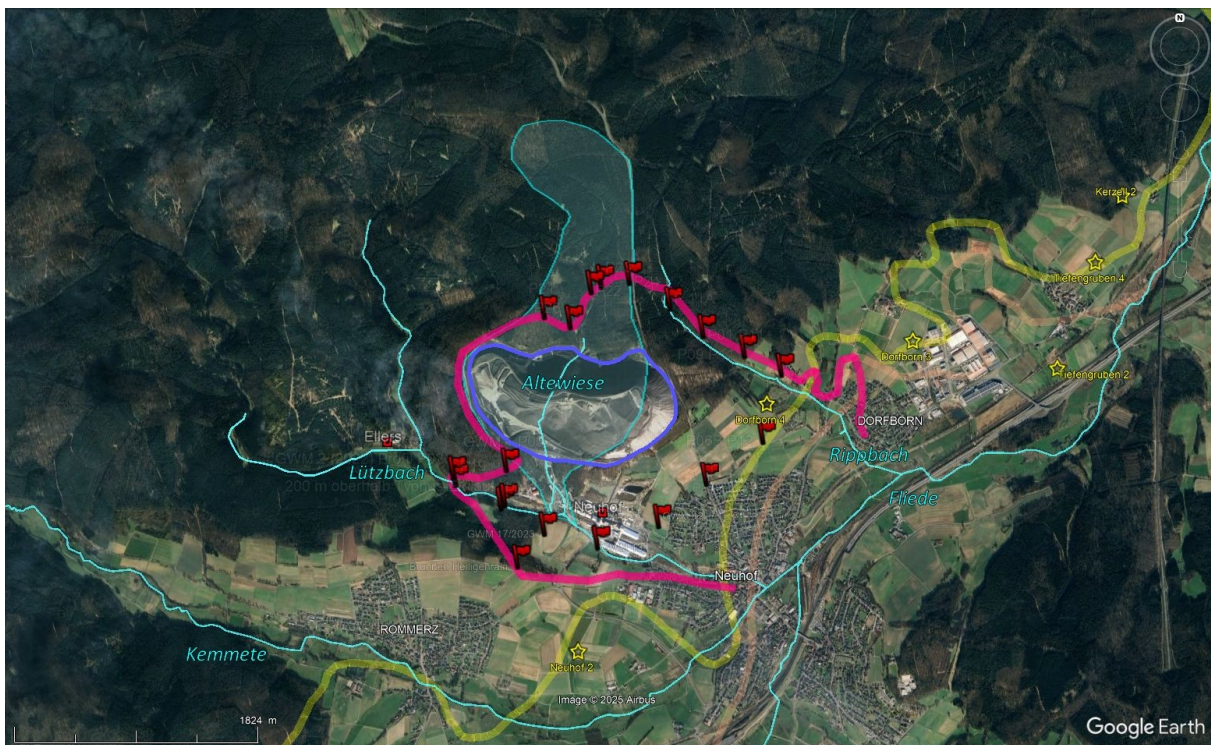


Abbildung 11 – Nachweisbare Ausdehnung der Versalzungs-fahne der Kalihalde Neuhof-Ellers (rote Kontur und Flaggen) und Einzugsgebiet des Altewiese Bachs (türkis). Haldenrandgraben (blau). Salzhang Innen- und Außenrand: gelb und rosa

Die Auswertung aller vorliegenden geoelektrischen Profilschnitte und geochemischen Nachweise in Grundwassermessstellen erlaubt eine weitgehende Eingrenzung der Versalzungs-fahne der Kalihalde (**Abbildung 11**), wie sie sich heute (2025) darstellt. Im Westen ist die Abgrenzung durch die Grundwasserscheide unter dem von der Harth zum Lützbach herabziehenden Bergrücken gegeben. Im Norden, im Einzugsbereich des Altewiese Bachs endet die Versalzungs-fahne dort, wo die nach Süden gerichtete regionale Grundwasserströmung eine weiter nordwärts gerichtete Salzwasserausbreitung stoppt. Im Nordosten reichen die Anomalien bis ins Rippbach-Tal, an dessen Flanken und Untergrund der gut Grundwasser leitende Volpriehausen Sandstein ausstreicht und eine Entlastung in den Rippbach stattfindet. Im Südosten zur Fliede hin ist ohne Einführung eines arbiträren Grenzwertes eine scharfe Abgrenzung der Versalzungs-fahne nicht möglich, weil flussabwärts eine zunehmende Verdünnung der Salzgehalte stattfindet, deren Reichweite letztlich bis zur Wesermündung in die Nordsee reicht (und tatsächlich, zusammen mit den Einleitungen der Kaliwerke an der Werra, schon vor vielen Jahren die Einstellung der Trinkwassergewinnung der Stadt Bremen aus Uferfiltrat zur Folge hatte). Im Südwesten kann die Versalzungs-fahne anhand der geoelektrischen Profile bis über den Lützbach hinaus verfolgt werden. Auch hier findet die Ausbreitung der schweren Salzwässer über den Volpriehausen Sandstein statt, unter der Vorflut hindurch. Dort hat die Versalzung bereits den Brunnen Heiligenrain erreicht und dessen Stilllegung erzwungen.

Vor allem im Abstrombereich östlich und südöstlich der Kalihalde sind in Oberflächennähe häufiger keine anomalen Widerstandswerte erfasst worden. Dies liegt wahrscheinlich an der stärkeren Überdeckung des Volpriehausen Sandsteins durch Grundwasser-Geringleiter, in denen sich eine Süßwasser-Kappe gebildet bzw. erhalten hat, die von den Salzwässern unterschichtet wird. Möglicherweise sind auch einzelne Teilbereiche hydraulisch isoliert, beispielsweise durch kleinere Störungen und erscheinen daher innerhalb der Versalzungsfahne als „Inseln“.

Airborne-Elektromagnetik (SkyTEM)

Im Auftrag von K+S hat die Firma *Aarhus Geophysics* im Jahr 2013 Helicopter-Befliegungen im Umfeld der Kalihalde Neuhof-Ellers durchgeführt und elektromagnetische Messungen vorgenommen. (Das „SkyTEM“ genannte Verfahren bezeichnet Transiente Elektromagnetische Messungen aus der Luft.) Aus den gewonnenen Daten wurde nach einem Pre-Processing durch ein nachfolgendes mathematisches Inversionsverfahren ein 3D-Modell der spezifischen elektrischen Widerstände des geologischen Untergrunds errechnet. Aus dieser 3D-Datenmatrix lassen sich beliebige 2D-Schnitte extrahieren. Die Aussagefähigkeit der Messungen ist zur Tiefe hin begrenzt, was durch die „Depth of Investigation“ (DOI) ausgedrückt wird, die auf Fehleranalysen beruht. Die hydrogeologische Interpretation der Widerstandsdaten wurde durch die Firma *Fugro Consult* (2014) vorgenommen.



Abbildung 12 – Übersicht des zentralen Befliegungsgebiets mit SkyTEM-Messungen. Die drei roten Profillinien markieren die Lage entsprechender Schnitt-Darstellungen in Fugro (2014). Die Wasserschutz-zonen II und III benachbarter Trinkwassergewinnungsanlagen sind ebenfalls eingetragen.

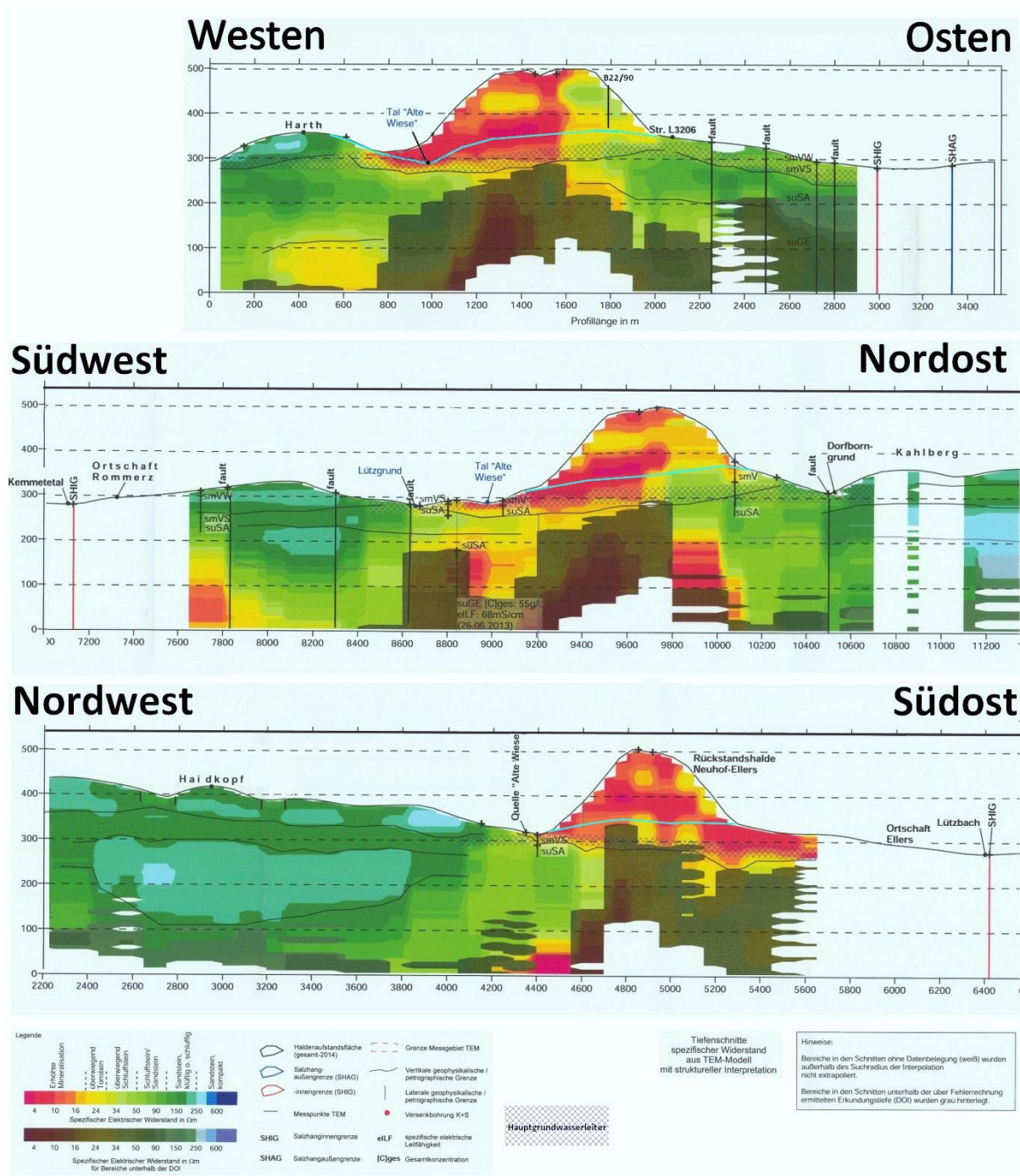


Abbildung 13 – Vom Verfasser neu zusammengestellte und interpretierte SkyTEM-Profile aus Fugro (2014). Die blaue Kreuzschraffur zeigt den Verlauf des Hauptgrundwasserleiters (Volpriehausen-Sandstein). Die türkisfarbene Linie markiert die Haldenbasis. Schnitt-Lagen siehe **Abbildung 12**.

Die SkyTEM-Profile (**Abbildung 13**) zeigen im Wesentlichen die gleichen Anomalien, wie sie auch durch die Gleichstrom-Geoelektrik festgestellt werden konnten. Auch hier sind besonders in den haldennahen Randbereichen diffuse Anomalien im Hauptgrundwasserleiter zu erkennen. Insgesamt ist die räumliche Auflösung enttäuschend schlecht, auch im Vergleich zu SkyTEM-Befliegungen anderer Kali-Regionen.

Fakten zur Hydrologie der Haldenkörper

Bestehende Anschauungen über den Innenaufbau von Kalihalden und insbesondere über deren „Halden-Hydrogeologie“, Wasserführung und hydraulische Verbindungen ins Grundwasser liegen mitunter noch weit auseinander, sind aber für viele Fragestellungen und Entscheidungen essentiell. Die vom Verfasser vertretenen Positionen in dieser Frage werden nachfolgend diskutiert und begründet.

Auswertung der Archie-Gleichungen im Hinblick auf Kalihalden

Die beiden Archie-Gleichungen für wasser-gesättigte und -ungesättigte Gesteine und ihre Parameter wurden bereits erörtert (s.o.). Um den Einfluss der Parameter und ihrer Kombinationen auf die spezifischen elektrischen Widerstände von Salzhalden zu untersuchen, wurden diese in einer Parameter-Studie systematisch variiert, und die Rechenergebnisse wurden dann in einem zweiten Schritt an realen Halden getestet. Hierfür standen insbesondere die beiden detailliert mit Gleichstrom-Geoelektrik vermessenen Halden Wintershall und Hattorf zur Verfügung (K-UTEC, 2021 a,b, c). Siehe **Abbildung 14** und **Anhang 2**.

In **Abbildung 14** fällt zunächst auf, dass die SkyTEM-Schnitte im Vergleich mit den bodengebundenen Gleichstrom-Messungen eine geringe Auflösung und Abbildungsschärfe aufweisen und daher für detaillierte Betrachtungen nicht geeignet sind. Gründe dafür sind unter anderem die geringere Messpunktdichte, zusätzlich erforderliche Korrekturen (z.B. Flughöhe, Neigung der Spulenachsen), steile Morphologie und wahrscheinlich auch ein nicht speziell für die Haldenkörper optimiertes Inversionsverfahren. Andererseits dürften die bodengebundenen, bei den Kalihalden Wintershall und Hattorf erzielten Ergebnisse auch auf die weitgehend gleichartige Kalihalde Neuhof-Ellers übertragbar sein. Die Halden zeigen insbesondere ähnliche Strukturen, beginnend mit einer Kernzone, die übergeht in eine Mantelzone, die wiederum in eine Böschungs-parallele Hülle übergeht.

Hinweis: Der Begriff „Mantelzone“ wird hier abweichend von der bei K+S gebräuchlichen Bedeutung verwendet. Dort reicht die Mantelzone außen bis zur Haldenkontur, soll selbst nicht gesättigt sein, und umfasst auch die wasserungesättigte Hülle im Sinne dieser Stellungnahme. – Hier wird unter Mantelzone der niedrig-ohmige, wassergesättigte Bereich zwischen dem ebenfalls gesättigten Kern und der nicht gesättigten Hülle verstanden.

Um die Archie-Gleichung mit Blick auf die Kalihalden auszuwerten, wurden die spezifischen Widerstände als Funktion der besonders interessierenden Wassersättigung S_w berechnet und in Diagrammen aufgetragen.

Dabei wurden folgende Parameter variiert:

- S_w Wassersättigung der Porenräume: $S_w = 0,05 \dots 1,0$
- m Zementationsexponent: $m = 1,3 \dots 2,5$
- Φ Porosität: $\Phi = 0,05 \dots 0,35$

Konstante Werte wurden angesetzt für:

- a Tortuositätsfaktor (Porenraumgeometrie): $a = 1,0$
- n Sättigungsexponent: $n = 2,0$
- R_f spezifischer Widerstand der Salzlösung: $R_f = 0,0513 \text{ } [\Omega\text{m}]$

Die systematisch variierten Parameterwerte decken die empirisch festgestellten Wertebereiche ab.

Für die konstant gehaltenen Parameter liegen folgende Überlegungen zugrunde:

- Der Tortuositätsfaktor a wird üblicherweise als empirischer Faktor mit $a = 1$ angenommen.
- Der Sättigungsexponent $n = 2,0$ gilt für gut benetzende Fluide, wie z.B. Salzlösungen in einer Salzmatrix.
- Der eingesetzte spezifische Widerstand der Salzlösung $R_F = 0,0513$ [Ωm] entspricht der elektrischen Leitfähigkeit einer gesättigten Haldenlösung von 195.000 μS/cm.

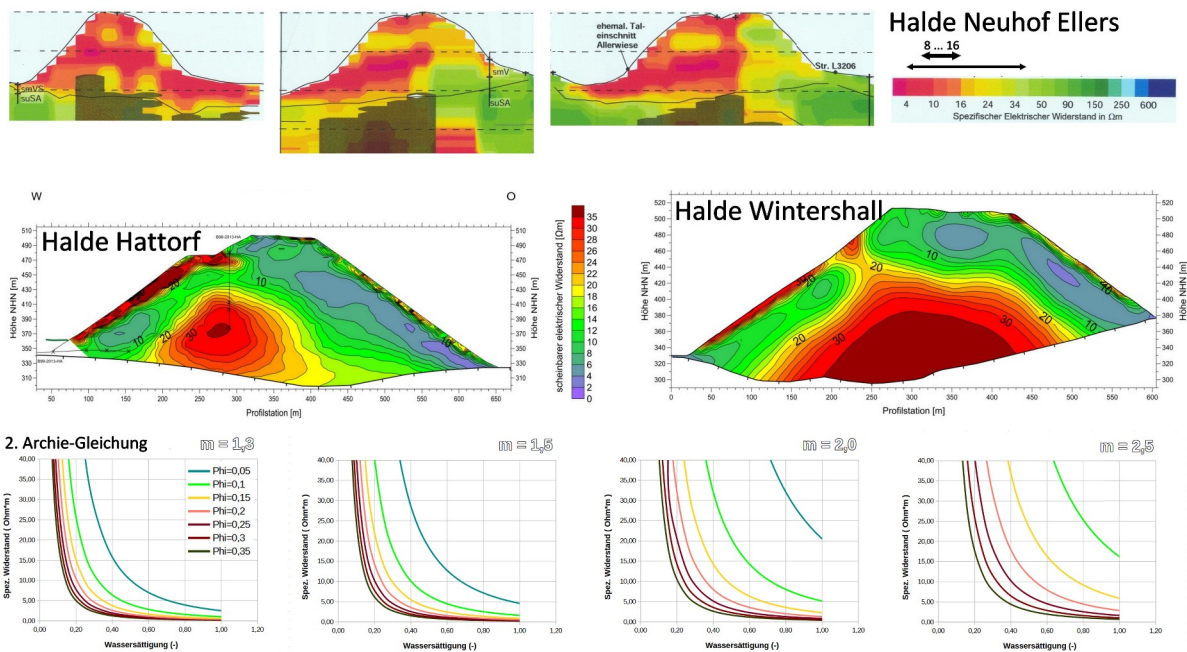


Abbildung 14 – Oben: Schnitte durch die Kalihalden Neuhoof-Ellers, Hattorf und Wintershall, mit den durch Inversion ermittelten Verteilungen der spezifischen elektrischen Widerstände. (Quellen: Fugro, 2014; K-UTEC, 2021 a,b). Unten: Ergebnisse der Parameterstudie. (Siehe Text).

In den Diagrammen (**Abbildung 14**, unten) wurden die spezifischen elektrischen Widerstände als Funktion bestimmter Wertekombinationen der Parameter berechnet und graphisch dargestellt. Die vier Diagramme für Zementationsexponenten von $m = 1,3$ bis 2,5 decken einen sehr weiten Bereich ab und zeigen für diskrete Porositätswerte von $\Phi = 0,05$ bis 0,35 die berechneten spezifischen elektrischen Widerstände als Funktion der (Teil-)Sättigungswerte mit Wasser, $S_w = 0,05$ bis 1,0.

Zementationsexponenten unter 2,0 sind typisch für unzementierte bis wenig zementierte Sedimente, während bei Rückstandshalden schon bei der Aufschüttung Rekristallisationsprozesse einsetzen die eine zunehmende Verfestigung und Verdichtung durch Zementation bewirken. Exponenten bis etwa 2,3 sind für gut zementierte Sandsteine und kristalline Kalksteine und Dolomite bekannt. Ähnliche und eventuell noch etwas höhere Exponenten werden auch für Rückstandshalden erwartet, so dass insbesondere die beiden

rechten Diagramme (**Abbildung 14**) herangezogen werden. Man beachte, dass für einen Exponenten von $m=2,5$ die Kurve für eine Porosität von $\Phi = 0,05$ bereits außerhalb des Diagrammbereichs liegt.

Die Diagramme (**Abbildung 14** unten) zeigen, dass die niedrigsten spezifischen Widerstände ($R \approx 0,5 \Omega\text{m}$), wie sie in den Mantelzonen (**Abbildung 14**, Mitte) beobachtet werden, nur bei mäßiger Zementation und noch hohen Porositäten und einer weitgehenden bis vollständigen Wassersättigung möglich sind. Da die niedrig-ohmigen Mantelzonen bis herab zur Haldenbasis reichen, ist eine Fortsetzung in den Untergrund und eine hydraulische Verbindung zum regionalen Grundwasser wahrscheinlich. Es ist an dieser Stelle unverständlich, weshalb die geoelektrischen Messungen und Auswertungen nicht auf den Bereich unterhalb und neben der Haldenbasis ausgedehnt worden sind und die bildlichen Darstellungen exakt an dieser Linie enden.

In den Haldenschnitten (**Abbildung 14**, Mitte) fällt weiter auf, dass die Haldenkerne und die oberflächennahen Bereiche, trotz bekannter deutlicher Unterschiede in Porosität bzw. Dichte, paradoxerweise ähnliche, hohe spezifische Widerstandswerte ($R = 20$ bis $40 \Omega\text{m}$) aufweisen. Eine einfache Erklärung ergibt sich aus den Diagrammen (**Abbildung 14**, unten), denn hohe spezifische Widerstände sind einerseits bei hohen Porositäten und geringer Wassersättigung (lockere äußere Hülle der Kalihalden) möglich, andererseits aber auch bei sehr kleinen Porositäten und vollständiger Wassersättigung (konsolidierter Kernbereich).

Somit zeigen die Widerstandsprofile klar folgenden Haldenaufbau:

- Die Halden bestehen aus einer konturnahen, etwa 10 bis 20 Meter dicken, böschungparallelen Hülle, die aus jüngeren Schüttungen von noch wenig zementierten und verdichteten Rückständen besteht und feucht, aber nicht wassergesättigt ist. – Hydrologisch eine ungesättigte Zone.
- Diese geht über in eine 50 bis teilweise 100 m dicke, böschungparallele Mantelzone, die mäßig zementiert und verdichtet ist, deren Porenraum aber im Wesentlichen wassergesättigt ist und die bis zur Haldenbasis und wahrscheinlich darüber hinaus reicht und mit dem regionalen Grundwasser in hydraulischer Verbindung steht. Dies impliziert, dass die Mantelzone einen Haldenwasserspiegel bzw. – damit identisch – einen Grundwasserspiegel hat.
- Nach einem fließenden Übergang folgt eine stark zementierte und konsolidierte Kernzone, die eine geringe, aber ebenfalls lösungsgesättigte Porosität aufweist. Es mag zutreffen, dass die in Poren der Kernzone gespeicherte Lösung nicht wesentlich an den stationären Strömungsprozessen teilnimmt. Der Lösungsinhalt der Poren unterliegt dennoch der Schwerkraft und übt einen hydrostatischen Druck $P_{hyd} = \rho \cdot g \cdot h$ aus (ρ = Dichte der Lösung ($1.200 \dots 1.300 \text{ kg/m}^3$), g = Erdbeschleunigung ($9,81 \text{ m/s}^2$), h = Höhe über Bezugsniveau (m)). Dies gilt auch dann, wenn die hydraulische Leitfähigkeit des Kerns gering ist.

Diese Befunde verdeutlichen, dass das von der Kaliindustrie verbreitete Bild vom Innenaufbau einer Kalihalde (Siehe unten) in wesentlichen Punkten nicht stimmen kann. Der Kern von Kalihalden kann nicht „trocken“ sein, wie in K-UTEC (2021a) für die Halde Wintershall behauptet wird. Die gemessenen Widerstände erfordern auch bei den geringen Porositäten des Haldenkerns lösungsgesättigte Porenräume.

Haldenbohrungen und Tunnel

Kalihalde NeuhoF-Ellers

Auf der Kalihalde NeuhoF-Ellers wurde 1990 am Ostrand des Haldenplateaus die Haldenbohrung B22/90 abgeteuft (Ansatzpunkt: +470,1 m NN, r3542850,6 h5592547,1). Die 95,6 m tiefe Haldenbohrung B22/90 endete etwa 8 m oberhalb der Aufstandsfläche der Halde und wurde später zu einer Inklinometermessstelle ausgebaut. In der Bohrung wurden in 15 m und in 44 m Teufe jeweils „*schwebende Spiegel von konzentrierten Salzlösungen angetroffen*“ (Diekmann, 2005). Die Laugenvorkommen wurden nachfolgend durch zwei weitere, wenige Meter entfernte Bohrungen (Grundwassermessstellen B21 und B23) hydrologisch untersucht.

Bohrung	Ansatzpunkt	Endteufe	Ruhewasserspiegel	Zweck
B22/90	+470,1 m NN	95,6	+455,1 m NN	Inklinometer
B23/90	+469,85 m NN	60	+429,3 m NN	GWM
B21/90	+470,05 m NN	25,9	+457,8 m NN	GWM

Der Gesamtwassergehalt der 20 untersuchten Kernproben (von B22/90) lag nach Diekmann (2005) bei ungefähr 10 Gew.-%, deren Dichte lag zwischen 1.900 bis 2.100 kg/m³, die von kompaktem Steinsalz liegt bei 2.200 kg/m³. Die Dichten der Kernproben entsprechen somit Porositäten von ungefähr 5 bis 14 Prozent (bzw. 0,05 bis 0,14 m³/m³).

Wenn man für das Rückstandssalz der Kernproben die von Diekmann (2005) angegebene Dichte zugrunde legt, entsprechen 10 Gewichtsprozent Wasser 190 bis 210 kg/m³, also einem Raumbedarf von ca. 0,19 bis 0,21 m³/m³. – Mit anderen Worten: der Porenraum muss (mehr als) gesättigt gewesen sein.

Der festgestellte Lösungsspiegel in ca. 15 m Tiefe markiert also den Beginn der Wassersättigung, und diese Tiefe korrespondiert bestens mit den geoelektrisch ermittelten Dicken der ungesättigten Hüllen (10 bis 20 m) der vergleichbaren Kalihalden Wintershall und Hattorf. Diekmann (2005) berichtet ferner, dass der obere Lösungsspiegel bei 15 m Teufe Ganglinien aufweist, die etwa um 2 Monate verzögert den jahreszeitlichen Niederschlagswerten folgen. Es handelt sich somit um den „Grundwasserspiegel“ des Haldenkörpers. Hingegen handelt es sich bei dem tieferen Lösungsvorkommen in 44 m Tiefe den Beschreibungen nach zu urteilen offenbar um wenig mobile Lösungen eines gesättigten Porenspeichers.

Kalihalde Hattorf

Am Böschungsfuß und auf dem Plateau der Halde Hattorf wurden mehrere Horizontal- bzw. Vertikal-Bohrungen durchgeführt und eingehend beschrieben (Poppitz, 2021; Artschwager et al., 2014; 2020).

Vertikalbohrungen	Ansatzpunkt	Endteufe	Ruhewasserspiegel	Haldenbasis
VB B1/80	+400,7 m NHN			
B 97/2013 HA	+414,0 m NHN	100 m	+368,90 m NHN	ca. +302 m NHN
B 98/2013 HA	+480,3 m NHN	102 m	+424,46 m NHN	ca. +320 m NHN
Horizontalbohrungen	Ansatzpunkt	Endteufe	Ausfluss	
HB Mitte/Süd B1/80				
B 99/2013 HA		101 m	11,5 L/min	
B 100/2013 HA		100 m	18 L/min	
B 104/2013 HA		117 m	20 L/min	

Bemerkenswert ist das Antreffen eines Wasserspiegels in den Vertikalbohrungen in 67 m bzw. 104 m über der Haldenbasis. Dies wird vom Verfasser als direkter Nachweis des Haldenwasserkörpers in einem gesättigten Porenraum angesehen.

Bei den Horizontalbohrungen ist vor allem das frei ausfließende Haldenwasser von Interesse. Die Berichte (Poppitz, 2021; Artschwager et al., 2014) sind zwar nicht explizit, doch ist anzunehmen, dass es sich bei den Lösungsaustritten um stationäre Abflüsse handelt.

An dieser Stelle sei bereits angemerkt, dass die im Labor bestimmten Lösungsreste, die in den Poren der gezogenen Bohrkerns noch enthalten waren, aufgrund der Druckluft-Bohr-Technik und der Probenahme-Technik keinerlei Signifikanz für die *in situ* Lösungsführung der Rückstandshalde haben können.

Kalihalde Wintershall

An der SE-Seite der Halde wurde nahe dem Haldenfuß auf +373,18 m NHN die „Horizontalbohrung“ B 72/2014 WI angesetzt und in Richtung 325° mit einer Neigung von 5,9° nach oben gebohrt. Aus der 131 m tiefen Bohrung wurden Wasseraustritte berichtet: *„In der Bohrung B 72/2014 WI wurden Wasserzutritte in das Bohrloch ab ca. 15 m festgestellt. Bis zur Bohrungsendteufe wurden Auslaufmengen aus dem Bohrloch zwischen < 1 l/min und max. 3 l/min gemessen. Im Trend ist ein leichter Anstieg der Auslaufmenge aus dem Bohrloch zu verzeichnen.“* (K+S, 2018). Auch bei diesem Bericht nimmt der Verfasser an, dass es sich bei den Lösungsaustritten um stationäre Abflüsse handelt.

Kalihalde Zielitz

Auch vom K+S-Standort Zielitz liegen Befunde aus zwei Haldenbohrungen auf der Plateau-Halde „Halde 2/HKE“ vor. In K+S (2019, Band 7) wird berichtet: *„Durch die Firma G F L-Dr. Lux Geophysikalische Fachberatung wurden zwei Vertikalbohrungen vom Haldentop der Halde 2 der K+S KALI GmbH, Werk Zielitz bis ca. 10 m unter GOK zur Klärung von Eingangsgrößen für geohydrologische und geomechanische Modellierungen ausgewertet (/ 1/ / 2/).“* Diese Bohrungen sind in 48,2 bzw. 45,8 m Teufe auf Lösungen gestoßen.

Die Halde 2 hat eine Höhe von ca. 120 m über Gelände, sodass der Lösungspegel dort ca. 75 m über der Haldenbasis steht. Da die Bohrungen bis ca. 10 m unter Geländeroberkante (GOK) reichen, müssen sie die Aufstandsfläche der Halde durchstoßen haben, und daher müssen die im Haldenkörper gespeicherten Lösungsvorkommen Kontakt mit dem Grundwasser unter der Halde haben und mit diesem ein hydraulisches Kontinuum bilden. Der in der Halde festgestellte Lösungspegel ist daher der Grundwasserspiegel.

K+S (2019, Band 7, Fachgutachten System Basisabdichtung) hat in diesem Zusammenhang konstatiert, dass das Haldenwasser auf bevorzugten Sickerwasserwegen zum Abfluss gelangt. In den Haldenbohrungen wurde festgestellt, dass hinsichtlich der vertikalen Durchlässigkeit Unterschiede innerhalb des Haldenkörpers auftreten, die nicht nur teufen- und damit kompaktions-bedingt sind, sondern auch von strukturellen Faktoren (gekennzeichnet durch teilweise auftretende schichtparallele / laterale Durchlässigkeiten) *„beeinflusst zu sein scheinen“*. Dies kann vom Verfasser gestützt werden, der bereits früher solche Wegsamkeiten an der gekappten Halde Ronnenberg und an der Halde Friedrichshall studiert und dokumentiert hat (**Anhang 2**). Neben steilen, Karstschlauch-artigen Gerinnen wurden auch böschungsparell geschüttete Groblagen als bevorzugte Wasserwegsamkeiten beobachtet. Die Verkarstungen wurden besonders im zentralen, stark kompaktierten Teil der Halde angetroffen, der also keineswegs „hydraulisch inaktiv“, sondern punktuell hoch durchlässig ist. Insgesamt ist für Rückstandshalden das Bild homogener Poren-Grundwasserleiter, die durch das Darcy'sche Gesetz beschrieben werden könnten, nicht ganz zutreffend und bei gewissen Fragestellungen irreführend. Es bestehen hingegen manche Analogien zu Karst-Grundwasserleitern (Krupp, 2018).

Tunnel durch Rückstandshalde Bleicherode

Diekmann (2005) berichtet: *„Zur Verbesserung der Haldenwasserfassung und -ableitung an der Rückstandshalde des stillgelegten Kaliwerkes Bleicherode wurde im Auftrag der Gesellschaft für Verwahrung und Verwertung stillgelegter Bergwerksstandorte (GW) von Nord nach Süd quer zur Längsrichtung durch die Halde ein begehrter Stollen im Rückstandssalz nahe der Haldenaufstandsfläche aufgeföhren. Damit bot sich erstmals die Möglichkeit, die Basis einer Großhalde durchgehend zu erkunden.“*

Weitere Details dazu finden sich auch in (Katzenbach, 2021). Demnach ist die Länge des durchschlägigen Tunnels zwischen den beiden Portalen 380 m. Das Haldenplateau liegt nur etwa 75 m über dem Gelände (und dem Tunnelniveau). Im Randbereich der Rückstandshalde beträgt der Durchlässigkeitsbeiwert $k_f = 2,8 \cdot 10^{-7}$ m/s, im Haldenkern liegen die ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerte bei max. $k_f = 2,4 \cdot 10^{-8}$ m/s bis min. $k_f = 4 \cdot 10^{-10}$ m/s.

„Dem Stollenvortrieb folgte ein Spritzbetonausbau mit etwa 20 m bis 30 m Entfernung zur Ortsbrust nach.“ (Katzenbach, 2021). Weitere Details zum Ausbau, beispielsweise zu Drainage-Vorkehrungen, sind nicht bekannt.

Trotz des zeitnahen Tunnelausbaus mit stahlbewehrtem Spritzbeton (warum eigentlich?) erfolgt aus dem Tunnel ein stetiger (stationärer) Abfluss von Haldenlösungen (Katzenbach, 2021; Bild 2).

Wasserandrang in horizontalen Haldenbohrungen und dem Haldentunnel

An dieser Stelle soll der Frage nachgegangen werden, mit welchen Wasserzuflüssen in den horizontalen Haldenbohrungen und in dem Haldentunnel in der Kalihalde Bleicherode zu rechnen ist, wenn der Haldenkörper (mit Ausnahme der ungesättigten Hüllschicht) lösungsgesättigt ist.

Zur Berechnung des stationären Wasserzuflusses unter Einwirkung eines hydraulischen Druckpotentials auf den Tunnel-Perimeter existieren analytische Lösungen (Butscher, 2012). Für Tunnelröhren ohne Ausbau kann die Formel nach El Tani (2003) verwendet werden. Ihre Lösung ergibt die Zufluss-Rate (Q_1) pro Einheitslänge (1 Meter) des Tunnels und kann grundsätzlich auch für Horizontalbohrungen verwendet werden:

$$Q_1 = \frac{2\pi k_{aq}(A+H)}{\ln\left(\frac{h}{r} + \sqrt{\frac{h^2}{r^2} - 1}\right)}$$

wobei

$$A = h(1 - \alpha^2)/(1 + \alpha^2)$$

und

$$\alpha = \frac{1}{r}(h - \sqrt{h^2 - r^2})$$

In der Formel ist H das hydraulische Potential am Top des Grundwasserleiters ($H = 0$ für ungespannte Verhältnisse), h ist die Tiefe des Tunnels unter dem Grundwasserspiegel und r ist der Radius des Tunnelquerschnitts.

In der **Tabelle 5** sind einige beispielhaft berechnete Zutrittsraten aufgeführt und in **Tabelle 6** sind gemessene Ausflussraten zusammengestellt (Daten aus Artschwager et al. 2014; Poppitz 2021; Katzenbach 2021).

Tabelle 5 – Berechnete Beispiele für Zutrittsraten in Horizontalbohrungen					
Bohrung / Tunnel	h (m)	r (m)	kf (m/s)	Endteufe (m)	Q1 (L/min)
B72/2014 WI	60	0,073*	$1,0 \cdot 10^{-7}$	131	43,7
	60	0,073*	$1,0 \cdot 10^{-8}$	131	4,37
	60	0,073*	$1,0 \cdot 10^{-9}$	131	0,437
Tunnel Bleicherode***	50**	1,5**	$2,8 \cdot 10^{-7}$	380	453,0
	50**	1,5**	$1,0 \cdot 10^{-8}$	380	16,2
	50**	1,5**	$1,0 \cdot 10^{-9}$	380	1,62

*) nach Kaliber-Log; **)Schätzwerte; ***)tatsächlich Spritzbeton-Ausbau

Tabelle 6 – Gemessene Werte für Trockendichte ρ_d , totale Porosität Φ und Ausflussraten Q				
	Endteufe (Tiefe) [m]	Dichte (ρ_d) [g/cm ³]	Porosität (Φ) [%]	Ausflussrate (Q) [L/min]
B99/2013-HA	101 (22)	1,65	22	11,5
B99/2013-HA	101 (95)	2,0	5	dto.
B100/2013-HA	100 (8)	1,4	34	18,0
B100/2013-HA	100 (100)	1,9	10	dto.
B104-2013-HA	117 (7)	1,5	30	18,75
B104-2013-HA	117 (106)	1,95	9	dto.
B72/2014-WI	131 (1)	1,4	35	1,8 – 2,5
B72/2014-WI	131 (105-126)	2,0	8	dto.

Ein Vergleich der berechneten (**Tabelle 5**) mit den empirisch bestimmten Ausflussraten (**Tabelle 6**) zeigt, dass bei den mittleren Durchlässigkeitsbeiwerten eine gute Übereinstimmung der Zutrittsraten mit den Ausflussraten gegeben ist. Man kann also feststellen, dass die stationären Ausflussraten nicht im Widerspruch zu einem im Wesentlichen lösungsgesättigten Porenraum im Haldenkörper stehen, sondern diese Annahme stützen. Dies impliziert, dass die hydraulischen Druckpotentiale an der Bohrlochwand durch die Höhe der Wassersäule (Lösungssäule) in der gesättigten Zone bestimmt sind.

Seismische p-Wellengeschwindigkeiten

Parallel zu den geoelektrischen Gleichstrom-Widerständen wurden an den Haldenkörpern Hattorf und Wintershall auch die Geschwindigkeiten refraktierter seismischer p-Wellen gemessen, die Aufschluss über die Dichte ρ und deren Verteilung im Haldenkörper geben können. (Hinweis: Der griechische Buchstabe Rho (ρ) wird an anderer Stelle auch als Formelzeichen für den spezifischen elektrischen Widerstand verwendet.)

Es bestehen folgende Beziehungen (Geophysik LMU München, 2025):

- Die *in situ* Dichte des porösen Gesteins/Rückstands (ρ_b) setzt sich zusammen aus der Fluidichte in den Poren (ρ_f) und der Matrixdichte (ρ_m), gewichtet mit der Porosität (Φ):

$$\rho_b = \rho_f \cdot \Phi + (1 - \Phi) \cdot \rho_m$$

Je poröser das Gestein, desto geringer ist die Dichte (solange $\rho_f < \rho_m$).

- Analog zu dieser Formel für die Dichte verhalten sich auch die seismischen p-Wellengeschwindigkeiten (v) (Wyllie-Gleichung):

$$1/v_b = \Phi/v_f + (1 - \Phi)/v_m$$

Je poröser das Gestein, desto langsamer sind die p-Wellen.

Für die beiden Kalihalden Hattorf und Wintershall liegen detaillierte Messungen der seismischen p-Wellengeschwindigkeiten und daraus berechnete tomographische Schnitte vor (K-UTEC, 2021 a, b, c) (**Abbildung 15**).

Aufgrund der Dichteabhängigkeit der Wellengeschwindigkeiten folgt aus den seismischen Profilen in **Abbildung 15**, dass in Kalihalden die Dichte-Verteilung im Wesentlichen mit der Höhe der Überschüttung korreliert. Die Porosität verhält sich zur Dichte invers.

Typische Werte für p-Wellengeschwindigkeiten (und zugehörige Dichten) verschiedener Gesteinstypen sind in **Tabelle 7** zusammengestellt. Ein Vergleich der Tabellenwerte mit **Abbildung 15** macht deutlich, dass die höchsten gemessenen p-Wellengeschwindigkeiten nahe der Haldenbasis den Werten von gewachsenem Steinsalz um $v_p = 4.500$ m/s nahe kommen. Andererseits sind Werte von $v_p > 2.000$ m/s in ungesättigten Gesteinen nicht zu finden.

Aus den gemessenen Werten der p-Wellengeschwindigkeiten folgt weiter, dass nur die äußersten Hüllen der Kalihalden, mit Geschwindigkeiten unter 2.000 m/s als ungesättigt an Haldenwasser interpretiert werden können.

Im Unterschied zur Verteilung der p-Wellengeschwindigkeiten zeigen die elektrischen Widerstände eine ganz andere Zonierung. Wie bereits dargelegt (Siehe oben) hängen die elektrischen Widerstände von der Wassersättigung der Porenräume und der Zementation ab

und zeigen, außer für die periphere Hüllschicht, eine vollständige Wassersättigung für den gesamten restlichen Haldenkörper an.

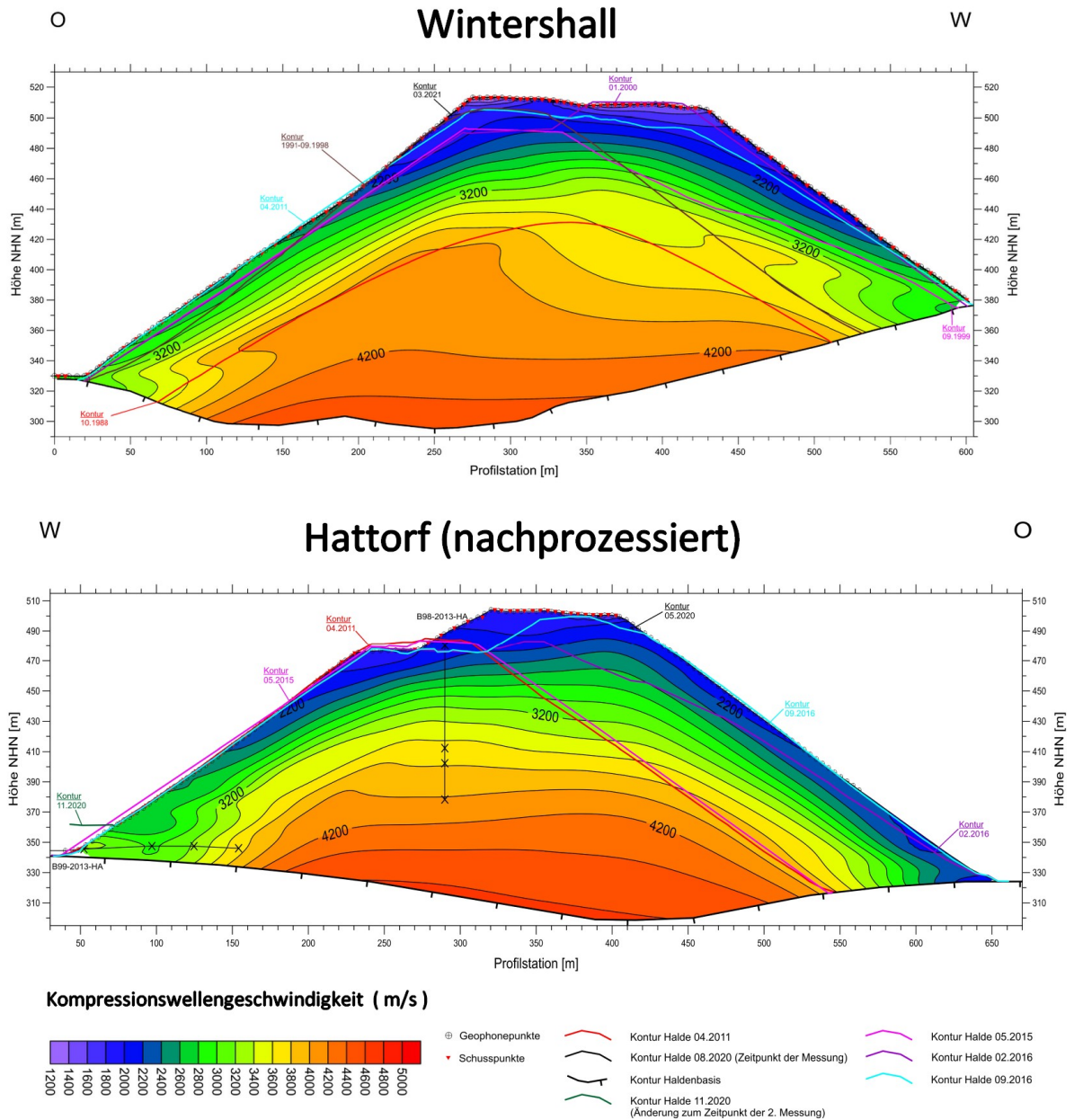


Abbildung 15 – Verteilung der Kompressionswellengeschwindigkeiten innerhalb der Haldenkörper Wintershall und Hattorf. Im unteren Schnitt sind auch die Spuren der beiden Haldenbohrungen B98/2013 HA und B99/2013 HA eingetragen. Nach K-UTEC (2021 a, b, c)

Tabelle 7 - p-Wellengeschwindigkeiten und Dichten			
Gestein, Material	vp (m/s)	ρ (kg/m³)	Referenz
Steinsalz (Na ₂ , Na ₃)	4.500	2.100	K-UTEK et al. (2009)
Speisesalz (Na ₂ S) Asse	4.140 ... 4.730	2.170 ... 2.205	IfG (2016)
Salz	4.500 ... 5.500		GPG (2017)
Anhydrite	4.000 ... 5.500		GPG (2017)
Kalksteine	3.500 ... 6.000		GPG (2017)
Dolomite	3.500 ... 6.500		GPG (2017)
Tone, Tonsteine, gesättigt	1.100 ... 2.500		GPG (2017)
Sandsteine, porös, gesättigt	2.000 ... 3.500		GPG (2017)
Sand (trocken)	200 ... 1.000		Igel (2012)
Sand (feucht)	1.500 ... 2.000		Igel (2012)
Sand (wasserungesättigt)	100 ... 600		Terrana (2025)
Sand (wassergesättigt)	1.500 ... 1.800		Terrana (2025)
Sand (trocken)	400 ... 1.200		GPG (2017)
Sand (nass)	1.500 ... 2.000		GPG (2017)
Kies (wasserungesättigt)	750 ... 1.250		Terrana (2025)
Schotter (wassergesättigt)	1.500 ... 2.000		Terrana (2025)
Löss, Lehm	300 ... 600		Terrana (2025)
Lehm, steinig bis stark steinig	500 ... 1.200		Terrana (2025)
Oberflächennahe Verwitterungszone	100 ... 500		Terrana (2025)
Ackerboden	300 ... 700		GPG (2017)
Luft	343		GPG (2017)
Wasser	1.450 ... 1.500		GPG (2017)

Kanadische Kalihalden

Von kanadischen Kalihalden sind die gesättigten Haldenwasserkörper gut bekannt und beschrieben (z.B. Haug & LePoudre, 2006). Anders als in Deutschland werden in Saskatchewan Kalihalden teilweise aufgespült („*spigotting*“), so dass bereits gleichzeitig mit der anwachsenden Halde ein Haldenwasserkörper („*brine mound*“) entsteht (**Abbildung 16**). Bei den deutschen Kalihalden entsteht ein vergleichbarer Haldenwasserkörper durch Restfeuchte und einsickernde Niederschläge erst nach und nach, bis ein stationärer Gleichgewichtszustand (Eintragsrate = Austragsrate) erreicht ist. Wie bei den kanadischen Kalihalden wirkt der sich aufbauende Porenwasserdruck destabilisierend auf die Haldenböschungen. Soweit hier bekannt, werden in Deutschland weder Standsicherheitsnachweise verlangt, die den sich aufbauenden Porenwasserdruck berücksichtigen, noch findet ein Monitoring der Porendrücke bzw. Haldenwasserspiegelmhöhen statt.

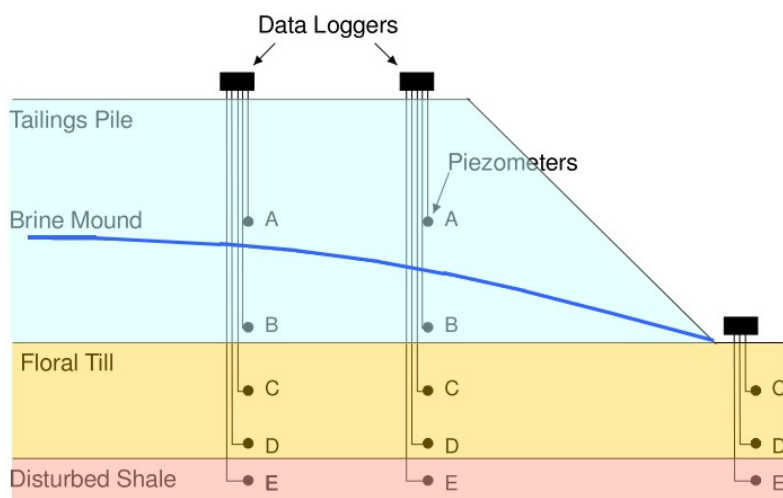


Abbildung 16 – Anordnung von Piezometern in einer Kalihalde (*Tailings Pile*) zur Überwachung des Haldenwasserspiegels (*Brine Mound*) und der Porenwasserdrücke. (Nach Haug und LePoudre, 2006)

Zeitliche Veränderungen des Haldenkörpers

Unmittelbar nach der Aufschüttung der angefeuchteten Fabrikrückstände ist deren mobiler Wasseranteil (ca. 6 bis 8 Masseprozent) für die Haldenwasserbildung dominierend. Betrachtet man hingegen die Haldenwasserbildung über die gesamte Standzeit der Halde von einigen tausend Jahren, so sind besonders die einsickernden Niederschläge von Bedeutung, indem sie nach und nach die Rückstandshalde auflösen, sich dabei an NaCl aufsättigen und zugleich die Nebenbestandteile (Reste von Kalium-, Calcium-, Magnesium- und Sulfat-Salzen) auslaugen.

Soweit auch diese Nebenbestandteile Sättigungskonzentrationen erreichen, können auch neue Salzminerale dieser Komponenten auskristallisieren und Porenräume im Haldenkörper ausfüllen. Dieser Vorgang ist jedoch kompliziert und mit Umlösungsreaktionen verbunden, durch welche auch Natriumchlorid in signifikanten Mengen um- und auskristallisiert. Die Verdichtung des Haldenkerns ist maßgeblich auf diese Umlöseprozesse zurückführbar, wobei der Auflastdruck eine zusätzliche Verdichtung des Korngefüges bewirkt. (Vgl. Krupp, 28.03.2022).

Grundsätzlich waren Verdichtungen des „Haldenkerns“ nie strittig, doch wurden von der Industrie wenig realistische Modelle vorgeschlagen, die nur zwischen einem nicht wasserdurchlässigen Kern und einem durchlässigeren Mantelbereich unterschieden haben. Die nachgewiesenen Verdichtungen sind jedoch graduell und treten dort auf, wo sich die ausgelaugten Nebenbestandteile (Mg, Ca, K, SO₄) bis zur Sättigung entsprechender Mineralphasen angereichert haben. Demnach müssen die Haldensickerwässer an diese Orte über Fließwege hingelangt sein, wobei die Bereiche ohne Basisabdichtung für die Strömung „wegweisend“ waren/sind. Ein angeblich hydraulisch nahezu absolut dichter Haldenkern über der dichtungslosen Basis der Bestandshalde ist daher nur eine nützliche Zweckbehauptung. Verdichtungen durch Zementation können auch erst nach einer gewissen Zeit entstehen, und nur dort wo Lösungen Zugang finden.

Für den Aufbau eines Haldenwasserkörpers ist die Entwicklung und Verteilung der Porosität und Permeabilität von Bedeutung. Bei gegebenen Wassereinträgen durch die Haldenoberfläche steigt der Haldenwasserpegel um so schneller, je geringer der aufzufüllende Porenraum ist und je geringer der Abfluss aus dem Haldenkörper (z.B. durch Haldenbasis) ist. Die gewölbte Form des Haldenwasserspiegels (Brine Mound) wird durch die Permeabilität bestimmt. Als Folge des Darcy'schen Gesetzes gilt: Je geringer durchlässig der Haldenkörper ist, desto steiler ist die Aufwölbung des Wasserspiegels.

Zusammenfassung und Kritik

BREFs („Best Available Techniques Reference Documents“)

Haldenmodelle für Kalihalden fanden sich lange Zeit auch in den BREFs der Europäischen Kommission. BREFs, also *Best Available Techniques (BAT) Reference Documents*, werden von der Europäischen Kommission auf Grundlage von Artikel 3(11) der Richtlinie 2010/75/EU erstellt und veröffentlicht und „sind das Ergebnis eines Informationsaustauschs zwischen Experten aus den EU-Mitgliedstaaten, den betroffenen Industriezweigen, Nichtregierungsorganisationen, die sich für den Umweltschutz einsetzen, und der Europäischen Kommission“ (EU 2018).

Das aktuelle MWEI BREF für die *Bewirtschaftung von Abfällen aus der mineralgewinnenden Industrie* (EU 2018) ist eine Überarbeitung des älteren MTWR BREF zum *Management of Tailings and Waste-Rock in Mining Activities* (EU 2004, 2009). Diese letzteren Versionen sind auf seltsame Weise fast spurlos aus dem Internet getilgt worden, insbesondere von den offiziellen Websites. Im aktuellen BREF (EU 2018) ist kein Kalihalden-Modell mehr enthalten.

Rechtlich verbindlich sind ohnehin nur die Kriterien für die Ermittlung der besten verfügbaren Technik in Anhang III der Richtlinie 2010/75/EU, für Kategorien von Tätigkeiten nach Artikel 10 im Anhang I. Einschlägig ist hier Ziffer 4.3 des Anhangs, also die *Herstellung von phosphor-, stickstoff- oder kaliumhaltigen Düngemitteln (Einnährstoff- oder Mehrnährstoffdünger)*. Der Anhang III der Richtlinie 2010/75/EU spezifiziert weiter, wie die Legaldefinitionen der „Besten Verfügbaren Technik“ (BVT bzw. BAT) zu verstehen und anzuwenden sind. Dort werden insbesondere Kriterien zur Nachhaltigkeit vorgeschrieben, und daher ist die in bergrechtlichen Genehmigungsverfahren oft praktizierte Gleichsetzung der BVT mit dem „Stand der Technik“ sachlich unzutreffend und rechtlich nicht zulässig.

Haldenmodelle der Kali-Industrie

Abbildung 17 reproduziert ein schematisches, aber in vielen Punkten unzutreffendes Bild von Kalihalden. Die Darstellung stammt aus den älteren MTWR BREFs (EU, 2009; Vgl. EU (2004); UBA, 2025) und wurde, genau so wie die meisten anderen Angaben zum Kalibergbau in Deutschland, nachweislich von K+S „beigetragen“ und kann als klassisches Beispiel für Industrie-Lobbyismus gelten. Praktischerweise kann dieses suggestive Haldenmodell, unter Verweis auf die „BREFs“ der EU-Kommission und die noch nicht aktualisierte Fassung beim UBA (2025), bei jeder Gelegenheit quasi als „offizielle Referenz“ dargestellt und benutzt werden. Dies kann insbesondere für Genehmigungsverfahren hilfreich sein. Im aktuellen MWEI BREF der EU (2018) ist die Abbildung des Kalihaldenmodells allerdings nicht mehr enthalten, und die sonstigen Informationen über die Kaliindustrie sind im Wesentlichen auf Banalitäten reduziert worden, ohne Bezug auf die Nachhaltigkeitskriterien in der Richtlinie 2010/75/EU.

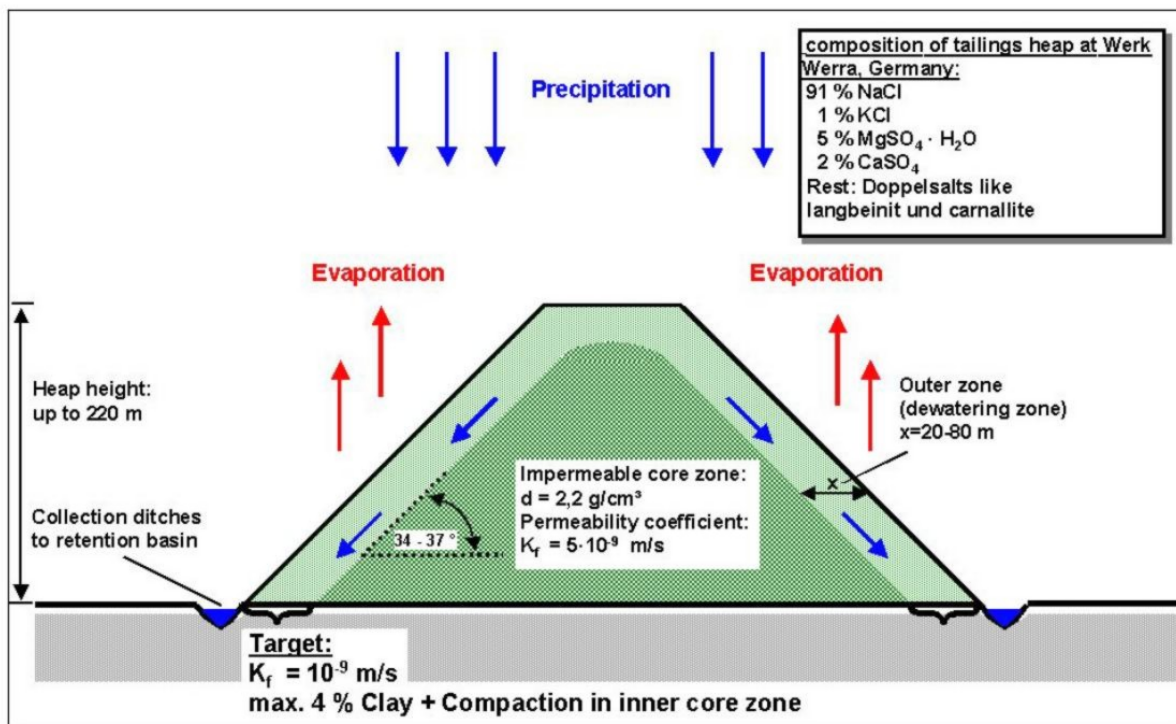


Abbildung 17 – Von der Kali-Industrie vorgeschlagener Aufbau von Kalihalden (aus EU, 2009)

Mittlerweile hat die Kali-Industrie ein Nachfolgemodell für Kalihalden entwickelt, das in **Abbildung 18** wiedergegeben ist.

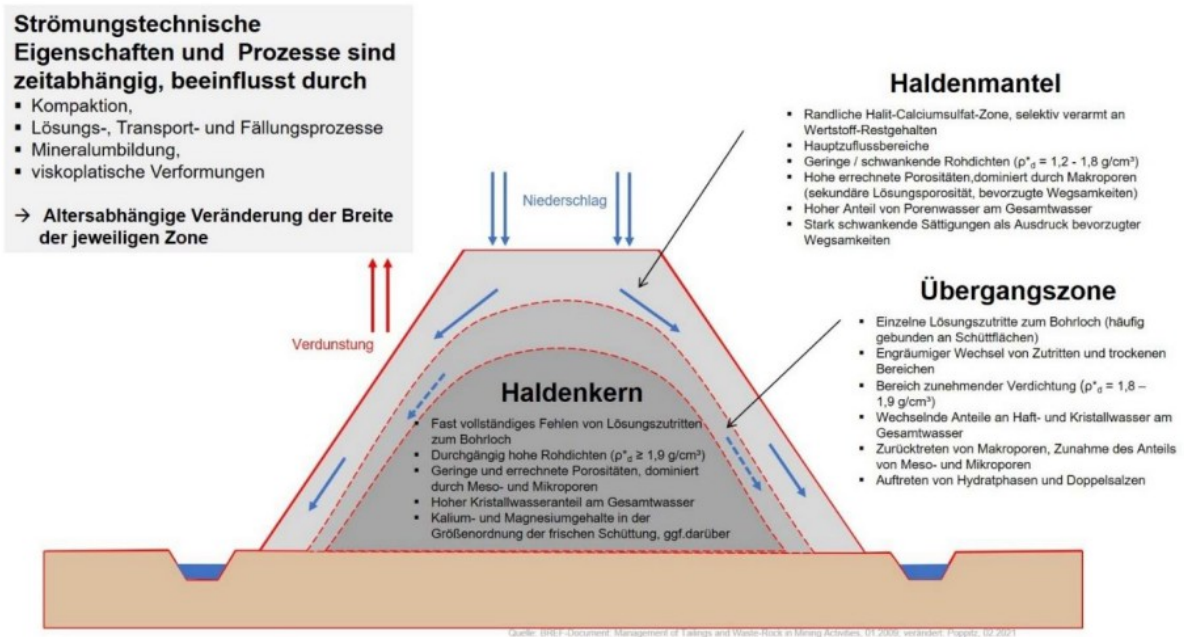


Abbildung 18 – Neues schematisches Haldenmodell der Kali-Industrie (Aus Artschwager et al. (2020; Abb. 5-10)

Nach Auswertung aller vorgenannten Daten und Fakten sollte nun außer Frage stehen, dass Kalihalden in wichtigen, nachfolgend adressierten Punkten weder dem in **Abbildung 17** noch dem in **Abbildung 18** gezeichneten Bild entsprechen.

Besonders kritikwürdig sind die folgenden Punkte:

Zonengliederung

Die in den Haldenbohrungen ermittelten Wertebereiche für die Dichten, Porositäten und hydraulische Leitfähigkeiten werden als im Wesentlichen zutreffend angesehen, soweit es um die porösen Partien geht, die dem Darcy'schen Gesetz folgen. Sie decken sich mit entsprechenden Werten, wie sie beispielsweise auch von Katzenbach (2021; S. 37) als Kriterien für die Einteilung von Rückstandshalden in „Haldenmantel, Übergangszone und Haldenkern“ vorgeschlagen wurden:

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

Allerdings stimmt diese Aufteilung in 3 Zonen geometrisch nicht mit den geoelektrischen und seismischen Befunden überein (Katzenbach (2021; Bilder 18 und 23) bzw. K-UTEC (2021)):

- Erstens existieren keine Grenzen zwischen den Zonen, sondern fließende Übergänge.
- Zweitens sind die beiden durch Kompaktion beeinflussten und voneinander abhängigen Parameter Dichte und Porosität nicht in gleicher Weise mit der hydraulischen Durchlässigkeit (k_f -Wert) gekoppelt, die auch stark von der Zementierung abhängt.
- Drittens sind die drei genannten Parameter nicht alle Böschungs-parallel zoniert, wie die seismischen und elektrischen Schnitte belegen.
- Viertens werden die hydraulisch sehr wichtigen Verkarstungen des Haldenkörpers völlig ignoriert.

Isolierte Betrachtung des Haldenkörpers

Die Halden werden von der Kaliindustrie als isolierte technische Objekte behandelt und dargestellt, die scheinbar keine Wechselwirkungen mit ihrer Umgebung und dem Untergrund, insbesondere nicht mit dem Grundwasser haben. Diese beschränkte Sicht setzt sich auch in allen Untersuchungen an Kalihalden fort, wie beispielsweise die an der Haldenbasis endenden Darstellungen der geoelektrischen und seismischen Messungen (**Abbildungen 14 und 15**) demonstrieren, oder die Haldenbohrungen, die wenige Meter über der Aufstandsfläche enden, oder die propagierten Haldenmodelle (**Abbildungen 17 und 18**). Dabei sind gerade diese systematisch ausgeblendeten „Tabu-Zonen“ von größtem Interesse für die Auswirkungen der Kalihalden auf die Umwelt.

Wassergehalte

Als höchst problematisch werden die Wassergehalts- oder Feuchteangaben für Rückstände und Haldenkörper angesehen, weil bereits die Probenahme-Technik großen Einfluss darauf hat. Insbesondere die an Bohrkernen nachträglich im Labor bestimmten Wassergehalte sind weitgehend unbrauchbar, weil bereits beim Bohrverfahren eine Druckluftspülung zum Einsatz kommt, wodurch Porenwasser unkontrolliert verdrängt wird, sowohl im Haldenkörper wie auch im Bohrkern. Auch nach der Kerngewinnung kann verbliebenes Porenwasser aus den Kernen noch austreten (entwässern, ausschwitzen) und es kann zu Austrocknungsprozessen, oder je nach Wetterlage umgekehrt zur hygroskopischen Wasseraufnahme kommen. Aus diesem Grund sind solche Wassergehalts-Bestimmungen und alle darauf beruhenden Berechnungen nicht aussagefähig und abgeleitete Aussagen sind nicht valide.

Auch häufig verwendete Bezeichnungen zur Beschreibung von Bohrkernen wie „trocken / erdfeucht / feucht / wassergesättigt / nass“ sind subjektiv und verkennen, dass diese Angaben nichts über die ungestörte *in situ* Wassersättigung vor Beginn der Bohrung aussagen. Angaben zu laborativ bestimmten Wassergehalten und davon abhängigen Angaben zur Porosität, zur Wassersättigung sowie zu Permeabilitäten sind daher, soweit es um die Klärung hydrologischer Sachverhalte bei Kalihalden geht, nicht repräsentativ und nicht verwendbar, unabhängig davon wie sorgfältig bei den Untersuchungen der Kernproben im Labor gearbeitet wurde. – Aussagefähig sind Ergebnisse *in situ* durchgeführter hydraulischer Bohrloch-Tests und geophysikalischer Bohrloch-Logs, nach Abklingen der Stör-Effekte, insbesondere durch Bohrungen mit Druckluft-Spülung.

Diesen eigentlich naheliegenden Zusammenhängen zum Trotz und ohne jede Beachtung entgegenstehender Tatsachen (s.o.) schreibt Poppitz (2021) auf Grundlage ihrer Bohrkern-Analysen: *„Unter Berücksichtigung aller Ergebnisse wurden die Strömungs- und Alterationsprozesse im Rückstand beschrieben. Die maßgebliche Erkenntnis im Hinblick auf das Strömungsgeschehen im Haldenkörper ist, dass in dessen Porenraum keine Sättigung besteht und dieser in allen Bereichen mit einem Gemisch aus Lösung und Luft gefüllt ist, so dass die Gesetzmäßigkeiten der Zweiphasenströmung maßgeblich sind. Die bislang zur Bewertung von Strömungsprozessen üblichen Durchlässigkeitsbeiwerte sind damit ungeeignet, da sie für gesättigte Bereiche gelten.“* – Diesen Behauptungen von Poppitz (2021) ist wegen ihrer ungeeigneten Untersuchungsmethoden einerseits und wegen allen entgegenstehenden, oben erörterten Tatsachen andererseits zu widersprechen.

Haldenwasserkörper und Wassersättigung

Die oben (S. 29 ff) vom Verfasser angestellten Berechnungen und Auswertungen zur Wassersättigung und zum Wasserandrang, sowie die beschriebenen direkten Nachweise eines Wasserspiegels in Haldenbohrungen an verschiedenen Standorten haben übereinstimmend gezeigt, dass im Inneren der Halden (Kern und Mantelbereich) ein zusammenhängender gesättigter Porenraum und damit ein der Schwerkraft unterliegender Haldenwasserkörper existiert, und dass nur in der oberflächennahen Hülle der Kalihalden ein ungesättigter Porenraum vorliegt. Der Wasserspiegel, der die Grenzfläche zwischen der gesättigten zur ungesättigten Zone bildet, ist somit die einzige Unstetigkeit (sprunghafte Grenze) innerhalb einer Kalihalde, alle anderen Übergänge sind fließend.

Die Existenz eines kohärenten, den Porenraum vollständig ausfüllenden Haldenwasserkörpers, welcher der Schwerkraft unterliegt und mit dem regionalen Grundwasser in einem hydraulischen Kontakt steht, ist somit eine erwiesene Tatsache. Die vom kohärenten Haldenwasserkörper übertragenen hydraulischen Drücke ins haldennahe Grundwasser erklären zwanglos, bzw. sind Voraussetzung für die beobachteten Haldenwasser-Ausbreitungen, insbesondere auch entgegen der regionalen Grundwasserströmung. Dabei ist es für die Druckübertragung unerheblich, wie groß oder klein im Haldeninneren die Durchlässigkeitsbeiwerte (k_f -Werte) sind. Erklärungsbedürftig sind hingegen die Narrative der Kali-Industrie, insbesondere aufgrund welcher physikalischen Gründe poröse Haldenkörper aus Salz sich hydraulisch anders als Berge ähnlicher Größe aus gewöhnlichen porösen Gesteinen verhalten sollten.

Realitätsnahes Kalihalden-Modell

Ein vom Verfasser entwickeltes generisches Haldenmodell ohne Widersprüche zu bekannten Fakten und Naturgesetzen ist in **Abbildung 19** skizziert. Das Modell zeigt und vereint wesentliche Merkmale von verschiedenen Haldenstandorten, insbesondere:

- Die Verfüllung von Tälern und Vorflutern, z.B. Neuhof-Ellers (Altewiese), Hattorf (Kreuzgraben), Wintershall (Zinkesgraben, Heergraben), Sehnde (Billerbach) mit Rückstandsalzen führt zu einem unmittelbarer Kontakt der Haldenbasis mit dem

Grundwasser, insbesondere dann/dort, wo ein Grundwasserleiter an der Aufstandsfläche ausbeißt.

- Nach Überschüttung der Vorfluter erfolgt ein Anstieg des Grundwasserspiegels und die Bildung einer lösungsgesättigten Zone im Inneren des Haldenkörpers, die zuletzt im stationären Gleichgewicht mit neugebildetem Haldenwasser aus Niederschlägen steht.
- An der Haldenkontur verbleibt eine dünne ungesättigte Hüllschicht, in der Niederschlagswasser sich zunächst mit NaCl aufsättigt und Nebenbestandteile (Sylvin, Kieserit, etc.) auslaugt, bis deren Komponenten ggf. auch Sättigungswerte für weitere Mineralphasen erreichen.
- Ein Teil des hauptsächlich aus Niederschlägen gebildeten Haldenwassers fließt oberflächlich oder innerhalb der ungesättigten Hüllschicht ab und wird einstweilen (solange das Bergwerk noch aktiv ist) mehr oder weniger unvollständig im Ringgraben um die Halde gesammelt und von dort aus „entsorgt“.
- Der verbleibende Teil des gebildeten Haldenwassers, welcher den Haldenwasserspiegel erreicht und weiter in den Haldenkörper einströmt, löst weiterhin NaCl und Nebenbestandteile des Rückstands auf. Diese Umlöse-Reaktionen führen bei Erreichen von Sättigungskonzentrationen von Na, K, Mg, Ca und/oder SO₄ zur Kristallisation neuer Phasen (auch NaCl), wodurch der Lösungsschemismus invarianten Punkten im Phasensystem zustrebt. Die Rekristallisation von NaCl und Neubildung von meist Kristallwasser-haltigen Phasen verringern den Porenraum (Erhöhung der Dichte) und die Permeabilität des Haldenkörpers und führen insgesamt zur Bildung einer stark zementierten Kernzone.
- Der interne Abfluss der Haldenwässer erfolgt nur teilweise über verbundenen Porenraum, der oft aus Böschungs-parallelen grobporigen Schüttungslagen im Rückstandssalz gebildet wird. Ein weiterer Abfluss erfolgt über Risse und vereinzelte lokale, aber sehr wirksame schlauchartige Verkarstungen, wie sie von abgetragenen Kalihalden gut bekannt sind.
- Durch den Anstieg des Wasserspiegels im Haldenkörper, vom ehemaligen Vorflut- und Grundwasserspiegel-Niveau bis hinauf zum Niveau des Haldenwasserspiegels, entsteht ein zusammenhängender gesättigter Porenwasserkörper. Dieser unterliegt der Schwerkraft (hydraulischer Potentialberg) und erhöht im Einflussbereich der Halde den hydrostatischen Druck im Untergrund, insbesondere im Hauptgrundwasserleiter (HGWL). Dadurch entstehen radial von der Halde ins Umfeld gerichtete Druckgradienten und in deren Folge Strömungen. In Haldennähe sind somit Strömungen und mit diesen ein Salztransport auch entgegen der regionalen Grundwasserströmung möglich.
- Nach Überschüttung der Vorfluter und der damit verbundenen Anhebung des Wasserspiegels entsteht ein direkter hydraulischer Kontakt zwischen dem Grundwasserleiter und dem Haldenkörper. In der Folge wird die Haldenbasis permanent durch Süßwasser angeströmt, wodurch die Halde von unten her abgelaugt (*quasi* subrodiert) wird.
- Durch Salzauflösung entstehende Hohlräume werden kollabieren und an der Haldenoberfläche dolinenartige Einbrüche und Schlucklöcher entstehen lassen, welche selbst wiederum Ansatzpunkte für eine weitere Oberflächenerosion bilden. Aufgrund dieser Vorgänge können Haldenabdeckungen keinen Bestand haben.

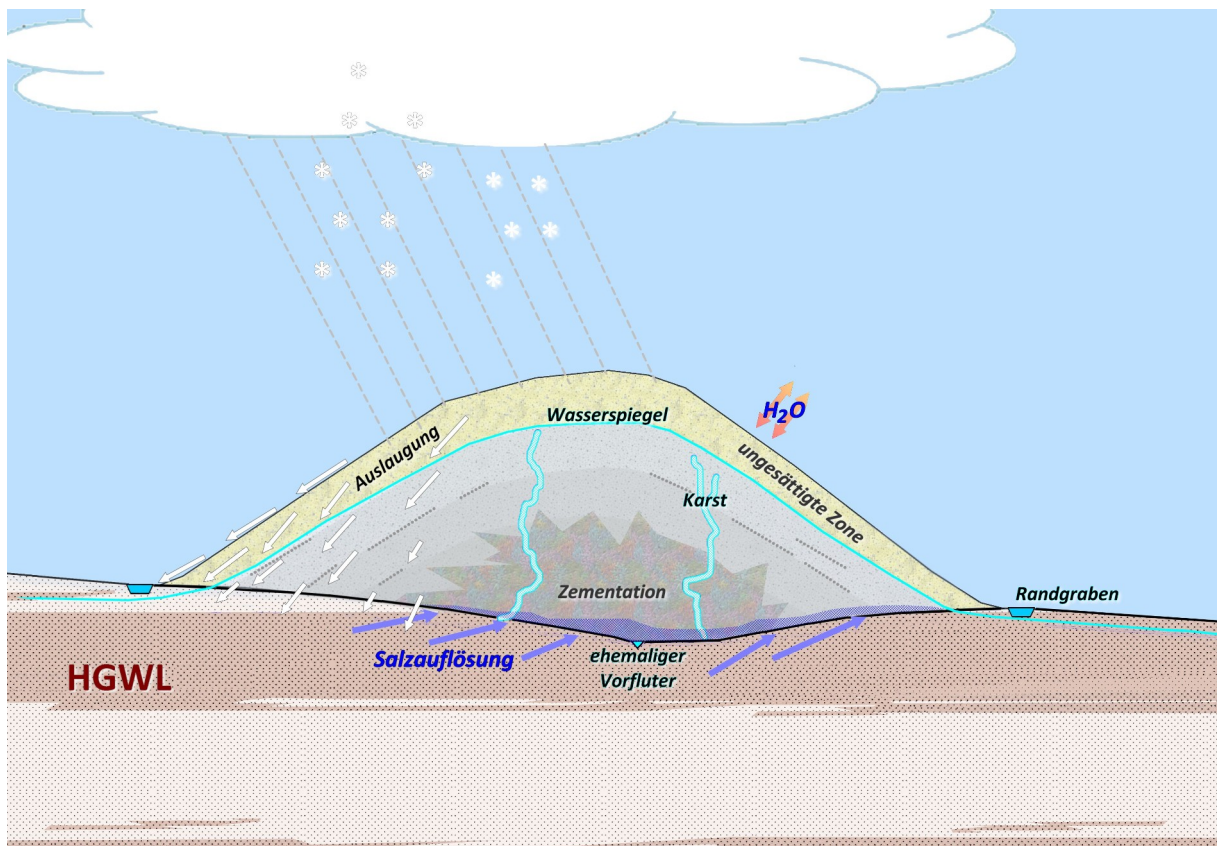


Abbildung 19 – Neues Haldenmodell des Verfassers. HGWL: Hauptgrundwasserleiter; H₂O: wetterabhängige hygroskopische Kondensation von Luftfeuchte bzw. Verdunstung.

Geochemie

Grundlagen

Die geochemischen Messwerte von Wasserproben sind unmittelbare quantitative Indikatoren für das Ausmaß der Versalzenungen und ermöglichen, abhängig von den bestimmten Parametern, auch spezifische Aussagen zur Herkunft und Entwicklung der Lösungen. Methodisch gesehen betrachtet man einerseits Zeitreihen einzelner Messstellen (x/t-Diagramme), welche zeitliche Veränderungen der Salzgehalte anzeigen und andererseits Korrelationsdiagramme (x/y-Plots) von Konzentrationen verschiedener Inhaltsstoffe („Ionen“), deren Verhältnisse (Geradensteigungen) als chemische Signaturen („Fingerabdrücke“) dienen und Vergleiche zwischen verschiedenen Messstellen und Lösungstypen ermöglichen.

Geochemische Systematik der Salzwässer

Auf Grundlage der charakteristischen Zusammensetzungen diverser natürlicher Wässer und Kaliabwässer konnte eine Systematik erarbeitet werden, mit deren Hilfe eine Diskriminierung unterschiedlicher Wasser-Typen sowie Aussagen zur Genese von Wasserproben möglich sind. Als nützlich haben sich u.a. die Plots von Br/Cl, Na/Cl, Na/K, Mg/SO₄, für spezielle Fragestellungen auch Ca/Mg und Ca/SO₄ erwiesen. Verschiedene theoretisch begründete Modellkurven (stöchiometrische Ionenverhältnisse, Gleichgewichtskurven, Extremwerte) sind wichtige Bezugsgrößen bei der Interpretation der empirischen Analysen-Daten. Die ausführlichen Hintergründe für die genetischen Deutungen wurden vom Verfasser bereits mehrfach in Gutachten erläutert (z.B. Krupp 2013, 2018, 2022, 2023), auf die verwiesen wird

Mischlösungen zwischen Endgliedern binärer Mischungsreihen können in Konzentrations-Diagrammen (x/y-Plots) anhand linearer Trends erkannt und genetisch interpretiert werden. Ein häufiger Sonderfall von Mischlösungen sind solche von (fast) reinem Wasser mit hoch mineralisierten Salzlösungen (Verdünnungsreihen), deren Trends jeweils zum Ursprung der x/y-Plots verlaufen. Seltener werden auch Reihen konzentrierter Salzlösungen unterschiedlicher Zusammensetzung beobachtet, die auch Reaktionspfade abbilden können und dann keine reine Mischungslinien sind.

Die zu beurteilenden natürlichen Wässer, Mischwässer und Kali-Abwässer decken oft enorme Konzentrationsspannen von fast 6 Größenordnungen ab, was zu Darstellungsschwierigkeiten in linear skalierten Diagrammen führt, doch logarithmische oder andere Achseneinteilungen erschweren genetische Rückschlüsse und werden daher vermieden.

Chemische Zusammensetzung beteiligter Mineralphasen

Die folgende **Tabelle 8** gibt eine Übersicht über die hier wichtigen Salzminerale und die jeweiligen chemischen Formeln.

Tabelle 8 - Salzminerale	
Halit (Steinsalz)	NaCl
Sylvin	KCl
Carnallit	KCl · MgCl ₂ · 6H ₂ O
Kainit	KCl · MgSO ₄ · 3H ₂ O
Thenardit	Na ₂ SO ₄
Mirabilit (Glaubersalz)	Na ₂ SO ₄ · 10H ₂ O
Blödit (Astrakanit)	Na ₂ SO ₄ · MgSO ₄ · 4H ₂ O
Glauberit	Na ₂ SO ₄ · CaSO ₄
Anhydrit	CaSO ₄
Gips	CaSO ₄ · 2H ₂ O
Kieserit	MgSO ₄ · H ₂ O
Hexahydrit	MgSO ₄ · 6H ₂ O
Epsomit	MgSO ₄ · 7H ₂ O
Polyhalit	K ₂ SO ₄ · 2CaSO ₄ · MgSO ₄ · 2H ₂ O
Leonit	K ₂ SO ₄ · MgSO ₄ · 4H ₂ O
Schönit (Picromerit)	K ₂ SO ₄ · MgSO ₄ · 6H ₂ O
Langbeinit	K ₂ SO ₄ · 2MgSO ₄

Die mineralische Zusammensetzung von frischen Rückstandssalzen wurde bereits in **Tabelle 3** mitgeteilt. Die meisten hier in **Tabelle 8** aufgeführten Mineralphasen treten in Kalihalden als sekundäre Bildungen im Laufe von Verwitterungs- und Umlöse-/ Rekrystallisations-Prozessen auf.

Mineral-Lösungs-Gleichgewichte (Phasengleichgewichte)

Marine Salinargesteine bestehen hauptsächlich aus den Komponenten Na, K, Ca, Mg, Cl und SO₄. Zusammen mit Wasser bilden sie Phasensysteme aus thermodynamisch stabil koexistierenden Mineralphasen und einer gesättigten Salzlösungs-Phase. Mineralgemische reagieren miteinander und mit der koexistierenden Lösung, wenn sie nicht bereits in einem chemischen Gleichgewicht zueinander stehen. Dabei werden einzelne Phasen eliminiert und ihre Komponenten kommen dem Wachstum der anderen, im Gleichgewicht stehenden Phasen zugute. Solche Reaktionen unter Beteiligung einer wässrigen Phase werden auch als „Umlösungen“ bezeichnet, weil sich mit der Phasenvergesellschaftung (Mineral-Paragenese) auch die beteiligte wässrige Lösung zu einer ganz bestimmten Zusammensetzung hin entwickelt, die einem „invarianten Punkt“ im Phasendiagramm entspricht. In Invarianten Punkten stehen jeweils nur bestimmte, thermodynamisch stabile Mineralphasen miteinander und mit der Lösung im Gleichgewicht. **Abbildung 20** zeigt das (Ca-freie) Quinäre Phasensystem der ozeanischen Salze in der Dreiecksdarstellung.

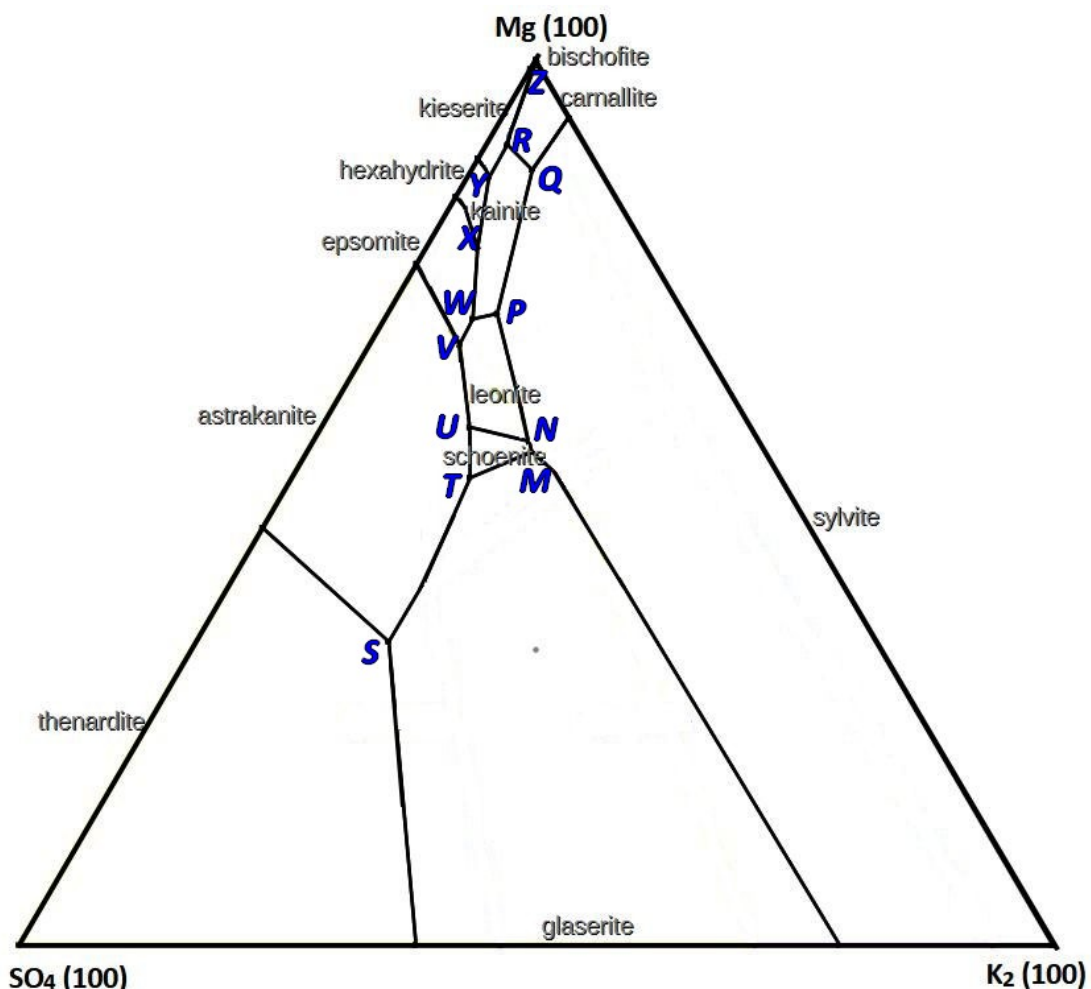


Abbildung 20 – Na-K-Mg-Cl-SO₄-H₂O Phasendiagramm (25°C) mit Invarianten Punkten

Das Diagramm (**Abbildung 20**) gilt ausschließlich für Mineral-Lösungs-Gleichgewichte, also gesättigte Lösungen, und das abgebildete System ist per Definition immer auch bezüglich des

nicht dargestellten NaCl (Halit) gesättigt. Die Mineralnamen kennzeichnen die jeweiligen Stabilitätsfelder und die Buchstaben bezeichnen Invariante Punkte. Beispiel: Im invarianten Punkt V koexistieren Halit, Astrakanit (= Blödit), Epsomit und Leonit stabil, und im chemischen Gleichgewicht hat die Lösung die eindeutige (invariante) Zusammensetzung V.

Verbindungslinien zwischen benachbarten invarianten Punkten sind univariant. Beispiel: Wenn zu einer Lösung S (im Gleichgewicht mit den angrenzenden Mineralphasen) Magnesium-Ionen zugefügt werden, reagieren diese mit Thenardit (zehren diesen auf) und bilden daraus Schönit. Die Lösungszusammensetzung bewegt sich dann während der Reaktion auf der univarianten Kurve zwischen den Punkten S und T. Wenn kein Thenardit mehr verfügbar ist, nimmt die Lösung die Zusammensetzung T an und koexistiert dann stabil mit den Phasen Halit, Astrakanit, Glaserit und Schönit.

Wenn auch Calcium-haltige Phasen im System vorhanden sind (insbesondere Anhydrit, Glauberit, Syngenit oder Polyhalit), muss man das Phasensystem um die Komponente Ca zum Hexären System erweitern (siehe unten, **Abbildungen 25 und 26**). Die Diagramm-Darstellung erfordert dann eine weitere Dimension, wodurch aus dem Dreieck ein Tetraeder wird, dessen Basisfläche wieder (wie im Quinären System) durch die drei Komponenten Mg(100), SO₄(100) und K₂(100) aufgespannt wird und an dessen Gipfel nun Ca(100) als weitere Komponente hinzu kommt.

Für viele Zwecke ist es ausreichend, die Phasengrenzen und invarianten Punkte auf die Basisfläche zu projizieren und dadurch in der 2D-Papierebene zu bleiben. Das ist möglich, weil nur wenige Ca-haltige Phasen hinzukommen und die Stabilitätsfelder der Ca-freien Phasen sich alle in der Nähe der Tetraederbasis drängen. Im Hexären System der Ozeanischen Salze werden die Invarianten Punkte und ihre Lösungen mit dem Präfix *IP* und einer nachfolgenden Nummer bezeichnet, z.B. „*IP21*“ für eine Lösung im Gleichgewicht mit Halit, Sylvin, Carnallit, Kainit und Polyhalit.

Haldenwässer

Der Begriff „*Haldenwasser*“ wird häufig ohne präzise Definition verwendet. Eine Abgrenzung gegenüber Mischwässern von/mit technischen Laugen, die mitunter auch als „*Haldenwasser*“ bezeichnet werden, ist essentiell. Der Verfasser versteht unter Haldenwasser im Allgemeinen ein Salzwasser, dessen Chemismus maßgeblich durch Lösungs-Prozesse an Haldenmaterial entstanden ist, an der Oberfläche unter Witterungseinflüssen, oder im Inneren des Haldenkörpers durch Umlösungs-Reaktionen.

Oberflächennahe Haldenwässer (Verwitterungslösungen)

An der Haldenoberfläche trifft salzfreies Niederschlagswasser auf frische oder auf bereits ausgelaugte Rückstandssalze. Im ersten Fall findet neben einer Auflösung von Steinsalz und Sylvin-Resten auch eine Hydratisierung von Kieserit durch die noch untersättigten Lösungen statt. Die Hydratisierung erfolgt stufenweise über Hexahydrat zu Epsomit, der selbst hoch wasserlöslich ist (**Abbildung 21**).

Obwohl Kieserit nur bei höheren Temperaturen ($> 67^{\circ}\text{C}$) stabil ist (und auch entstanden ist), löst er sich bei Umgebungstemperaturen in Wasser im Vergleich zu anderen Salzen nur sehr langsam auf. Diesen kinetischen Effekt hat man früher bei der Aufbereitung in der „Kieseritwäsche“ ausgenutzt.

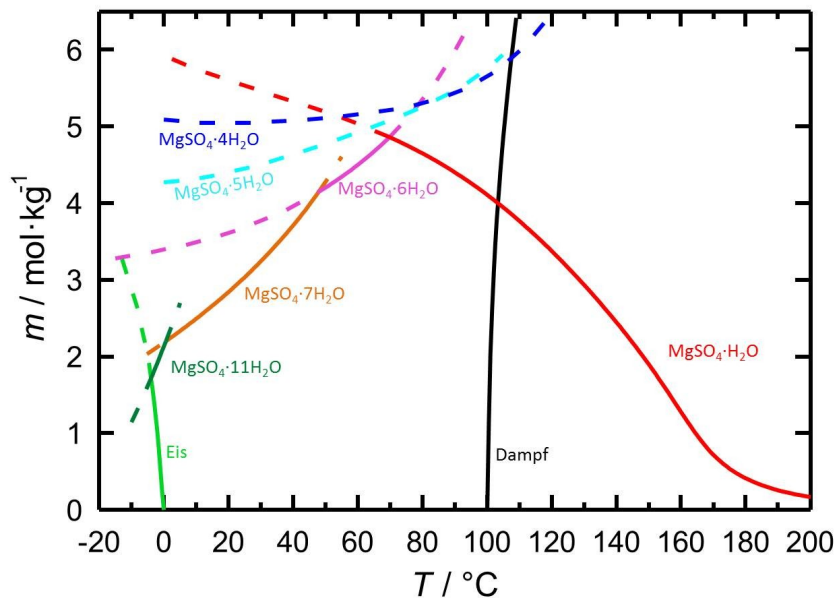


Abbildung 21 – Löslichkeiten und Stabilitätsbereiche von MgSO₄-Hydraten in Wasser, in Abhängigkeit von der Temperatur. Schwarz et al. (2023)

Mit Bezug zu Neuhof-Ellers schreiben K+S (1999): „In der durchfeuchteten Außenschicht der Halde findet außerdem eine Mineralumbildung über das reziproke Salzpaar $\text{MgSO}_4 + 2\text{NaCl} = \text{MgCl}_2 + \text{Na}_2\text{SO}_4$ statt. Haldenwässer aus Kieserit-reichen Halden enthalten deshalb stets einen relativ hohen MgCl₂-Anteil. Die Umsetzung von Kieserit zu Mirabilit (Glaubersalz, $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$) und Thenardit (Na_2SO_4) oder Astrakanit ($\text{Na}_2\text{Mg}(\text{SO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) führt dazu, daß in der Außenschicht von Althaldenteilen kaum noch Steinsalz wiederzufinden ist (Neuhof, Siegfried-Giesen).“

Diese Reaktionen, die zur Bildung von Magnesiumchlorid-reichen Lösungen und Natriumsulfaten führen, sind stark temperaturabhängig, ebenso wie die Löslichkeit der Natriumsulfate selbst (**Abbildung 22**).

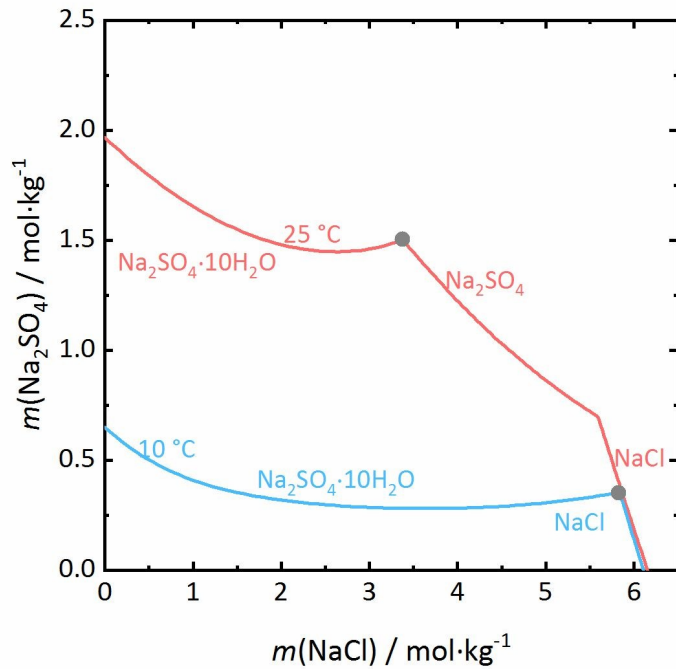


Abbildung 22 – Löslichkeiten von Mirabilit, Thenardit und Halit im System NaCl-Na₂SO₄-H₂O bei 25 °C (rot) und 10 °C (blau). Aufgetragen ist die Molalität m von Na₂SO₄ gegen die von NaCl. (Aus Stahlbuhk, 2024)

Bemerkenswert ist die starke Temperatur-Abhängigkeit der Natriumsulfat-Löslichkeit und die geringe Beeinflussung durch Natriumchlorid (**Abbildung 22**). Das Diagramm erklärt auch, weshalb bei niedrigen Temperaturen in Ringgräben von Kieserit-haltigen Kalihalden oftmals Mirabilit (Glaubersalz) mit der Zusammensetzung $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ aus den Haldenlösungen auskristallisiert. Siehe auch Witzke und Denk (2011) und **Anhang 2**.

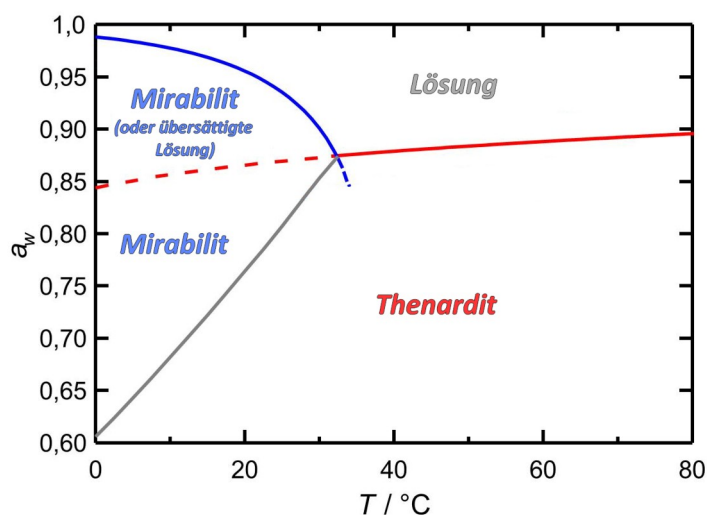


Abbildung 23 – Gleichgewicht zwischen Thenardit und Mirabilit als Funktion der Temperatur und relativen Luftfeuchtigkeit (Aktivität von Wasser, a_w). (Geändert, nach Schwarz et al. (2023b))

Das oft beobachtete Phänomen der wetterabhängigen Farbwechsel bei Kalihalden zwischen weiß und grau hängt ebenfalls mit den Hydratationsstufen der Natriumsulfate zusammen (Siehe **Abbildung 23**). Feinkörniger Thenardit ist weiß und bildet sich bei Trockenheit, auch bei niedrigen Temperaturen als pulveriges Material aus Mirabilit. Im Freien wird Thenardit bei hoher Luftfeuchtigkeit zu Mirabilit hydratisiert, und die Haldenfarbe schlägt wieder in grau um. Oberhalb von 32,4 °C ist nur Thenardit in gesättigten Lösungen stabil.

Für den Wasserhaushalt von Kalihalden spielt die Deliqueszenzfeuchte eine wichtige Rolle, also der Luftfeuchtwert, bei dem ein hygroskopisches Salz anfängt zu zerfließen. Es ist seit einigen Jahren durch Untersuchungen von K+S prinzipiell bekannt (Krupp, 2018), dass frische Rückstände über einen Jahreszeitraum mehr Feuchtigkeit aus der Luft anziehen als von der Rückstandshalde wieder verdunstet, selbst wenn man die Deliqueszenzfeuchte von reinem NaCl betrachtet. Für frische Rückstände ist diese Betrachtung aufgrund der mineralischen Zusammensetzung akzeptabel, doch gilt dies nicht für Rückstandshalden, die bereits der Witterung ausgesetzt sind.

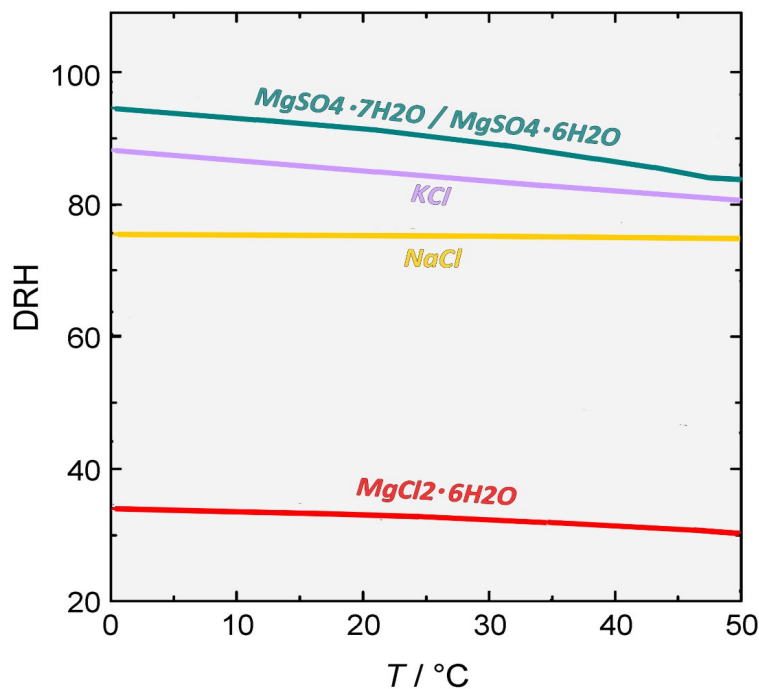


Abbildung 24 – Deliqueszenzfeuchten (DRH) einiger Salze als Funktion der Temperatur. (Geändert, nach Steiger, 2012)

Weiter oben wurde K+S (1999) bereits zitiert mit der Feststellung, dass „Haldenwässer aus Kieserit-reichen Halden stets einen relativ hohen MgCl₂-Anteil“ aufweisen. Aus **Abbildung 24** ist zu entnehmen, dass Magnesiumchlorid viel stärker hygroskopisch wirkt als NaCl. Die Deliqueszenz ist keine originäre Festkörper-Eigenschaft, sondern hat ihre Ursache in der thermodynamisch begründeten Verdünnungstendenz des gesättigten Lösungsfilms an der Kristalloberfläche. Die hygroskopische Wirkung von Kalihalden, die bereits verwittern und dabei MgCl₂-reiche Lösungen bilden, wird daher nicht von NaCl, sondern von gelöstem MgCl₂ dominiert.

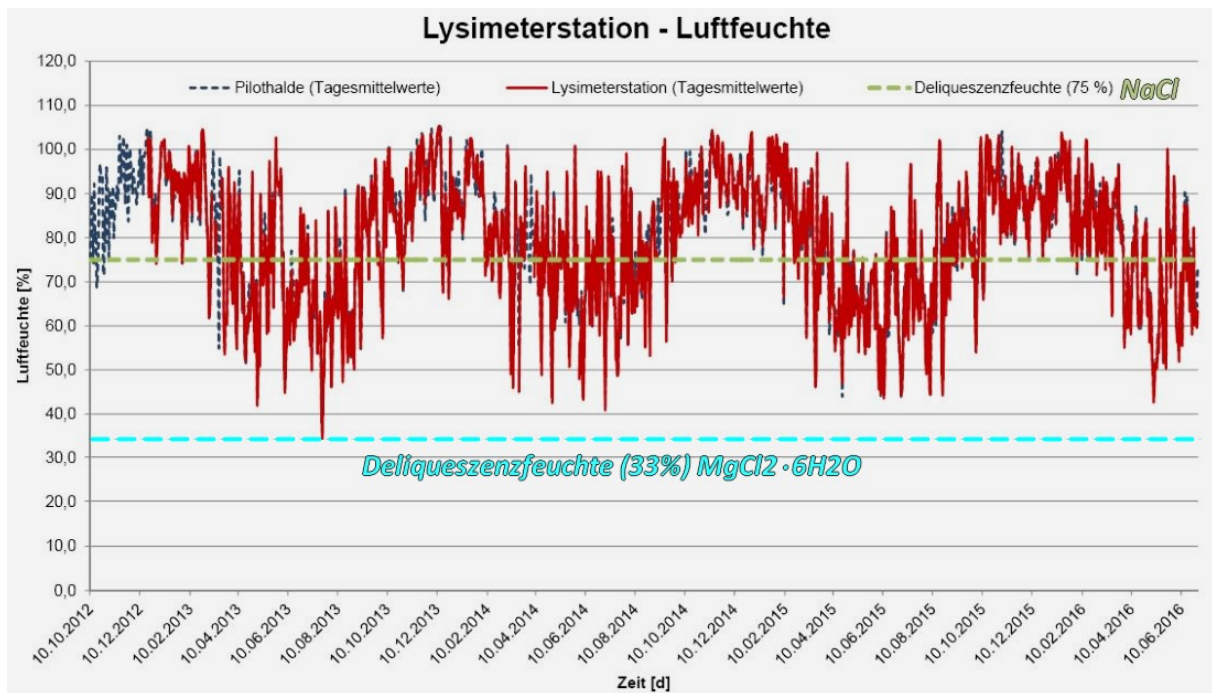


Abbildung 25 – Messreihe der relativen Luftfeuchte an der Lysimeterstation und Pilothalde Zielitz. Eingetragen sind auch die Deliqueszenzfeuchten von Steinsalz (75%) und von Magnesiumchlorid (33%) . Ergänzt vom Verfasser. K+S (2019, Band 8, Anhang 3.6)

Mit **Abbildung 25** wird deutlich, dass Kalihalden mit Magnesiumchlorid-reichen Haldenlösungen viel stärker hygroskopisch wirken als reines NaCl. Selbst wenn die Haldenlösungen mit $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ nicht voll gesättigt sind, haben die typischen Konzentrationen um 20 bis 30 Gew.-% MgCl_2 einen sehr starken und nahezu ganzjährigen Einfluss auf die hygroskopische Wasseraufnahme aus der Umgebungsluft und damit auf die Haldenwasserbilanzen.

Haldenwässer (Verwitterungslösungen), Neuhoof-Ellers

Neuhoof-Ellers Haldenwässer

- ◆ GWM 13/2017 NE (sm)
- + GWM 9/2017 NE (su)
- + GWM 1 Halde Neuhoof (flach) (sm)
- ▲ GWM 1 Halde Neuhoof (tief)
- GWM 4 Halde Neuhoof
- GWM 8/2013 NE
- ▼ GWM 10/2017 NE (sm)
- ▲ GWM 14/2017 NE (sm)
- ▲ GWM 14/2018 NE (sm) flach
- ✕ Graben Bahndamm

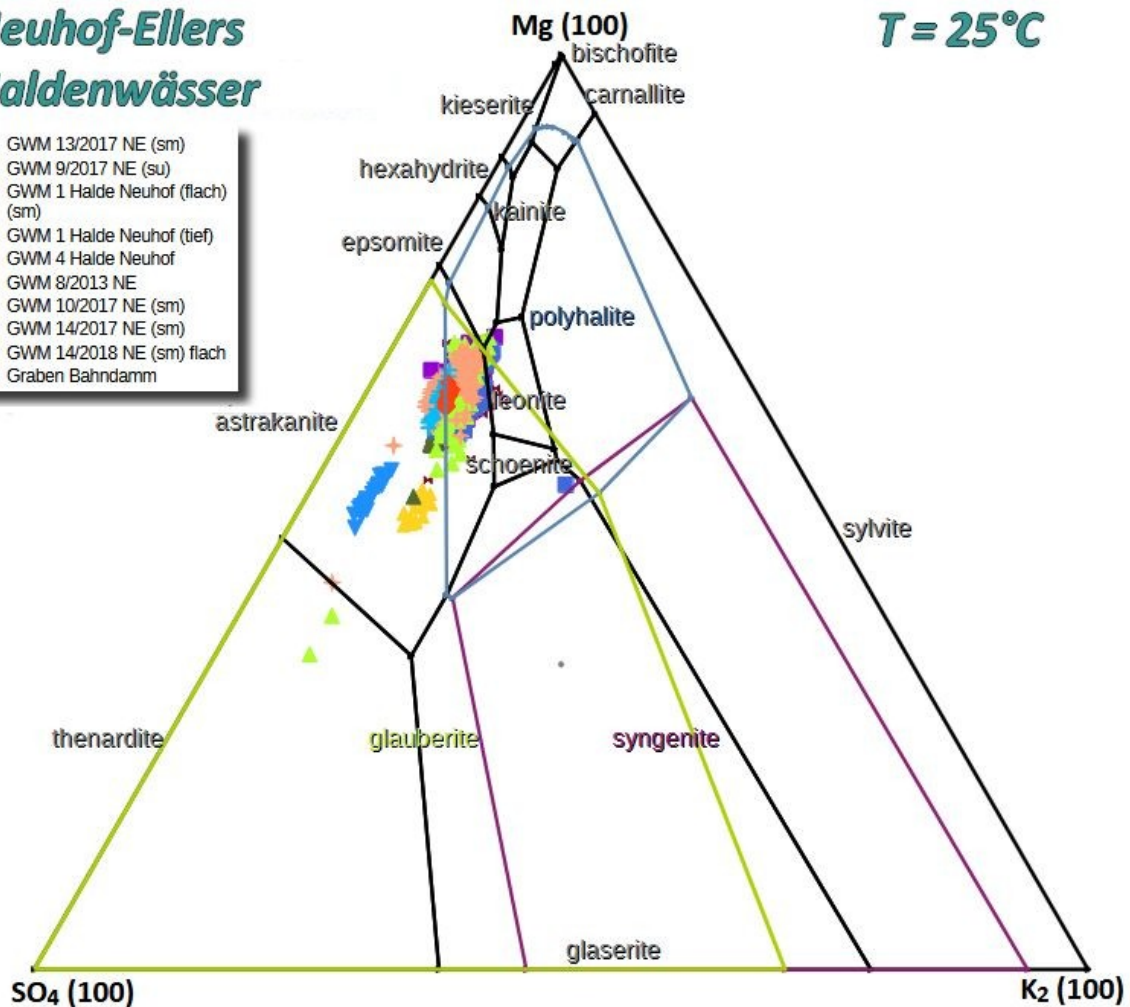
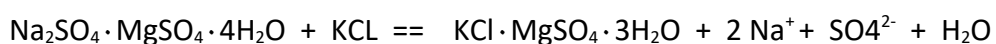


Abbildung 26 – Plot konzentrierter Salzwässer (Verwitterungslösungen) aus dem Umfeld der Kalihalde Neuhoof-Ellers im hexären Phasendiagramm der ozeanischen Salze.

Die **Abbildung 26** zeigt eine Auswahl höher konzentrierter Salzwässer aus dem Einflussbereich der Kalihalde. Auch wenn diese Lösungen nicht vollständig gesättigt und somit keine Gleichgewichtslösungen sind, erkennt man einen Trend aus dem Thenardit-Feld über das Blödit-Feld (= Astrakanit-Feld) in Richtung des Invarianten Punkts *IP15* (Halit+Leonit+Epsomit+Blödit+Polyhalit). Da die Lösungen überwiegend nur teilgesättigt sind, das Diagramm (**Abbildung 26**) aber Phasengrenzen (bei gesättigten Gleichgewichtslösungen) bei 25°C darstellt, ist eine genauere Übereinstimmung mit *IP15* nicht zu erwarten. Eine nahezu identische Entwicklung konnte auch für die Kalihalde Hattorf festgestellt werden (Krupp, 2022), nur dass dort bereits der Invariante Punkt *IP16* (Halit+Leonit+Epsomit+Kainit+Polyhalit) erreicht worden ist, was bedeutet, dass Blödit aufgezehrt wurde und dafür Kainit gebildet worden ist:



Zwischenergebnisse

Oberflächennahe Haldenwässer (Verwitterungslösungen) entstehen an der Haldenoberfläche und in der ungesättigten Zone aus zunächst salzfreiem Niederschlagswasser, Luftfeuchtigkeit und anfangs auch Haftwasser. Die meteorischen Wässer können auf frisch geschüttete Rückstände und/oder bereits ältere, durch Witterungseinflüsse ausgelaugte Rückstandssalze treffen. Die oberflächennahen Prozesse sind durch wechselnde Temperaturen, Luftfeuchten und intermittierende Niederschlagsereignisse (Witterungseinflüsse) gekennzeichnet, und diese Faktoren haben Einfluss auf die möglichen Reaktionen.

Die oberflächennah entstehenden Lösungen sind nicht immer gesättigt und ihr Chemismus folgt Verdünnungsreihen. Es findet eine Hydratisierung von Kieserit zu Hexahydrat und Epsomit und die Bildung weiterer Kristallwasser-haltiger Sulfate, und damit eine temporäre Bindung und Speicherung von Wasser statt, bis auch diese hydratisierten Magnesiumsulfate wieder aufgelöst werden. Die an der Oberfläche gebildeten Sulfatminerale werden beim nächsten Niederschlag wieder aufgelöst und als abfließende Haldenwässer gesammelt, oder sie versickern vor Erreichen des Randgrabens im Boden.

Aus dem reziproken Salzpaar Kieserit + Steinsalz wird durch Umsetzung Mirabilit bzw. Thenardit, sowie teilweise das Doppelsalz Blödit gebildet. Die entstehende Lösung ist Magnesiumchlorid-reich und kann über die ungesättigte Zone abfließen, aber in Teilen auch den Haldenwasserspiegel erreichen und in den Haldenkörper weiter einsickern.

Die in Grundwassermessstellen in der Haldenumgebung ermittelten Chemismen zeigen bei Eintragung in das Hexäre Phasensystem der Ozeanischen Salze eine ganz ähnliche, aber nicht ganz so weit fortgeschrittene Entwicklung wie im Bereich der Kalihalde Hattorf. Die Lösungen streben dem Invarianten Punkt *IP15 (IP16)* zu und weisen auf Eliminationsreaktionen der Wertmineralreste von Sylvin und Kieserit unter Neubildung von Epsomit, Blödit, Leonit und evtl. Polyhalit hin. Eine Entstehung der versalzten Grundwässer durch Lösungsprozesse in der Kalihalde steht außer Frage und wäre auch wegen der räumlichen und zeitlichen Zusammenhänge nicht bestreitbar.

Für die Haldenwasserbilanz spielt die hygroskopische Aufnahme von Luftfeuchtigkeit eine deutlich größere Rolle als bisher von der Kaliindustrie eingeräumt wird. Der Grund liegt in der Bildung von Magnesiumchlorid-reichen Haldenwässern an der Oberfläche der Halde, die eine sehr viel geringere (≥ 33 % relative Luftfeuchte) Deliqueszenzfeuchte als Steinsalz (75% relative Luftfeuchte) haben und nahezu permanent Luftfeuchtigkeit aufnehmen.

Haldensickerwässer (Halden-Laugen), Neuhoof-Ellers

Salz-gesättigte Lösungen, welche die hydraulisch ungesättigte Zone der Kalihalde passiert haben und den Salzwasser-gesättigten Porenraum durchströmen, treffen dort auf überwiegend noch nicht (wenig) ausgelaugte Rückstandssalze. Auch die vergleichsweise konstanten Reaktionsbedingungen und die bereits weitgehend gesättigten Lösungszusammensetzungen machen einen wesentlichen Unterschied zu der

oberflächennahen Hülle einer Kalihalde. Aufgrund des Reaktionspotentials der eingesickerten Lösungen gegenüber reaktiven Wertmineralresten (Sylvin, Kieserit) und Anhydrit können hier andere Umlösungs-Reaktionen ablaufen, mit Lösungsentwicklungen hin zu weiteren Invarianten Punkten des Phasensystems. Diese Umlöse-Reaktionen führen zu einer zunehmenden Zementation des Haldenkörpers durch sekundären Halit und andere, neu kristallisierende Phasen. Die sich dabei einstellenden Lösungszusammensetzungen der Haldenlaugen (**Abbildung 27**) sind reicher an Magnesiumchlorid als die oberflächennahen Verwitterungslösungen (**Abbildung 26**).

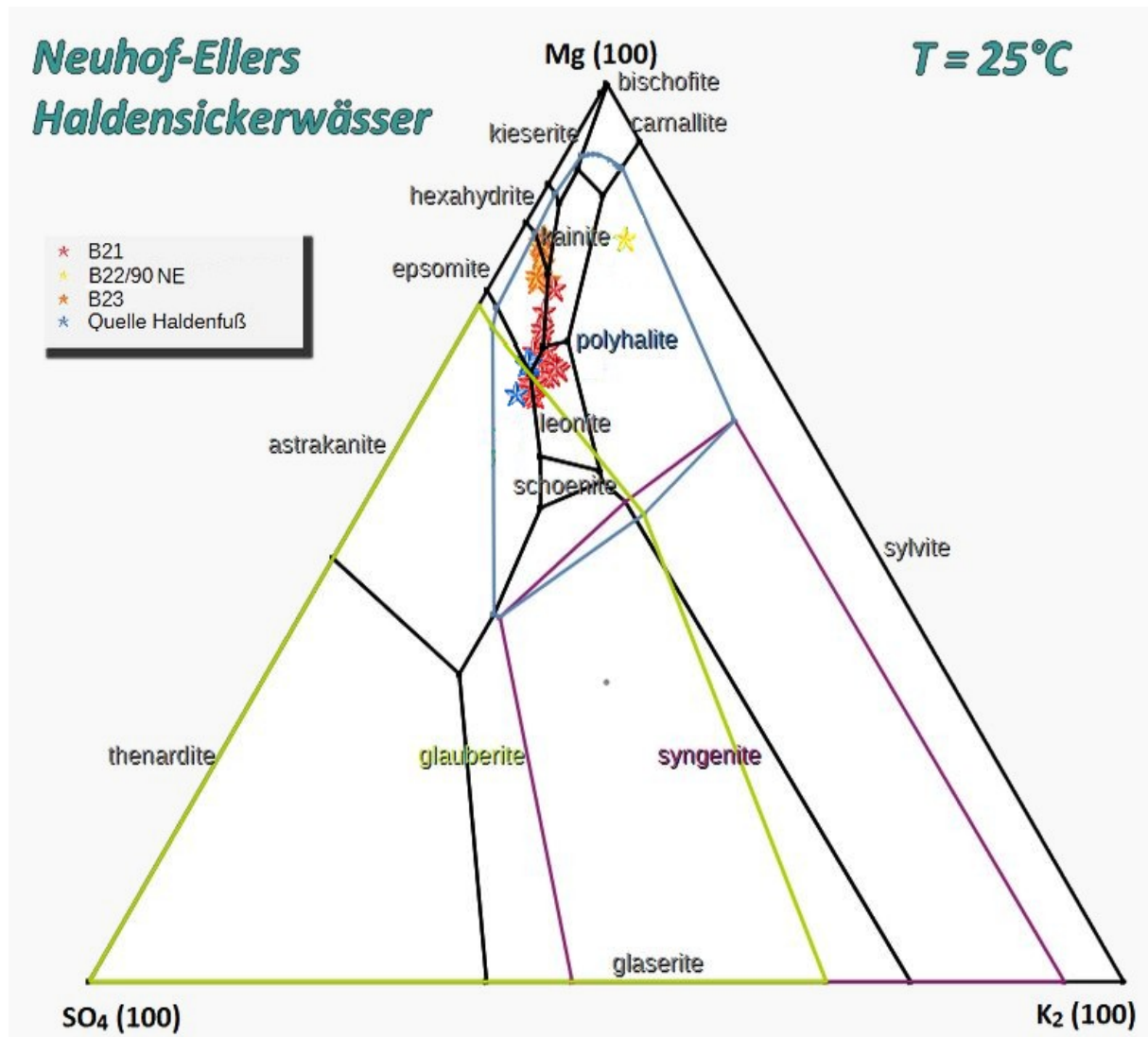


Abbildung 27 – Plot konzentrierter Haldensickerwässer (Haldenlaugen) der Kalihalde Neuhof-Ellers im hexären Phasendiagramm der ozeanischen Salze.

Die Lösungszusammensetzungen welche in **Abbildung 27** eingetragen sind, sind alle im Inneren des Haldenkörpers entstanden. Diese Lösungen stammen aus den Haldenbohrungen B21, B22, B23 und von einer Quelle am Haldenfuß. Im Gegensatz zu den Lösungen in **Abbildung 26** liegen die Darstellungspunkte genau auf den Phasengrenzen, weil es sich um univariante Lösungen handelt, die nur noch bezüglich der gerade neu entstehenden Phase keine Sättigung erreicht haben.

Die im Haldeninneren ablaufenden Rekrystallisationsprozesse sind darauf gerichtet chemische Gleichgewichte zwischen koexistierenden Phasen herzustellen. Da Kieserit und Sylvin bei den herrschenden Umgebungstemperaturen nicht stabil koexistieren können, Kieserit in den Rückständen von Neuhoof-Ellers aber mengenmäßig dominiert, wird Sylvin eliminiert.

Die Zusammensetzungen der Haldenlaugen sind gegenüber den oberflächennahen Haldenwässern auch deutlich Magnesium-reicher und plotten näher zur Mg-Ecke des Diagramms, entlang der Kainit-Epsomit- und Kainit-Hexahydrit-Phasengrenzen.

Bisher liegen nur wenige Haldenlaugen-Analysen aus dem Haldeninneren vor, doch scheinen diese deutliche Unterschiede zu den oberflächennah gebildeten Verwitterungslösungen zu belegen. Für Sickerwässer, welche durch die Haldenbasis hindurch in den Untergrund und dort in den Hauptgrundwasserleiter gelangen, werden ähnliche Chemismen erwartet.

Korrelationen

Zur Betrachtung stärker verdünnter Salzwässer sind die „Dreiecksdiagramme“ für gesättigte Gleichgewichtslösungen (**Abbildungen 26 und 27**) nicht geeignet, wengleich dort nur Ionen-Verhältnisse dargestellt werden, die sich bei Verdünnungsreihen nicht ändern. Für Darstellungen salzhaltiger Wässer sind x-y-Plots (Korrelationsdiagramme) gut geeignet, auch weil sie absolute Konzentrationen vergleichen.

In **Abbildung 28** bilden die aus „Verwitterungslösungen“ hervorgegangenen salzhaltigen Grundwasser- und Oberflächenwasserproben der Messstellen jeweils eigene Verdünnungstrends, also lineare Mischungsreihen zwischen salzhaltigen Endgliedern und reinem Wasser, z.B. Regenwasser (im Diagramm-Ursprung). Die Verdünnungstrends unterscheiden sich untereinander in ihren Geradensteigungen (also Element-Verhältnissen) mehr oder weniger deutlich, je nach Zusammensetzung des konzentrierten Mischungs-Endglieds.

Demgegenüber stehen in **Abbildung 28** die hochkonzentrierten bis gesättigten Haldenlaugen („Haldensickerwässer“), scheinbar und paradoxweise ohne Beziehung zu den Verdünnungsreihen der Verwitterungslösungen. Wie oben bereits beschrieben verhalten sich die chemischen Trends der mehr Natrium- und Sulfat-betonten oberflächennahen Haldenwässer und der mehr Magnesium- und Chlorid-betonten intern gebildeten Haldensickerwässer komplementär, was schon aus Massenbilanzgründen so sein muss. Dies spiegelt sich auch in den „summarischen“ Korrelationsdiagrammen in **Abbildung 28** wieder.

Ein entscheidender Unterschied ist die Verfügbarkeit des Lösungsmittels Wasser, das in den Verdünnungsreihen im Überschuss vorhanden ist, im Inneren der Halden hingegen als Reaktionspartner an den Umlösereaktionen beteiligt ist und durch Einbindung als Kristallwasser immer knapper wird, während die sich einstellenden Lösungszusammensetzungen durch die Phasengleichgewichte (Invariante Punkte) erzwungen werden.

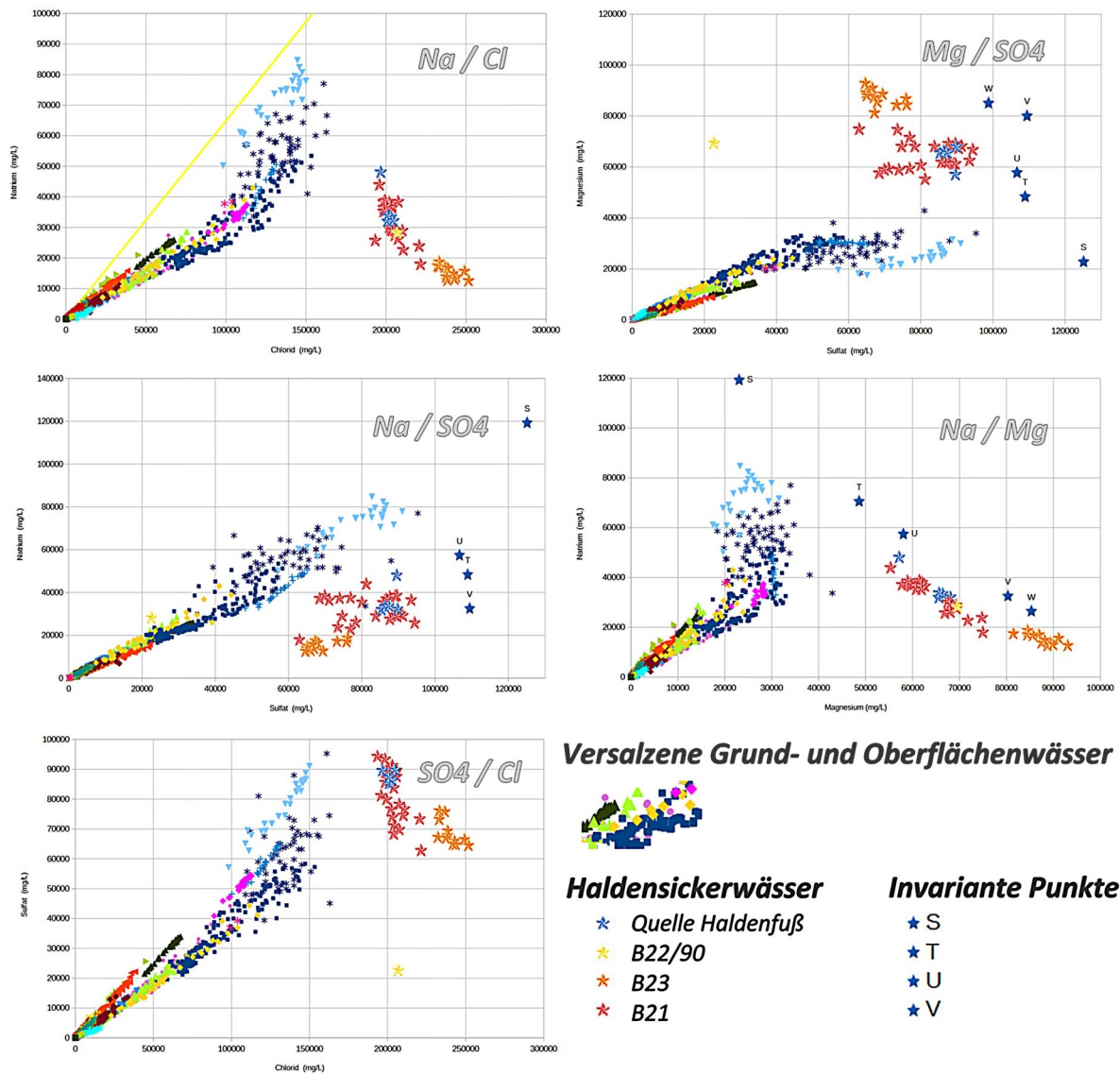


Abbildung 28 – Element-Korrelationen in Grund- und Oberflächen-Wasserproben (kleine Symbole) und internen Haldenlaugen (große Symbole). Blaue Sterne mit Buchstaben: Invariante Punkte des Quinären Phasensystems der ozeanischen Salze.

In **Abbildung 28** ist zu erkennen, dass auch die Haldensickerwässer gegenüber den Invarianten Punkten selbst bereits etwas verdünnt sind. Dies ist ein bekanntes Phänomen bei Magnesiumchlorid-reichen Lösungen, das durch die starke hygroskopische Aufnahme von Luftfeuchtigkeit bei/nach der Probenahme zu erklären ist. Auch dies verdeutlicht, wie wichtig hygroskopische Prozesse bei Kalihalden sind, und dass eine angepasste Probenahme wichtig ist um analytische Artefakte zu vermeiden.

Ausgewählte Messstellen

Nachfolgend sollen die geochemischen Entwicklungen in einzelnen Teilgebieten bzw. Messstellen näher betrachtet werden. **Abbildung 29** ist eine Übersicht über Gewässer und Messstellen im Umfeld der Kalihalde Neuhof-Ellers.



Abbildung 29 – Haldenumfeld mit ausgewählten Messstellen. Blaue Kontur: Haldenrandgraben. Rote Flaggen und pinkfarbene Umrandung: Nachgewiesene Ausdehnung der Versalzungsflanke im Grundwasser, Stand 2025. Hellblau schattiert: Trinkwasserschutzgebiete (Zonen 3 und 2). Rote und violettfarbene Linien: Innen- bzw. Außenrand des Salzhangs. Gelbe Sterne: Versenkbohrungen.

Quelle Alte Wiese, GWM 14/2017, GWM 14/2018 (flach) und Quelle der ehemaligen Gemeinde Dorfborn

Knapp nördlich der Kalihalde entspringt die kräftige Quelle „Alte Wiese“, die den Altwiese-Bach teilweise speist. Etwa 400 m östlich davon steht die Doppel-Messstelle GWM 14 im Mittleren Buntsandstein, mit je einer Filterstrecke von 8 bis 13 m Tiefe („flach“) in einer sandigen Einschaltung in der Volpriehausen-Wechselfolge, sowie einer Filterstrecke in 29,1 bis 39,1 m Tiefe im Volpriehausen-Sandstein (HGWL). Weitere 350 m östlich entspringt im oberen Rippbach-Tal die „Quelle der ehemaligen Gemeinde Dorfborn“, ebenfalls aus dem Volpriehausen-Sandstein. Die **Abbildung 30** zeigt die Zeitreihen dieser Messstellen.

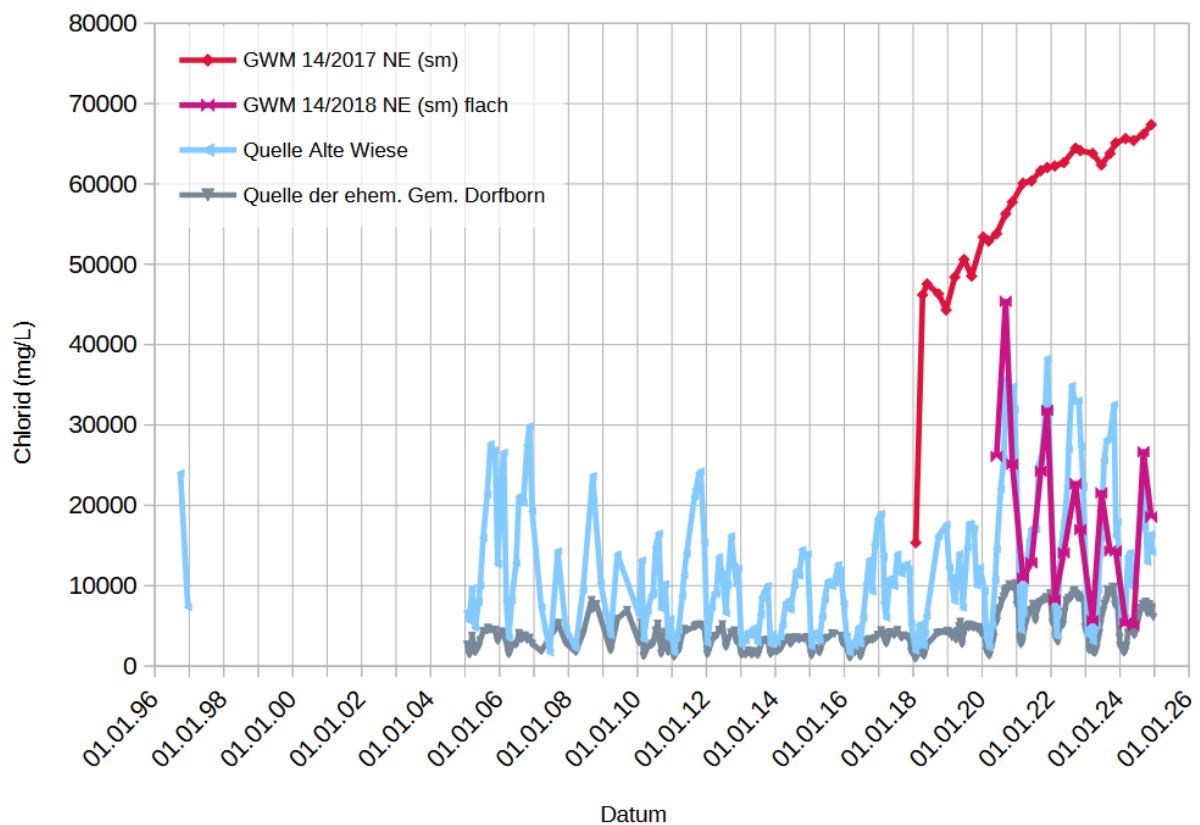


Abbildung 30 – Zeitliche Entwicklung der Versalzungen im Mittleren Buntsandstein nördlich und nordöstlich der Halde.

Mit Ausnahme der tiefen GWM 14 im HGWL zeigen die anderen Messstellen eine teilweise deutliche saisonale Periodizität, welche die stärkeren Verdünnungen in/nach der niederschlagsreichen Saison wiedergibt. Die Versalzung im Hauptgrundwasserleiter GWM 14 ist deutlich höher und zeigt außerdem einen ansteigenden Trend.

Die „Quelle Alte Wiese“ war bereits 1996 in ähnlichem Ausmaß wie 2005 versalzen, wie zwei Einzelanalyse belegen (29.09.1996: 24.009 mg/L Cl und 17.12.1996: 7335 mg/L Cl). Damals war der Haldenfuß schon in unmittelbare Nähe der Quelle vorgerückt. Ab 2020 ist auch in der „Quelle Alte Wiese“ und ebenso in der „Quelle der ehemaligen Gemeinde Dorfborn“ eine deutliche Zunahme der Chlorid-Werte feststellbar. Dieser Anstieg kann mit der Überschüttung des Altwiese-Bachs zusammenhängen, weil als Folge dieser Maßnahme der Grundwasserspiegel im Haldenkörper allmählich ansteigt und den hydraulischen Gradienten

auch nach Norden und Osten hin erhöht und damit die Ausbreitung der Haldensickerwässer begünstigt.

Die chemischen Verwandtschaften zwischen der Alte Wiese-Quelle, der Quelle der ehemaligen Gemeinde Dorfborn und der tieferen GWM 14/2017 sind in den beiden Diagrammen **Abbildung 31 und 32** gut ersichtlich. Die flache GWM 14/2018 zeigt jedoch erkennbare Unterschiede in Form höherer Na/Cl-Verhältnisse und kleinerer Mg/SO₄-Verhältnisse (bzw. größeren SO₄/Mg-Verhältnissen). Anders formuliert ist die flache Messstelle reicher an Na₂SO₄-Komponente, und dies ist ein Hinweis auf eine stärkere Beeinflussung durch oberflächennahe Haldenwässer.

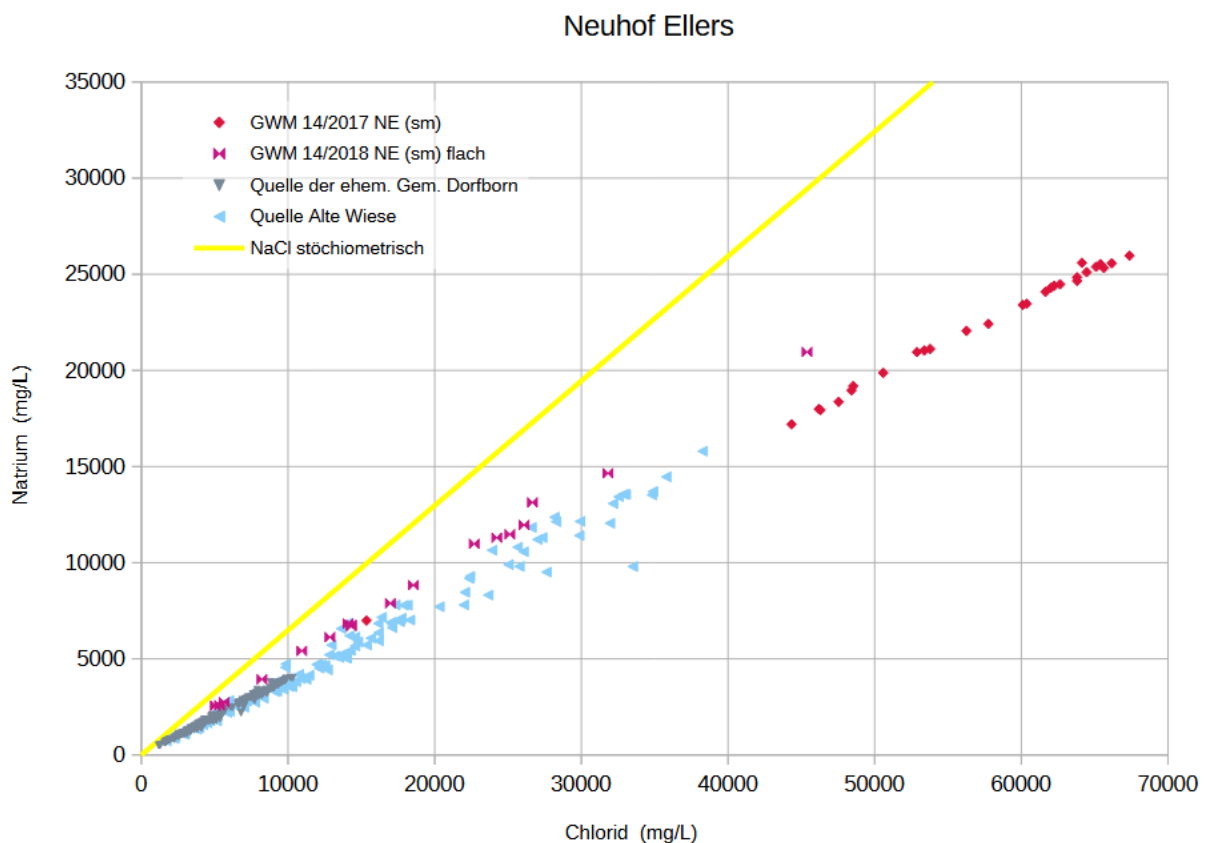


Abbildung 31 – Na/Cl-Diagramm der o.g. Messreihen

Neuhof Ellers

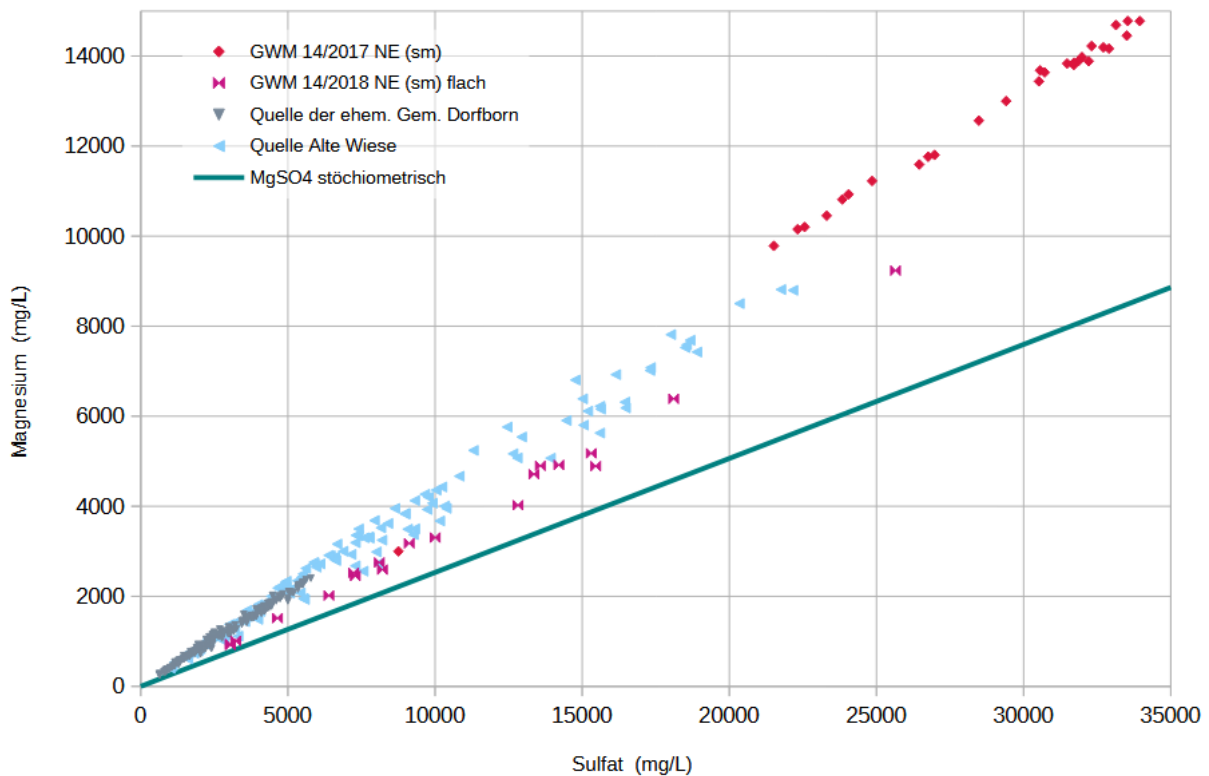


Abbildung 32 – Mg/SO₄-Diagramm der im Text genannten Messreihen

Altewiese Bach, Graben Bahndamm, Quelle Typhusbrunnen, GWM 8

Der zum Teil durch die Alte Wiese Quelle (154.000 m³/a) gespeiste Altewiese-Bach ist zwischen den frühen 1990er Jahren und 2019 nach erfolgter Verrohrung im weiteren Verlauf der Westerweiterung der Kalihalde überschüttet und südlich davon bis zu seiner ehemaligen Einmündung in den Lützbach verbaut worden. Messdaten aus der Zeit vor 2005 liegen nicht vor. Das durch die unter der Halde verlaufenden Rohrleitung erfasste Wasser wird dem Salzwasserbecken südlich der Halde und somit dem „Salzwassermanagement“ der K+S zugeführt. Der Altewiese-Bach existiert daher nicht mehr.

Die im Mittel ca. 13,2 m³/h (5,8 bis zu 27 m³/h ; 115.600 m³/a) schüttende und ursprünglich in den Lützbach auslaufende „Quelle Typhusbrunnen“ war bereits 1996 in ähnlicher Höhe durch Kaliabwässer versalzen wie auch in den seit Januar 2005 kontinuierlich vorliegenden Messreihen (**Abbildung 33**). Ab 2022 wurde eine weitere Erhöhung der Salzgehalte beobachtet, und seither wird der Abfluss der „Quelle Typhusbrunnen“ in den „Graben Bahndamm“ umgeleitet und dem „Salzwassermanagement“ der K+S zugeführt.

Die Grundwassermessstelle GWM 8/2013 NE steht ca. 50 m südlich des Haldenrandgrabens im Bereich des überschütteten Altewiese Bachs und westlich des Sammelbeckens. Die 44 m tiefe Bohrung beginnt im Volpriehausen-Sandstein und ist von 33 bis 43 m Tiefe verfiltert und schließt möglicherweise auch schon Liegendschichten des HGWL auf.

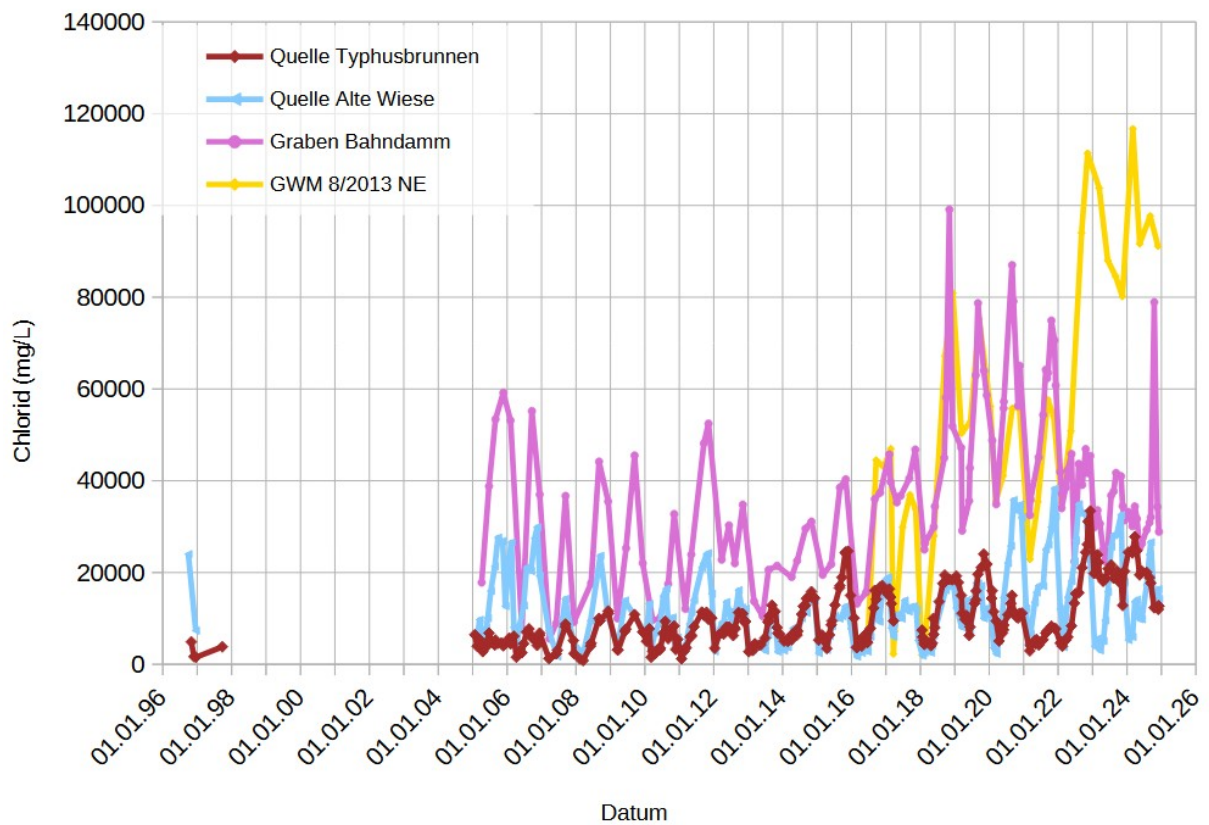


Abbildung 33 – Zeitliche Entwicklung der Versalzungen im Bereich des Altewiese-Tals.

Die Zeitreihen zeigen allesamt ein saisonales Muster, lassen aber auch den Einfluss technischer Maßnahmen erkennen, z.B. Umleitung der Quelle Typhusbrunnen (2022) oder die Zunahme der Salzkonzentrationen im Graben Bahndamm mit der erstmaligen Beschüttung der südlichen Haldenaufstandsfläche (2019). Etwas ungewöhnlich ist die ausgeprägte saisonale Periodizität in der GWM 8/2013 NE, die noch in 40 m Tiefe zeitnah und ungedämpft jahreszeitliche Wetterphänome im Bereich des Altewiese-Tals abbildet.

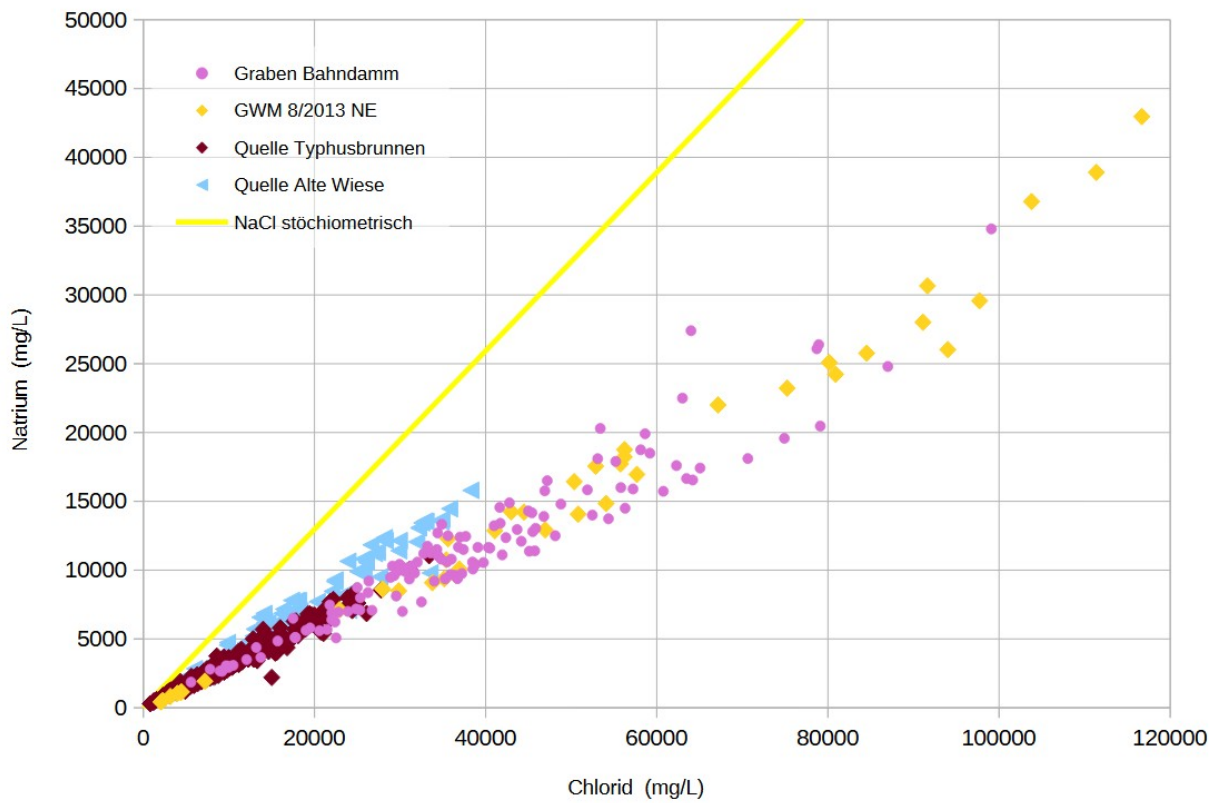


Abbildung 34 – Na/Cl-Diagramm der o.g. Messreihen

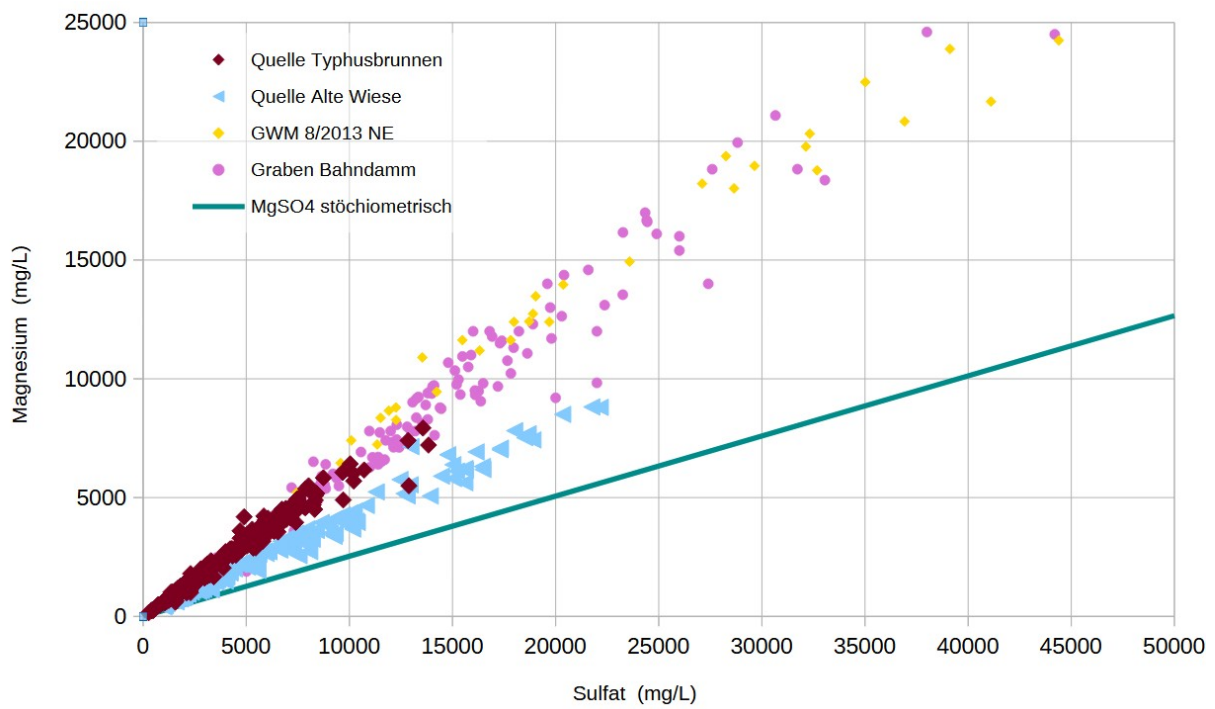


Abbildung 35 – Mg/SO4-Diagramm der o.g. Messreihen

Die chemischen Signaturen (**Abbildungen 34 und 35**) der Messstellen lassen auch hier im Vergleich eine Abweichung der Alte Wiese Quelle zu Natrium- und Sulfat-reicheren Zusammensetzungen erkennen, während die drei anderen Messstellen stärker Magnesiumchlorid-betont sind.

Grundwassermessstellen zwischen Lützbach und Halde (GWM 1, 2, 4, 8)

Die folgenden Grundwassermessstellen (mit Filterstrecken und Baujahr) geben Einblicke in die Dynamik der Ausbreitung der Salzwasserfahne (**Abbildung 36**):

GWM 1 Halde Neuhof (flach)	sm / su	26 – 39 m	vor 1997
GWM 1 Halde Neuhof (tief)	su	112 – 156 m	vor 1997
GWM 2 Halde Neuhof	sm	19 – 29,2 m	vor 1997
GWM 4 Halde Neuhof	sm / su	11,6 – 23 m	vor 1997
GWM 8 Halde Neuhof	sm / su	33 – 43 m	2013

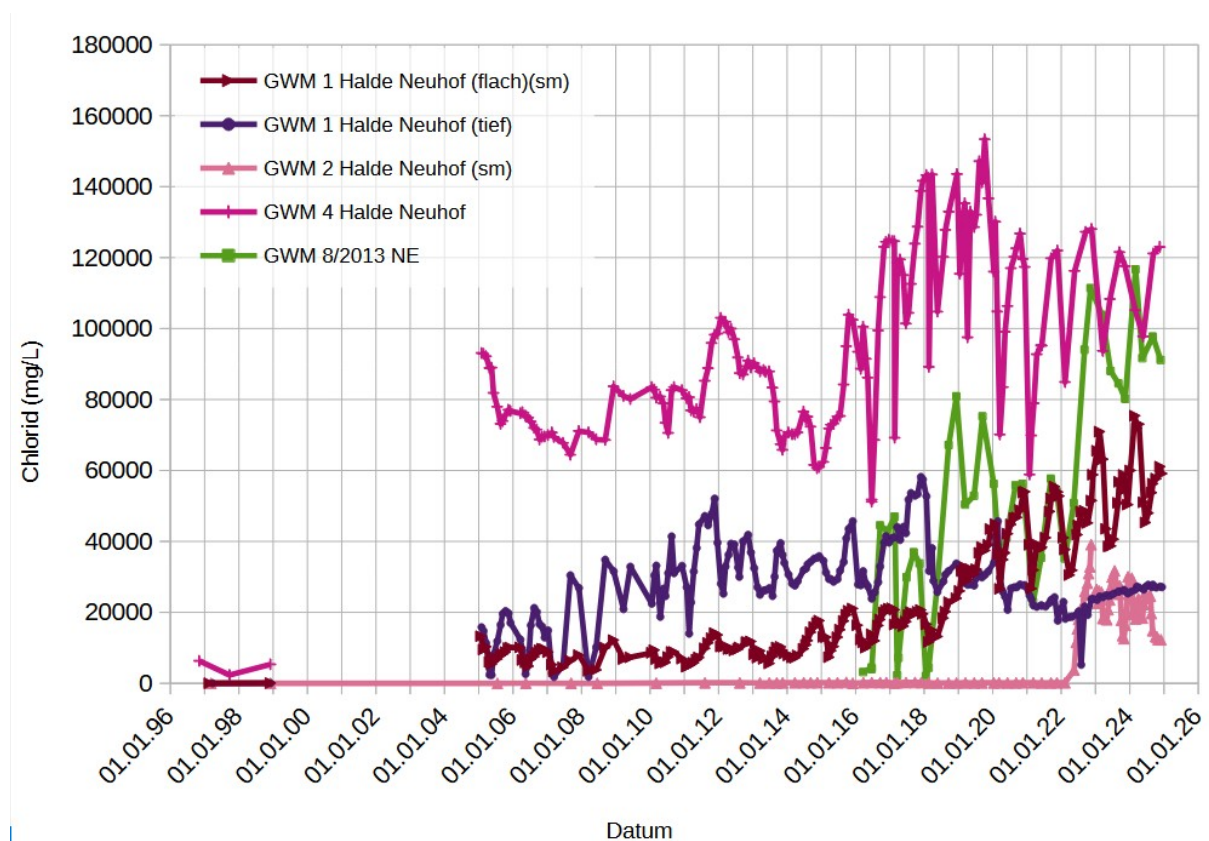


Abbildung 36 – Zeitreihen von Grundwassermessstellen zwischen Lützbachgrund und südlichem Haldenrand.

Für die Messstellen GWM 1 (flach und tief), GWM 2 und GWM 4 liegen auch Einzelwerte aus den Jahren 1997 und 1998 vor. Demnach waren zu dieser Zeit in den weiter westlich gelegenen Messstellen GWM 1 (flach und tief) und GWM 2 noch keine Anzeichen für Versalzungen nachzuweisen. In der Messstelle GWM 4 weiter im Osten waren von 1996 bis 1998 aber schon Chlorid-Konzentrationen bis 6300 mg/L gemessen worden. Ab 2005 zeigen die kontinuierlich vorliegenden Messwerte für die GWM 1 (flach und tief) deutliche, für die GWM 4 massive Versalzungen, während GWM 2 noch bis 2022 versalzungsfrei war, ab dann aber auch eine starke Versalzung aufweist. Im Jahr 2013 kam die neue Messstelle GWM 8/2013 hinzu, die zwischen GWM 4 und dem Haldenrand liegt und bereits im Jahr ihrer Herstellung stark versalzenes Grundwasser anzeigt.

Insgesamt ist somit die zeitlich fortschreitende Ausbreitung der Versalzungsfahne in der Fläche und auch in der zunehmenden Intensität gut dokumentiert. Bemerkenswert ist die Ausbreitungsrichtung nach Westen, entgegen der Strömungsrichtung des Vorfluters Lützbach, und auch nach Süden, unter dem Vorfluter hindurch. Letzteres ist durch die GWM 17/2023 sowie die Versalzung des Brunnens Heiligenrain erwiesen (s.u.).

Die enge genetische Verwandtschaft der hier dargestellten Salzwässer ergibt sich aus den **Abbildungen 37 und 38**.

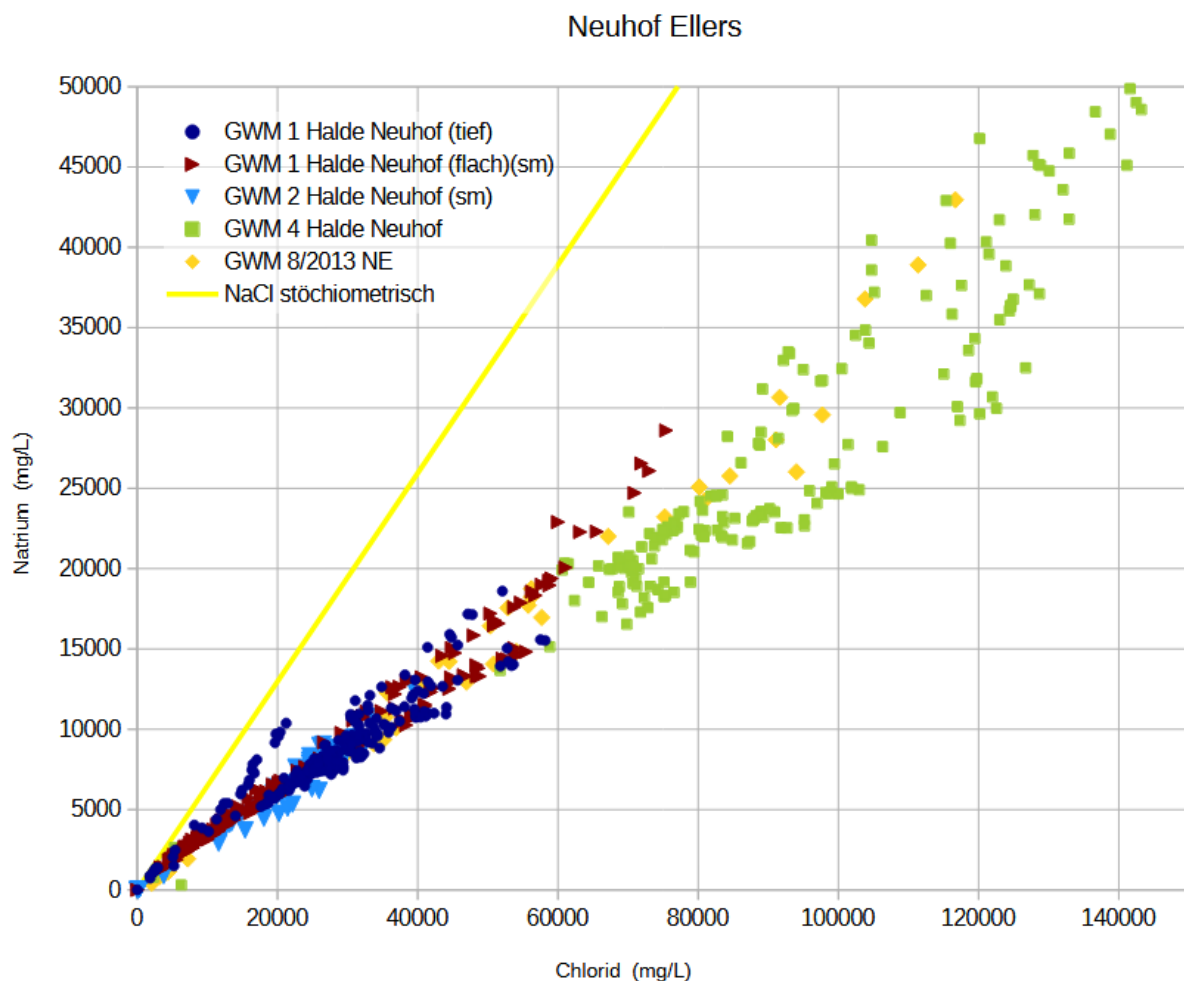


Abbildung 37 – Na/Cl-Diagramm der o.g. Messreihen

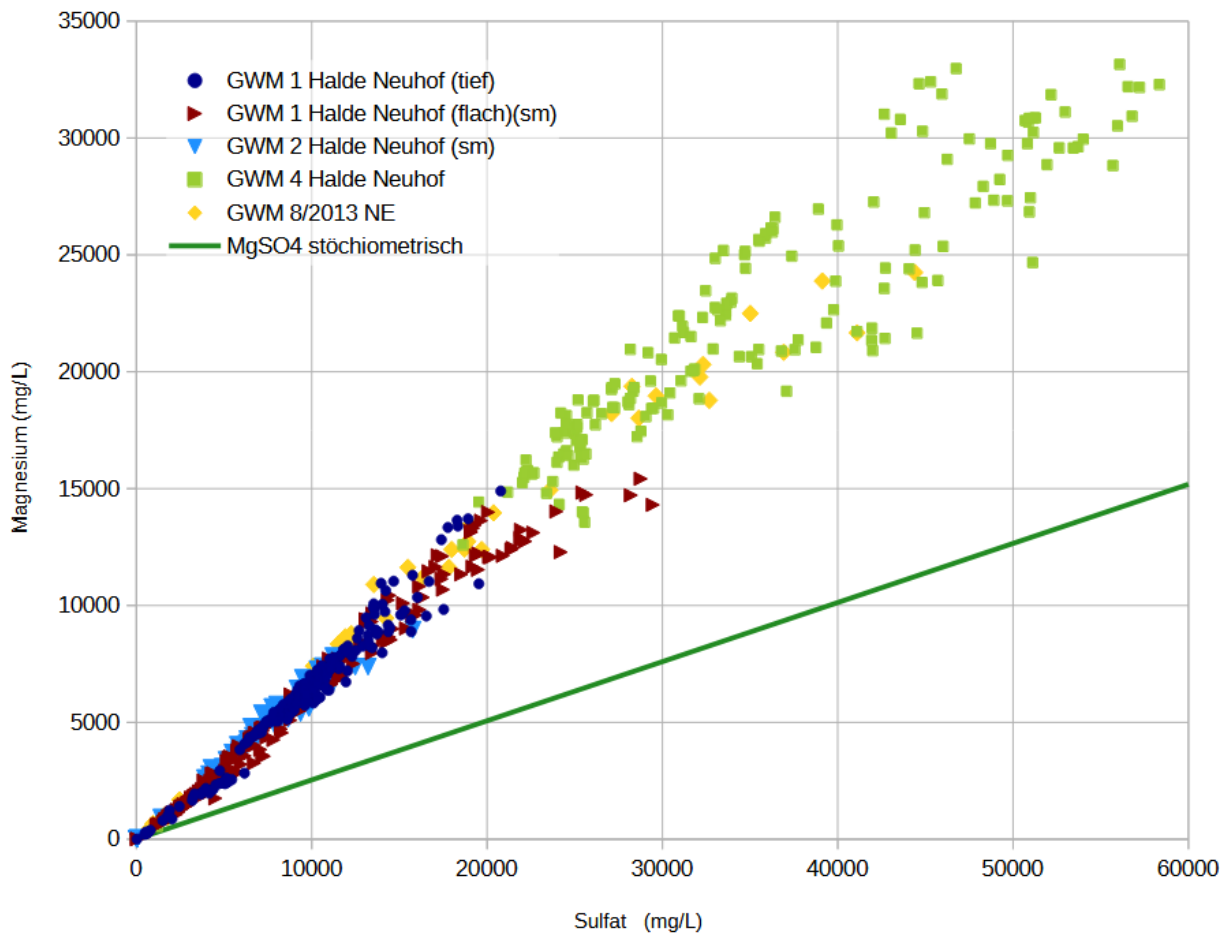


Abbildung 38 – Mg/SO₄-Diagramm der o.g. Messreihen

Brunnen Heiligenrain, GWM 1, GWM 2, GWM 17

Der Brunnen Heiligenrain liegt ca. 400 m südlich des Lützbachs und wurde im Mai 2012 wegen Versalzung außer Betrieb genommen. Der bis in 52 m Tiefe ausgebaute Brunnen schließt im unteren Abschnitt Mittleren Buntsandstein (Volpriehausen Sandstein) auf. In **Abbildung 39** ist die Entwicklung der Salzkonzentrationen dargestellt. Leider scheint die Probenahme 2012 mit der Brunnen-Stilllegung ebenfalls eingestellt worden zu sein, und es liegen außer Chloridwerten nur wenige Messungen anderer Parameter vor.

Im Vergleich sind in **Abbildung 39** die Zeitreihen einiger weiterer Messstellen eingetragen, die dem gleichen jahreszeitlichen Muster folgen, wobei die Konzentrationen im Brunnen Heiligenrain aufgrund der größeren Entfernung zu Halde noch auf einem deutlich niedrigeren Niveau liegen. Das Gleiche gilt für die neue GWM 17/2023 (su), die aber auch bereits Chlorid-Werte über 5000 mg/L Cl aufweist und die Ausbreitung der Versalzungsfahne südlich des Lützbachs bestätigt.

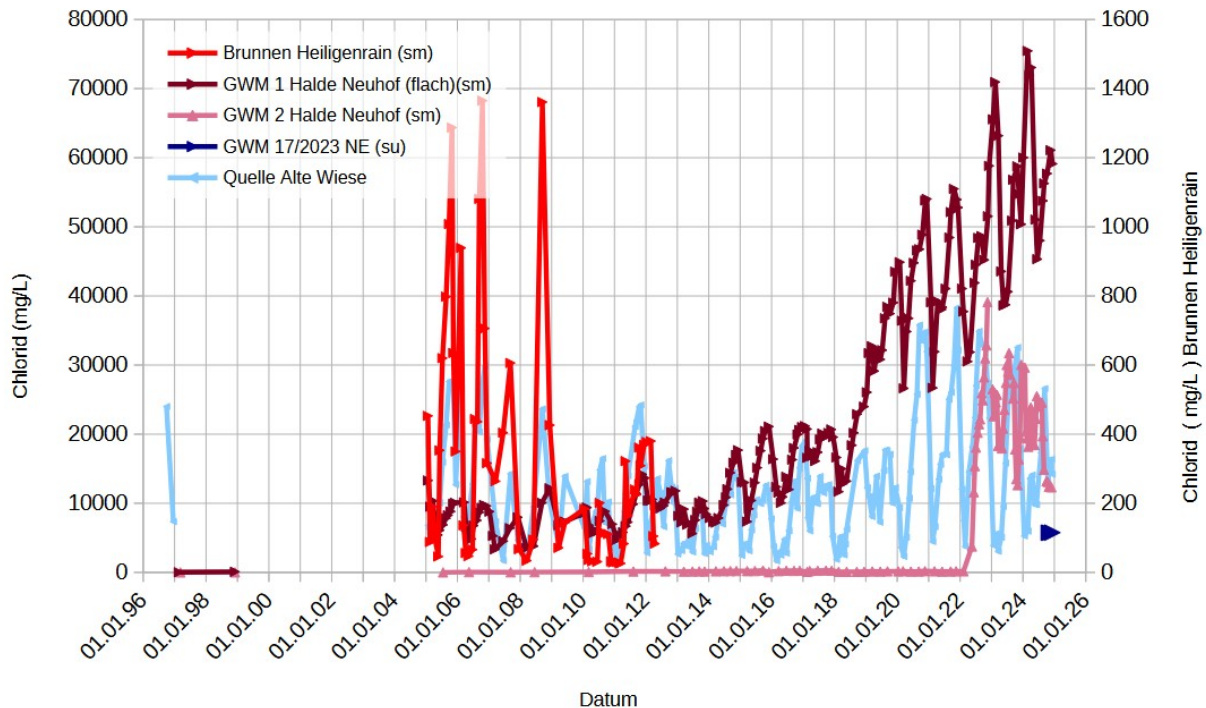


Abbildung 39 – Zeitliche Entwicklung der Versalzungen im Hauptgrundwasserleiter (Mittleren Buntsandstein). Der Brunnen Heiligenrain (rechte Y-Achse) liegt jenseits (400 m südlich) des Lützbachs, so dass die Versalzung den Vorfluter Lützbach bereits unterströmt hat. (Bitte unterschiedliche Skalierung beachten.)

Von Interesse sind auch die unterschiedlichen Zeitpunkte des Einsetzens langjähriger Versalzungstrends. So ist in der GWM 1 Ende der 1990er Jahre noch keine Chlorid-Belastung festzustellen, spätestens ab 2005 ist ein Anstieg auf 5.000 bis 10.000 mg/L Cl erfolgt, und etwa ab 2012/2014 ist ein beschleunigter Anstieg zu beobachten. Diese Entwicklung folgt der Westerweiterung der Halde, mit der beginnenden Überschüttung des Altewiese-Tals ab 1993/1996. In der entfernter gelegenen und zuvor unbelasteten GWM 2 kommt die Versalzungsfront dann ein paar Jahre später, in 2022 an. Alle genannten Messstellen stehen im HGWL (Volpriehausen-Sandstein).

Die zunehmenden Versalzungs-Trends belegen, dass trotz aller Maßnahmen von K+S und trotz sämtlicher Nebenbestimmungen des RP Kassel (2003) anlässlich der Genehmigung zur Haldenerweiterung, die Ausbreitung der Versalzungsfront im Grundwasser weiter fortschreitet und an Intensität zunimmt. Die vorgenommenen Maßnahmen zur Basisabdichtung sind entgegen aller Behauptungen in der Praxis offenkundig ungeeignet und schon von Anfang an weitgehend wirkungslos.

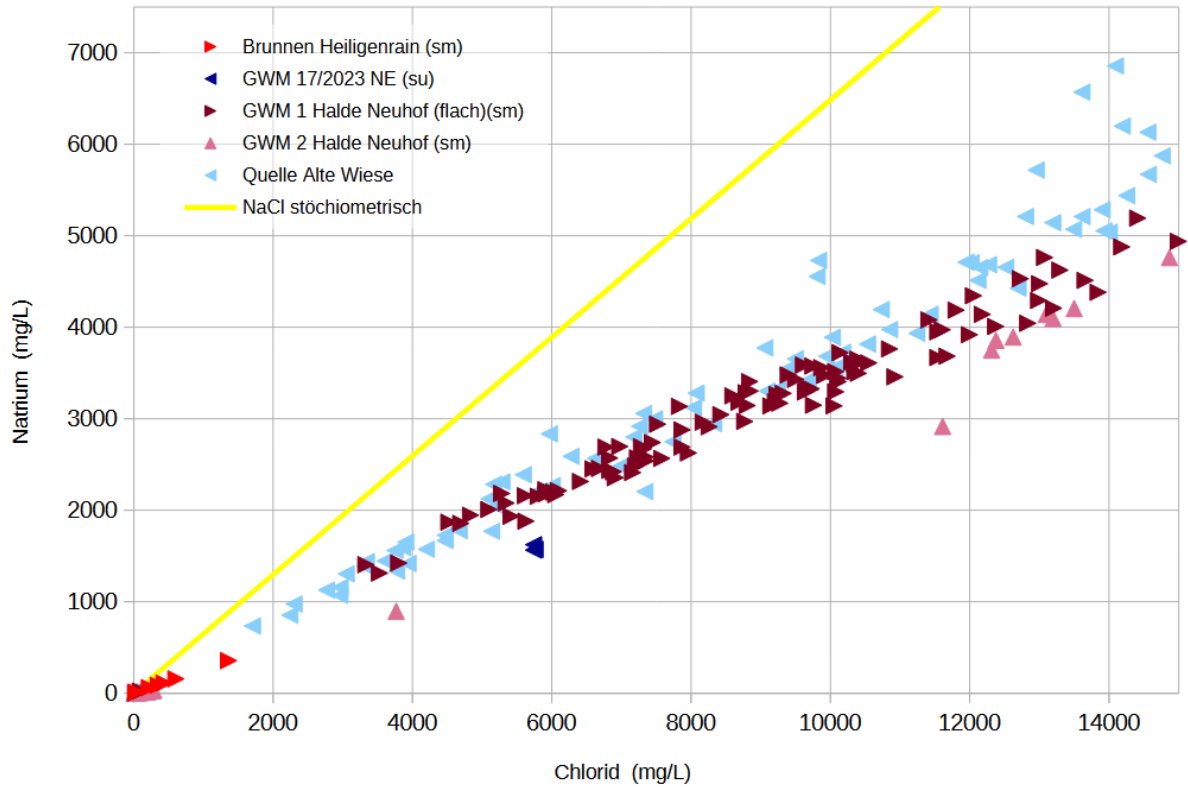


Abbildung 40 – Na/Cl-Diagramm der o.g. Messreihen

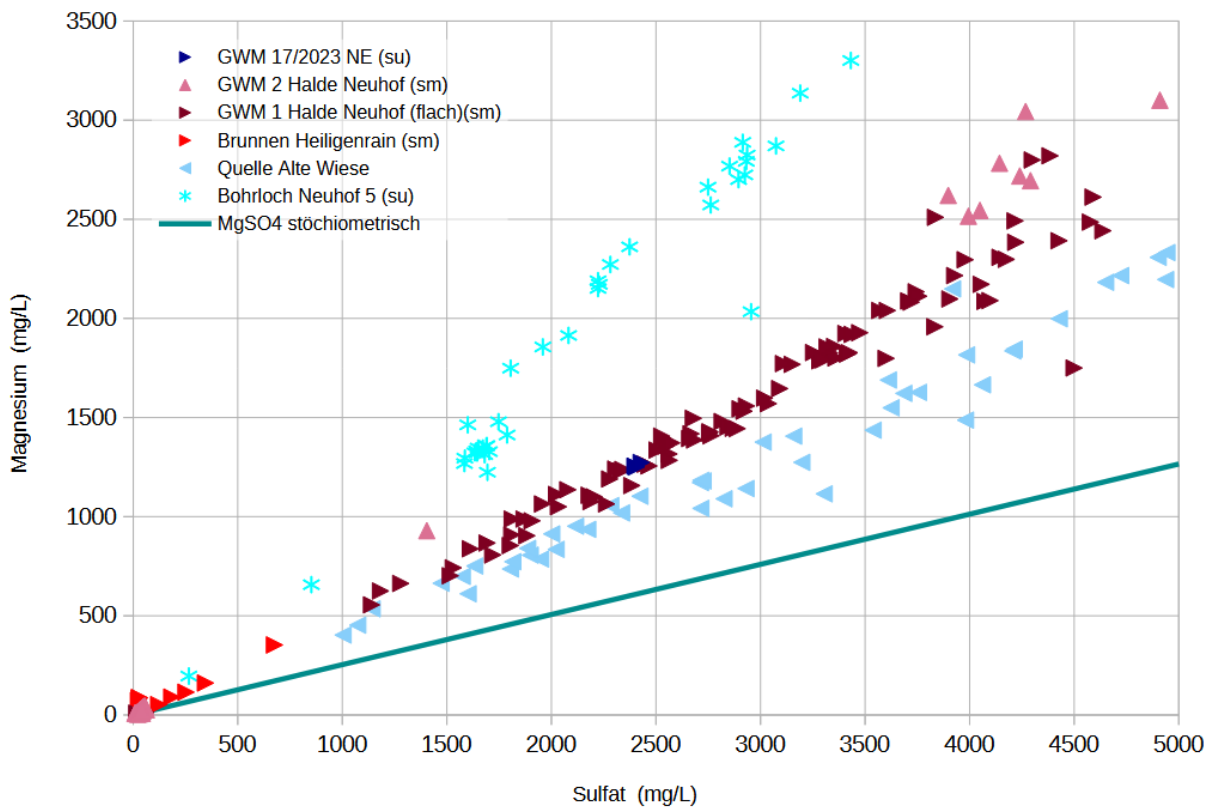


Abbildung 41 – Mg/SO4-Diagramm der o.g. Messreihen.

Die **Abbildungen 40 und 41** zeigen die chemischen Signaturen der o.g. Messstellen. Der versalzte Brunnen Heiligenrain zeigt bei den Ionenverhältnissen gute Übereinstimmungen mit GWM 1 und GWM 2 nördlich des Lützbachs, die ebenfalls im südlichen bis südwestlichen Sektor des Halden-Umfelds liegen und den HGWL (Volpriehausen-Sandstein) beproben, und ebenso mit der tieferen GWM 17 NE (su) südlich des Lützbachs, soweit bereits Daten vorliegen. Im Unterschied dazu ist die Alte Wiese Quelle Mg-ärmer.

Die Messstelle Neuhof 5 ist durch Mg-reiche Versenklaugen der direkt daneben gelegenen Versenkbohrung Neuhof 2 beeinflusst. Aufgrund der deutlich höheren Mg-Verhältnisse (**Abbildung 41**) können Versenklaugen nicht als Erklärung für die Versalzung des 750 m NW der Versenkbohrung gelegenen Trinkwasserbrunnens Heiligenrain in Frage kommen.

Brunnen Dorfborn und Rippbach-Tal

Der Brunnen Dorfborn liegt etwa 600 m östlich der Kalihalde, am westlichen Abhang zum Rippbach hin und hat eine Tiefe von mindestens 76,2 m. Anfänglich (2005) lagen die Chlorid-Konzentrationen bei etwa 50 mg/L (**Abbildung 42**). Nach temporären Versalzungen des Brunnenwassers in den Jahren 2007 und 2008 und erneut und dauerhaft ab 2010 wurde auch dieser Brunnen aufgegeben und 2017 verfüllt. Am gleichen Ort wurden die neuen Grundwassermessstellen GWM 11/2017 (su) und GWM 11/2017 (sm) (flach) eingerichtet. Letztere beprobt den Volpriehausen-Grundwasserleiter in 7 bis 12 m Tiefe, erstere den Unteren Buntsandstein in 60 bis 80 m Tiefe. In der Messstelle GWM 11/2017 (sm) (flach) setzt sich der im Brunnen beobachtete Versalzungstrend fast nahtlos, aber auf erneut höherem Niveau fort. Mit Ausnahme der tiefen Messstelle GWM 11/2017 (su) zeigen die Salzgehalte auch hier eine ausgeprägte Saisonalität, mit den höchsten Konzentrationen im Herbst, also vor der erneuten Verdünnung während der Phase der Grundwasserneubildung im Winter und Frühjahr.

Neuhof-Ellers

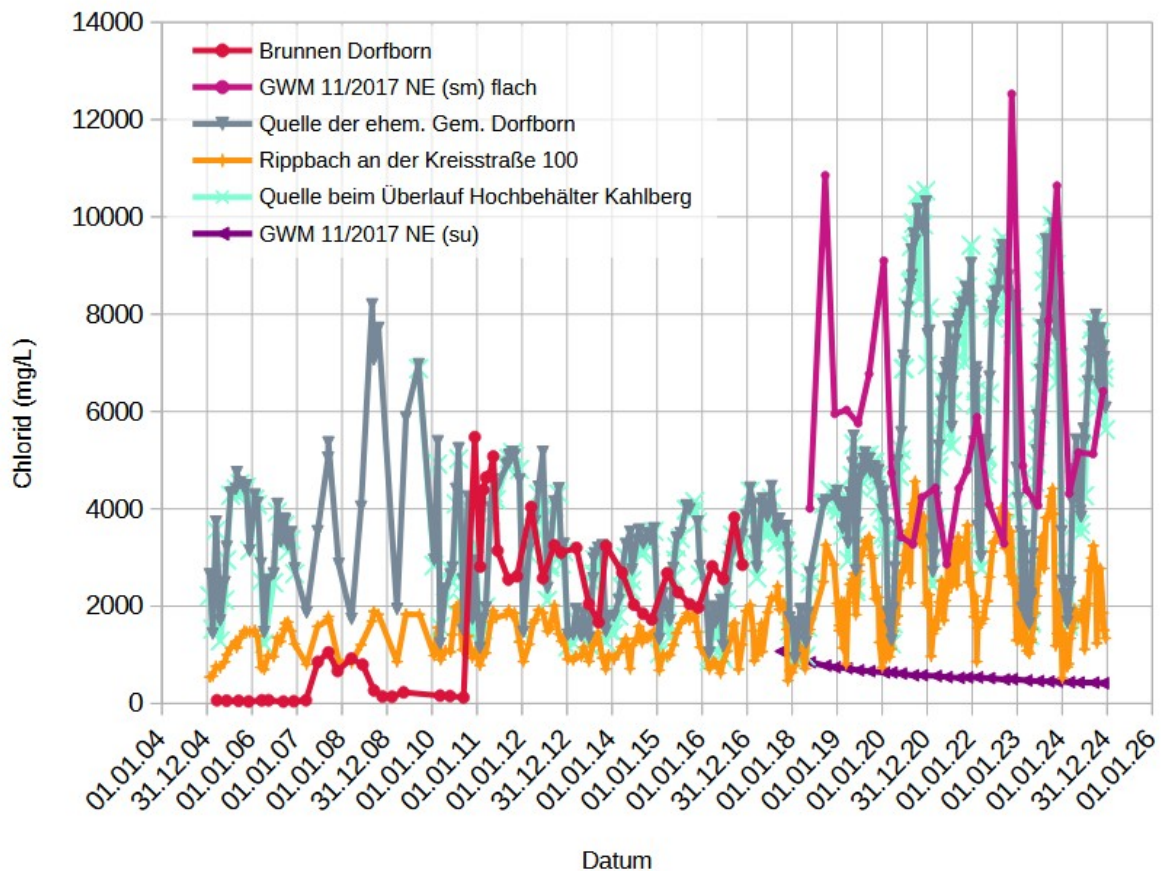


Abbildung 42 – Zeitliche Entwicklung der Versalzungen im Hauptgrundwasserleiter (Volpriehausen-Sandstein).

Die beiden Quellen im Rippbach-Tal zeigen fast deckungsgleiche Konzentrationsverläufe, die sich nach Verdünnung so ähnlich (s.u.) auch im Unterlauf des Rippbachs (Messstelle an der Kreisstraße 100) wieder finden. Die große Ähnlichkeit der beiden Quellen im Rippbach-Tal zeigt sich auch in den Korrelations-Diagrammen (**Abbildungen 43 und 44**), so dass der Verdacht einer technischen Verbindung zwischen den beiden, 800 m voneinander entfernten „Quellen“ nahe liegt.

Auch die chemischen Signaturen der anderen dargestellten Wasseranalysen (**Abbildungen 43 und 44**) unterscheiden sich nicht und weisen auf eine identische Versalzungs-Ursache in Gestalt der Kalihalde hin.

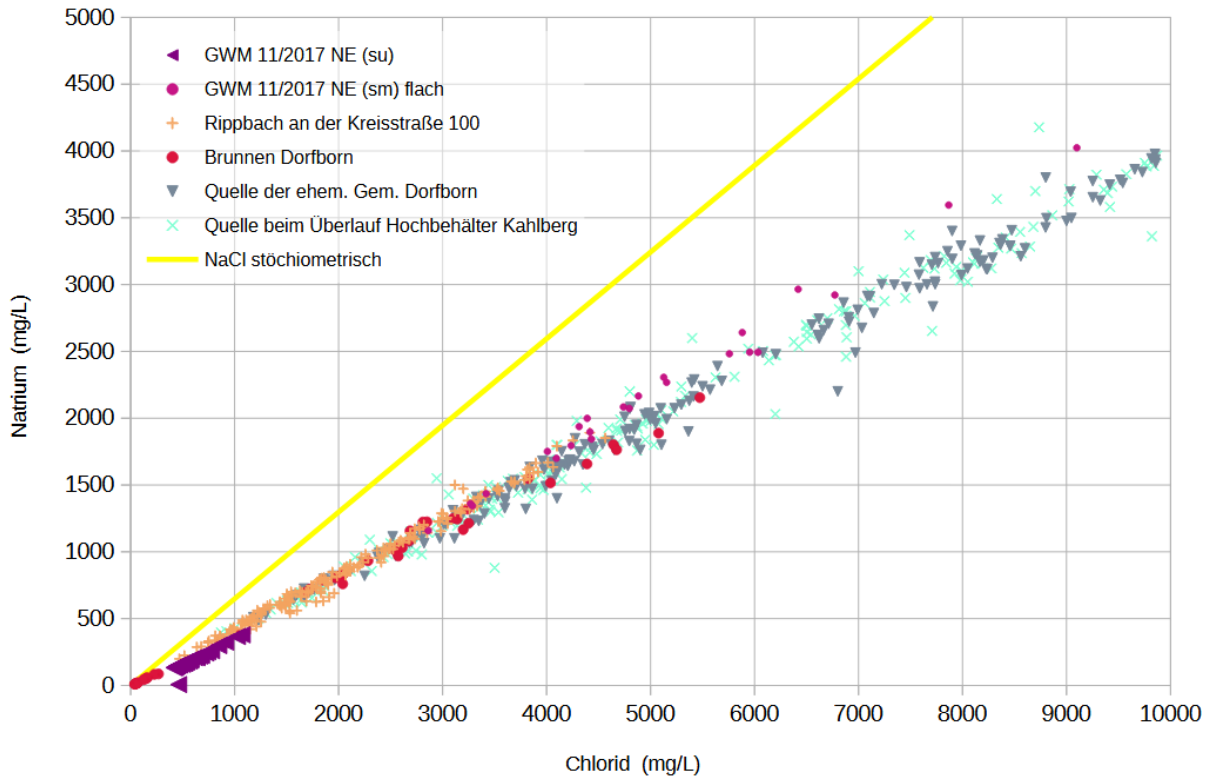


Abbildung 43 – Na/Cl-Diagramm der o.g. Messreihen

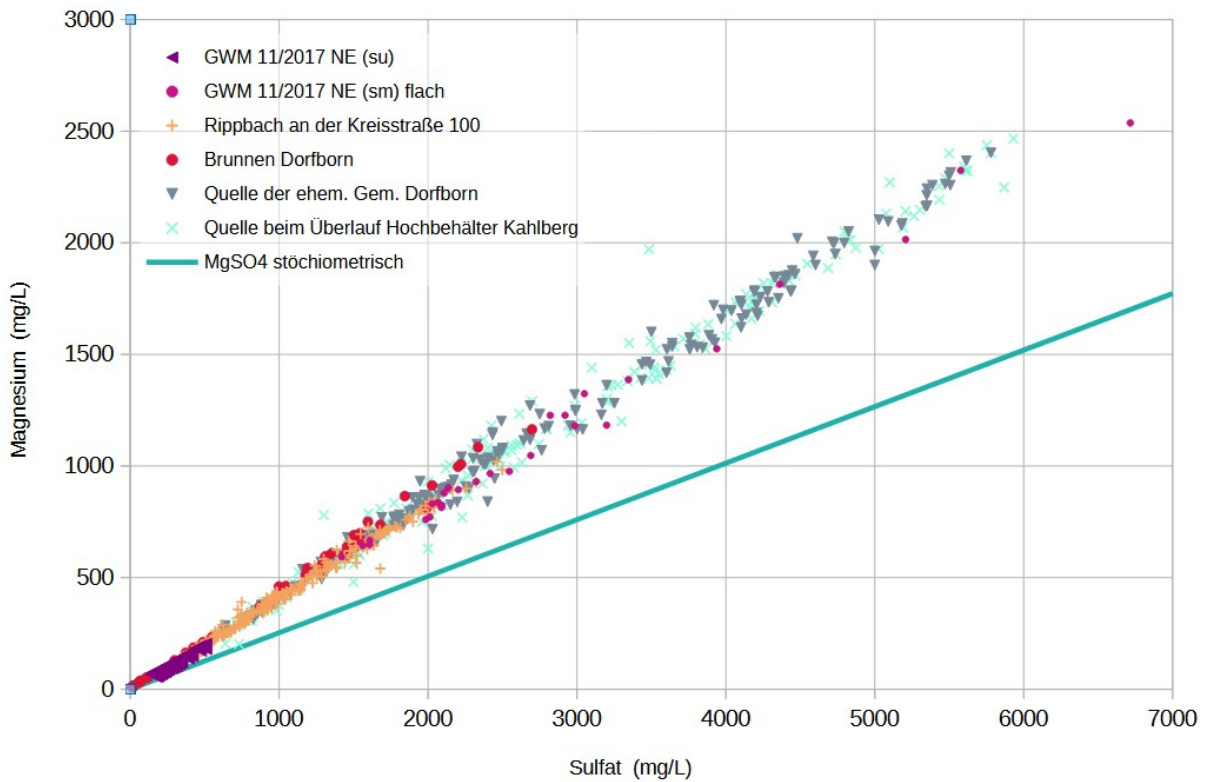


Abbildung 44 – Mg/SO4-Diagramm der o.g. Messreihen.

Südlicher Haldenrand und Südost-Sektor

Im Abhang südöstlich der Halde befinden sich die Messstellen GWM 7a/2013 NE, GWM 9/17 NE (sm), GWM 10/17 NE (sm), GWM 12/17 NE (sm), GWM 15/22 NE (sm), sowie die Quelle Kirschbach (Graben zum Rippbach). Zum Vergleich sind auch die Messstellen GWM 1, GWM 2, GWM 4 und GWM 8 nochmals aufgeführt (**Abbildung 45**).

GWM 1 Halde Neuhof (flach)	sm / su	26 – 39 m	vor 1997
GWM 1 Halde Neuhof (tief)	su	112 – 156 m	vor 1997
GWM 2 Halde Neuhof	sm	19 – 29,2 m	vor 1997
GWM 4 Halde Neuhof	sm	11,6 – 23 m	vor 1997
GWM 7a/2013 NE	su ?	78 – 88 m	2013
GWM 8 Halde Neuhof	sm	33 – 43 m	2013
GWM 9/17 NE	sm	34,8 – 44,8 m	2017
GWM 10/17 NE	sm	13 – 19 m	2017
GWM 12/17 NE	sm	30 – 40 m	2017
GWM 15/22 NE	sm	18 – 30 m	2022
Quelle Kirschbach (Graben zum Rippbach)			

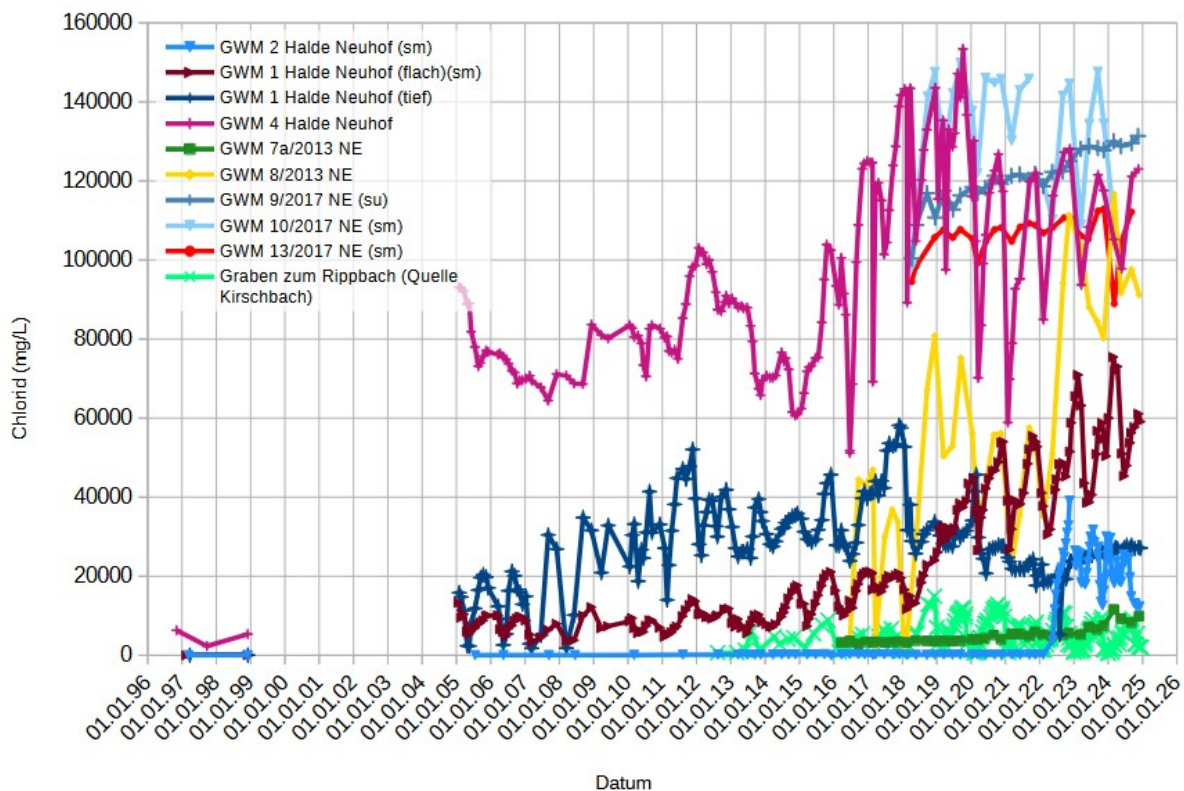


Abbildung 45 – Zeitliche Entwicklung der Versalzungen im Hauptgrundwasserleiter (Volpriehausen-Sandstein) und Unteren Buntsandstein.

Die beiden Messstellen „GWM 3 Halde Neuhof“ und „GWM 5 Halde Neuhof“ im Westen der Halde sind bisher ohne nachweisbare Versalzung. Nachdem die Halde nun aber nach Westen erweitert wird und an Höhe gewinnt, rechnet der Verfasser damit, dass auch diese Messstellen über kurz oder lang von der sich ausbreitenden Versalzungsfahne erfasst werden.

Alle anderen oben aufgeführten und in **Abbildung 44** dargestellten Messstellen im näheren Umfeld der Halde sind mittlerweile stark bis massiv versalzen und zeigen überwiegend weiter ansteigende Versalzung-Trends. Besonders die Messstellen im oberflächennah anstehenden oder austreichenden Volpriehausen-Sandstein sind durch ausgeprägte jahreszeitliche Schwankungen der Grundwasserneubildung gekennzeichnet.

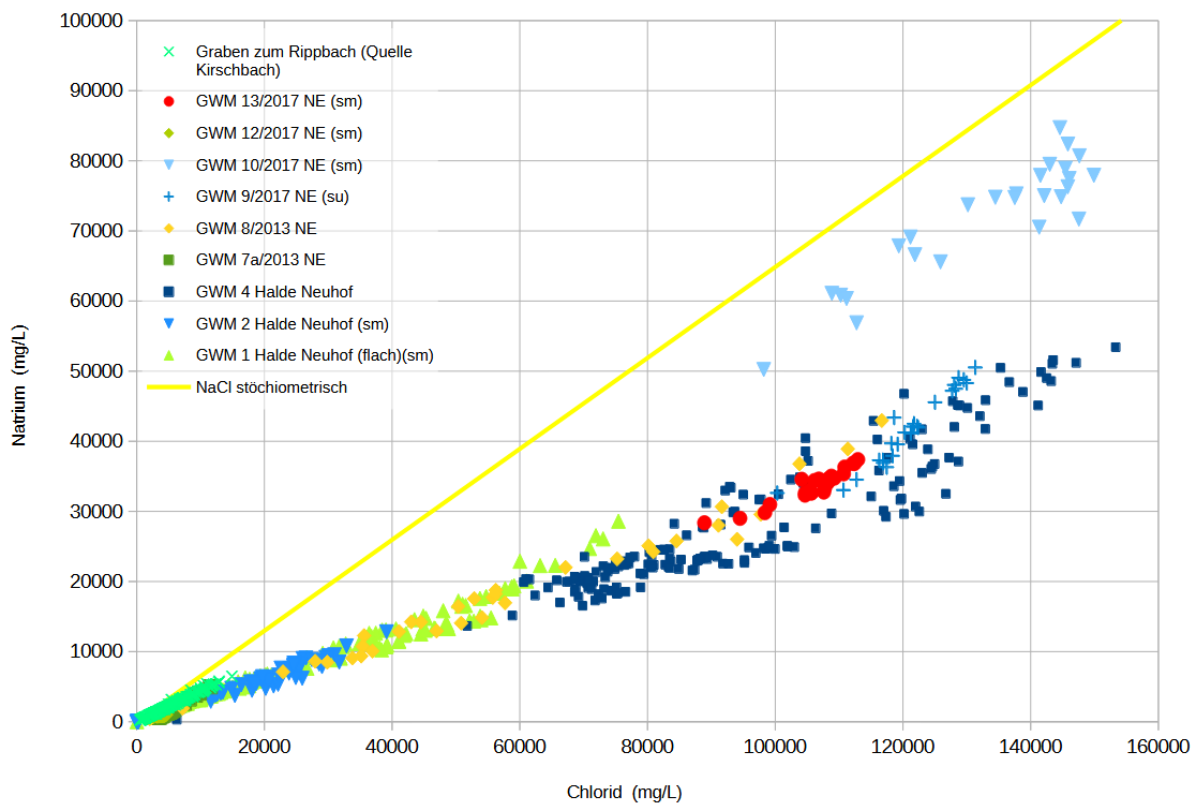


Abbildung 46 – Na/Cl-Diagramm der o.g. Messreihen

Beim Vergleich der Ionenverhältnisse (**Abbildungen 46 und 47**) fallen zwei unterschiedliche Trends auf, welche die GWM 10 und die Quelle Kirschbach in einen genetischen Zusammenhang stellen, der sich von den anderen Messstellen durch höhere Natriumsulfat-Anteile unterscheidet. Räumlich liegen die beiden Messstellen im südöstlichen Abstrom und werden von den ältesten Teilen der Kalihalde gespeist. Alle anderen Messreihen haben geringere Natriumsulfat-Anteile.

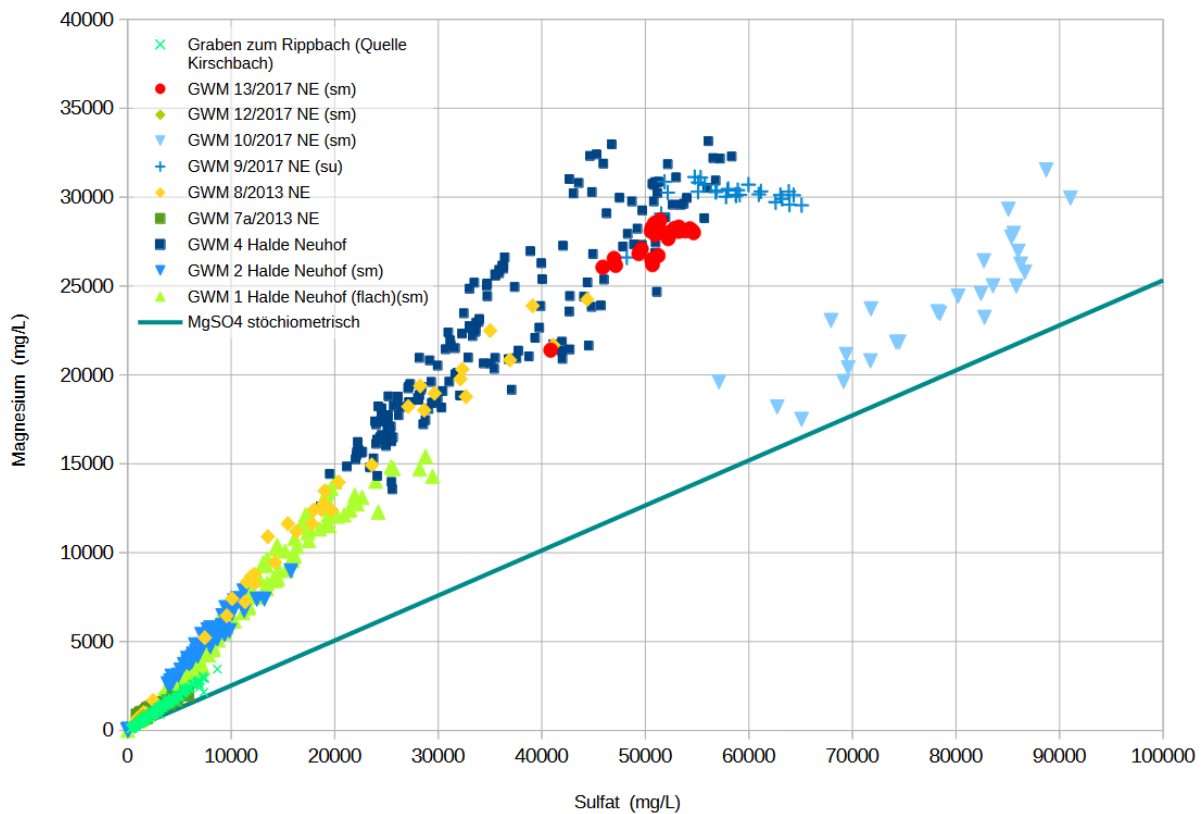


Abbildung 47 – Mg/SO₄-Diagramm der o.g. Messreihen.

Bei genauerer Betrachtung, auch in den unteren Konzentrationsbereichen (nicht eigens abgebildet) fallen aber bei weiteren Messreihen Abweichungen vom linearen Trend, hin zu den Natriumsulfat-reicheren Konzentrationen auf (z.B. GWM 9, GWM 1 (flach); **Abbildungen 46 und 47**).

Zur näheren Untersuchung wurden die Ionenverhältnisse (Na/Mg und Cl/SO₄) der Einzelanalysen gegen das Datum geplottet (**Abbildung 48**). Dort kann man anhand der Beispiele erkennen, dass abgesehen von kurzzeitigen, saisonalen Schwankungen auch längerfristige Entwicklungen stattfinden und zwar immer zu höheren Na/Mg-Verhältnissen und kleineren Cl/SO₄-Verhältnissen, in anderen Worten zu Natriumsulfat-reicheren Zusammensetzungen.

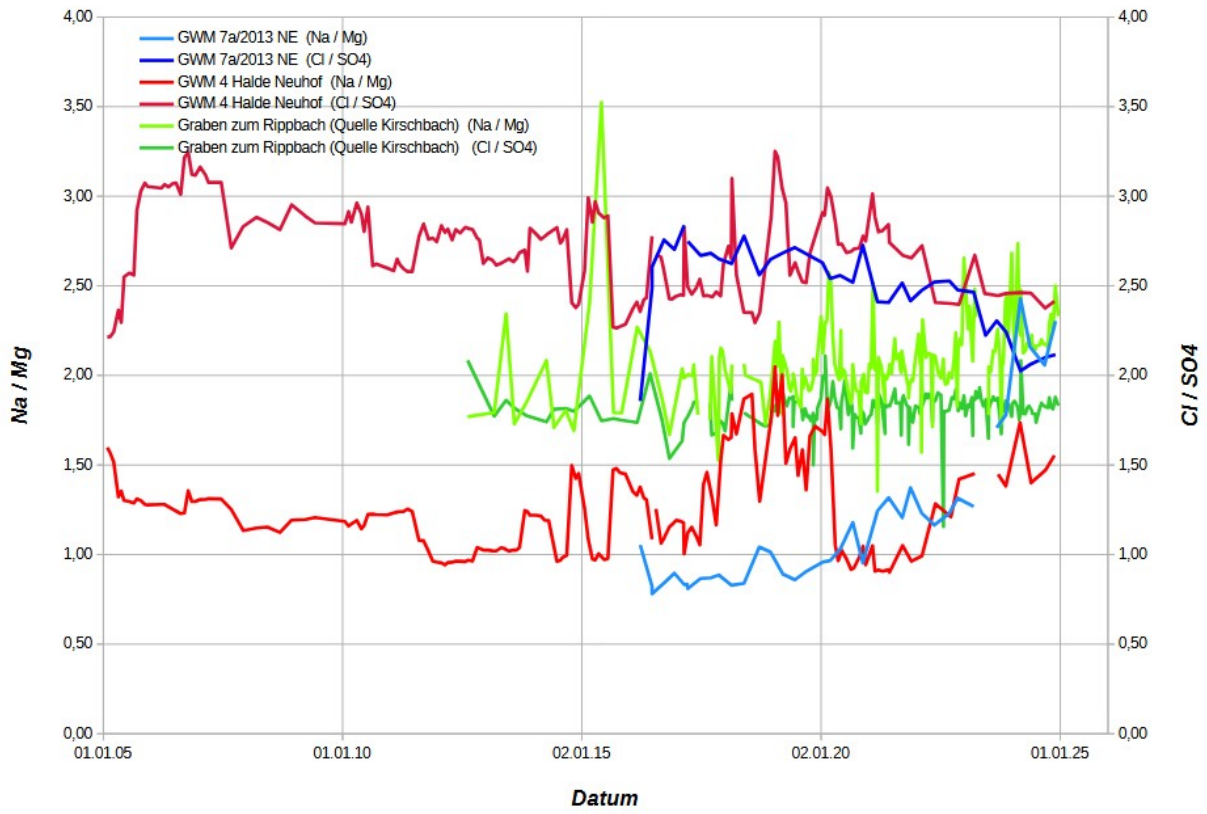


Abbildung 48 – Zeitliche Veränderungen in den Na/Cl- und Mg/SO4-Verhältnissen

Ergebnisse, Schlussfolgerungen, Empfehlungen

Auf Grundlage der vorausgegangen Ausführungen und Datenanalysen können einige für die weiteren Überlegungen relevante Feststellungen getroffen werden.

Kalihalde und Altewiese Bach

- Der Untergrund der Kalihalde Neuhof-Ellers wird von dem flach lagernden Volpriehausen-Sandstein und der Volpriehausen-Wechselfolge des Mittleren Buntsandsteins gebildet. Der grobsandige Volpriehausen-Sandstein ist der Hauptgrundwasserleiter, der an seiner Hangendgrenze von den Vorflutern Lützbach, Altewiese-Bach und Rippbach eingeschnitten wird.
- Der von der Kalihalde überschüttete Altewiese Bach und sein Einzugsgebiet haben für die weiteren Entwicklungen bzw. Planungen eine zentrale Bedeutung.
- Der Altewiese Bach wurde zwar maßgeblich, aber nicht ausschließlich durch die Alte Wiese Quelle gespeist. Sein natürlicher Einschnitt in den Volpriehausen Sandstein bindet ihn auch an den Hauptgrundwasserleiter an. Daher ist die Fassung der Alte Wiese Quelle und deren Ableitung keine geeignete Maßnahme, das gesamte im Einzugsgebiet des Altewiese Bachs anfallende Grundwasser (Grundwasser-Neubildung) zu fassen.
- Durch die Überschüttung des Altewiese Bachs und die Verfüllung seines eingeschnittenen Tals mit Fabrikrückständen wird dessen Vorflut-Funktion aufgehoben und der Grundwasserspiegel wird sich neu einstellen und dabei nach oben in den Haldenkörper verlagern.
- Nach Überschüttung der Vorfluter und der damit verbundenen Anhebung des Wasserspiegels entsteht ein direkter Kontakt zwischen dem Grundwasser und dem Haldenkörper. In der Folge wird die Haldenbasis permanent durch Süßwasser angeströmt, wodurch die Halde von unten her abgelautet (*quasi* subrodiert) wird.
- Durch Salzauflösung entstehende Hohlräume werden kollabieren und an der Haldenoberfläche dolinenartige Einbrüche und Schlucklöcher verursachen, die selbst wieder Ansatzpunkte für eine weitere Oberflächenerosion darstellen. Aufgrund dieser Vorgänge können Haldenabdeckungen keinen Bestand haben.

Haldenabdeckung

- Eine Abdeckung der Kalihalde Neuhof-Ellers durch ein definiertes technisches Abdichtungssystem kann aus den genannten Gründen keinen Bestand haben und würde seine Funktion und Gebrauchstauglichkeit einbüßen.
- Aufgrund der fortgesetzten Salzauflösung an der Haldenbasis durch das aus dem Altewiese-Einzugsbereich zugeführte Süßwasser kann eine Haldenabdeckung auch nicht die weitere Entstehung von Haldenwasser verhindern. Im Gegenteil wird durch die Gegebenheiten sogar zusätzliches Süßwasser aus dem Einzugsbereich der Kalihalde zugeführt.
- Eine Abdeckung der Kalihalde würde vermutlich mit mehr oder weniger belasteten bergbaufermen Abfallstoffen erfolgen, die das Schadstoff-Spektrum der Haldenwässer um viele Stoffe erweitern würden.
- Eine Abdeckung der Kalihalden ist auch ökologisch kontraproduktiv, denn Haldenabdeckungen machen aus potentiell stofflich verwertbaren Monodeponien

Mischdeponien, die eine spätere Verwertung technisch und wirtschaftlich unmöglich machen.

- Die Haldenwässer haben aufgrund ihrer sehr hohen Konzentrationen an komplexbildenden Anionen (insbesondere Chlorid und Sulfat) die Fähigkeit, Schwermetalle, Aluminium und weitere umweltschädliche Stoffe durch Komplexbildung zu mobilisieren und in Lösung zu bringen.
- Auch die infolge der Hydrolyse-Reaktion des Mg-Ions schwach sauren pH-Werte der Magnesium-reichen Haldenwässer fördern generell die Mobilisierung vieler Schadstoffe, selbst aus gewöhnlichen Gesteinen und Böden.
- Aus den gleichen Gründen sind die vorgeschriebenen standardmäßigen Elutionstests (DEV S4 usw.) mit destilliertem Wasser an Abfall-Proben bei Kalihaldenabdeckungen vollkommen sinnlos und irreführend.
- Die Halden-Abdeckung ist aber auch Teil des bergrechtlichen Abschlussbetriebsplans, nach dessen Erfüllung die Kalihalde „aus der Bergaufsicht entlassen“ wird und hinfert als Altlast dem Abfallrecht unterliegt und die Verantwortung, die Risiken und Pflichten, z.B. zur Instandhaltung der Abdeckung oder Korrektur der Maßnahme dann in der „Öffentlichen Hand“ liegen.

Haldenmodelle

- Bestehende Modellvorstellungen über die Struktur und die hydraulischen Eigenschaften von Kalihalden sind nachweislich unzutreffend und als Entscheidungsgrundlage abzulehnen. Tatsächlich sind die Porenräume der Haldenkörper nur in einer äußeren Hüllschicht mit „Wasser“ (Salzlösungen) ungesättigt, im Kern- und Mantelbereich dagegen lösungsgesättigt. Dieses Ergebnis ist indirekt durch geoelektrische und durch refraktionsseismische Profile durch Haldenkörper (Tomographien) belegt, direkt durch Haldenbohrungen und einen Tunnel nachgewiesen und auch durch Berechnungen zum Wasserandrang bestätigt. Anderslautende Behauptungen über „trockene“ Haldenkörper bzw. durchweg ungesättigte Porenräume und Haldenkörper beruhen auf ungeeigneten Probenahmen und Feuchtebestimmungen und auf subjektiven Beschreibungen, sind aber wissenschaftlich nicht haltbar.
- Tatsächlich bilden sich im Inneren von Kalihalden zusammenhängende Wasserkörper aus lösungsgesättigten Porenräumen und Verkarstungen, die der Schwerkraft unterliegen und durch einen Wasserspiegel (= Haldenwasserspiegel = Grundwasserspiegel) gegen die ungesättigte Hüllschicht der Kalihalden abgegrenzt sind. Die Haldenwasserkörper reagieren auf Niederschlagsereignisse und werden (u.a.) aus diesen gespeist. Die Haldenwasserneubildung steht in einem stationären Gleichgewicht mit Abflüssen ins bzw. über das Grundwasser.
- Die Haldenwasserkörper bilden ein hydraulisches Kontinuum mit dem regionalen Grundwasser.

Grundwasserdynamik

- Kalihalden sitzen nicht einfach als unbeteiligte technische Fremdkörper auf einem überschütteten Gelände, sondern sind aufgrund ihrer Beschaffenheit, Ausdehnung und Höhe hydraulisch gesehen wie Landschaftsbestandteile anzusehen, mit ihrem eigenen Wasserhaushalt und, zumindest nach einer Übergangszeit, mit einem ständigen hydraulischen Kontakt zum regionalen Grundwasser.

- Aufgrund der Lageunterschiede des Haldenwasserspiegels besteht eine hohe Potentialdifferenz gegenüber dem Haldenumfeld. Diese wird verstärkt aufgrund der um 20 bis 30 Prozent höheren Dichte der Haldenwässer gegenüber gering mineralisiertem Grundwasser. Im Ergebnis entsteht ein hydraulischer Potentialberg mit hohen Gradienten ins Haldenumfeld.
- Durch die so erhöhten hydraulischen Gradienten breiten sich die Haldensickerwässer innerhalb des Hauptgrundwasserleiters (hauptsächlich Volpriehausen Sandstein) lateral in alle Himmelsrichtungen aus.
- Durch den erhöhten Druckgradienten können die Vorfluter, die nur in den oberen Teil des Hauptgrundwasserleiters einschneiden, durch versalzenes Grundwasser quer zur Vorflut-Achse unterströmt werden. Solche Unterströmungen der Vorfluter Lützbach und Rippbach und Grundwasserversalzungen jenseits dieser Fließgewässer werden bereits beobachtet.

Haldenwasserbilanz

- Für die Jahre 2022 und 2023 konnten aus Niederschlags- und Haldenwasser-Abflüssen die Versickerungsmengen und somit eine ungefähre Haldenwasserbilanz abgeschätzt werden. (Verdunstung und hygroskopische Wasseraufnahme wurden dabei nicht berücksichtigt.) Demnach versickern (mindestens) etwa 40 Prozent des Niederschlags und (höchstens) 60 Prozent werden im Ringgraben gefasst und abgeleitet.
- Für die Haldenwasserbilanz spielt die hygroskopische Aufnahme von Luftfeuchtigkeit eine deutlich größere Rolle als bisher bekannt ist bzw. eingeräumt wird. Der Grund liegt in den hohen Magnesiumchlorid-Konzentrationen in Haldenwässern, auch an der Oberfläche der Halde. Magnesiumchlorid hat eine sehr viel geringere Deliqueszenzfeuchte (≥ 33 % relative Luftfeuchte) als Steinsalz (75% relative Luftfeuchte), so dass die Haldenlösungen nahezu permanent weitere Luftfeuchtigkeit aufnehmen und praktisch keine Verdunstung stattfinden kann. Für die Haldenwasserbilanz bedeutet dies einen tendenziell noch höheren Versickerungsanteil.

Trinkwassergewinnung

- Seit Beginn der Haldenaufschüttung mussten einige Wasserversorgungsanlagen im Einflussbereich der Halde wegen Versalzung aufgegeben werden. Dazu zählen unter anderem der Tiefbrunnen Altewiese, der Brunnen Dorfborn und der Brunnen Heiligenrain.
- Aufgrund der veränderten Grundwasserdynamik infolge des hohen Potentialbergs der Kalihalde kann man nicht ausschließen, dass auch weitere Brunnen und Trinkwassergewinnungsgebiete von der sich weiter ausbreitenden Versalzungsfahne erreicht werden, zumal durch die dortige Wasserförderung ein zusätzliches Potentialgefälle zu den Brunnen hin erzeugt wird.
- Zwecks Erkundung und Überwachung der Salzwasserausbreitung wird dringend empfohlen, die geoelektrischen Profile bis in die umliegenden Trinkwassergewinnungsgebiete zu verlängern und das hydrogeochemische Messstellennetz um geeignete Vorfeld-Messstellen zu erweitern. Der stillgelegte Brunnen Heiligenrain sollte wieder in das Monitoring aufgenommen und regelmäßig und auf alle üblichen Parameter analysiert werden.

Sanierung von Kalihalden

- Diese empfohlenen zusätzlichen Maßnahmen zur Überwachung sind kein Ersatz für umgehende Maßnahmen zur Schadens-Begrenzung und Schadens-Behebung, die unverzüglich vorzunehmen sind. Die rechtliche Handhabe dazu sollte aufgrund der allenthalben ansteigenden Versalzungstrends gegeben sein.
- Die derzeitige Ausdehnung (Stand 2025) der Versalzungsfahne im Grundwasser ist geochemisch und geoelektrisch gut dokumentiert, breitet sich aber ausweislich der ansteigenden Salzkonzentrationen weiter aus und nimmt an Intensität zu. Insoweit ist „Gefahr im Verzug“ gegeben.
- An dieser Stelle ist (abermals) auf das gigantische Versalzungspotential der Kalihalden hinzuweisen. 1 Tonne Rückstandssalz enthält 550 kg Chlorid und kann dadurch 2.200 m³ Süßwasser durch Überschreitung des Chlorid-Grenzwertes für Trinkwasser (250 mg/L Cl) vernichten. Die bereits aktuell in Neuhof-Ellers auf Halde liegenden 140 Millionen Tonnen Rückstände können somit 308 km³ Süßwasser unbrauchbar machen. (Zum Vergleich: Bodensee: 48 km³; Öffentliche Trinkwasserversorgung Deutschland (2019): 5,32 km³/a).
- Die Notwendigkeit einer Sanierung der Kalihalden ist dem Grunde nach längst ausdiskutiert. Es ist grundsätzlich nicht möglich, durch technische Maßnahmen Kalihalden dauerhaft und wirksam und ohne Folgekosten für die Allgemeinheit abzudichten. Daher ist eine Fortsetzung der bisherigen Entsorgungspraxis in Gestalt von Rückstandshalden nicht zu verantworten, und bestehende Kalihalden müssen unverzüglich vom Verursacher rückgebaut und umweltverträglich beseitigt werden.
- Durch die gegenwärtige Praxis werden künftige Generationen nicht nur für die Folgekosten der von K+S wesentlich verursachten Schäden einstehen müssen, sondern durch den Raubbau an den Kali-Lagerstätten auch ihrer Rohstoffbasis und durch die Gewässerversalzung ihrer Trinkwasserressourcen beraubt. - Siehe auch **Anhang 1**

Geochemie

- Oberflächennahe Haldenwässer (Verwitterungslösungen) entstehen in der ungesättigten Zone aus zunächst salzfreien meteorischen Wässern und frisch geschütteten Rückständen und/oder bereits älteren, durch Witterungseinflüsse ausgelaugten Rückstandssalzen.
- Die oberflächennahen Verwitterungs-Prozesse sind durch wechselnde Temperaturen, Luftfeuchten und intermittierende Niederschlagsereignisse (Witterungseinflüsse) gekennzeichnet, und diese Faktoren haben Einfluss auf die möglichen chemischen Reaktionen.
- Die oberflächennah entstehenden Lösungen sind nicht immer gesättigt und ihr Chemismus folgt Verdünnungsreihen. Es findet eine Hydratisierung von Kieserit zu Hexahydrat und Epsomit und die Bildung weiterer Kristallwasser-haltiger Sulfatsalze statt. Letztere bewirken eine temporäre Bindung und Speicherung von Wasser, bis auch diese hydratisierten Salze beim nächsten Niederschlag wieder aufgelöst werden.
- Aus dem reziproken Salzpaar Kieserit + Steinsalz wird durch Umsetzung Mirabilit bzw. Thenardit, sowie teilweise das Doppelsalz Blödit gebildet. Die entstehende Lösung ist

Magnesiumchlorid-reich und kann über die ungesättigte Zone abfließen, aber in Teilen auch den Wasserspiegel erreichen und in den Haldenkörper weiter einsickern.

- Die in Grundwassermessstellen im Umfeld der Halde Neuhof-Ellers ermittelten Chemismen zeigen bei Eintragung in das Hexäre Phasensystem der Ozeanischen Salze eine ganz ähnliche, aber nicht ganz so weit fortgeschrittene Entwicklung wie im Bereich der Kalihalde Hattorf (Philippsthal). Die Lösungen streben dem Invarianten Punkt *IP15 (IP16)* zu und weisen auf Eliminationsreaktionen der Wertmineralreste von Sylvin und Kieserit unter Neubildung von Epsomit, Blödit, Leonit und evtl. Polyhalit hin.
- Eine Entstehung der Versalzungsfahne, also der versalzten Grundwasserkörper durch Salzeinträge aus Lösungsprozessen in der Kalihalde, steht geochemisch außer Frage und wäre auch wegen der räumlichen und zeitlichen Zusammenhänge nicht bestreitbar.

Zitierte Quellen

Archie, G E (1942) Electrical Resistivity Log as an Aid in Determining Some Reservoir Characteristics. Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers, 164, 322-323.

Artschwager C, Braatz R, Poppitz H (2014) Haldenkörperbohrungen am Standort Hattorf – Ergebnisbericht. Band 3.17 der Antragsunterlage "Nachhaltiges Rückstandsmanagement am Standort Hattorf (Haldenerweiterung Hattorf)". K+S KALI GmbH, Werk Werra. Philippsthal. 115 S. + Anlagen.

Artschwager C, Braatz R, Poppitz H (2018) Haldenkörperverhalten – Auswertung der Haldenkörperbohrung am Standort Wintershall unter Einbeziehung der Ergebnisse für den Standort Hattorf. Band 3.15 des Rahmenbetriebsplans 27/12-WI (Antragsunterlage zum Nachhaltigen Rückstandsmanagement am Standort Wintershall) incl. Anlagen.

Artschwager, C.; Poppitz, H., Wilsnack, T. (2020). Die Rückstandshalde - wirklich eine Black Box? Kali und Steinsalz, 1/2020, 6-23.

Beer W (1996) Kalilagerstätten in Deutschland. Kali und Steinsalz, 12(1): 18-30.

BUND (2007) Kalihalden. BUND Region Hannover.

http://region-hannover.bund.net/themen_und_projekte/bergbaufolgen/kalihalden/

Butscher C (2012) Steady-state groundwater inflow into a circular tunnel. Tunnelling and Underground Space Technology 32, 158-167.

Diekmann R (2005) Zum Wasserhaushalt von Kali-Rückstandshalden. Bergrechtliches Planfeststellungsverfahren "Erweiterung der Halde Werk Sigmundshall" : 2004 - 2005. - 5A. Haldenerweiterung Werk Sigmundshall : Ergänzungsbericht zu Band 5: Geologische und hydrogeologische Untersuchungen/Bestandsaufnahmen.

El Tani M (2003) Circular tunnel in a semi-infinite aquifer. Tunn. Undergr. Space Technol. 18(1), 49–55.

EU (2004) Draft Reference Document on Best Available Techniques for Management of Tailings and Waste-Rock in Mining Activities. Draft March 2004
http://info.igme.es/SidPDF/123000/498/123498_0000003.pdf

EU (2009) Reference Document on Best Available Techniques for Management of Tailings and Waste-Rock in Mining Activities. European IPPC Bureau, European Commission, Joint Research Centre. 557 S.

EU (2010) Richtlinie 2010/75/EU Des Europäischen Parlaments und des Rates vom 24. November 2010 über Industrieemissionen (integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung) (Neufassung)

EU (2018) Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Management of Waste from Extractive Industries in accordance with Directive 2006/21/EC. Authors: Elena Garbarino, Glenn Orveillon, Hans G. M. Saveyn, Pascal Barthe, Peter Eder

FGG Weser (2025) Salz. Flussgebietsgemeinschaft Weser.
<https://www.fgg-weser.de/veroeffentlichungen/salz>

Fritsche J-G (2016) Gutachten zur Festsetzung eines Wasserschutzgebietes für die Trinkwassergewinnungsanlage „Tiefbrunnen 3 Dorfborn“ in der Gemarkung Dorfborn der Gemeinde Neuhof, Landkreis Fulda. Az.: III Hef 31.2 - 79 b 06.15, WSG ID 631-160

Fugro (2014) Abschlussberichtbericht – Hydrogeologische Auswertung der SkyTEM-Befliegungen im Umfeld der Rückstandshalde Neuhof-Ellers. Fugro Consult GmbH, Torgau, 13.08.2014. 41 S.

Geophysik LMU München (2025) Seismische Wellen. https://www.geophysik.uni-muenchen.de/~igel/Lectures/AG-I_new/5_apl_seismischewellen.pdf

GGL Geophysik und Geotechnik Leipzig GmbH (2025) Geoelektrische Messungen im südwestlichen, nördlichen und östlichen Bereich der Rückstandshalde Neuhof-Ellers der K+S Minerals and Agriculture GmbH. Leipzig, 28.02.2025

GGL Geophysik und Geotechnik Leipzig GmbH (2019) Geoelektrische Messungen im östlichen Bereich der Rückstandshalde Neuhof-Ellers der K+S Minerals and Agriculture GmbH. Leipzig, 06.12.2019

GGL Geophysik und Geotechnik Leipzig GmbH (2010) Durchführung von geoelektrischen Messungen im südwestlichen Umfeld der Rückstandshalde Neuhof-Ellers. Leipzig, 03.05.2010

GPG (2017) Seismic Velocities of Rocks and Various Materials (30.07.2025)
https://gpg.geosci.xyz/content/physical_properties/tables/seismic_velocity.html

Haug M und LePoudre C (2006) Management of Slope Stability for Potash Tailings Piles in Saskatchewan. Sea to Sky Geotechnique 2006, 1013-1017.
<https://members.cgs.ca/documents/conference2006/Seatosky/S3/0122-126.pdf>

Heimat- und Geschichtsverein Rommerz (2025) Werk Neuhof – Ellers. Heimat- und Geschichtsverein Rommerz e.V.
<https://www.heimatverein-rommerz.de/index.php/einrichtungen-und-gebaeude/geschaeftsleben/77-ks-kali-werk-neuhof-ellers?showall=1>

HGN (2024) Machbarkeitsstudie zur Ableitung des Quellgebietes „Alte-Wiese-Tal“ nördlich der Rückstandshalde Neuhof-Ellers. Magdeburg, 12. Juni 2024

HLNUG (2025) Geologie Viewer. Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie. (30.07.2025)
<https://geologie.hessen.de/mapapps/resources/apps/geologie/index.html?lang=de>

IfG (2016) Vergleich aktueller Stoffgesetze und Vorgehensweisen anhand von Modellberechnungen zum thermo-mechanischen Verhalten und zur Verheilung von Steinsalz. Teilvorhaben 2. Leipzig, 31.03.2016

Igel H (2012) Seismische Wellen. Internationales Qualitäts-Netz: Georisiken. https://www.geophysik.uni-muenchen.de/~igel/Lectures/AG-I_new/5_apl_seismischewellen.pdf

Katzenbach R (2021) Band 3.17.3N der Antragsunterlage - Bewertung der Modellvorstellung zur Ausbildung eines dichten Haldenkerns an Rückstandshalden. Ingenieursozietät Professor Dr.-Ing. Katzenbach GmbH. 11.11.2021

Krupp R (2003) Umweltschäden und stoffliche Verwertungspotentiale in der Kali- und Salz-Industrie. Umweltinformationen für Niedersachsen, Ausgabe 53, 1-43

Krupp R (2011) Alternative Produktions-, Aufbereitungs- und Entsorgungsverfahren im Thüringisch-Hessischen Kalirevier. Betrachtungen zur Nachhaltigkeit des Kalibergbaus. https://www.die-linke-thl.de/fileadmin/lv/dokumente/presse/sonstiges/Krupp_Gutachten_nachhaltiger_Kalibergbau.pdf

Krupp R (2013) Gefährdung der Gerstunger Brunnen durch Kaliabwasserversenkung. Stand Oktober 2013. Auftraggeber: Einheitsgemeinde Gerstungen. Burgdorf, 04.11.2013. 63 S.

Krupp R (2014) Memorandum: Wege zu einer umweltverträglicheren Kaliindustrie https://bund-region-hannover.de/fileadmin/hannover/BUND_Themen/Bodenabbau/Publikationen/Krupp_Memorandum_Kalibergbau.pdf

Krupp R (2017) Anhörungsverfahren des Thüringer Landtags zu dem Thema: Sanierung ökologischer Altlasten der DDR Kaliindustrie im Werk Werra der K+S Kali GmbH sowie Einlagerung von Kaliabwässern in der Grube Springen.

Krupp R (2018) Fachliche Prüfung von Antragsunterlagen im Bergrechtlichen Planfeststellungsverfahren „Haldenkapazitätserweiterung II Werk Zielitz (HKE II)“. Auftraggeber: Dirk Standaert, Schloss Heinrichshorst. Burgdorf, 15.07.2018.

Krupp R (2018) Grundwasserversalzung im Bereich der Kalihalde bei Wathlingen. Stand Januar 2018. Auftraggeber: BI Umwelt Uetze und BI Umwelt Wathlingen. Burgdorf, 30.01.2018

Krupp R (2019) Offener Brief: Versalzung der Werra und Weser, riskante Einstapelung von Kaliabwässern in ehemaligen Kalibergwerken. An die Flussgebietsgemeinschaft Weser (FGG Weser), 30.07.2019

<https://bund-region-hannover.de/service/meldungen/detail/news/offener-brief-einstapelung-von-kaliabwaessern-in-ehemaligen-kalibergwerke-nicht-geeignet-zur-loesung-der-kaliabwasserproblematik/>

Krupp R (2022) Gutachten zur Grundwasserversalzung, Neuhalde Hattorf. Auftraggeber: Bund für Umwelt und Naturschutz (BUND) Hessen. Burgdorf, 28.03.2022. 21 S.

Krupp R (2023) Stellungnahme zu weiteren Fragen, Gutachten zur Grundwasserversalzung, Neuhalde Hattorf. Burgdorf, 13.04.2023

Krupp R (2024) Gutachten zur Grundwasserversalzung, Kalihalde Hattorf. Auftraggeber: Bund für Umwelt und Naturschutz (BUND) Hessen. Burgdorf, 24.06.2024

K+S (1992) Hydrogeologie der Rückstandshalde des Werkes Neuhoof-Ellers. Juni 1992

K+S (1996) Westerweiterung Rückstandshalde Neuhoof-Ellers: Die Wirkung sulfatischer Salzminerale auf den Wasserhaushalt der Rückstandshalden. Anlage A-3.2, RBPI Westerweiterung.

K+S (1999) Westerweiterung Rückstandshalde Neuhoof-Ellers: Zur Frage des Grundwasserschutzes bei der Aufhaltung von Kalirückstandshalden. Anlage A-3, RBPI Westerweiterung.

K+S (2009 a) Gesamtstrategie zur Verminderung von Umweltbelastungen. - Überarbeitete Fassung vom 31.10.2009

K+S (2009 b) Integriertes Maßnahmenkonzept für das hessisch-thüringische Kalirevier.
<http://www.k-plus-s.com/de/umwelt/gewaesserschutz/massnahmenkonzept.html>

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. Artschwager,C; Poppitz, H; Braatz,R.

K+S (2019) Antragsunterlagen im Bergrechtlichen Planfeststellungsverfahren „Haldenkapazitätserweiterung II Werk Zielitz (HKE II)“

K+S (2019) Sicherungskonzept zum Haldenbetrieb des Werkes Neuhoof-Ellers der K+S Minerals and Agriculture GmbH. Neuhoof, 20. Dezember 2019

K+S (2024) 8. Runder Tisch // Beitrag K+S 09.10.2024 // Dr. Stefan Weber
<https://www.neuhof-fulda.de/runder-tisch/anhang-2-praesentation-k-s-reaktion-zum-konzept-generationes-sowie-haldenrueckbau-versatz-in-die-grube-oekologische-renaturier.pdf?cid=8y4>

K-UTEC (2021a) Geophysikalische Erkundung der Bestandshalde in Wintershall mittels Geoelektrik und Seismik, K-UTEC AG Salt Technologies, 25. November 2021. (Band 3.17.2N der Antragsunterlage, Anlage 17 Rev 01)

K-UTEC (2021b) Geophysikalische Erkundung - Tomographie der Bestandshalde in Hattorf mittels Geoelektrik und Seismik, K-UTEC AG Salt Technologies, 08. März 2021.

K-UTEC (2021c) Fortschreibung Geophysikalische Erkundung - Tomographie der Bestandshalde in Hattorf mittels Geoelektrik und Seismik. Sondershausen, 25. November 2021. 46 S.

K-UTEC et al. (2009) Abschlussbericht Universelles integriertes geophysikalisches Mess- und Auswertearmamentarium zur Charakterisierung von Problemzonen im Salinar. Leipzig, April 2009. <https://edocs.tib.eu/files/e01fb09/602172802.pdf>

Lux (05/2008) Lux K.-N., Bericht zu geophysikalischen Bohrlochmessungen, Zielitz Halde 2, Bohrung BK 1/08, 29.05.2008

Lux (07/2008) Lux K.-N., Bericht zu geophysikalischen Bohrlochmessungen, Zielitz Halde 2, Bohrungen BK 2/08 und 2A/08 und Vergleich mit BK 1/08, 11.07.2008

Poppitz Hanka (2021) Untersuchungen zur Alteration von Rückstandshalden der Kaliindustrie im Werratal. Dissertation, Universität Würzburg, 340 S., 2 digitale Anhänge

Reichling, Kenji Gilles (2014) Bestimmung und Bewertung des elektrischen Widerstands von Beton mit geophysikalischen Verfahren. Dissertation RWTH Aachen. 240 S.

Schwarz H, Müller T, Mainusch N (2023a) Epsomit. SalzWiki. <https://www.salzwiki.de/index.php/Epsomit>

Schwarz H, Steiger M, Müller T (2023b) Thenardit. SalzWiki. <https://www.salzwiki.de/index.php/Thenardit>

SIG UmweltProjekt GmbH Stendal (2007) Machbarkeitsuntersuchungen zur Oberflächenabdeckung der Rückstandshalde des Werkes Neuhof-Ellers der K+S KALI GmbH. Stendal, März 2007

Stahlbuhk A (2024) Salze und Salzgemische. SalzWiki. [https://www.salzwiki.de/index.php/Salze und Salzgemische](https://www.salzwiki.de/index.php/Salze_und_Salzgemische)

Steiger M (2012) Deliquescenzfeuchte. SalzWiki. <https://www.salzwiki.de/index.php/Deliquescenzfeuchte>

Steiger M, Charola A, Sterflinger K (2014) Weathering and Deterioration. In: Siegesmund S, Snethlage R (eds) Stone in Architecture. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-45155-3_4

Terrana (2025) Methode - Refraktionsseismik (Refraktionstomographie). (29.07.2025) [http://www.terrana-geophysik.de/images/Methode Seismik.htm](http://www.terrana-geophysik.de/images/Methode_Seismik.htm)

TU Freiberg (2019) Geophysikalische Bohrlochmessverfahren. Elektrische und elektromagnetische Bohrlochmessungen https://tu-freiberg.de/sites/default/files/media/institute-of-geophysics-and-geoinformatics-575/bl_el_gundlagen.pdf

UBA (2025) BVT-Merkblatt zum "Management von Bergbauabfällen und Taubgestein", Juli 2004, mit ausgewählten Kapiteln in deutscher Übersetzung. (03.08.2025) https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/481/dokumente/bvt_management-bergbauabfaelle_vv.pdf

Witzke T und Denk M (2011) Eine temporäre Mirabilit-Mineralisation bei Teutschenthal, Sachsen-Anhalt. - Der Aufschluss, 62: 353 – 360.

Anhang 1

Strategiewechsel für einen nachhaltigen Kalibergbau

Eine volkswirtschaftlich nachhaltige Nutzung der Kalilagerstätte erfordert eine langfristige Strategie, welche eine maximale Wertschöpfung bei minimalen Umweltbelastungen anstrebt und von Fairness gegenüber künftigen Generationen getragen wird. Der gegenwärtige Kalibergbau ist nach wie vor gekennzeichnet durch eine miserable Ausnutzung der gewinnbaren Vorräte aufgrund

- der verschwenderischen Kammer-Pfeiler-Abbaumethode, mit Verlusten um 50 Prozent.
- der selektiven Gewinnung nur hochgradiger und leicht aufbereiter Lagerstättenteile; hierdurch weitere hohe Verluste.
- sowie durch selbstverschuldete (verweigerter Nordsee-Pipeline) Einschränkungen bei der Nutzung von nassen Aufbereitungsverfahren; geringeres Ausbringen von Wertstoffen in trockenen Verfahren. .

Vermeintliche „technische Fortschritte“, wie die Umstellung auf das Kammer-Pfeiler-Abbauverfahren, oder die Entwicklung des ESTA-Verfahrens dienen immer der Gewinn-Optimierung auf Kosten der Volkswirtschaft (hohe Abbauverluste durch Raubbau) und zu Lasten der Umwelt (schneller wachsende Kalihalden und zukünftige Bergschäden wegen fehlender Versatzpflicht).

Zugleich verursacht der gegenwärtige Kalibergbau massivste und weit reichende Umweltschäden durch Versalzungen der Gewässer und Ökosysteme. Besonders die Versalzungen des Grundwassers werden sich über Jahrtausende auswirken und wichtige Lebensgrundlagen künftiger Generationen vernichten. Hinzu kommen Bergschäden durch Bodensenkungen infolge des versatzlosen Abbauverfahrens.

Eckpunkte für eine Strategie zur nachhaltigen Fortführung des Kalibergbaus wurden vom Verfasser bereits früher vorgeschlagen (z.B. Krupp, 2019). Dies sind insbesondere:

- Stopp der Aufhaldung von Rückstandssalzen und Wiedereinführung der Versatzpflicht, verbunden mit der
- Umstellung des Abbauverfahrens auf eine Totalgewinnung der Kaliflöze, durch Nachgewinnung der Stützpfeiler verbunden mit Versatzpflicht,
- Nutzung aller Rohsalz-Typen durch Anwendung auch nasser Aufbereitungsverfahren
- Rückbau bestehender Kalihalden.
- Bau einer Nordsee-Pipeline. Dadurch Entlastung der Fließgewässer, umweltverträgliche Entsorgung von Salzabwässern (Produktionsabwässer, Haldenwässer), Beseitigung bestehender Kalihalden durch aktive Auflösung. - Mündung der Pipeline im Außenbereich der Weser oder Elbe zwecks schneller

Verdünnung der Kaliabwässer. Finanzierung der Pipeline durch staatliche Darlehen, Amortisierung aus der zusätzlichen Wertschöpfung.

Demgegenüber liegen der Abdeckung von Kalihalden vornehmlich wirtschaftliche Gewinn-Interessen des Betreibers zugrunde, die einer nachhaltigen und ökologisch guten Problemlösung entgegenstehen. Diese Interessen ergeben sich unmittelbar aus den eingenommenen Entsorgungsgebühren für die angelieferten Abfälle (Bauschutt, Böden, sonstige mineralische Abfälle). Außerdem wird durch die Abdeckung ein Vorwand für die Entlassung der Halden aus der Bergaufsicht geschaffen, wodurch die Verantwortlichkeiten und Kosten auf die Allgemeinheit abgewälzt werden.

Anhang 2

Fotodokumentation zu den Kalihalden Friedrichshall und Ronnenberg

Fotodokumentation Kalihalde Ronnenberg, 2007

R.Krupp





Kalihalde Ronnenberg

Luftaufnahme vom 1. Juli 2004 (Google Earth)

Von August 1995 bis April 2004 wurde der Oberteil der Halde abgetragen um Versatzmaterial für das Versuchsendlager Asse bei Wolfenbüttel zu gewinnen.

Dank der Abtragung konnten Details der Innenstruktur einer Kalihalde studiert werden.

Bei einem Besuch am Neujahrstag 2007 konnten bei niedrigen Temperaturen auch Kristallisate im Randgraben der Kalihalde dokumentiert werden.

Titelbild: Kalihalde Ronnenberg, Haldenrumpf von Süden gesehen.



Plateau Halde Ronnenberg.

Angelöste Schichtköpfe von Schüttungskörpern.

Wechsel von rekristallisierten Salzlagen und tonigen Zwischenlagen.

System von Querklüften.



Plateau Halde Ronnenberg.
(Detail aus vorherigem Bild)

Angelöste Schichtköpfe von
Schüttungskörpern.

Wechsel von rekristallisierten
Salzlagen und tonigen
Zwischenlagen.

System von Querklüften.



Plateau Halde Ronnenberg.

Schluckloch auf Plateaufläche.



Plateau Halde Ronnenberg.

Überwiegend rekristallisierte
Salzpartien, mit karstartigen Gerinnen,
die in Schlucklöcher einmünden.



Plateau Halde Ronnenberg.

Karstartiges Gerinne mit fließender Salzlösung, verschwindet in Schluckloch.



Plateau Halde Ronnenberg.

Angelöste Schichtköpfe von Schüttungskörpern (rekristallisierten Salzlagen), die in Blickrichtung schräg rechts einfallen.

System von Querklüften.



Ringgraben Halde Ronnenberg.

Am kalten Neujahrstag 2007.

Auskristallisation von Mirabilit
(Glaubersalz)



Ringgraben Halde Ronnenberg.

Am kalten Neujahrstag 2007.

Auskristallisation von Mirabilit
(Glaubersalz)



Ringgraben Halde Ronnenberg.

Am kalten Neujahrstag 2007.

Auskristallisation von Mirabilit
(Glaubersalz)

Anhang 3

Zu Abbildung 14: Tomographische Schnitte durch die Halden Hattorf (oben) und Wintershall (unten).

Gleichstrom-Geoelektrik (K-UTEC, 2021 a,b, c).

