

OTEC – Geology

Ausbreitungsabschätzung der Sickerwässer der Althalde Siegfried-Giesen im Grundwasser

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

Kassel, 19.01.2021

Inhaltverzeichnis

1	Zusammenfassung	5
2	Zielstellung	6
3	Modellaufbau	6
3.1	Hydrogeologische Verhältnisse im Bereich Althalde	7
3.2	Kalibrierung	9
3.3	Parametrisierung der Modellränder und innere Randbedingungen	11
3.4	Transportmodell	12
4	Fortschreiben Grundwassermodell	12
4.1	Aktualisierung Datensatz Grundwasserneubildung	12
4.2	Verlängerung der Zeitreihen Wasserstände und Verifizierung der Kalibrierung	13
4.3	Modelldiskretisierung	15
4.4	Modellparameter	15
4.4.1	Dispersivität	15
4.4.2	Parameter Fluid	16
4.5	Die Althalde als Quellterm	18
4.6	Implementieren Felduntersuchungen 2019/2020	19
4.7	Anpassung der Durchlässigkeitsbeiwerte	20
4.8	Ergebnisse der Stofftransportsimulation	20
4.8.1	Umrechnung Gesamtmineralisation - Chloridkonzentration	20
4.8.2	Ist-Zustand	21
4.9	Validierung der Modellergebnisse	24
4.9.1	Vergleich der gemessenen mit den modellierten Salzkonzentrationen	24
4.9.1.1	Haldennahe Messstellen	25
4.9.1.2	Haldenferne Messstellen	27
4.9.1.3	Messstellen nördlich der Innerste	29
4.9.2	Validierung der Modellergebnisse mittels Geoelektrik	30
4.10	Prognoserechnung	34
5	Literaturverzeichnis	37

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematischer Schnitt der hydrostratigraphischen Einheiten, verändert nach Fugro 2014 Hydrogeologisches Gutachten.....	8
Abbildung 2: Übersicht aller zur Erstellung des Modells verfügbaren Aufschlüsse. [Fugro 2014 Modellbericht].....	10
Abbildung 3: Güte der Modellanpassung (Modellrepräsentanzfehler) Modell 2014. Grundwassermessstellen (oben) und Oberflächenmessstellen (unten). [Fugro 2014 Modellbericht].....	11
Abbildung 4: Vergleich Verteilung Grundwasserneubildung mGROWA mit GROWA06v2.....	13
Abbildung 5: Güte der Modellanpassung (Modellrepräsentanzfehler) der Oberflächenwassermessstellen des aktualisierten Modells.	14
Abbildung 6: Güte der Modellanpassung (Modellrepräsentanzfehler) der Grundwassermessstellen des aktualisierten Modells.....	15
Abbildung 7: PECLET-Zahlen in Folge der horizontalen Netzverfeinerung im potentiellen Abstrombereich.	16
Abbildung 8: Verhältnis Dichte zu Gesamtmineralisation aller verfügbarer Analysen im Modellgebiet.....	17
Abbildung 9: Entwicklung Althalde SG und daraus resultierende Restinfiltration.	19
Abbildung 10: Verhältnis Chlorid zu Gesamtmineralisation im Haldenwasserbecken.	21
Abbildung 11: Verteilung der Gesamtmineralisation ausgehend von der Althalde im Ist-Zustand, 4 Meter unterhalb des Grundwasserspiegels.....	22
Abbildung 12: Verteilung der Gesamtmineralisation ausgehend von der Althalde im Ist-Zustand, 14 Meter unterhalb des Grundwasserspiegels.....	23
Abbildung 13: Verteilung der Gesamtmineralisation ausgehend von der Althalde im Ist-Zustand, 26 Meter unterhalb des Grundwasserspiegels.....	24
Abbildung 14: Für die Stofftransportmodellierung relevante Messstellen.....	25
Abbildung 15: Vergleich gemessene mit errechneten Chloridkonzentrationen in den haldennahen Messstellen (ausgenommen GWM 14).	26
Abbildung 16: Vergleich gemessene mit errechneten Chloridkonzentrationen an der GWM6-tief. Gut zu erkennen ist das Zurückgehen der gemessenen Chloridkonzentrationen durch eine Verringerung der Restinfiltration nach Ende der Produktion durch einen Teilrückbau der Halde.	27
Abbildung 17: Vergleich gemessene mit errechneten Chloridkonzentrationen in den haldenfernen Messstellen.....	28
Abbildung 18: Vergleich gemessene mit errechneten Chloridkonzentrationen an der Messstelle GWM7-tief.	29
Abbildung 19: Vergleich gemessene mit errechneten Chloridkonzentrationen in den Messstellen nördlich der Innerste.....	30
Abbildung 20: Geoelektrik Horizontalschnitt im Untersuchungsgebiet bei 60 m NN, ca. 5 m u. GOK. Ab spezifischen elektrischen Widerständen kleiner 10 Ohm m sind Salzwässer mit einiger Sicherheit beteiligt. [GGL 2020].....	32
Abbildung 21: Geoelektrik Horizontalschnitt im Untersuchungsgebiet bei 50 m NN, ca. 15 m u. GOK. Ab spezifischen elektrischen Widerständen kleiner 10 Ohm m sind Salzwässer mit einiger Sicherheit beteiligt. [GGL 2020].....	33
Abbildung 22: Geoelektrik Horizontalschnitt im Untersuchungsgebiet bei 40 m NN, ca. 25 m u. GOK. Ab spezifischen elektrischen Widerständen kleiner 10 Ohm m sind Salzwässer mit einiger Sicherheit beteiligt. [GGL 2020].....	34
Abbildung 23: Verteilung der Gesamtmineralisation ausgehend von der Althalde 30 Jahre in die Zukunft gerechnet, 4 Meter unterhalb des Grundwasserspiegels.	35



Abbildung 24: Verteilung der Gesamtmineralisation ausgehend von der Althalde 30 Jahre in die Zukunft gerechnet, 14 Meter unterhalb des Grundwasserspiegels.	36
Abbildung 25: Verteilung der Gesamtmineralisation ausgehend von der Althalde 30 Jahre in die Zukunft gerechnet, 26 Meter unterhalb des Grundwasserspiegels.	36

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Vertikaler Schichtenaufbau im Modellgebiet. [Fugro 2014 Modellbericht].....	8
Tabelle 2: Zusammenfassung relevanter Modellparameter. Parameter die unverändert aus dem Originalmodell übernommen wurden sind zitiert.	17

1 Zusammenfassung

Das Grundwassermodell, welches zur Beurteilung der stofflichen Beeinflussung des Grundwassers durch die Althalde Siegfried-Giesen herangezogen wurde, basiert auf dem anerkannten Strömungs- und Transportmodell, das im Rahmen des Planfeststellungsverfahrens zum Rahmenbetriebsplan Hartsalzwerk Siegfried-Giesen 2014 durch die Fugro Consult GmbH erstellt wurde. 2018/2019 wurde das Transportmodell bzgl. der Grundwasserstände und -neubildung fortgeschrieben. Ein aus der Althalde resultierender Stoffeintrag in das Grundwasser wurde in das Modell implementiert. Dabei wurde folgender weiterer Untersuchungsbedarf festgestellt: Erstens lagen im Bereich zwischen Ahrbergen und Sarstedt bislang keine Aufschlüsse vor, die Auskunft über die konkreten hydrogeologischen Verhältnisse geben können. Zweitens war der Stoffeintragsterm in das Grundwassermodell, die Althalde, nach wie vor mit großen Unsicherheiten behaftet. Zur Abgrenzung der Salzwasserausbreitung zwischen Ahrbergen und Sarstedt wurde eine Geoelektrik-Messkampagne in den Bereichen nördlich der Innerste (Richtung Ahrbergen) sowie im nordwestlichen Randbereich der Ausbreitung (Ist-Zustand/Abgrenzung in Richtung Nordwesten) durchgeführt. Aufbauend auf den Ergebnissen dieser Geoelektrik-Messungen wurden, in Kombination mit den Modellergebnissen, Standorte für neu zu errichtende Messstellen festgelegt. Dies betraf insbesondere die mögliche Ausbreitung in Richtung Nordwesten (3 Doppelmessstellen im Umfeld des Friedhofs Ahrbergen) sowie die potentiellen Mineralisationen im Bereich der Innerste (im unmittelbaren Umfeld der GWM20 eine weitere, tiefere Messstelle). Die Ausbreitung kann dadurch mit größerer Sicherheit umgrenzt werden. Die Messstellen werden in das umfangreiche laufende Monitoring integriert und sämtliche Entwicklungen werden weiterhin durch laufendes Monitoring beobachtet.

Der Stoffeintragsterm in das Grundwassermodell, die Althalde, wurde mittels einer Haldenwasserbilanz quantifiziert. Die Ergebnisse wurden mit den in den Messstellen tatsächlich gemessenen Chloridkonzentrationen abgeglichen. Somit wurde der lateral wirksame Teil der von der Halde ausgehenden Salzemission quantifiziert. Geogene Mineralisationen oder etwaige Mineralisationen aus anderen Quellen bleiben hierbei unberücksichtigt, um eine möglichst genaue Abschätzung der von der Althalde ausgehenden stofflichen Beeinflussung zu gewährleisten.

Im Ergebnis des Modelllaufs für den Zeitraum 1925 - 2020 (seit Beginn der Aufhaldung am jetzigen Standort der Althalde) stellt sich die räumliche Ausbreitung der Mineralisation im Ist-Zustand wie folgt dar: Die sich ausbildende stoffliche Beeinflussung erfolgte ausgehend von der Althalde in Richtung Innerste. Sie folgte dabei der Grundwasserfließrichtung nach Nordwesten. Entsprechend der höheren Dichte des Salzwassers gegenüber dem oberflächennahen Grundwasser sank dieses über den Transportweg hinweg in größere Tiefen zur Sohle des Grundwasserleiters ab.

Die modellierten Konzentrationen in den tiefen Messstellen im Zentrum der Salzwasserausbreitung entsprechen weitestgehend den gemessenen Werten. Jedoch werden die oberflächennahen Messstellen im Modell überschätzt, ebenso der Bereich nordöstlich der Innerste. Die geochemische Signatur der tieferen Messstellen nördlich der Innerste weist zusätzlich auf geogene Mineralisation hin, so dass hier das Modell die Ausbreitung vermutlich überschätzt. Da bei der Modellierung ausschließlich die Ausbreitung der Haldensickerwässer im Grundwasserleiter nachgebildet wird, bleiben geogene Einflüsse oder Mischungsvorgänge

unberücksichtigt. Vergleicht man die Modellergebnisse mit den Ergebnissen der Geoelektrik, stellt man fest, dass die Ergebnisse bei beiden auf erhöhte Mineralisation im tieferen Untergrund hindeuten, was sich mit den Ergebnissen aus der Beprobung der Grundwassermessstellen deckt. Die oberflächennahen Bereiche sind jedoch unbeeinträchtigt.

Für eine Prognoserechnung wurde die Simulation bis 2050 verlängert. Im Modell erfolgt dabei eine weitere Ausbreitung entlang der Grundwasserleitersohle mit der Grundwasserströmung Richtung Nordwesten. Die Mineralisation wird dabei mit zunehmenden Abstand von der Althalde durch Verdünnungsprozesse geringer. Die Ergebnisse der Prognoserechnung werden folgendermaßen eingeordnet und bewertet: Gemäß Modell ist die Ausbreitung der Mineralisation in geringen Konzentrationen an der Sohle des Grundwasserleiters, d.h. in größerer Tiefe, Richtung Nordwesten möglich.

Die neu errichteten Messstellen werden in das umfangreiche regelmäßige Monitoringprogramm mit einbezogen. Hier werden die Ergebnisse aus der Grundwasserbeobachtung in den nächsten Jahren in Hinblick auf die Modellprognosen zu bewerten sein.

2 Zielstellung

Im Rahmen des früheren Betriebes des Kaliwerks Siegfried-Giesen wurden die Rückstände aufgrund der natürlich vorhandenen bindigen Schichten entsprechend dem damaligen Vorgehen ohne den Einbau einer technischen Basisabdichtung aufgehaldet. Die Haldenoberfläche ist dem Niederschlagswasser direkt ausgesetzt, so dass Lösungseffekte eintreten. Das von der Haldenoberfläche abfließende Niederschlagswasser wird zum größten Teil in Haldenrandgräben aufgefangen. Dennoch ist im derzeitigen Zustand für die konsolidierte Althalde immer noch von einem Eintrag des nicht im Haldenrandgraben gefassten Niederschlagswassers der Althalde in das Grundwasser auszugehen. Dichtebedingt sinkt das stärker mineralisierte Haldenwasser in den Untergrund ab. [Fugro 2014 Modellbericht]

Im Rahmen der Gefährdungsabschätzung Althalde Siegfried-Giesen soll mit Hilfe des numerischen Grundwassermodells Siegfried-Giesen eine Prognose der Ausbreitung der stofflichen Beeinflussung im Grundwasser, ausgehend von den salinaren Wässern der Althalde, erfolgen. Die Prognose erfolgt auf Basis des numerischen Grundwasserströmungs- und Stofftransportmodells, das im Rahmen des Planfeststellungsverfahrens zum Rahmenbetriebsplan Hartsalzwerk Siegfried-Giesen durch die Firma Fugro Consult GmbH entwickelt und anerkannt wurde. [Fugro 2014 Modellbericht]

3 Modellaufbau

2014 wurde das numerische Grundwasserströmungs- und transportmodell im Rahmen des Planfeststellungsverfahrens zum Rahmenbetriebsplan Hartsalzwerk Siegfried-Giesen durch die Firma Fugro Consult GmbH entwickelt. Hierfür wurde die Software Feflow (Finite Element subsurface FLOW system), ein durch die DHI-Wasy GmbH entwickeltes Grundwassersimulationsprogramm, verwendet.

Zielstellung war dabei die Prognose der Auswirkungen der Wiederinbetriebnahme des Hartsalzwerks Siegfried-Giesen, mitsamt der zu errichtenden Neuhalde, auf das Grundwasser. Hierfür wurde ein Planungsmodell entsprechend der technischen Regel Arbeitsblatt W 107

(DVGW 2004, Neuauflage DVGW 2016) erstellt. Für derartige Planungsmodelle wird eine mittlere bis hohe Wiedergabetreue der realen Verhältnisse gefordert. Ein Modell dieser Kategorie muss kalibriert sowie die einzelnen Bilanzgrößen auf Plausibilität geprüft werden. Sofern geeignete Datensätze verfügbar sind, sind die Modellergebnisse damit ergänzend zu verifizieren. Für die Nutzung als Planungsmodell im Rahmen des Genehmigungsverfahrens sind stationäre Modellrechnungen ausreichend. Detaillierte Aquifersimulationen im Sinne der DVGW 2016 mit Abbildung instationärer Vorgänge sowie hochaufgelöste sowie flächendifferenzierte Detailbetrachtungen sind zum Planfeststellungsverfahren nicht erforderlich. [Fugro 2014 Modellbericht]

Die für die Gefährdungsabschätzung wichtigen Aspekte des Modellaufbaus werden hier in Kürze zusammengefasst:

Das Modell besteht insgesamt aus 32 Schichten. Die vertikale Modellgeometrie basiert auf einem 3D-geologischen Strukturmodell. Der Fokus für den vertikalen Modellaufbau liegt demnach auf der Differenzierung der quartären Strukturen bzw. der Hangendablagerungen der Festgesteinsaufragungen nördlich der Giesener Berge (Festgesteinsersatzzone), in denen die potenzialbestimmenden Strömungsvorgänge stattfinden. In den geologischen Einheiten im Liegenden der Quartärbasis vollziehen sich nur untergeordnete Strömungsprozesse, die Strömungsvorgänge im Quartär dominieren im Untersuchungsraum. Der vertikale Schichtenaufbau wurde im Modell entsprechend der hydrostratigrafischen Haupteinheiten untergliedert, wobei im Zusammenhang mit der dichteabhängigen Stofftransportsimulation weitergehende vertikale Untergliederungen vorgenommen wurden. [Fugro 2014 Modellbericht]

3.1 Hydrogeologische Verhältnisse im Bereich Althalde

Ein schematischer hydrogeologischer Querschnitt ist in Abbildung 1 dargestellt und in Tabelle 1 beschrieben. Das Modellgebiet kann in drei Abschnitte eingeteilt werden. Im Süden der Bereich Hanglage mit geringmächtigem Grundwasserleiter und prätertiären Festgesteinen in geringer Tiefe. Die Gesamtmächtigkeit der quartären Lockersedimente schwankt im südlichen bis südwestlichen Umfeld des Standortes SG meist zwischen wenigen Dezimetern und ca. 15 bis 20 m. Der Übergangsbereich, dem auch das ehem. Werksgelände Siegfried-Giesen sowie die Althalde zugeordnet sind, ist durch eine deutlich größere grundwassererfüllte Mächtigkeit, sowie einen Wechsel zwischen grundwasserführenden und -hemmenden Schichten gekennzeichnet. Eine flächenhafte Trennung der grundwasserleitenden Horizonte ist jedoch nur teilweise vorhanden. Insbesondere am Rand zur Innersteaue kann von hydraulischen Fenstern zwischen den quartären Grundwasserleitern ausgegangen werden. Im restlichen Bereich ist die hydraulische Verbindung zwischen den Grundwasserleitern durch die Trennschicht zumindest eingeschränkt. Die Innerste-Niederung im Nordteil ist durch Kiese und Sande als Rinnenfüllung und subrosionsbedingte Senkungen gekennzeichnet. Hier werden auch deutlich größere Mächtigkeiten von über 40 m kiesig-sandiger Ablagerungen erreicht. [Fugro 2014 Hydrogeologisches Gutachten]

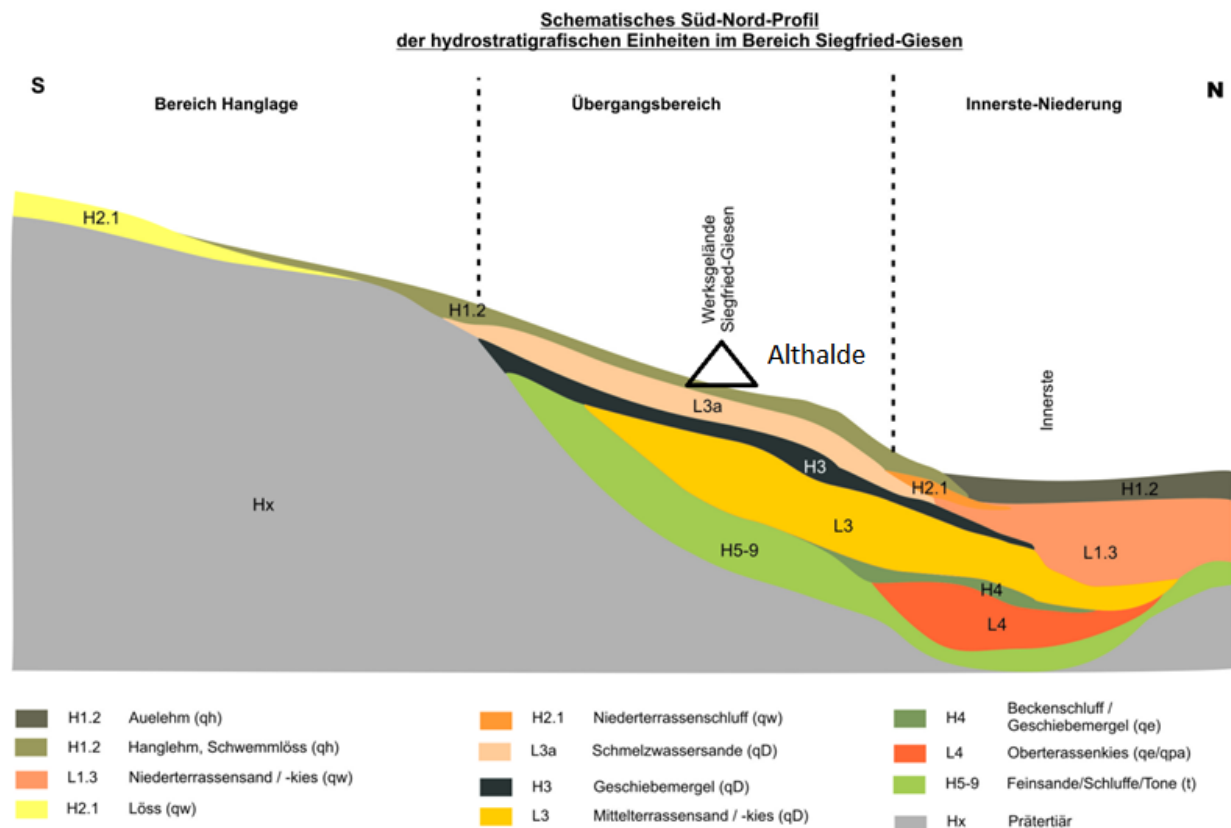


Abbildung 1: Schematischer Schnitt der hydrostratigraphischen Einheiten, verändert nach Fugro 2014 Hydrogeologisches Gutachten.

Tabelle 1: Vertikaler Schichtenaufbau im Modellgebiet. [Fugro 2014 Modellbericht]

Geologische Einheit	Primäre hydraulische Funktion	Hydrostratigraphische Einheit
Auelehm, Hanglehm, Löss	Deckschicht, GW-Hemmer - GWH1	H1.2 / H2.1
Niederterrassensande / -Kiese (qH), Schmelzwassersande (qD)	Hangender quartärer GW-Leiter-Horizont – GWL1	L1.3 / L3a
Drenthe-Geschiebemergel (qD)	GW-Hemmer - GWH2	H3
Sande/Kiese Mittelterrasse (qM) (Drenthe-Vorschütt- und Elster-Nachschüttbildungen)	Quartärer Haupt-GW-Leiter GWL2	L3
Elster-Geschiebemergel (qe)	GW-Hemmer – GWH3	H4
Sande/Kiese Oberterrasse (qO) Altpleistozän (qpa)	Liegender quartärer GW-Leiter-Horizont – GWL3	L4
Tertiär (schluffige Feinsande / Schluffe) Zersatzzone des mesozoischen Festgesteins	überwiegend GW-Hemmer (indifferent) (Ausgleichsströmungen im Bereich der Zersatzzone des Festgesteins bzw. rolliger tertiärer Bildungen)	H 5-9

Hutgestein (als integrale 20 m-Schicht im Modell)		
Mesozoisches Festgestein (zumeist steilgestellte stratigrafische Schichtung) im Flankenbereich des Salzstocks bzw. Hutgesteins	überwiegend GW-Hemmer	Hx

Hinsichtlich der Grundwasserflurabstände im Untersuchungsraum ergibt sich in Abhängigkeit von den natürlichen Schwankungen und der morphologischen Situation ein Bild überwiegend flurnaher Grundwasserstände, d. h. die gemittelten Grundwasserflurabstände liegen im Großteil des Gebietes zwischen 1 und 5 m. Die Umgebung des Werksgeländes und der Althalde ist gekennzeichnet von mittleren Grundwasserflurabständen von ca. 4 m im Werksgelände SG und Althaldenumfeld und geringeren Abständen von ca. 2 m im Bereich der Innersteaue. Aufgrund der innerjährlichen Schwankungen können hier jedoch auch Flurabstände von weniger als 1 m erreicht werden. [Fugro 2014 Hydrogeologisches Gutachten]

Die Grundwassergleichen zeigen eine dem Oberflächenrelief folgende Strömungssituation und sind auf die Vorfluter ausgerichtet. Nordöstlich von Werksgelände und Althalde zeigt sich eine vorwiegend nach Norden bis Nordosten direkt zur Innerste ausgerichtete Grundwasserströmung, während westlich davon ein hydraulisches Gefälle in nordwestliche Richtung (Entenfanggebiet und weiter in Richtung Giften auf die Leine ausgerichtet) besteht. [Fugro 2014 Hydrogeologisches Gutachten]

Der Fokus der Betrachtungen im Modellgebiet liegt auf den Fließvorgängen in den quartären und tertiären Schichten. Fließvorgänge im Hutgestein spielen eine untergeordnete Rolle. Geogen aufmineralisierte Wässer aus dem Hutgestein haben jedoch durchaus das Potenzial, über Schwächezonen in die quartären Grundwasserleiter aufzusteigen. Dies zeigt sich am Druckpotenzial der im Hutgestein verfilterten GWM26, welches zwischen 70,8 und 73,5 m NN liegt. Zieht man das Gefälle des Untersuchungsgebietes hin zur Innerste in Betracht, bedeutet dies, dass das Druckpotential des prätertiären Grundwasserleiters in Bereichen nördlich der Althalde bereits über GOK liegt.

3.2 Kalibrierung

Die ursprüngliche Kalibrierung des Modells erfolgte auf Basis der Mediane der Grundwasserstände 2011 (oder später) bis 2014. Insgesamt standen 49 Grundwassermessstellen und 42 Oberflächenwassermessstellen zur Verfügung (Abbildung 1/Abbildung 2). Dabei konnte eine Modellanpassung mit einem mittleren relativen Fehler von 1,3 % (Grundwassermessstellen) bzw. 2,1 % (grundwasserabhängige Oberflächenwassermessstellen) erreicht werden (Abbildung 3). Entsprechend der technischen Regel Arbeitsblatt W 107 [DVGW 2016] wird bei einem mittleren relativen Fehler von < 5 % eine gute Modellanpassung erreicht. [Fugro 2014 Modellbericht]

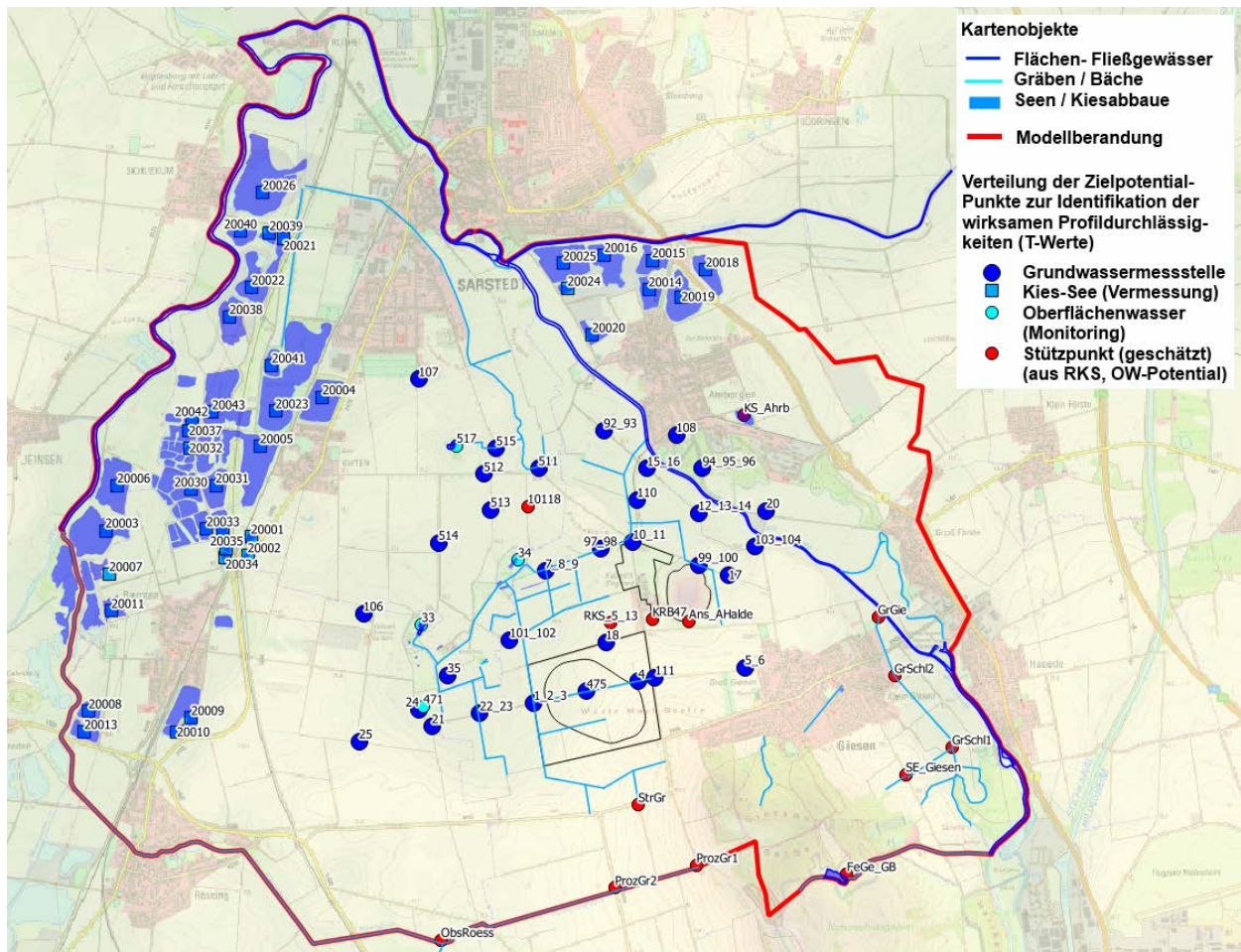


Abbildung 2: Übersicht aller zur Erstellung des Modells verfügbaren Aufschlüsse. [Fugro 2014 Modellbericht]

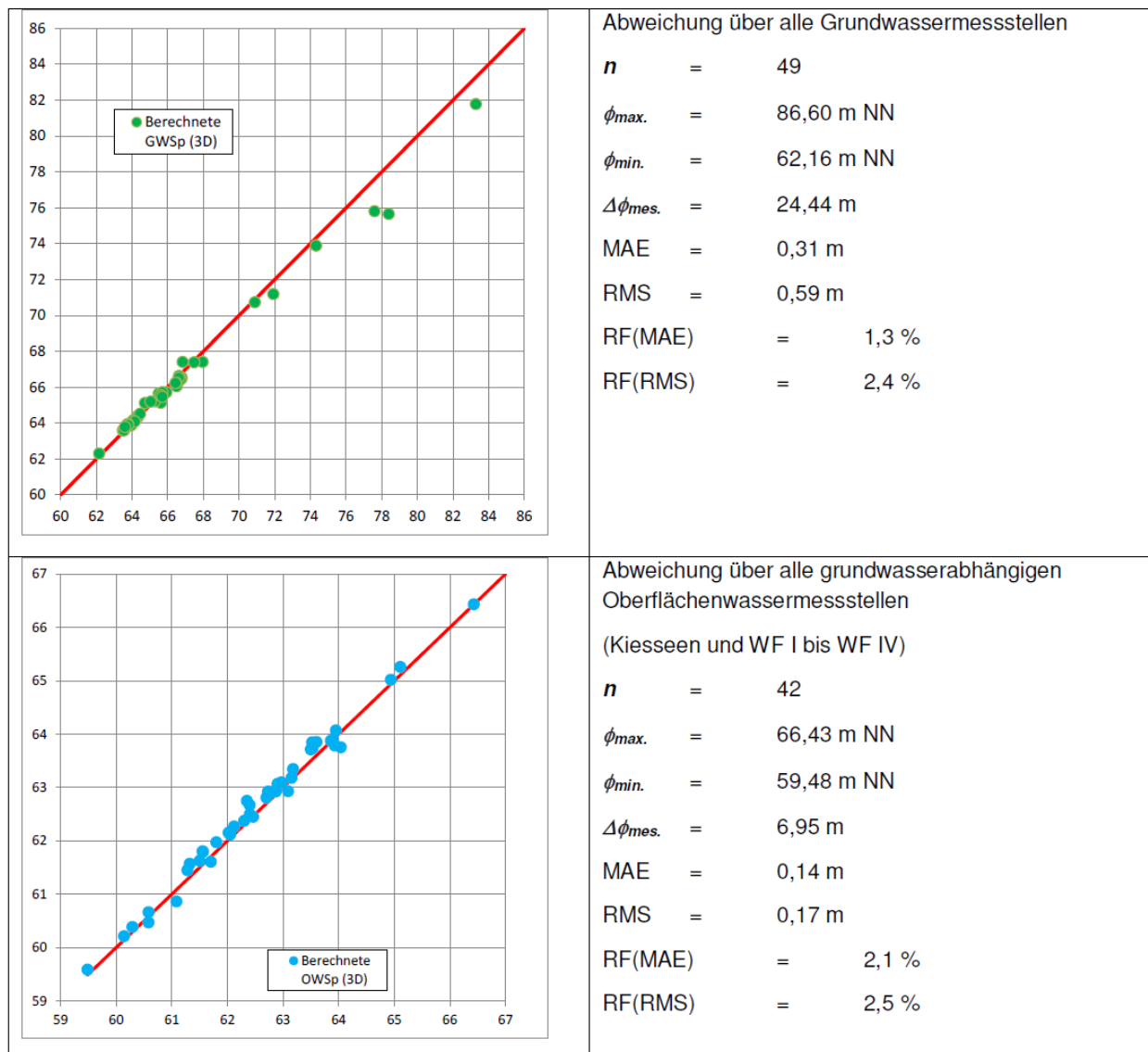


Abbildung 3: Güte der Modellanpassung (Modellrepräsentanzfehler) Modell 2014. Grundwassermessstellen (oben) und Oberflächenmessstellen (unten). [Fugro 2014 Modellbericht]

3.3 Parametrisierung der Modellränder und innere Randbedingungen

Das Modellgebiet reicht über die Innerste hinaus, um einer ggf. möglichen Unterströmung des Vorfluters durch das Grundwasser Rechnung zu tragen. Der Bruchgraben im Bereich südlich von Sarstedt wird zu einer nördlichen äußeren Randbedingung für die Grundwasserströmung (Randbedingung 3. Art). Weiterhin bildet hier die oberirdische östliche Einzugsgebietsgrenze der Innerste (ohne Randzufluss) die Modellberandung. Im Bereich östlich von Hasede wurde eine Zustromrandbedingung gemäß Grundwasserneubildung im Modell implementiert (Randbedingung 2. Art). [Fugro 2014 Modellbericht]

Die im Modellgebiet vorhandenen Oberflächengewässer/Vorfluter wurden als innere Randbedingungen 3. Art (Cauchy BC) in das Modell integriert. In Feflow wurden diese inneren Randbedingungen als Fluid-transfer BC mit Minimal hydraulic head constraint implementiert.

Diese dienen der Begrenzung der Infiltrationsraten für den Fall, dass die Grundwasseroberfläche unterhalb der Sohlflächen der Vorfluter liegt. [Fugro 2014 Modellbericht]

Die Fließgewässer Innerste und Leine wirken als regionale Hauptvorfluter für den Grundwasserabfluss. Die in die Niederterrasse als oberer Grundwasserleiter (L1.3) eingeschnittenen Vorfluter stehen größtenteils in direkter hydraulischer Verbindung mit dem Grundwasser. Die Anbindung der Vorfluter an das Grundwasser erfolgt in Feflow über die In und Out-transfer rate. Lokal kann jedoch bei Kolmation oder erhöhten Mächtigkeiten der Auelehmdecke eine Minderung der Wechselbeziehung zwischen Grundwasser und Vorfluter eintreten, sofern das Gewässer die bindigen Deckschichten nicht durchstoßen hat. Mittels Kleinrammbohrungen wurden Bereiche, in denen eine verminderte Wechselbeziehung im Uferbereich des Flusses anzunehmen ist - im Umfeld des Friedhofs Ahrbergen sowie südlich der Kläranlage Giesen - identifiziert. Südlich des Werksgeländes Ahrbergen-Fürstenhall (Bahnbrücke) steht die Innerste jedoch mit dem oberen Grundwasserleiter in hydraulischer Verbindung. [Fugro 2014 Hydrogeologisches Gutachten] Dieser Wechsel wurde über variierende In-transfer rates realisiert.

3.4 Transportmodell

Ein Teilaspekt in der Bearbeitung 2014 war die Prognoserechnung der Ausbreitung der Haldensickerwässer im theoretischen Fall eines Versagens der Basisabdichtung der Neuhalde. Dafür wurde, basierend auf dem Strömungsmodell, ein dichtegetriebenes Transportmodell aufgesetzt. In diesem wurde aufgrund der numerischen Stabilität auf die Simulation der ungesättigten Zone verzichtet, da diese zudem von untergeordneter Bedeutung für den Stofftransport im Grundwasser ist. 2014 wurde die Neuhalde als Quelle des Stofftransports als Mass-Flux Boundary Condition im Bereich der Haldenaufstandsfläche Neuhalde und entsprechend dem gewählten Szenario implementiert.

Diese wurde für die aktuelle Aufgabenstellung entfernt.

4 Fortschreiben Grundwassermodell

Das Ausgangsmodell von 2014 wurde für die hier durchgeführte Untersuchung der Auswirkungen der Althalde weiterentwickelt und auf den aktuellen Stand gebracht.

4.1 Aktualisierung Datensatz Grundwasserneubildung

Der dem Modell 2014 zugrunde liegende Grundwasserneubildungsdatensatz, basierend auf dem Wasserhaushaltsmodell GROWA06v2, wurde in der Zwischenzeit durch das Forschungsinstitut Jülich in Zusammenarbeit mit dem LBEG überarbeitet. Die jährlichen Grundwasserneubildungsraten aus dem nun aktuellen Wasserhaushaltsmodell mGROWA wurden in das Modell integriert. Der Mittelwert hat sich geringfügig von 91,8 mm/a auf 89,2 mm/a verringert, was sich auch in der Abnahme der kumulierten jährlichen Grundwasserneubildung um 4,25 % widerspiegelt. Der Median ist hingegen von 101,9 mm/a auf 119 mm/a gestiegen (Abbildung 4). Dies liegt an den mit mGROWA berechneten höheren maximalen Grundwasserneubildungsraten im Modellgebiet. Andererseits treten auch sehr niedrige Grundwasserneubildungsraten bis hin zur Grundwasserzehrung auf, so z.B. im Bereich der Giftener Teiche.

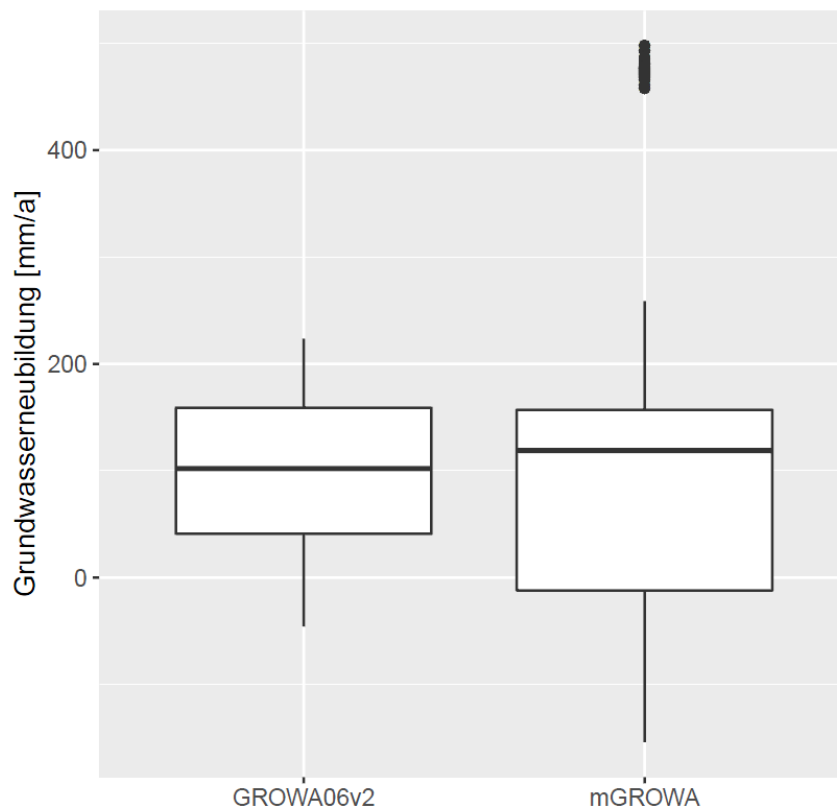


Abbildung 4: Vergleich Verteilung Grundwasserneubildung mGROWA mit GROWA06v2.

4.2 Verlängerung der Zeitreihen Wasserstände und Verifizierung der Kalibrierung

Im Rahmen des laufenden Monitoringprogramms Siegfried-Giesen werden fortschreibend Wasserstände gemessen. Die Mediane der Zeitreihen der Wasserstände in den einzelnen Grundwassermessstellen, die die Grundlage des Strömungsmodells darstellen, wurden unter Einbezug der Messungen bis einschließlich Anfang 2020 neu berechnet. Die Güte der Modellanpassung ist in Abbildung 3 für das Ursprungsmodell 2014 und in Abbildung 5 (Oberflächenwassermessstellen) bzw. Abbildung 6 für das aktualisierte Modell dargestellt.

Bei den Oberflächengewässern wurden sämtliche im Ursprungsmodell vorhandenen Messstellen - die Kieseseen, Wasserflächen sowie die wasserführenden Gräben - sowie die drei neuen Messpunkte an der Innerste einbezogen. Bei den Grundwassermessstellen wurden die 7 2019 neu errichteten Grundwassermessstellen mit einbezogen. Waren neuere Messwerte vorhanden, wurden die Mediane neu berechnet.

Neben den verlängerten Zeitreihen der Wasserstände fließt die Aktualisierung der Grundwasserneubildung sowie die Anpassung der Durchlässigkeitsbeiwerte mit ein, woraus sich eine Neudarstellung der Modellabweichung ergibt. Die Modellabweichung, berechnet als mittlerer relativer Fehler, entspricht mit 1,6 % für Grund- und 0,75 % für Oberflächenwasserspiegel in etwa dem Originalmodell - 1,3 % bei Grund- bzw. 2,1 % bei Oberflächenwasserspiegel.

Entsprechend der technischen Regel Arbeitsblatt W 107 [DVGW 2016] wird bei einem mittleren relativen Fehler (mittlere absolute Abweichung zwischen berechneten und gemessenen Werten im Verhältnis zu der maximalen Differenz der Standrohrspiegelhöhen) von 5 % von einer guten Modellanpassung gesprochen. Die Steigung der linearen Regression der Gegenüberstellung der gemessenen und berechneten Standrohrspiegelhöhen sollte sich im Bereich von 1 bewegen, um eine systematische Unter- oder Überschätzung der Grundwasserstände durch das Modell zu vermeiden.

Dieser Wert wird sowohl für die grundwasserabhängigen Oberflächenwassermessstellen als auch die Grundwassermessstellen nahezu erreicht.

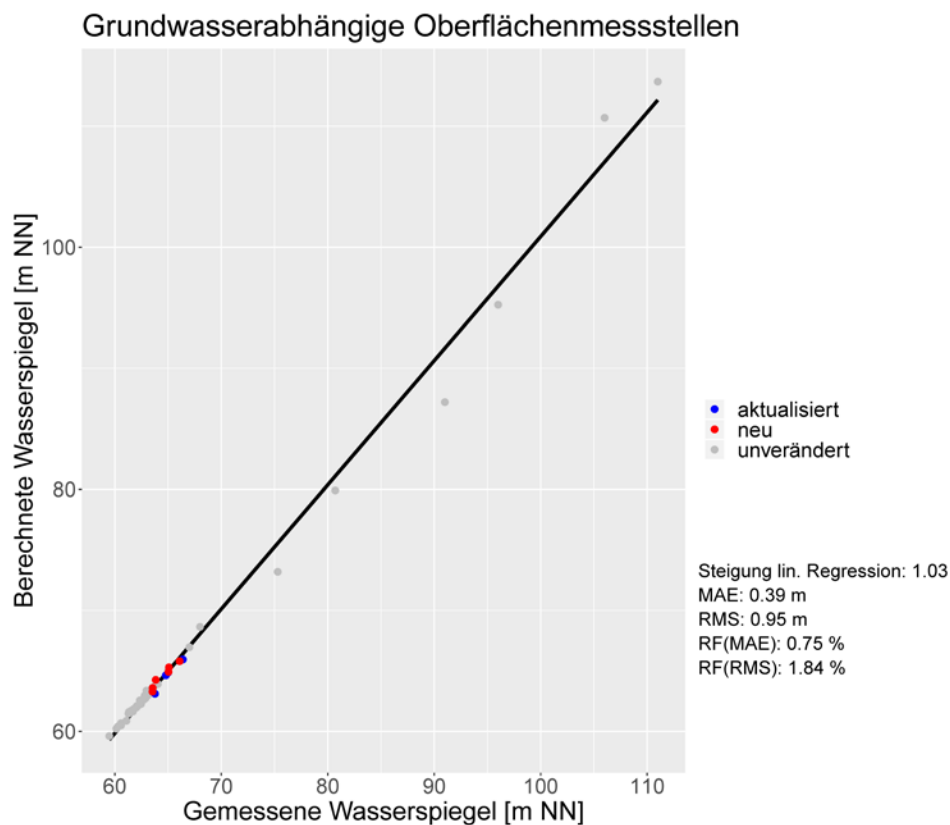


Abbildung 5: Güte der Modellanpassung (Modellrepräsentanzfehler) der Oberflächenwassermessstellen des aktualisierten Modells.



Abbildung 6: Güte der Modellanpassung (Modellrepräsentanzfehler) der Grundwassermessstellen des aktualisierten Modells.

4.3 Modelldiskretisierung

Um die Verteilung der Chloridkonzentration im Abstrom der Althalde nachzubilden, wurden in diesem Bereich Verfeinerungen der Modelldiskretisierung vorgenommen. Da der Abstrombereich der Neuhalde für die Gefährdungsabschätzung Althalde nicht mehr im Aussagebereich liegt, konnte in diesem Bereich das Netz wieder vergrößert werden, um die Laufzeit des Modells zu verkürzen. Im Abstrombereich der Neuhalde wurden die Peclet Zahlen berechnet, wobei aus numerischen Gründen Peclet Zahlen < 2 erforderlich sind (Abbildung 7).

4.4 Modellparameter

4.4.1 Dispersivität

Feflow bietet in der Version 7.1 anisotrope Optionen für die Dispersivität. Somit besteht die Möglichkeit, die transversale Dispersivität in horizontal und vertikal transversal zu unterscheiden. Dies macht das Modell realitätsgetreuer, da aufgrund geologischer Schichtung die vertikal transversale meist geringer als die horizontal transversale Dispersivität ist. Dies ist insofern relevant, da langjährige Messreihen zeigen, dass die Salzkonzentrationen aufgrund von Dichteunterschieden in den unteren Teilen des Aquifers am höchsten, in den oberen Bereichen jedoch kaum oder gar nicht vorhanden sind. Dies ist durch teufenorientiertes Beprobieren sowie Leitfähigkeitsmessungen belegt [Fugro 2014 Errichtung Grundwassermessstellen]. Die longitudinal horizontale Dispersivität wurde auf 20 m gesetzt, die transversal horizontale Dispersivität (Richtwert 10 % der longitudinalen Dispersivität) entsprechend auf 2 Meter gesetzt. Die nun neuen Parameter longitudinal und transversal vertikale Dispersivität wurden auf 1 bzw.

0,01 m gesetzt. Diese Lösung stellte sich als das Optimum bzgl. numerischer Stabilität, Kalibrierung des Massentransports und möglichst realitätsgetreuer Dichteschichtung heraus.

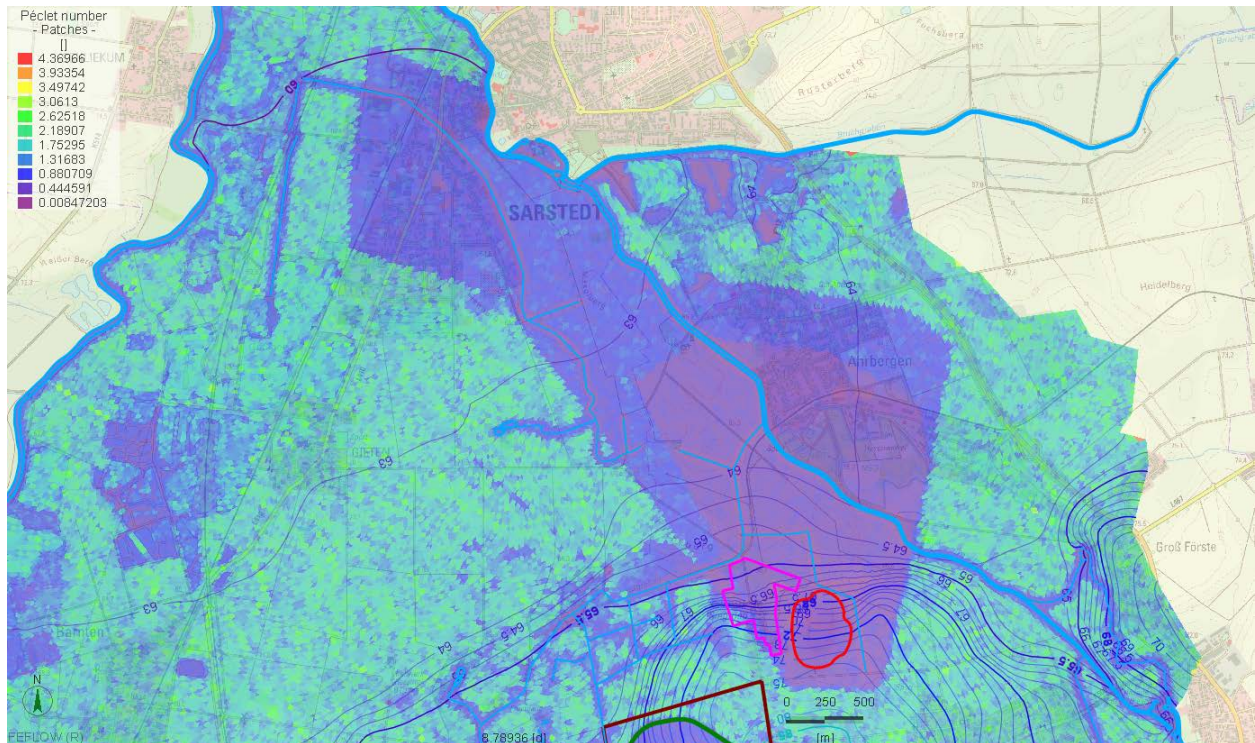


Abbildung 7: PECLET-Zahlen in Folge der horizontalen Netzverfeinerung im potentiellen Abstrombereich.

4.4.2 Parameter Fluid

Für die Simulation der dichteabhängigen Strömung wurde als Feflow Dichteverhältnis α 0,25 gewählt, welches aus der Dichte von Salzwasser ρ_s und Süßwasser ρ_0 nach

$$\alpha = \frac{\rho_s - \rho_0}{\rho_0} \quad (\text{Gleichung 1})$$

berechnet wird. Als Süßwasserdichte ρ_0 wurde 1000 g/l gewählt. Die Dichte einer gesättigten Lösung ρ_s kann mit der Formel

$$\rho_s = \rho_0 + 0,7 * c_s \quad (\text{Gleichung 2})$$

berechnet werden, was sich aus der Gegenüberstellung von Gesamtmineralisation und Dichte aller verfügbarer Analysen im Modellgebiet ergibt (Abbildung 8).

Als maximale Konzentration c_s wurde hier 360 g/l gewählt, was einer mit NaCl gesättigten wässrigen Lösung entspricht. Mit diesen Werten ergibt Gleichung 2 eine Dichte der gesättigten Lösung von 1252 g/l, was gemäß Gleichung 1 ein Dichteverhältnis von 0,25 ergibt [Feflow Online; Diersch 2014]. Die Eingangsparameter sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

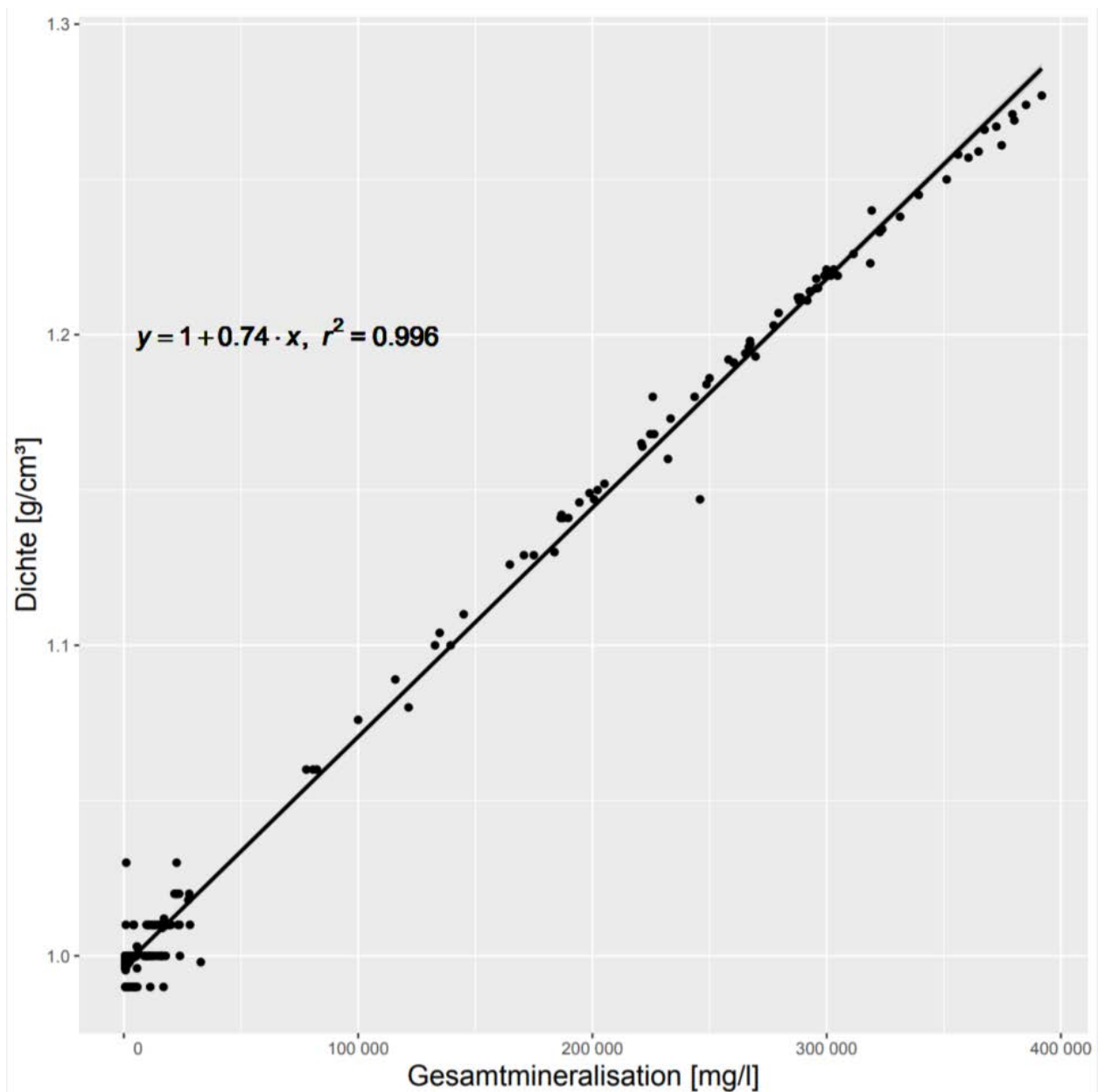


Abbildung 8: Verhältnis Dichte zu Gesamtmineralisation aller verfügbarer Analysen im Modellgebiet.

Tabelle 2: Zusammenfassung relevanter Modellparameter. Parameter die unverändert aus dem Originalmodell übernommen wurden sind zitiert.

Hydraulische Konduktivität	Kalibriert durch Fugro [Fugro 2014 Modellbericht]
Grundwasserneubildung	In/outow on top/bottom nach mGROWA
Porosität	Berechnet über die entsprechende Konduktivitäten [Fugro 2014 Modellbericht]
Spezifische Speicherkapazität	Berechnet über die entsprechenden Porositäten [Fugro 2014 Modellbericht]

Dispersivität longitudinal horizontal	20 m
Dispersivität longitudinal vertikal	1 m
Dispersivität transversal horizontal	2 m
Dispersivität transversal vertikal	0,01 m
Restinfiltration	Zeitabhängig berechnet über Haldenwasserbilanz
Fracht als Mass-Flux Boundary Condition	Zeitabhängig berechnet aus Restinfiltration mit Median Gesamtmineralisation Haldenwasser 288 g/l
Dichteverhältnis α	0,25
Konzentrationsreferenzwerte	$c_0 = 0 \text{ g/l}$ $c_s = 360 \text{ g/l}$

4.5 Die Althalde als Quellterm

Die Althalde Siegfried-Giesen stellt den Quellterm der Salzfracht im Modell dar und ist als Mass-Flux Boundary Condition implementiert. Mittels der Haldenwasserbilanz wird eine Restinfiltration quantifiziert (Abbildung 9), die in Abhängigkeit der Entwicklung der Halde und der damit zusammenhängenden Aufstandsfläche variiert. Um die numerische Stabilität zu erhöhen, wurde bei der Implementierung der Halde in das Grundwassermodell die Aufstandsfläche konstant gehalten, und die Eintragsraten mittels Zeitreihe variiert.

Auf die Entwicklung der Halde wird im Bericht zur Haldenwasserhaushaltsbilanz näher eingegangen [K+S AG 2020]. In Abbildung 9 wird die Entwicklung der Althalde SG und die daraus resultierende Restinfiltration ersichtlich. Gut zu erkennen ist das Zurückgehen der Restinfiltration nach Ende der Produktion durch einen Teilrückbau der Halde.

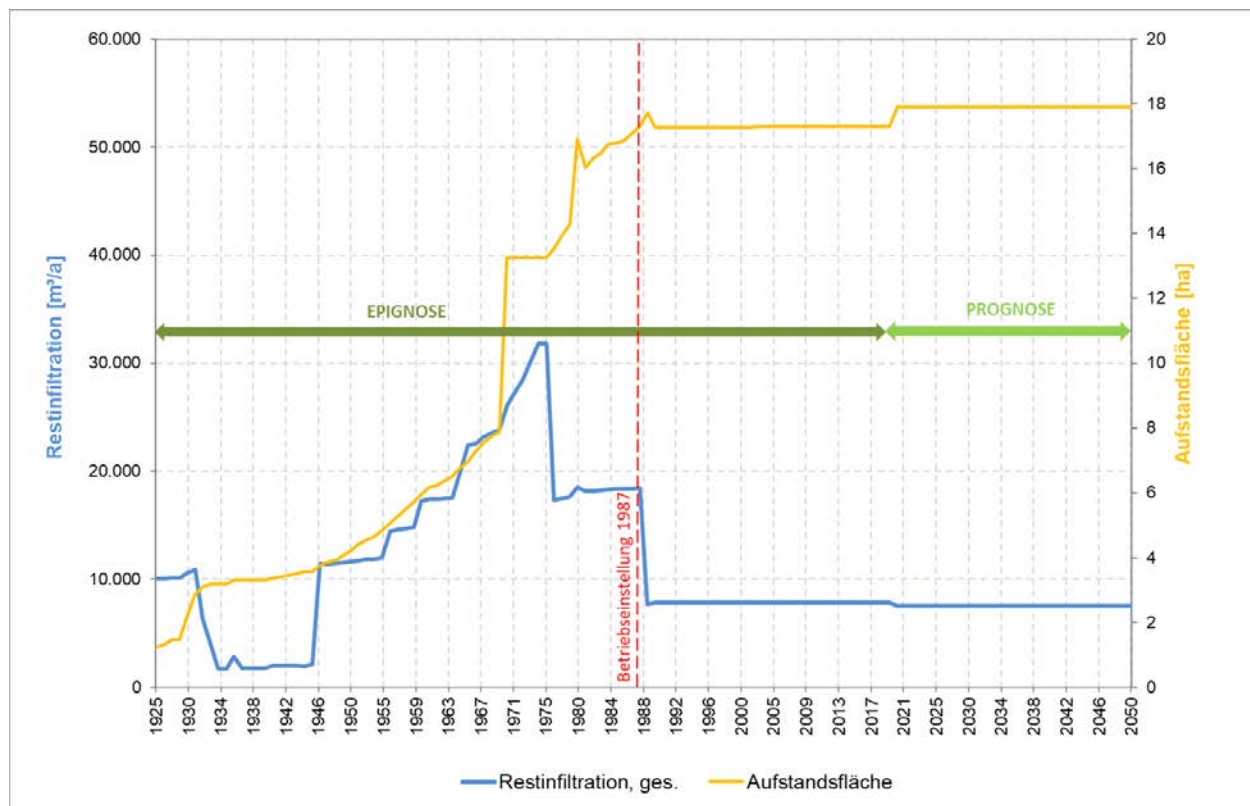


Abbildung 9: Entwicklung Althalde SG und daraus resultierende Restinfiltration.

4.6 Implementieren Felduntersuchungen 2019/2020

Im Rahmen der vorläufigen Gefährdungsabschätzung wurde folgender weiterer Untersuchungsbedarf festgestellt: Erstens lagen im Bereich zwischen Ahrbergen und Sarstedt bislang keine Aufschlüsse vor, die Auskunft über die konkreten hydrogeologischen Verhältnisse geben können. Somit war die Prognoserechnung noch mit größeren Unsicherheiten behaftet. Um Sicherheit darüber zu erlangen, wie weit sich die Mineralisation tatsächlich weiter in Richtung Nordwesten ausbreiten kann, waren weitere Untersuchungen notwendig, insbesondere im Randbereich der, Stand 2018/2019, modellierten Ausbreitung. Damit sollten lokale hydrogeologische Kenntnisdefizite geschlossen und die Ausbreitung mit größerer Sicherheit umgrenzt werden.

Zur Abgrenzung der Salzwasserausbreitung zwischen Ahrbergen und Sarstedt wurde eine Geoelektrik-Messkampagne in den Bereichen nördlich der Innerste (Richtung Ahrbergen) sowie im nordwestlichen Randbereich der Ausbreitung (Ist-Zustand/Abgrenzung in Richtung Nordwesten) durchgeführt. Aufbauend auf den Ergebnissen dieser Geoelektrik-Messungen wurden, in Kombination mit den Modellergebnissen, Standorte für neu zu errichtende Messstellen festgelegt. Dies betraf insbesondere die mögliche Ausbreitung in Richtung Nordwesten (3 Doppelmessstellen im Umfeld des Friedhofs Ahrbergen) sowie die potentiellen Mineralisationen im Bereich der Innerste (im unmittelbaren Umfeld der GWM20 eine weitere, tiefere Messstelle).

Die Geoelektrik diene vorrangig dazu, die flächige Verteilung der Salzwässer weiter zu umgrenzen und die modellierte Fahne damit abgleichen zu können. Dieser Abgleich erfolgt in Abschnitt 4.9.2. Dazu wurden flächenhaft angelegte Messungen der 2D-Geoelektrik bis zu einer

Erkundungstiefe von 60 m auf insgesamt 16 Messprofilen in den 2 Messgebieten östlich und westlich des Flusses Innerste durchgeführt. Die Ergebnisse der geoelektrischen Untersuchung zeigen die großräumige Verteilung des spezifischen elektrischen Widerstands des Untergrundes im Abstrom der Rückstandshalde Siegfried-Giesen. Die flächenhafte Darstellung der Widerstandsverteilung zeigt, dass im Abstrom der Rückstandshalde auf den oberen 10 – 12 m unter Geländeoberkante (GOK) sehr niedrige Widerstände nur in unmittelbarer Nähe zur Althalde vorliegen. Ab ca. 16 m bis 32 m unter GOK sind in großen Bereichen niedrige Widerstände von im Wesentlichen kleiner $10 \Omega \cdot m$ erfasst, was auf die Verbreitung höher konzentrierter Salzwässer hindeutet. Im Bereich Großförster-/Ahrberger Holz sind Bereiche mit höheren Widerständen erkennbar. Dies deutet darauf hin, dass hier höher mineralisierte Wässer nicht flächig sondern nur punktuell vorhanden sind (siehe Abbildung 22). [GGL 2020]

Die in den Jahren 2019/2020 neu errichteten Grundwassermessstellen angetroffenen tatsächlichen Wasserstände entsprechen den modellierten Wasserständen weitestgehend (Abbildung 6). In der tiefen Messstelle am Werksgelände Fürstenhall wurden keine erhöhten Mineralisationen angetroffen, in den tieferen Bereichen der neu errichteten Messstellen Richtung Sarstedt hingegen schon, wobei hier die hydrochemische Zusammensetzung zum Teil auf geogene Wässer oder eine Mischung aus geogenen und haldenstämmigen Salzwässern hindeutet.

4.7 Anpassung der Durchlässigkeitsbeiwerte

Die Geoelektrik Messkampagne zeigt höhere Widerstände im Bereich des Ahrberger-/Großförster Holz (siehe Abschnitt 4.6). Daher musste in diesem Bereich der Durchlässigkeitsbeiwert verringert werden, um den Stofftransport hier einzuschränken. Die Durchlässigkeitsbeiwerte in horizontale Richtung wurden um eine Größenordnung auf $5E-06$ m/s verringert.

In den tieferen Bereichen der neu errichteten Messstellen Richtung Sarstedt wurden erhöhte Mineralisationen festgestellt, sodass in diesem Bereich der Durchlässigkeitsbeiwert erhöht werden musste, um eine flächigere Verbreitung mineralisierten Wassers zu erreichen und die gemessene Mineralisationen bestmöglich nachzubilden. Die Durchlässigkeitsbeiwerte in horizontale Richtung wurden daher um eine Größenordnung auf $5E-04$ m/s erhöht.

Die errechneten Wasserstände stimmen trotz dieser Änderung nach wie vor gut mit den gemessenen überein (siehe Abschnitt 4.2).

4.8 Ergebnisse der Stofftransportsimulation

4.8.1 Umrechnung Gesamtmineralisation - Chloridkonzentration

Die Simulationen zeigen die Gesamtmineralisation. Diese kann nicht 1:1 mit den Chloridwerten gleichgesetzt werden, da Chlorid nur einen Teil der Gesamtmineralisation ausmacht. Um das Verhältnis von Chlorid zur Gesamtmineralisation zu bestimmen, wurden Analysen im Haldenwasserbecken herangezogen, da dessen Zusammensetzung dem Sickerwasser am nächsten kommt. Chlorid ist der Gesamtmineralisation in Abbildung 10 gegenübergestellt. Wie aus der Abbildung ersichtlich wird, hat die Regressionsgerade eine Steigung von 2,3. Somit beträgt die Gesamtkonzentration das 2,3-fache der Chloridkonzentration. Dieses Verhältnis wird über den Transportweg hinweg als konstant angenommen.

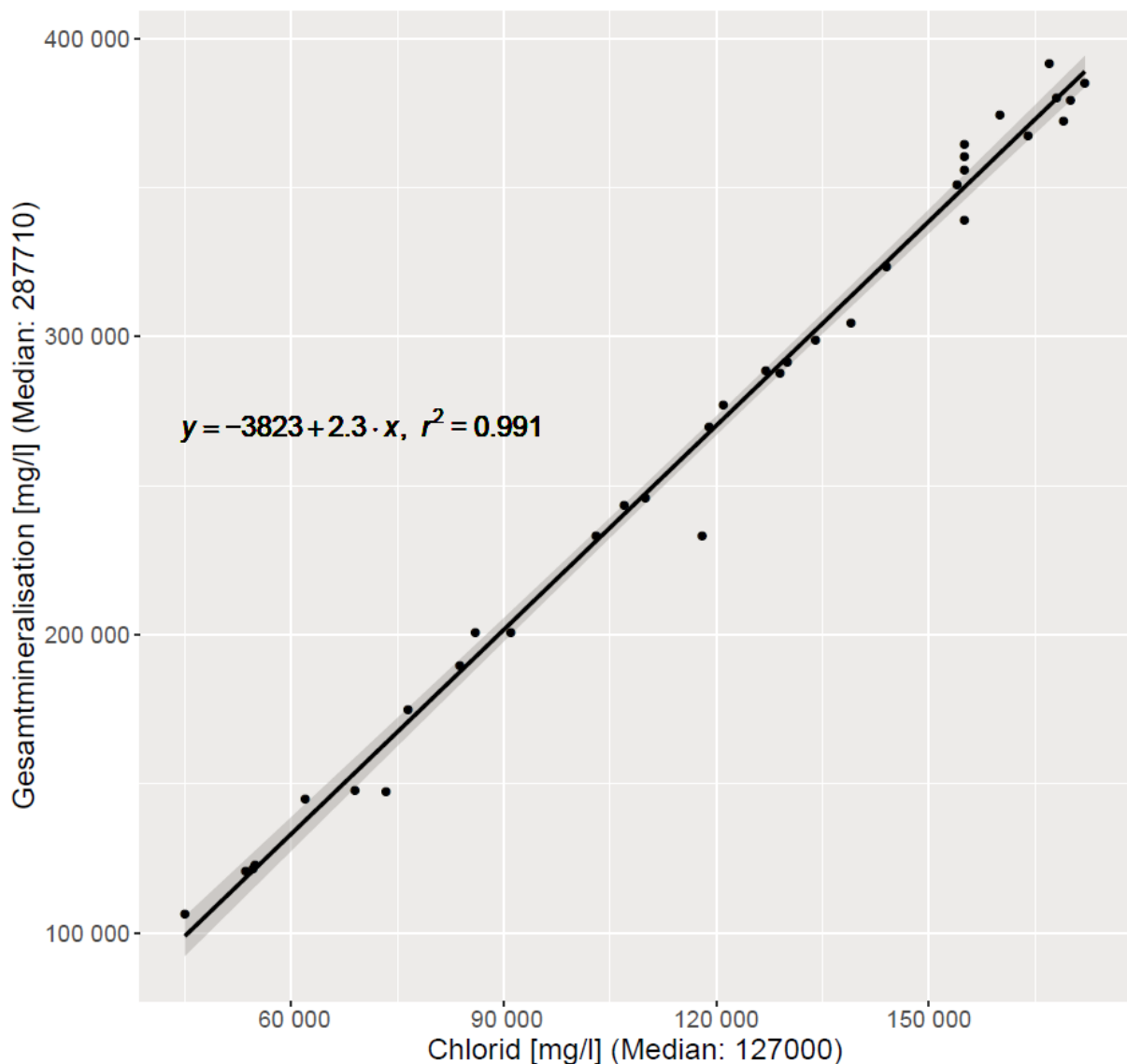


Abbildung 10: Verhältnis Chlorid zu Gesamtmineralisation im Haldenwasserbecken.

4.8.2 Ist-Zustand

Zunächst einmal wird die flächige Ausbreitung der modellierten Mineralisation beschrieben. Aussagen bzgl. der modellierten Chloridkonzentrationen in Messstellen folgen in Abschnitt 4.9.1. Abbildung 11 zeigt einen horizontalen Querschnitt des Modells in Slice 4, also 4 Meter unterhalb des Grundwasserspiegels, der im Modellgebiet zwischen 1 und 5 m unter GOK liegt. Die modellierte stoffliche Beeinflussung erfolgte ausgehend von der Althalde in Richtung Innerste. Zwischen der Kläranlage Giesen-Ahrbergen und der Bahnbrücke befinden sich modellierte mineralisierte Wässer unterhalb der Innerste. GWM6-flach liegt im Zentrum der modellierten Mineralisation und GWM12-flach am nördlichen Rand. GWM7-flach wird vom äußersten Rand der Fahne erreicht. GWM11-flach sowie die 2019/2020 im Nordwesten neu gebohrten flachen Messstellen und GWM20 im Norden werden nicht erreicht. Der Ortsrand von Ahrbergen wird nicht erreicht. GWM22 liegt westlich der Salzwasserfahne.

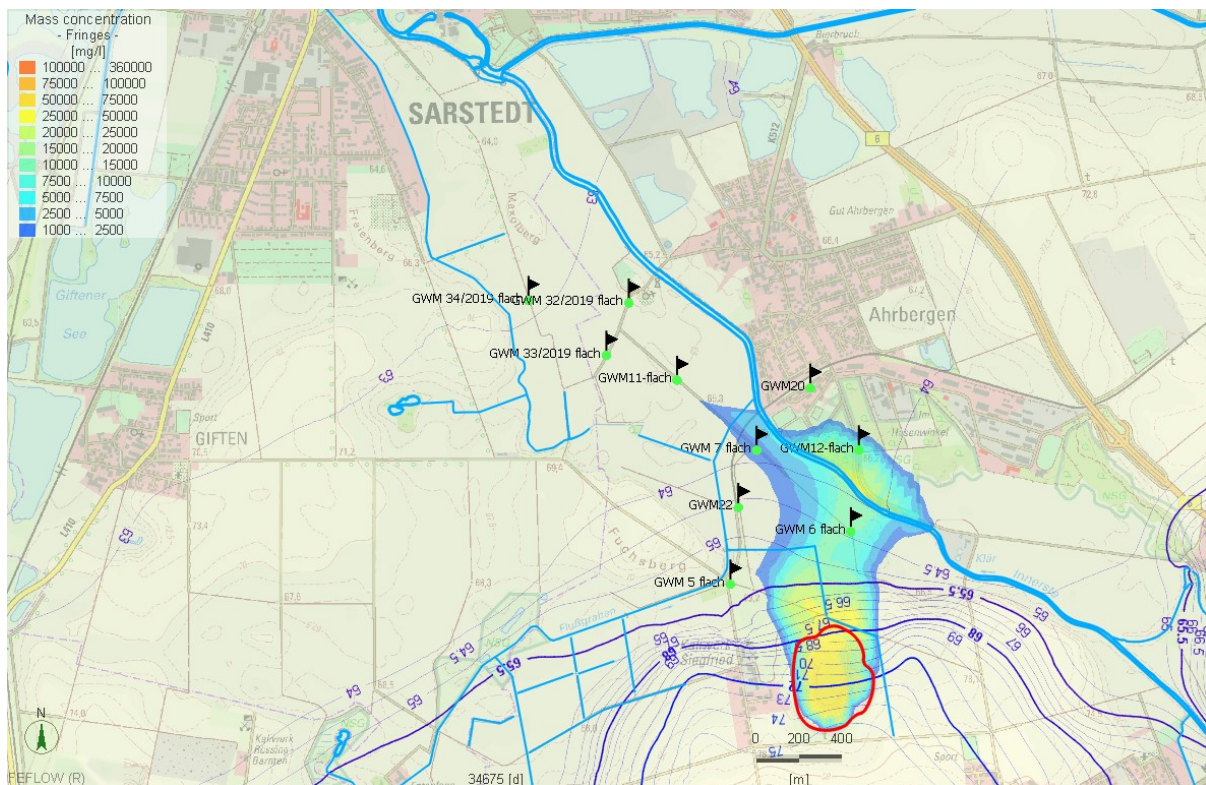


Abbildung 11: Verteilung der Gesamtmineralisation ausgehend von der Althalde im Ist-Zustand, 4 Meter unterhalb des Grundwasserspiegels.

In Abbildung 12, 14 Meter unterhalb des Grundwasserspiegels, ist die Ausbreitung der modellierten Mineralisation im Vergleich zu den oberflächennäheren Schichten weiter vorangeschritten, sowohl in der Länge als auch in der Breite. Auch sind die modellierten Konzentrationen höher. GWM7-tief, die in dieser Tiefenlage verfiltert ist, ebenso wie GWM6-mitte liegen im Zentrum der modellierten Mineralisation. GWM12-mitte sowie GWM11-tief werden vom äußeren Rand der modellierten Mineralisation erreicht. Die Salzwasserfahne ist nicht weiter in Richtung Ahrbergen fortgeschritten, die in der Geoelektrik erkundete Zone bindiger Schichten im Bereich Fürstenhall deutet sich an. Die neu errichteten Grundwassermessstellen GWM32-tief, GWM33-tief und GWM34-tief liegen in einem Bereich, der von der Fahne teilweise erfasst wird. Ein im Horizontalschnitt abgetrennter Bereich mit Konzentrationen zwischen 1000 und 2500 mg/l ist zu erkennen. Dies deckt sich mit den Erkenntnissen aus der Geoelektrik (siehe Abschnitt 4.9.2). GWM5-tief wird von der von der Althalde ausgehenden Mineralisation nicht erfasst.

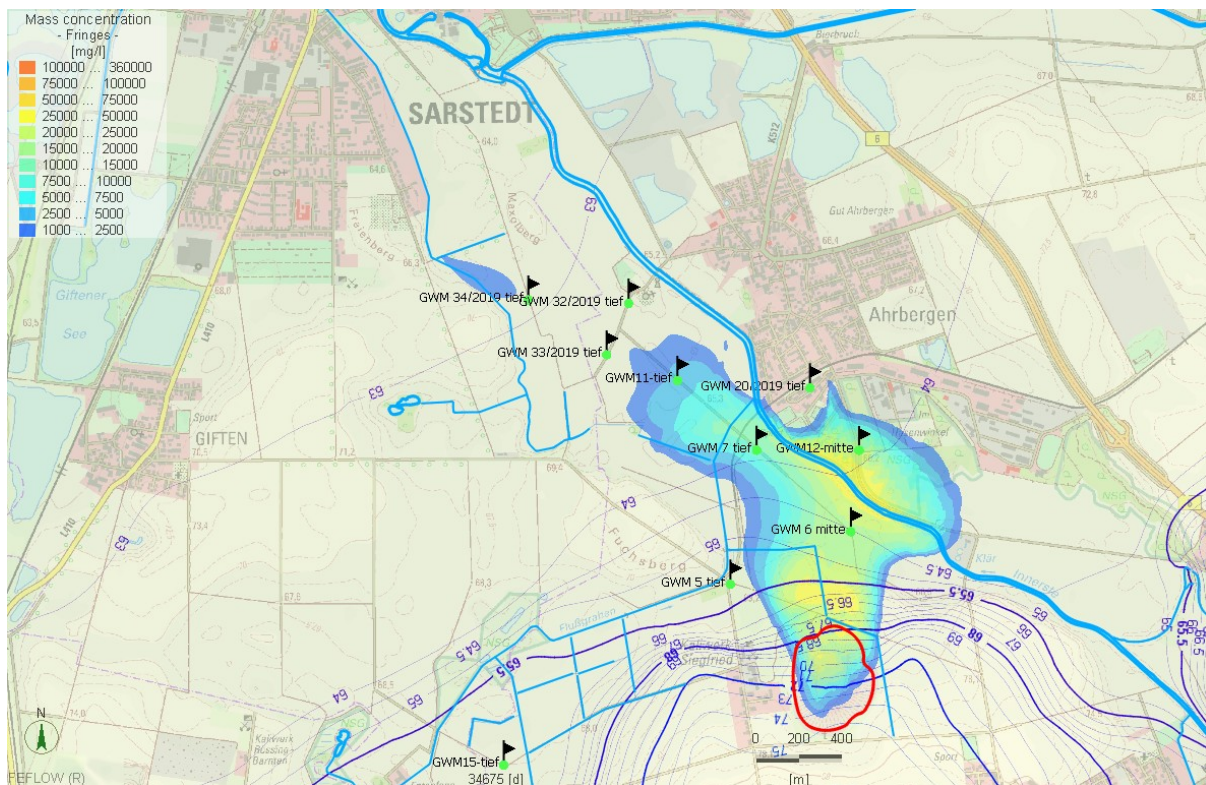


Abbildung 12: Verteilung der Gesamtmineralisation ausgehend von der Althalde im Ist-Zustand, 14 Meter unterhalb des Grundwasserspiegels.

Abbildung 13 zeigt die modellierte Mineralisation 26 Meter unterhalb des Grundwasserspiegels. In etwa dieser Tiefe sind GWM6-tief und GWM12-tief verfiltert. Die modellierte Mineralisation ist zusätzlich breiter geworden und die Konzentrationen gestiegen, einzelne Salzwasserbereiche sind nun einer flächigeren Mineralisation gewichen, die sich in den Bereich der 2019/2020 errichteten GWM32-tief, GWM33-tief und GWM34-tief erstreckt und den Ortsrand von Sarstedt erreicht. Die in der Geoelektrik erkundete Zone bindiger Schichten im Bereich Fürstenhall ist nun deutlich erkennbar.

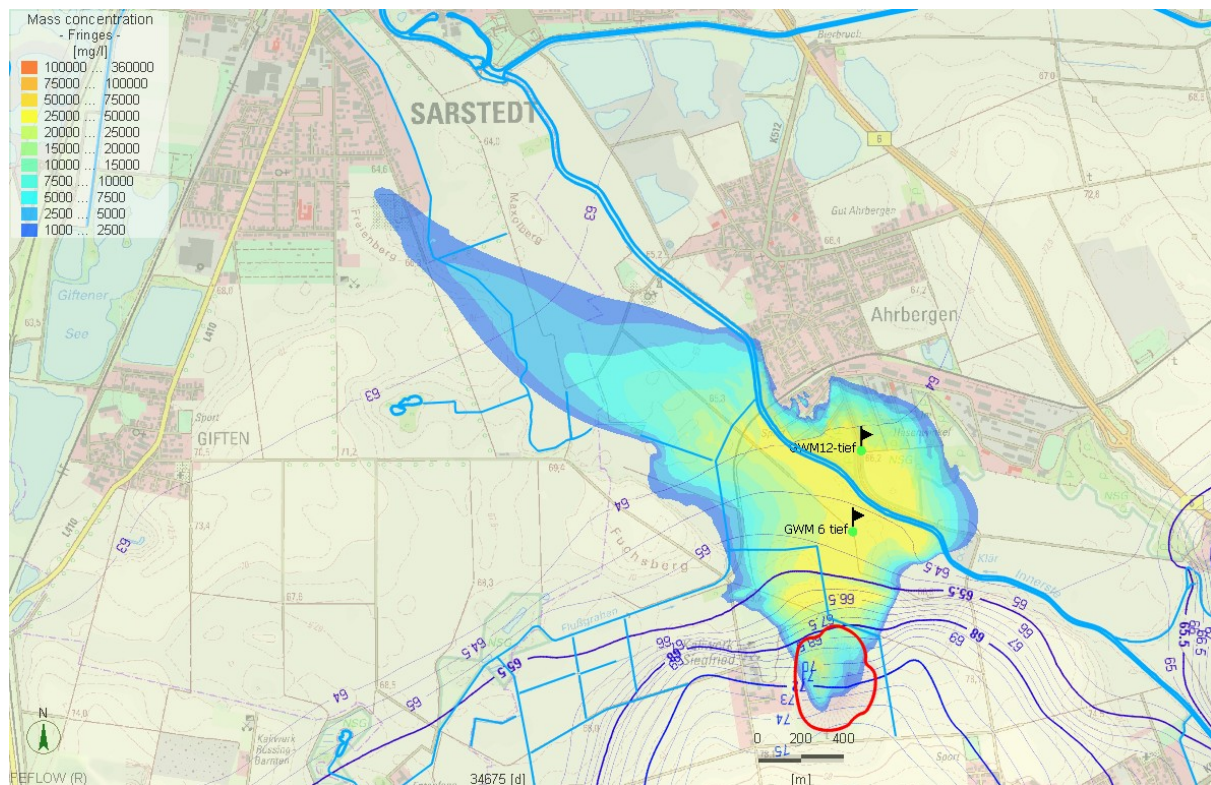


Abbildung 13: Verteilung der Gesamtmineralisation ausgehend von der Althalde im Ist-Zustand, 26 Meter unterhalb des Grundwasserspiegels.

4.9 Validierung der Modellergebnisse

Zur Validierung der erzielten Modellergebnisse können zum einen die modellierten mit den gemessenen Konzentrationen abgeglichen werden. Zum anderen kann ein Vergleich mit geoelektrischen Messungen erfolgen. Entsprechend der technischen Regel Arbeitsblatt W 107 (DVGW 2016) ist es für die Kalibrierung des Transportmodells ausreichend, wenn der Trend der Stoffausbreitung und charakteristische Eigenschaften richtig erfasst wurden.

4.9.1 Vergleich der gemessenen mit den modellierten Salzkonzentrationen

An allen Messstellen im Abstrom der Halde können die gemessenen Chloridwerte den modellierten gegenübergestellt werden. Dabei ist zu beachten, dass Messwerte frühestens ab 2011 existieren, das Modell aber Konzentrationen von 1925 bis 2050 berechnet. Um einen Vergleich zu ermöglichen, müssen die errechneten Werte der Gesamtmineralisation zunächst nach dem oben beschriebenen Verfahren in Chloridkonzentrationen umgerechnet werden. Die für den Vergleich verwendeten Messstellen sind in Abbildung 14 dargestellt. Diejenigen Messstellen mit der gleichen Nummerierung befinden sich in direkter Nachbarschaft, sind jedoch in unterschiedlichen Teufen verfiltert.

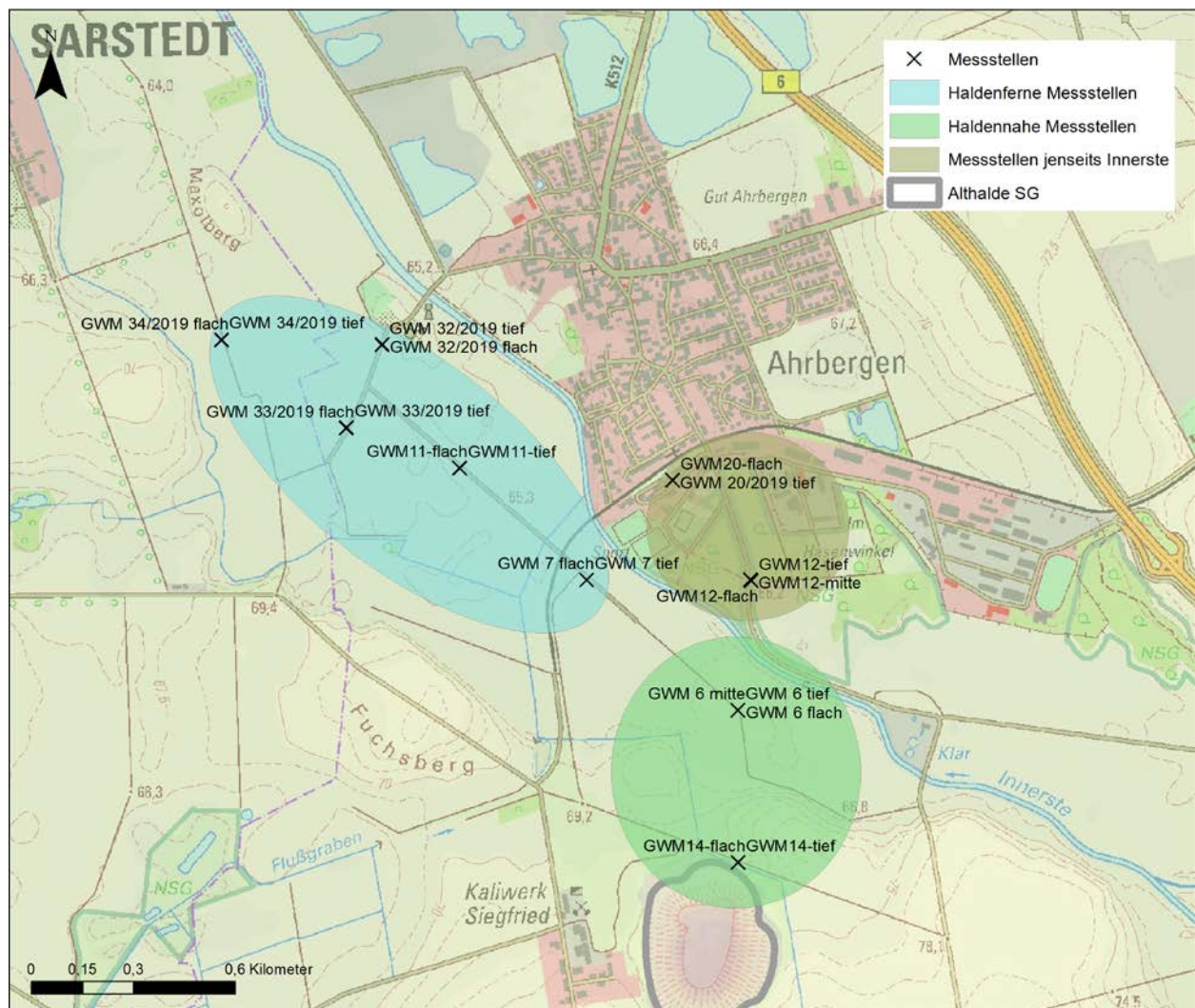


Abbildung 14: Für die Stofftransportmodellierung relevante Messstellen.

4.9.1.1 Haldennahe Messstellen

Als haldennahe Messstellen werden GWM14-flach, GWM14-tief, GWM6-flach, GWM6-mitte und GWM6-tief bezeichnet. Die gemessenen Konzentrationen sind bei GWM14 aufgrund ihrer Nähe zum Quellterm schwer abbildbar und daher in Abbildung 15 nicht dargestellt.

Die GWM6 liegt im Bereich der höchsten modellierten Mineralisation. Die gemessenen Werte bei der GWM6-tief werden vom Modell korrekt wiedergegeben, die flacheren Filtertiefen von GWM6-mitte und GWM6-flach jedoch überschätzt. Dies hängt mit der vertikalen Zonierung der Salzkonzentration, d.h. der Dichteschichtung, zusammen. Diese kann mit dem Modell zwar angenähert werden, trifft jedoch nicht exakt die gemessenen vertikalen Konzentrationsunterschiede, da dieser Prozess numerisch nur schwer abbildbar ist. Ein Vergleich gemessene mit errechneter Chloridkonzentration an der GWM6-tief ist in Abbildung 16 dargestellt.

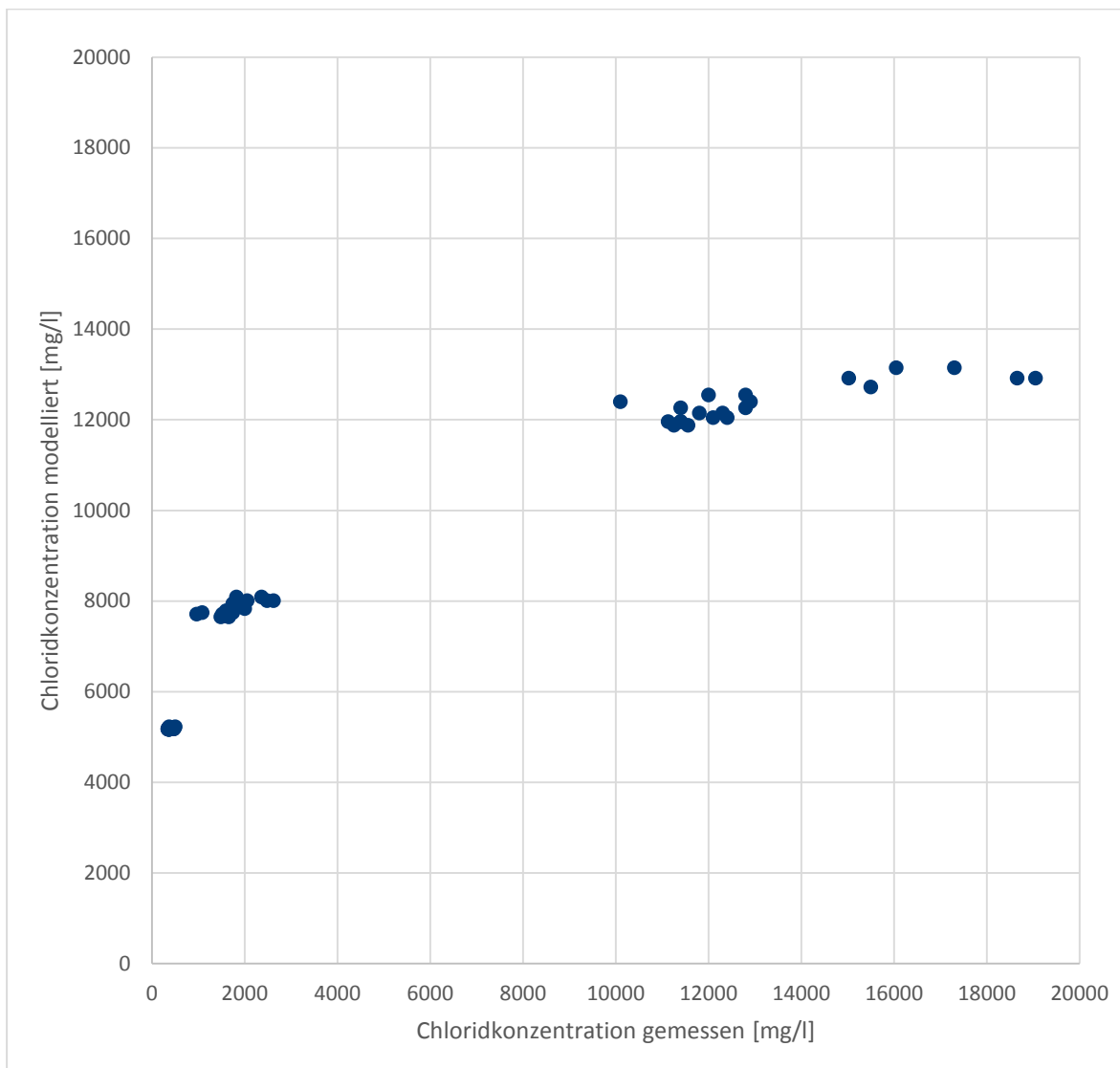


Abbildung 15: Vergleich gemessene mit errechneten Chloridkonzentrationen in den haldennahen Messstellen (ausgenommen GWM 14).

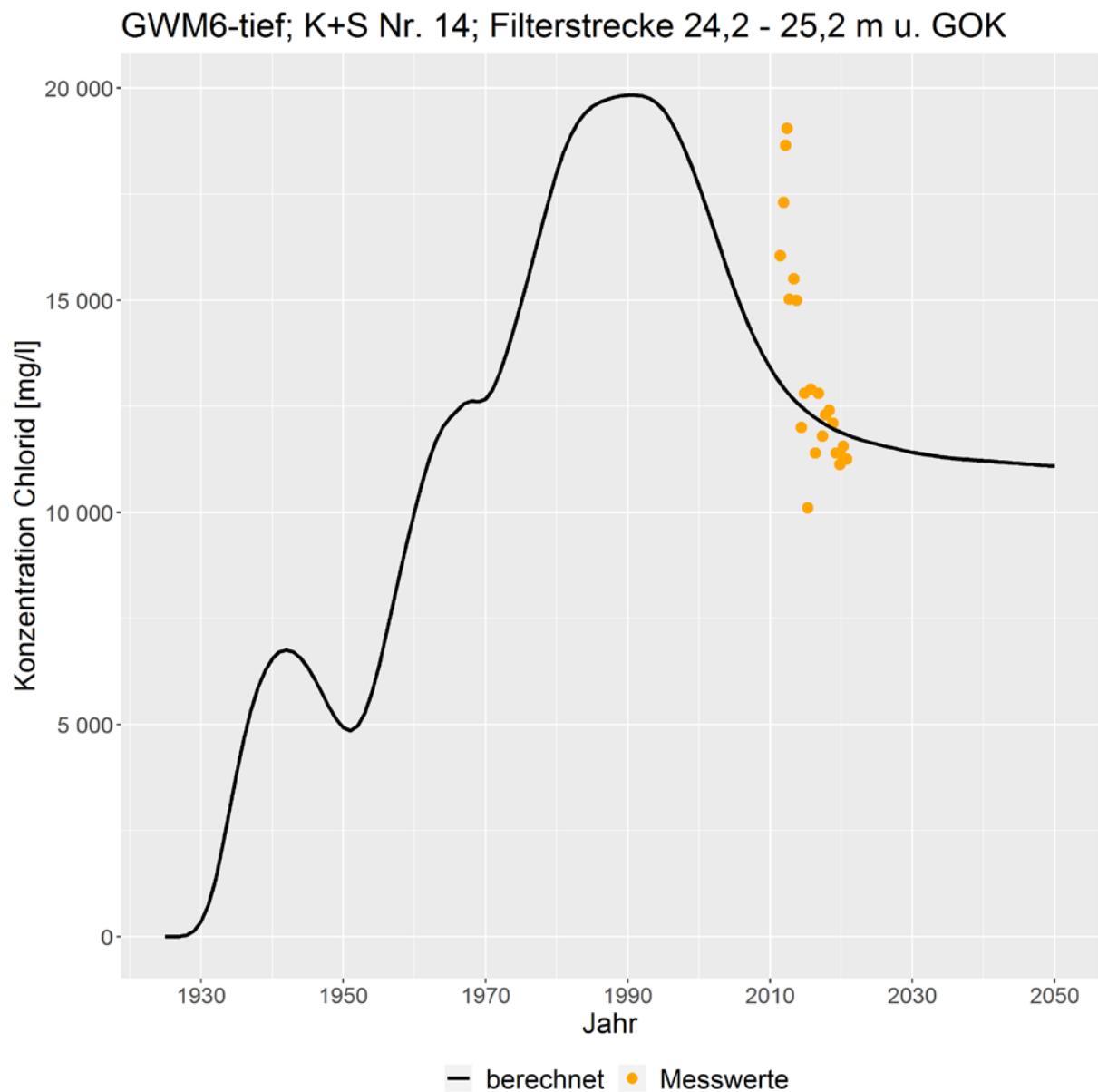


Abbildung 16: Vergleich gemessene mit errechneten Chloridkonzentrationen an der GWM6-tief. Gut zu erkennen ist das Zurückgehen der gemessenen Chloridkonzentrationen durch eine Verringerung der Restinfiltration nach Ende der Produktion durch einen Teilrückbau der Halde.

4.9.1.2 Haldenferne Messstellen

Als haldenferne Messstellen werden GWM7-flach und tief, GWM11-flach und tief sowie die 2019 neu errichteten Grundwassermessstellen GWM 32, 33 und 34 (jeweils flach und tief) zusammengefasst. Auch hier wird der Trend der Stoffausbreitung korrekt wiedergegeben und die gemessenen Chloridkonzentrationen werden vom Modell weitgehend richtig erfasst (Abbildung 17). Abbildung 18 zeigt einen Vergleich von gemessenen mit errechneten Chloridkonzentrationen an der Messstelle GWM7-tief. Der Trend wird richtig erfasst, die Modellergebnisse liegen leicht unterhalb der gemessenen Werte.

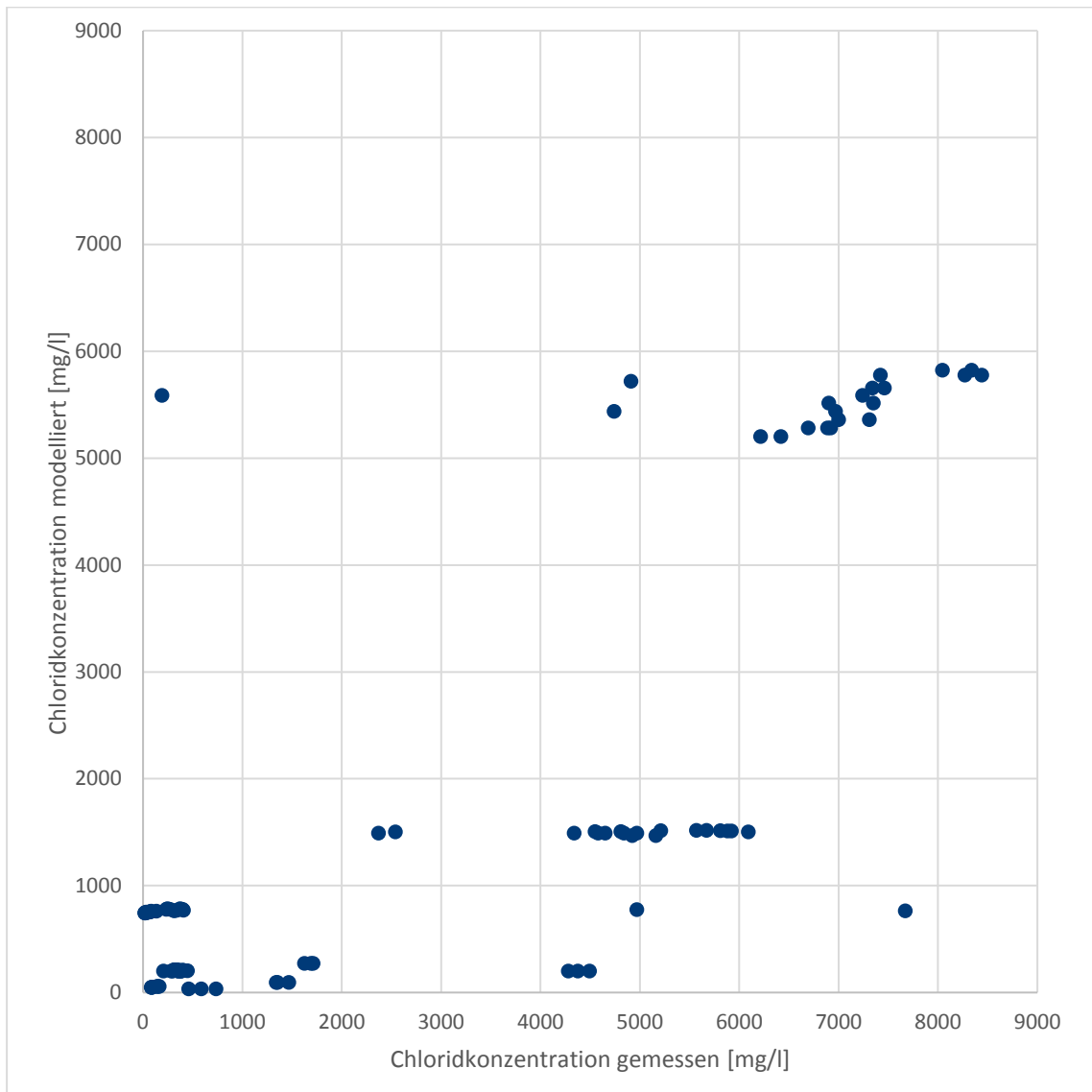


Abbildung 17: Vergleich gemessene mit errechneten Chloridkonzentrationen in den haldenfernen Messstellen.

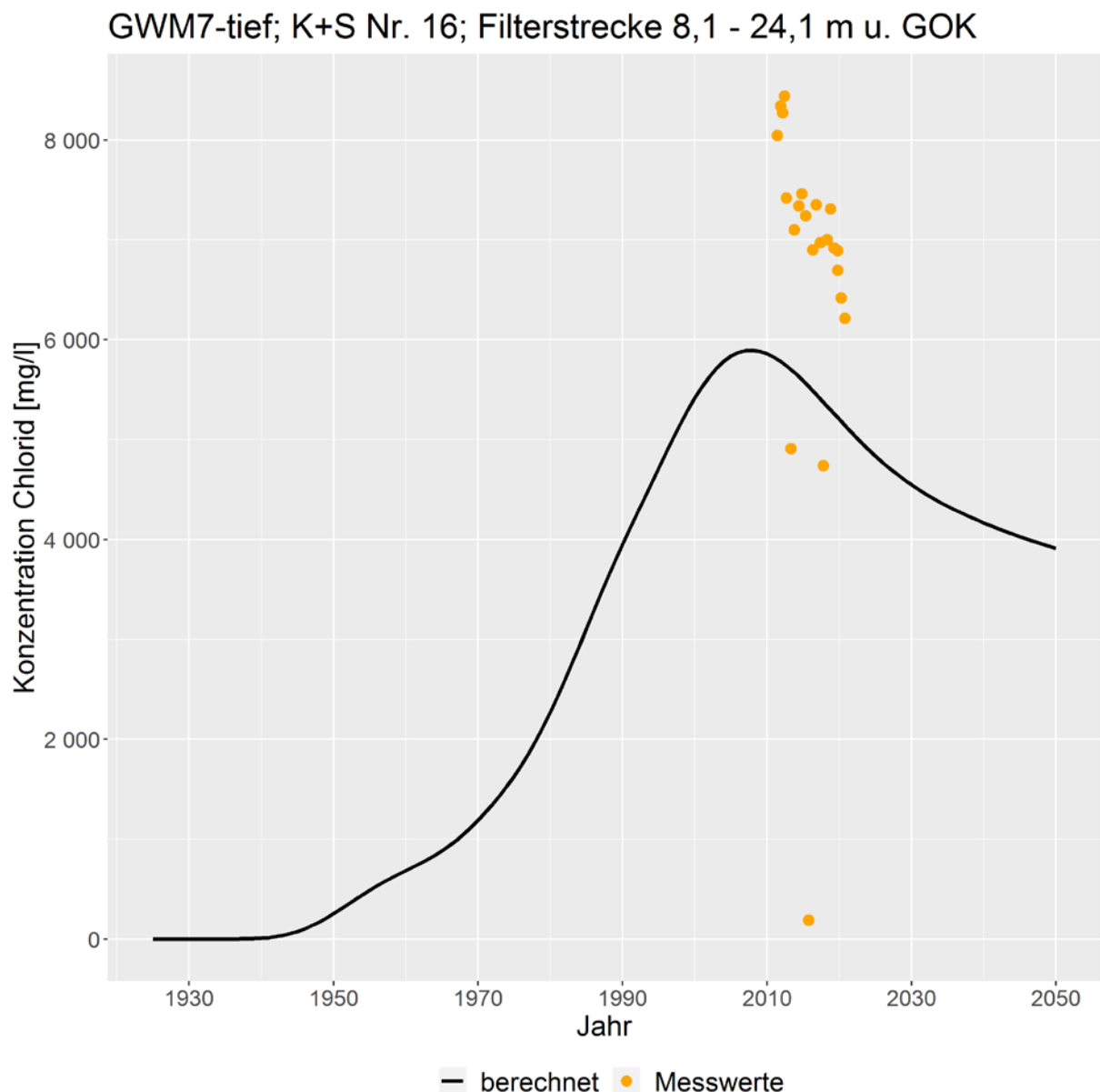


Abbildung 18: Vergleich gemessene mit errechneten Chloridkonzentrationen an der Messstelle GWM7-tief.

4.9.1.3 Messstellen nördlich der Innerste

Als Messstellen nördlich der Innerste werden GWM12-flach, mitte und tief sowie die GWM20 und die 2019 neu errichtete GWM20-tief zusammengefasst. In diesem Bereich werden die gemessenen Chloridkonzentrationen, insbesondere in den flacheren Messstellen etwas überschätzt (Abbildung 19). Dies hängt wieder mit der numerisch nur schwer abbildbaren vertikalen Zonierung der Salzkonzentration, d.h. der Dichteschichtung, zusammen.

GWM12 liegt im Modell im aufmineralisierten Bereich. Die geochemische Signatur dieser Messstelle weist jedoch auf geogene Mineralisation hin, so dass hier das Modell die Ausbreitung vermutlich überschätzt. Die am nördlichsten gelegene GWM20 sowie die 2019 neu errichtete GWM20-tief weisen weder im Modell noch anhand der Messwerte eine Beeinflussung auf.

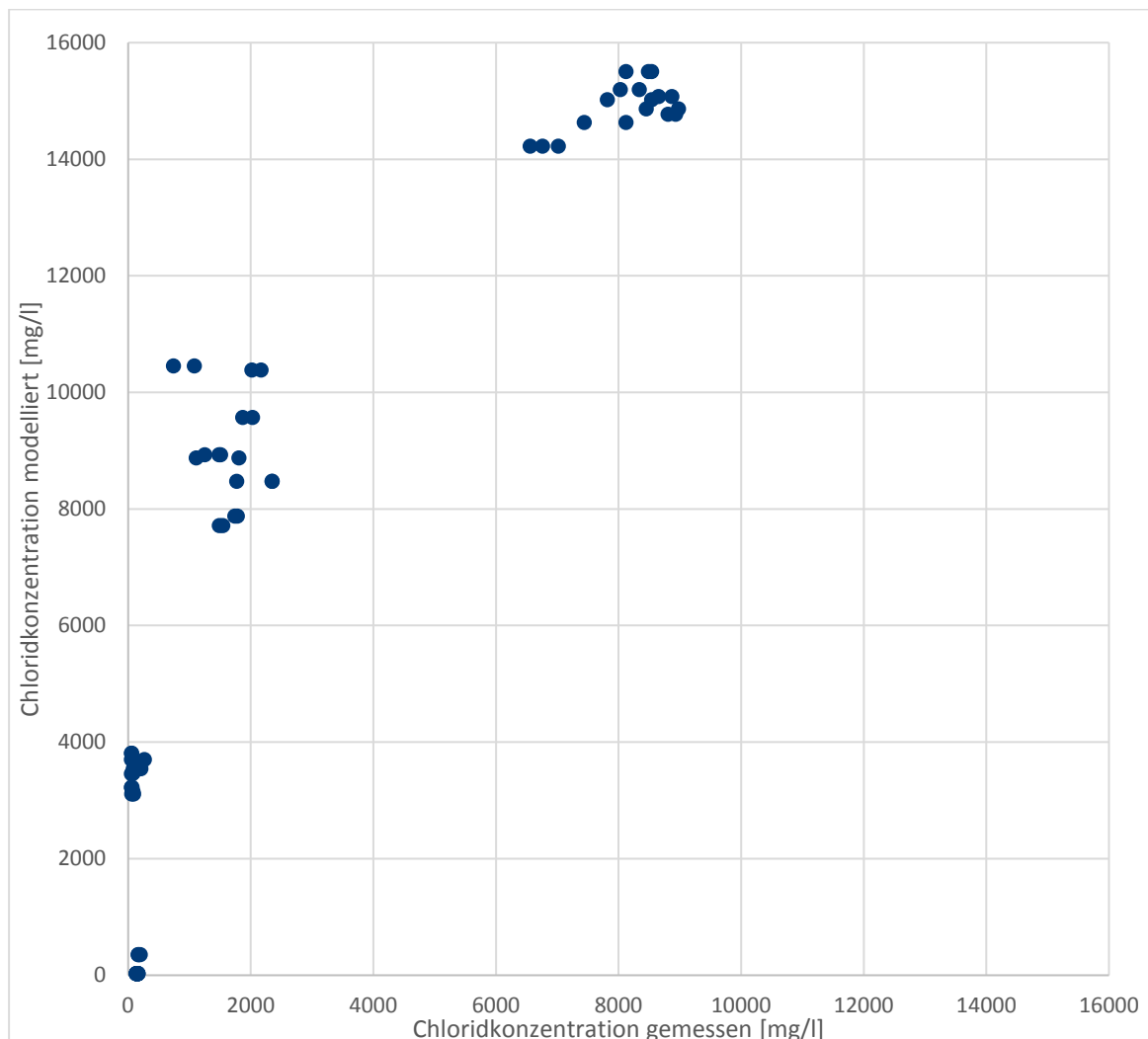


Abbildung 19: Vergleich gemessene mit errechneten Chloridkonzentrationen in den Messstellen nördlich der Innerste.

Zusammenfassend lässt sich feststellen: Das Stofftransportmodell wurde anhand der Chloridkonzentrationen in den tieferen Horizonten im Zentrum der Salzwasserausbreitung kalibriert. Die modellierten Konzentrationen in den tiefen Messstellen im Zentrum der Salzwasserausbreitung entsprechen daher den gemessenen Werten. Die oberflächennahen Messstellen werden im Modell überschätzt. Dies lässt sich mit der Schwierigkeit der numerischen Abbildbarkeit von Dichteschichtungen im Modell erklären. Auch im Bereich östlich der Innerste wird die Ausbreitung im Modell überschätzt. Dies stellt einen konservativen Rechenansatz dar, der im Zweifel zu hohe Mineralisationen ausweist. Hinzu kommt, dass im Modellgebiet neben haldenstämmigen Salzwässern auch geogen mineralisierte Wässer aus dem Hutgestein vorkommen, so dass die haldenstämmigen Chloridwerte durch das Modell zusätzlich überschätzt werden könnten.

4.9.2 Validierung der Modellergebnisse mittels Geoelektrik

Nachdem im vorangegangenen Abschnitt die gemessenen mit den modellierten Werten (punktuell) verglichen wurden, erfolgt nun eine flächenhafte Überprüfung anhand von geophysikalischen Messdaten.

2019 erfolgten bodengestützte geoelektrische Messungen im Arbeitsgebiet, die weitere Hinweise auf geologische Strukturen und die Verbreitung höher mineralisierter Wässer liefern. Diese wurden durch GGL Leipzig durchgeführt, graphisch aufbereitet und interpretiert. [GGL 2020]

Mineralisierte Bereiche im Untergrund zeichnen sich durch niedrige spezifische elektrische Widerstände ab. Eine Unterscheidung von Bereichen des Grundwassers, die von Salzwasser beeinflusst sind, von solchen Bereichen, die davon nicht beeinflusst sind, kann also über die spezifischen elektrischen Widerstände (unter Einbeziehung von Randwerten aus den geologischen Gegebenheiten) erfolgen. Dabei ist jedoch zu beachten, dass der spezifische elektrische Widerstand neben dem Einfluss durch die Mineralisation auch natürlichen Einflussfaktoren, z.B. der Kornzusammensetzung, dem Wassergehalt der Böden bzw. Festgesteine, dem effektiven Porenraum, der Gesteinsmatrix, der Wechselwirkung zwischen Porenfluid und Gesteinsmatrix, etc. unterliegt.

Für die Darstellung in Horizontalschnitten wurde durch GGL eine Legende entwickelt, die bei der Bewertung der spezifischen elektrischen Widerstände Hilfestellung leistet. So sind bei spezifischen elektrischen Widerständen kleiner 10 Ohm m Salzwässer mit einiger Sicherheit beteiligt und in den Abbildungen in verschiedenen Blautönen dargestellt. [GGL 2020]

Abbildung 20 zeigt die Inversion der Geoelektrik-Daten 5 Meter u. GOK. Die höher leitfähigen Bereiche befinden sich nördlich bis nordwestlich der Halde. Die Lage ist ein starker Hinweis auf eine von der Halde ausgehende Mineralisation. Dies deckt sich mit den Ergebnisse des hydrogeologischen Modells (Abbildung 11). Auch ein „Abschwenken“ der Mineralisation in Richtung Nordwesten ist sowohl im Modellausschnitt als auch in der Geoelektrik erkennbar.

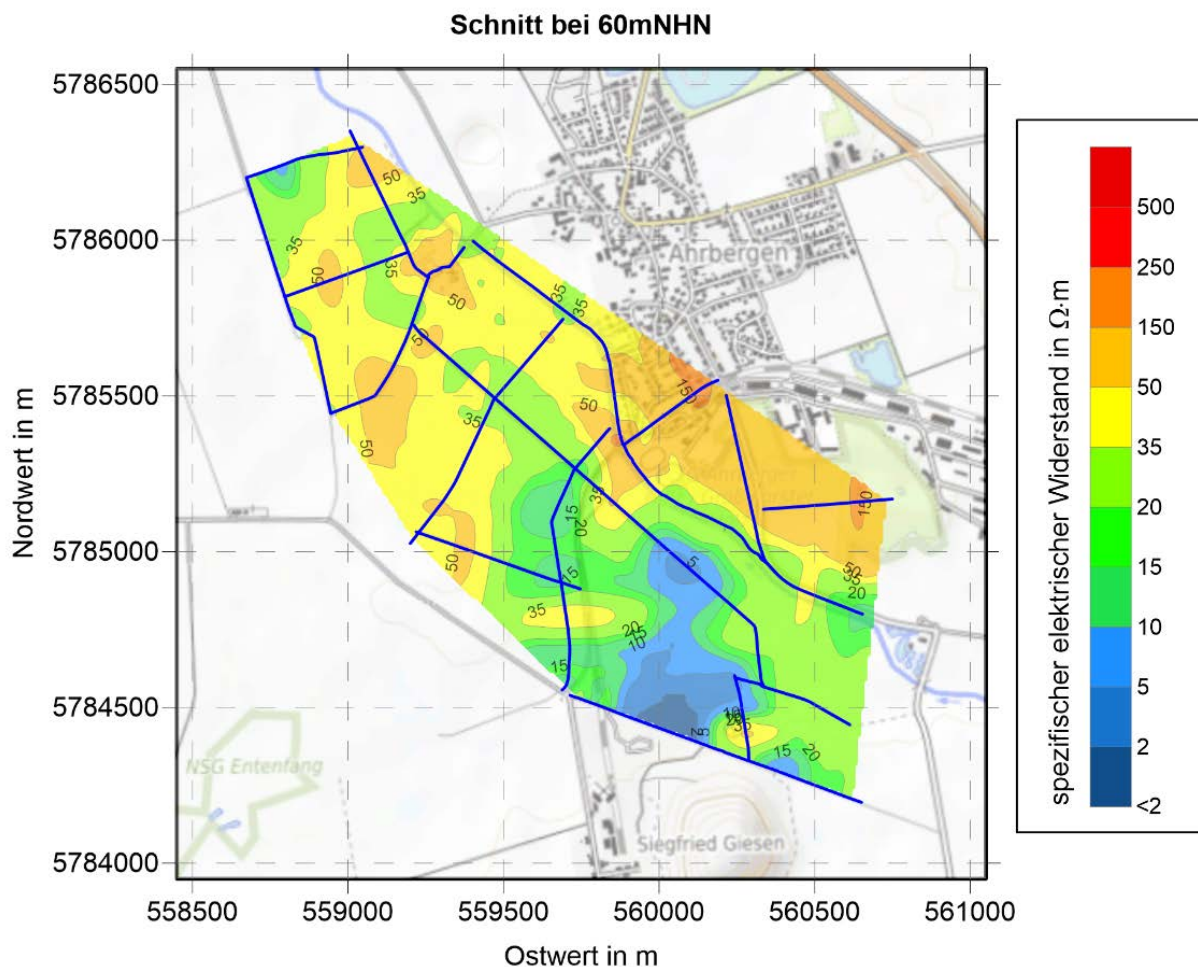


Abbildung 20: Geoelektrik Horizontalschnitt im Untersuchungsgebiet bei 60 m NN, ca. 5 m u. GOK. Ab spezifischen elektrischen Widerständen kleiner 10 Ohm m sind Salzwässer mit einiger Sicherheit beteiligt. [GGL 2020]

Abbildung 21 zeigt die Inversion der Geoelektrik-Daten 15 Meter u. GOK. Niederohmige Bereiche befinden sich flächig nördlich sowie fleckig nordwestlich der Althalde, was ein Hinweis auf mineralisierte Wässer ist. Die Verbreitung der niederohmigen Bereiche kann durch die modellierte Fahne angenähert werden (Abbildung 12). Die Lage ist ein starker Hinweis auf haldenstämmige Einflüsse, in diesen Tiefenlagen kommen jedoch auch geogen aufmineralisierte Wässer in Betracht. Eine Vermengung der geogenen mit den haldenstämmigen Wässern ist hierbei eine plausible Erklärung, was zum Teil auch die fleckenhafte Verteilung der niederohmigen Bereiche erklären könnte. Nördlich der Innerste entlang der Bahnlinie etwa im Bereich des Schachts Fürstenhall fällt ein Bereich mit hohen Widerständen auf. Hier kann das Vorhandensein höher mineralisierter Wässer in dieser Tiefenlage ausgeschlossen werden.

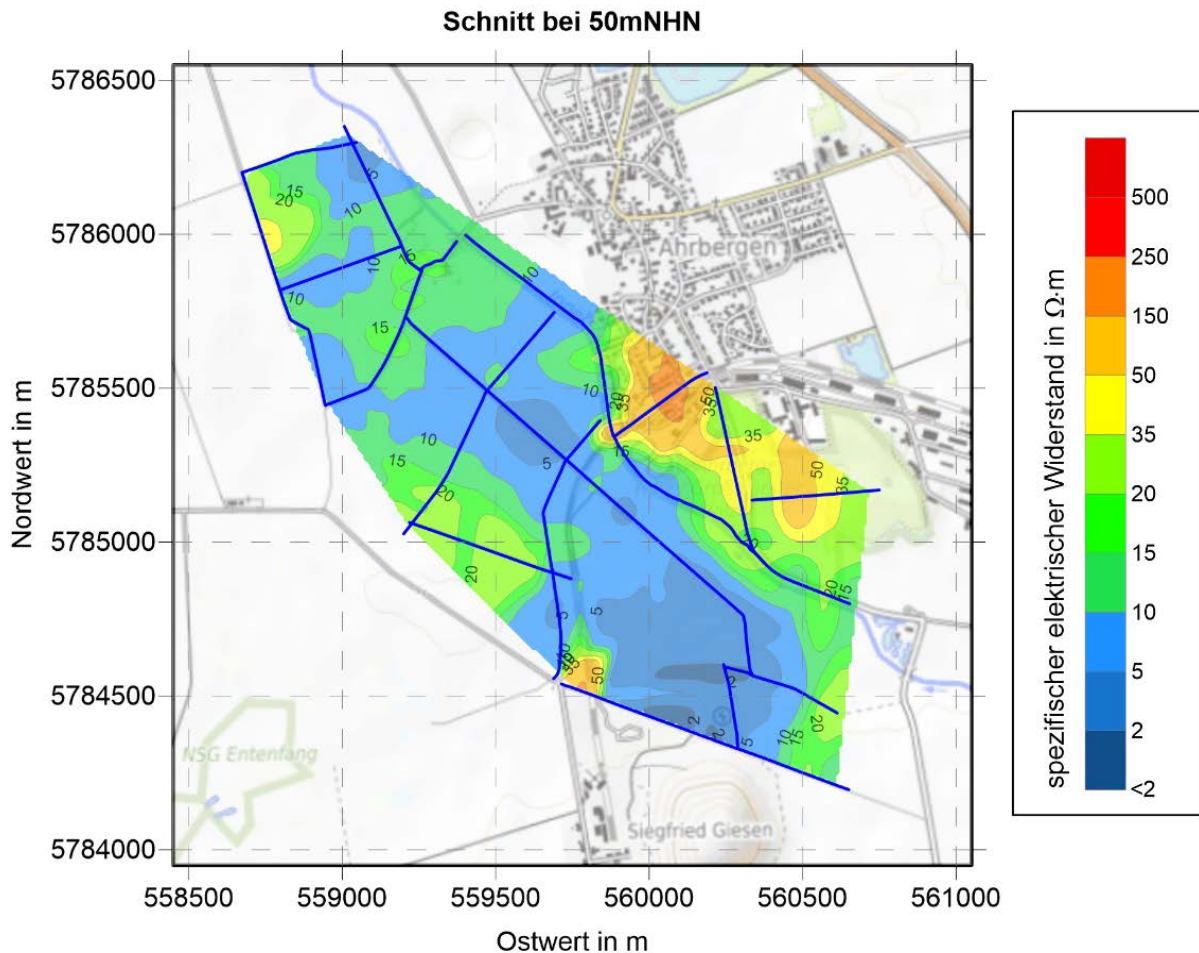


Abbildung 21: Geoelektrik Horizontalschnitt im Untersuchungsgebiet bei 50 m NN, ca. 15 m u. GOK. Ab spezifischen elektrischen Widerständen kleiner 10 Ohm m sind Salzwässer mit einiger Sicherheit beteiligt. [GGL 2020]

In Abbildung 22 wurde ein Horizontalschnitt der Geoelektrik Messergebnisse in 20-30 Metern unter GOK erzeugt. Hier zeigt sich ein ähnliches Bild wie in Abbildung 21, die niederohmigen Bereiche sind jedoch etwas weiter verbreitet und die einzelnen Bereiche mit niedrigeren Widerständen weichen einer flächigeren Verbreitung. Der Bereich hoher Widerstände nördlich der Innerste entlang der Bahnlinie fällt erneut ins Auge. Dies deckt sich sehr gut mit den Modellergebnissen.

Ähnlich wie in der Teufenlage 15 m u. GOK, muss in der Teufenlage 25 m u. GOK (Abbildung 13) mit geogen mineralisierten Wässern aus dem Hutgestein, die sich mit haldenstämmigen Wässern mischen, gerechnet werden.

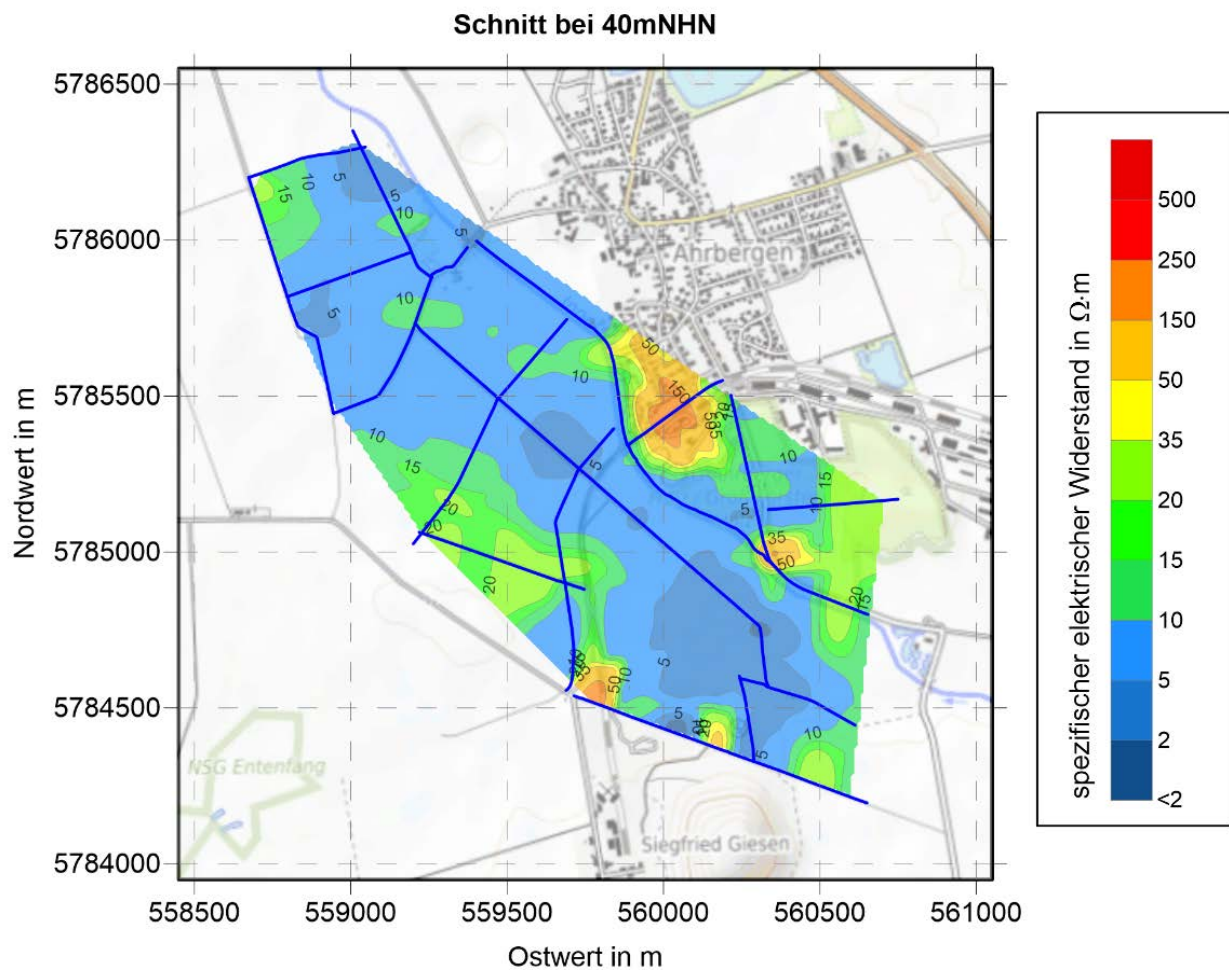


Abbildung 22: Geoelektrik Horizontalschnitt im Untersuchungsgebiet bei 40 m NN, ca. 25 m u. GOK. Ab spezifischen elektrischen Widerständen kleiner 10 Ohm m sind Salzwässer mit einiger Sicherheit beteiligt. [GGL 2020]

Insgesamt zeigt der großräumige Abgleich mit den Geoelektrik Horizontalschnitten, dass sich die prinzipielle Salzwasser-Ausbreitung im Modell gut mit den Bereichen niedriger elektrischer Widerstände deckt. Lokal ergeben sich jedoch Unterschiede zwischen Modellsimulation und Geoelektrik.

Insbesondere nördlich der Innerste wird die Ausbreitung der Mineralisation durch das Modell im Vergleich zur Geoelektrik etwas überschätzt. Weiterhin ist darauf zu achten, dass mit geophysikalischen Messverfahren, wie oben bereits erwähnt, keine Rückschlüsse auf die Herkunft der Wässer gezogen werden können. Mit zunehmender Tiefe muss mit einem verstärkten Auftreten höher mineralisierter geogener Wässer aus dem Hutgestein gerechnet werden. Das Auftreten dieser ist durch die im Hutgestein verfilterte Messstelle GWM26 nachgewiesen.

4.10 Prognoserechnung

Für eine Prognoserechnung wurde die Simulation bis 2050 verlängert. In den oberflächennahen Bereichen (Abbildung 23) zeigt sich keine Veränderung gegenüber dem Ist-Zustand. Auch in den

unteren Bereichen (Abbildung 24 und Abbildung 25) ist der Teil der Mineralisation mit den höchsten Konzentrationen stationär. Mit geringer Konzentration erfolgt modellseitig jedoch eine weitere Ausbreitung entlang der Grundwasserleitersohle mit der Grundwasserströmung Richtung Nordwesten, in mittleren Tiefen (14 Meter unter Grundwasseroberfläche) als kleine Bereiche mit Konzentrationen zwischen 1000 und 2500 mg/l, in den tieferen Bereichen flächiger mit höheren Konzentrationen. Die Mineralisation wird dabei mit zunehmendem Abstand von der Althalde durch Verdünnungsprozesse geringer.

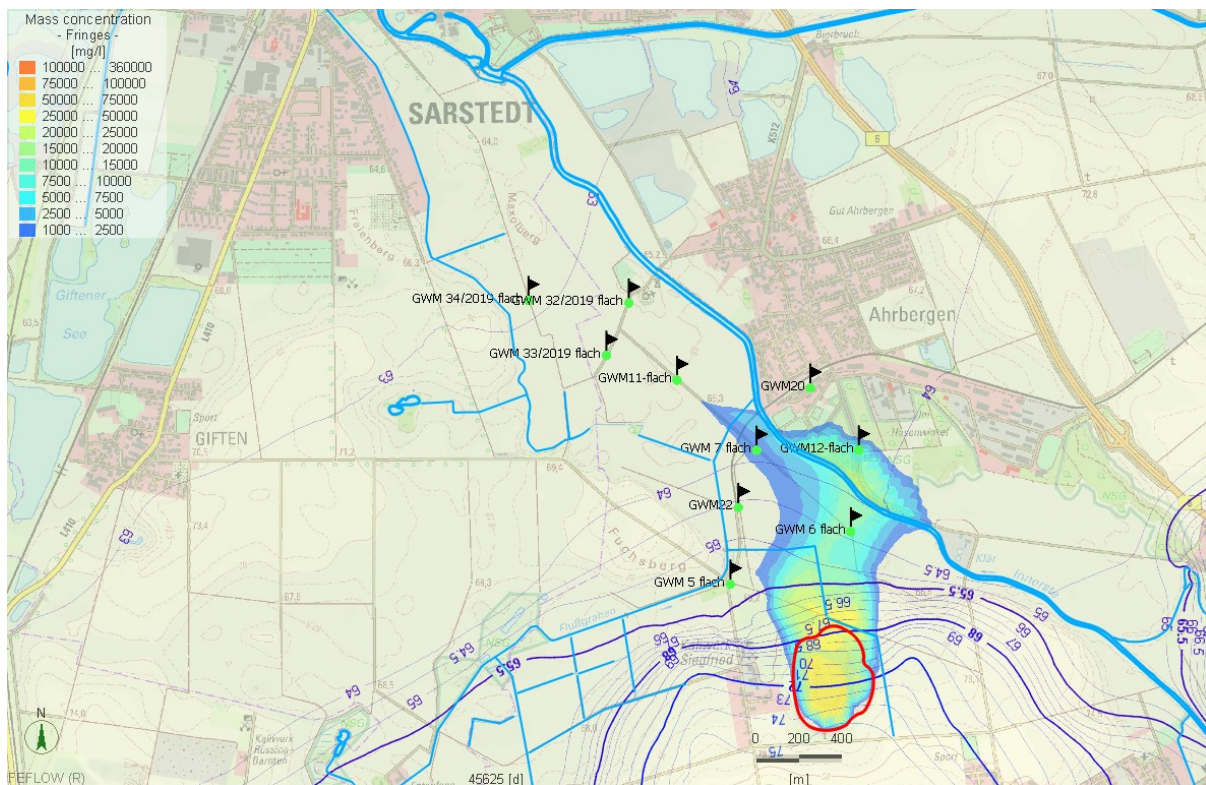


Abbildung 23: Verteilung der Gesamtmineralisation ausgehend von der Althalde 30 Jahre in die Zukunft gerechnet, 4 Meter unterhalb des Grundwasserspiegels.

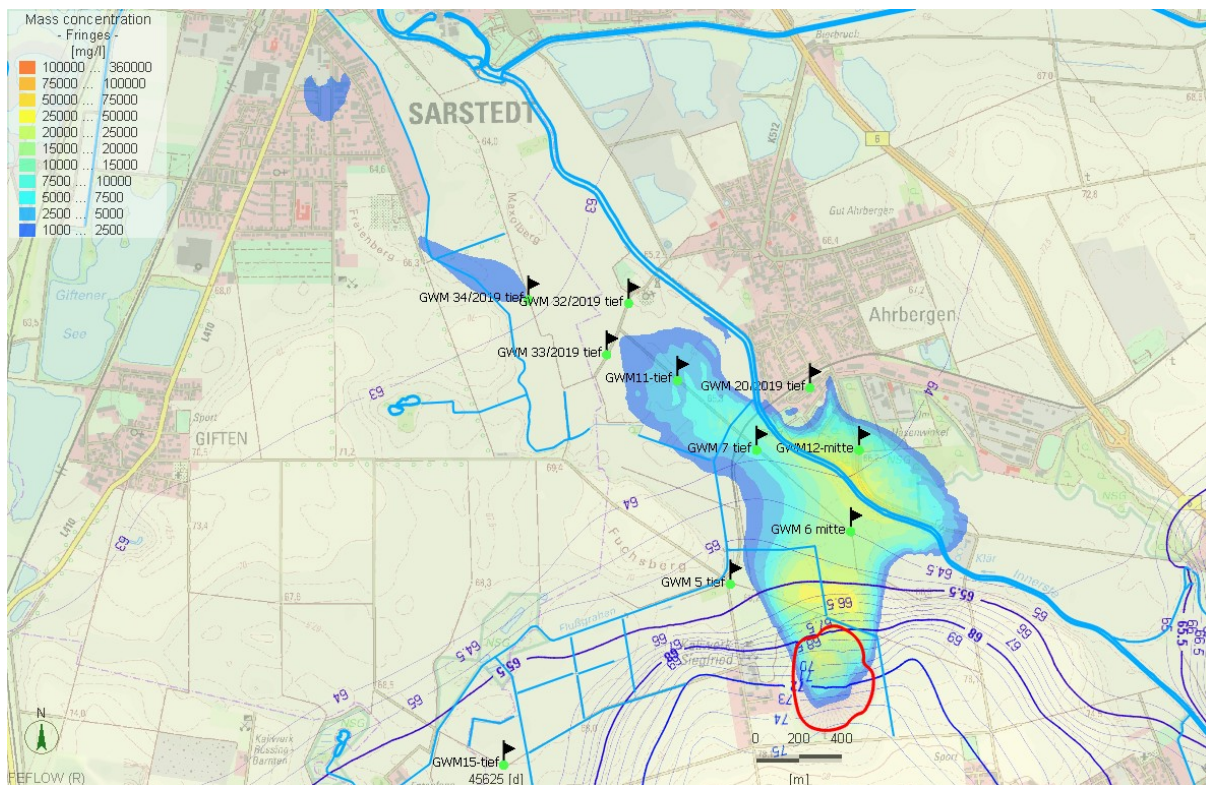


Abbildung 24: Verteilung der Gesamtmineralisation ausgehend von der Althalde 30 Jahre in die Zukunft gerechnet, 14 Meter unterhalb des Grundwasserspiegels.

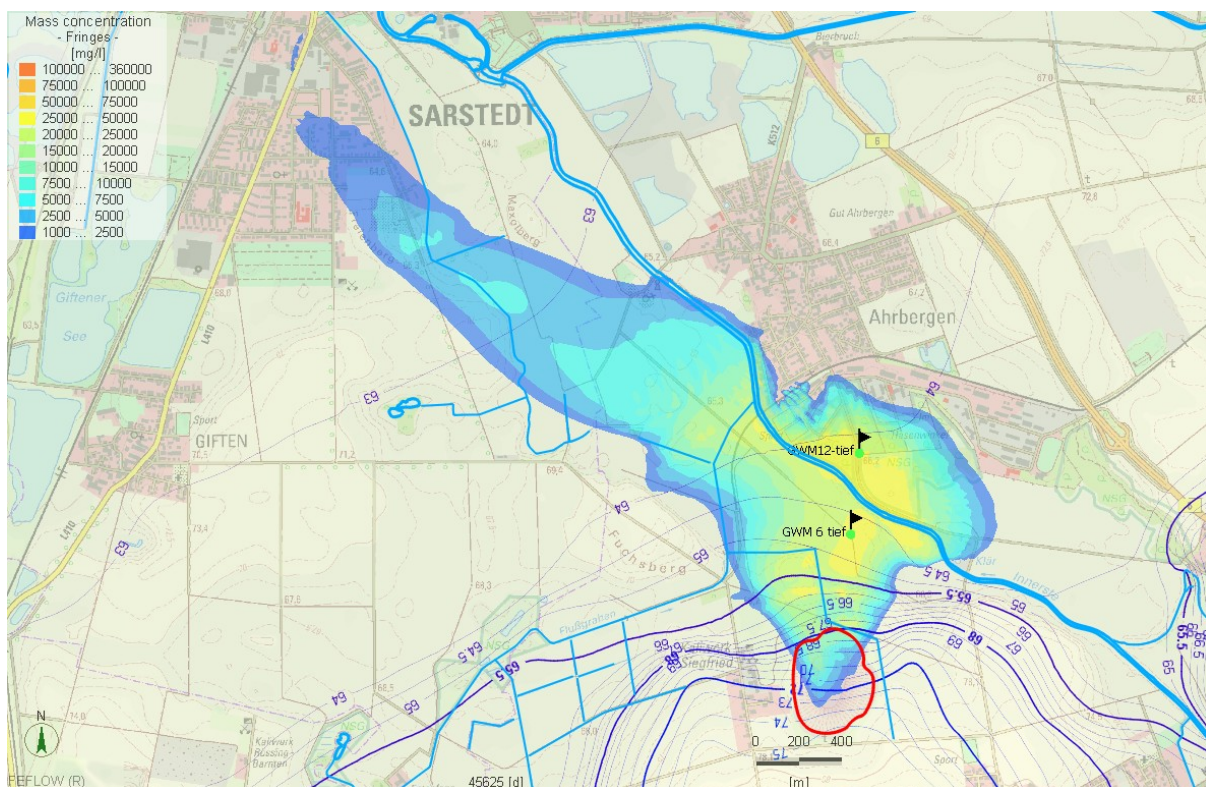


Abbildung 25: Verteilung der Gesamtmineralisation ausgehend von der Althalde 30 Jahre in die Zukunft gerechnet, 26 Meter unterhalb des Grundwasserspiegels.

Als Schlussfolgerung lässt sich sagen, dass gemäß Modell die Ausbreitung der Mineralisation in geringen Konzentrationen an der Sohle des Grundwasserleiters, d.h. in größerer Tiefe, Richtung Nordwesten theoretisch möglich ist. In diesem Bereich zwischen Ahrbergen und Sarstedt wurden 2019/2020 Messstellen niedergebracht, die Auskunft über die konkreten hydrogeologischen Verhältnisse geben. Die Befunde bestätigen dabei die Modellrechnungen, dass in den unteren Ausbautiefen der Grundwassermessstellen erhöhte Chloridkonzentrationen angetroffen werden. Die Messstellen werden in das umfangreiche laufende Monitoring integriert und sämtliche Entwicklungen werden weiterhin durch laufendes Monitoring registriert. Die Ergebnisse des Monitorings werden mit den Modellaussagen abgeglichen und wenn nötig weitere Anpassungen am Modell vorgenommen. Denkbare Änderungen wären etwa ein zeitverzögertes Fallen der Mineralisation in den Messstellen aufgrund der Sanierungsmaßnahmen am Haldengraben in den Jahren 2018/2019, welche eine Abnahme des Eintragsterms bewirken können.

5 Literaturverzeichnis

Diersch, Hans-Jörg G. (2014): Feflow, Finite Element Modeling of Flow, Mass and Heat Transport in Porous and Fractured Media, Springer.

DVGW (2004), Neuauflage DVGW (2016): Technische Regel - Arbeitsblatt DVGW W 107 (A). Aufbau und Anwendung numerischer Grundwassermodelle in Wassergewinnungsgebieten.

Feflow Online: url:<http://www.feflow.info/html/help/default.htm?url=HTMLDocuments%2FPreference%2Fparameters%2Fmaterialproperties%2Fflow%2Fflowmaterials.htm> (besucht am 27.04.2017).

Fugro (2014) Hydrogeologisches Gutachten: Bearbeitungsgrundlagen I-7, Hydrogeologisches Gutachten. Antrag auf Planfeststellung Hartsalzwerk Siegfried-Giesen, Planfeststellungsunterlage zum Rahmenbetriebsplan.

Fugro (2014) Modellbericht: Bearbeitungsgrundlagen I-10, Dokumentation des Grundwasserströmungs und Stofftransportmodells, Antrag auf Planfeststellung, Hartsalzwerk Siegfried-Giesen, Planfeststellungsunterlage zum Rahmenbetriebsplan.

Fugro (2014) Errichtung Grundwassermessstellen: Bearbeitungsgrundlagen I-9, Bericht zur Errichtung von Grundwassermessstellen sowie zur Bestandsaufnahme Grund- und Oberflächenwasser Frühjahr/Herbst 2013, Antrag auf Planfeststellung, Hartsalzwerk Siegfried-Giesen, Planfeststellungsunterlage zum Rahmenbetriebsplan.

GGL (2020): Geoelektrische Messungen im Abstrom der Rückstandshalde Siegfried-Giesen, Ergebnisbericht.

K+S AG (2020): Gefährdungsabschätzung Althalde Siegfried-Giesen - Wasserhaushaltsbilanz