

DMT GmbH & Co. KG

Geo Engineering & Exploration
Hydrogeologie & Wasserwirtschaft
Am Technologiepark 1
45307 Essen

tk SE-Deponie Wehofen-Nord, 3. BA**Gutachten zu den Auswirkungen des 3. BA auf die
Grundwassertemperaturen und die Hydrochemie in
der Umgebung der Halden bzw. der Deponie im
Bereich Wehofen**

Auftraggeber: thyssenkrupp Steel Europe AG
Kaiser-Wilhelm-Straße 100
47166 Duisburg

Bestell-Nr.: 86130249

Bestell-Datum: 29.06.2016

Sachverständige: Dipl.-Math. H. Kories
Dipl.-Geol. Dr. C. Klinger

Tel.-Durchwahl: 0201/172-1862
Fax: 0201/172-1891

DMT-Bearbeitungs-Nr.: EG-HW-2013-037-3

Essen, den 04.05.2017

DMT GmbH & Co. KG



(Kories)



(Klinger)

Dieses Gutachten besteht aus 45 Seiten.

Inhaltsverzeichnis

1	Ausgangssituation.....	4
2	Grundlagen	5
2.1	Historie des Halden- und Deponiestandorts Wehofen.....	5
2.2	Grundwasserströmungssituation	8
2.3	Grundwassertemperaturen	10
3	Weitere Entwicklung der Grundwassertemperaturen	14
4	Auswirkungen der Temperaturerhöhung auf die Grundwasserbeschaffenheit	16
4.1	Sickerwasserbeeinflussungen	17
4.1.1	Bergehalden	20
4.1.2	tk SE-Deponie	22
4.1.3	Emscher	25
4.2	Temperaturabhängigkeit chemischer Gleichgewichte	27
4.3	Temperaturabhängigkeit mikrobieller Aktivität.....	30
4.4	Schlussfolgerungen	38
5	Fazit und Empfehlungen	39

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Übersichtslageplan.....	5
Abb. 2:	Grundwassergleichen in mNN (Stichtagsmessung April 2016) Quelle: Emschergenossenschaft.	8
Abb. 3:	Isolinien der aktuellen mittleren Grundwassertemperaturen.	11
Abb. 4:	Isolinien der aktuellen mittleren und für den Endzeitpunkt der Schüttung des 3.BA erwarteten Grundwassertemperaturen.	14
Abb. 5:	Temperaturentwicklung in wichtigen Grundwassermessstellen.	17
Abb. 6:	Verteilung von Grundwassertemperaturen und Wärmequellen.....	19
Abb. 7:	Korrelation Sulfatgehalt mit Temperatur in den Grundwassermessstellen.	21
Abb. 8:	Korrelation Natriumgehalt mit Temperatur in den Grundwassermessstellen.	21

Abb. 9:	Verteilung von Stoffen in den Bauabschnitten nördlich der Leitstraße. Die Pfeile zeigen mögliche Stoffausträge an.	22
Abb. 10:	Korrelation Cyanidgehalt mit Temperatur in den Grundwassermessstellen.	23
Abb. 11:	Korrelation Borgehalt mit Temperatur in den Grundwassermessstellen.	24
Abb. 12:	Korrelation Kaliumgehalt mit Temperatur in den Grundwassermessstellen.	24
Abb. 13:	Entwicklung von Temperatur und Chloridgehalt in den emschernahen Grundwassermessstellen.	25
Abb. 14:	Konzentrationsverhältnisse (Medianwerte) von Emscherwasser zu dem Grundwasseranstrom (Messstellen 19 u. 20) bzw. der östlichen Messstelle A 2.1.	26
Abb. 15:	Dateneingabe für thermodynamische Gleichgewichtsberechnung mit PHREEQC.	28
Abb. 16:	Sättigungsverhältnisse in Wasser aus A 1.1 bei 12,8 und 20 °C.....	29
Abb. 17:	Temperaturabhängige Aktivitätsverteilung am Beispiel sulfatreduzierender Bakterien (Literaturdaten und zusammenfassende Kurve).....	31
Abb. 18:	Korrelation TOC-Gehalt mit Temperatur in den Grundwassermessstellen.	33
Abb. 19:	Korrelation Ammonium-Gehalt mit Temperatur in den Grundwassermessstellen.	34
Abb. 20:	Korrelation Nitratgehalt mit Temperatur in den Grundwassermessstellen.	35
Abb. 21:	50-Tage Linie im Grundwasserabstrom von der Emscher.	36
Abb. 22:	Spezifische Wachstumsraten von natürlichen Coliformen-Isolaten als Funktion der Inkubations-Temperatur (aus Camper et. al. (1991)).	37

Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Temperaturmesswerte vom Februar 2017.	10
---------	--	----

Anhangverzeichnis

Anhang 1:	Lageplan mit Grundwassermessstellen und Ganglinien der Grundwassertemperaturen von 2000 – 2015.....	16
-----------	--	----

1 Ausgangssituation

Seit 1984 werden durch thyssenkrupp Steel Europe AG (tk SE) auf der Deponie Wehofen-Nord LD-Schlacken und weitere Abfälle aus der Stahlerzeugung abgelagert. Bis 2007 wurde der 1. Bauabschnitt (BA) beschickt. Seit 2007 werden die Schlacken und weitere Abfälle im 2. BA abgelagert. Es ist bekannt und durch Temperaturmessungen im Bereich des 1. und 2. BA nachgewiesen, dass sich nach der Deponierung der Schlacken und weiterer Abfälle durch exotherme Reaktionen mehrere Jahrzehnte anhaltende Temperaturerhöhungen einstellen. Diese Temperaturerhöhungen innerhalb des Deponiekörpers übertragen sich konduktiv durch Wärmeleitung oder bei fehlender Basisabdichtung auch konvektiv durch Versickerung erwärmter Sickerwässer auf den Untergrund. Für die Deposition von LD-Schlacken und weiteren Abfällen nach 2018 (Beendigung der Schüttung des Mischbereichs des 2. BA) wurde die Errichtung des 3. BA bei der Bezirksregierung Düsseldorf beantragt. Der 3. BA soll auf der Fläche zwischen dem 1. BA und der Brinkstraße errichtet werden, wobei die Westböschung des 1. BA durch den geplanten 3. BA überbaut wird.

Die tk SE hat bei der Bezirksregierung Düsseldorf den Antrag gestellt, den 1. und 2. BA mit einer Oberflächenabdichtung zu versehen. Hierzu hat die DMT GmbH & Co. KG (DMT) im Auftrag der tk SE ein Temperaturgutachten mit Wärmetransportmodellierung (Datum 27.11.2014) erstellt. Zusätzlich hat die DMT ein „Gutachten zu den Grundwassertemperaturen in der Umgebung der Deponien im Bereich Wehofen“ (Datum 28.09.2016) erarbeitet. Zu diesem Temperaturgutachten wünscht die Bezirksregierung eine Konkretisierung der Aussagen zu der in Folge der Errichtung des 3. BA zu erwartenden Grundwassererwärmung und deren Auswirkung auf die Hydrochemie und auf die Mikrobiologie, letztere mit dem Fokus auf pathogenen Keimen wie z. B. Escherichia coli.

tk SE hat die DMT mit der Anfertigung dieses Ergänzungsgutachtens beauftragt. Hierzu werden die an den Grundwassermessstellen in der Umgebung der Deponie bzw. Halden nördlich und südlich der Leitstraße im Bereich Wehofen gemessenen Grundwassertemperaturen im Hinblick auf die zeitliche Abfolge der Errichtung der Deponie bzw. Halden ausgewertet und in Form von Temperaturisolines dargestellt. Außerdem werden die verfügbaren Grundwasseranalysen im Hinblick

auf Herkunft der Wasserinhaltsstoffe und Temperatureinflüsse auf die Hydrochemie ausgewertet.

2 Grundlagen

2.1 Historie des Halden- und Deponiestandorts Wehofen

In dem genannten Bereich befinden sich eine Werksdeponie und 2 Bergehalden. Nördlich der Leitstraße steht die Werksdeponie Wehofen-Nord mit ihren beiden Bauabschnitten 1 und 2. Südlich der Leitstraße stehen die beiden Bergehalden Wehofen-West und Wehofen-Ost. Die Lage der Deponie und der beiden Bergehalden ist in Abb. 1 dargestellt. Die Schüttungsgeschichte der Deponie und der beiden Bergehalden werden im Folgenden kurz beschrieben. Dabei wird auf Umstände eingegangen, die für die Temperatursituation im Grundwasser von Bedeutung sind.



Abb. 1: Übersichtslageplan.

Deponie Wehofen-Nord (tk SE)

Der Schüttnbetrieb im **1. BA** wurde 1984 aufgenommen und 2007 beendet. Er verfügt über keine Basisabdichtung. Unterhalb des 1. und 2. BA wie auch im Bereich der Aufstandsfläche des geplanten 3. BA befinden sich Aussandungen (oberflächennahe Sandabgrabungen). Im Bereich des 1. BA wurden sie von der Stadt Dinslaken mit Müll, vermutlich überwiegend Hausmüll und Sperrmüll, verfüllt. Die Mülleinlagerungen sind z. T. mit Hüttensand abgedeckt worden. Der 1. BA besteht aus Mischabfällen, also überwiegend LD-Schlacken mit weiteren Abfällen aus der Stahlerzeugung. An 4 Wärmemessstellen werden die Temperaturen im Deponiekörper quartalsweise gemessen. Die Temperaturmesswerte liegen in Abhängigkeit von der Lage der jeweiligen Wärmemessstelle und Tiefe des Messpunktes im Deponiekörper zwischen 20 und 50°C.

Der Schüttnkörper des **2. BA** ist in zwei Bereiche geteilt, und zwar von West nach Ost in den Monodeponie-Bereich (Flächen 9 und 10: nur LD-Schlacken und Hochofen-Gichtschlamm) und den Mischbereich (Flächen 1 bis 8: LD-Schlacken mit weiteren Abfällen aus der Stahlerzeugung). Im östlichen Teil des Mischbereichs (Flächen 3 bis 6) wurden zusätzlich unter besonderen Vorsichtsmaßnahmen bezüglich Einbautechnik und Standsicherheit besonders verpackte Asbestabfälle eingebaut. Die Deponierung von Asbest ist inzwischen eingestellt. Der Schüttnbetrieb im 2. BA wurde 2007 aufgenommen und dauert voraussichtlich im Mischbereich bis 2018 und im Monobereich bis 2022 an. Die Aussandungen unter dem 2. BA sind mit LD-Schlacken und Hüttenschutt verfüllt. Der 2. BA verfügt im Gegensatz zum 1. BA über eine Basisabdichtung mit aufliegender Dränageschicht. Im 2. BA wurden bisher Temperaturen in den Sickerwasserrohren unmittelbar oberhalb der Basisabdichtung gemessen. Die Temperaturmesswerte reichen bis 35°C. Uns liegen die halbjährlichen Temperaturmesswerte der Jahre 2013 bis 2015 vor. Dabei kann eine generelle Tendenz zu steigenden Temperaturen in allen 5 Sickerwasserrohren festgestellt werden. Der Anstieg über die 3 Jahre wird von uns im Mittel über alle Sickerwasserrohre mit ca. 2°C abgeschätzt.

Die Aussandungen im Bereich des geplanten **3. BA** sind nach dem „Bericht zur industriehistorischen Recherche der Deponie Wehofen-Nord in Dinslaken“ (erstellt 2001 durch Thyssen Krupp Immobilien Management GmbH) mit Bergematerial, Hüttensanden, Kraftwerksaschegranulat und Gießereisanden verfüllt. Für den

3. BA ist wie beim 2. BA eine Basisabdichtung mit aufliegender Dränageschicht vorgesehen, die auch auf der Westflanke des 1. BA hochgezogen wird.

Bergehalde Wehofen-West (tk SE)

Die Bergehalde Wehofen-West wurde von 1935 bis 1984 geschüttet. Während bis 1943 nur Bergematerial aufgehaldet wurde, wurde sie in den nachfolgenden Jahren im Wesentlichen mit Bergematerial und Hüttenschutt und außerdem in geringeren Anteilen mit Oxygenschlamm, Rückständen aus der Hochofengasreinigung, Bauschutt und LD-Schlacken beschickt. Diese Halde verfügt über keine Basisabdichtung.

Die Bergehalde weist mehrere Warmbereiche auf, die auf Schwelbrände zurückzuführen sind. In 5 Warmbereichen werden die Haldentemperaturen regelmäßig gemessen, dokumentiert und ausgewertet. Hierzu erfolgt unter anderem eine brandschutztechnische Fremdüberwachung durch die DMT – Fachstelle für Brandschutz. Die 5 Warmbereiche befinden sich im Norden, Osten und Südwesten jeweils im Randbereich des Haldenplateaus. Die Temperaturmesswerte aus 2017 reichen bis knapp über 75°C. Nur die Messstelle P2.4 im Warmbereich 6 liefert einen höheren Temperaturmesswert. Er lag in 2016 bei 230°C und in 2017 bei 200°C (DMT-Bericht vom 29.03.2017). In 2009 wurden in dem Warmbereich 6 Temperaturen bis 430°C gemessen. Diese erhöhten Temperaturen sind auf eine Abgrabung dieser Haldenflanke im Zusammenhang mit dem Ausbau der Autobahn A 59 mit dadurch erhöhtem Zutritt von Luftsauerstoff zurückzuführen. Die Flanke wurde durch eine Stahlspundwand gesichert und abgedeckt. Im Rahmen des bergrechtlichen Abschlussbetriebsplanverfahrens wurde im Jahre 2010 als brandschutztechnische Sanierungsmaßnahme die Abdeckung des gesamten Haldenplateaus mit einer 2 Meter mächtigen Bodenschicht zugelassen. Die Abdeckarbeiten dauern noch an.

Bergehalde Wehofen-Ost (RAG)

Auf der Bergehalde Wehofen-Ost, die von der RAG Montan Immobilien GmbH (RAG MI) überwacht und verwaltet wird, wurde von etwa 1953 bis etwa Ende der 1980er Jahre Bergematerial abgelagert. Auch diese Bergehalde verfügt über keine Basisabdichtung. In der Vergangenheit ist es verschiedentlich zu Schwelbränden gekommen, die durch den Bau einer Spundwand entlang der Leitstraße und

den Auftrag von bindigen Böden in den 1980er/1990er Jahren saniert wurden und die offensichtlich gelöscht sind. Die Halde ist abgedeckt und bewaldet. Temperatureffälligkeiten sind nicht bekannt.

2.2 Grundwasserströmungssituation

Um Vernässungen von Bebauungen und insbesondere Unterkellerungen in Folge zu geringer Flurabstände zu vermeiden, betreibt die Emschergenossenschaft (EG) im Stadtteil Aldenrade die Grundwasserhaltung Duisburg-Aldenrade. Die Grundwasserhaltung besteht aus 12 Vertikalbrunnen, einem Horizontalfilterbrunnen und dem Kronprinzengraben und fördert ca. 10 Mio. m³ Grundwasser pro Jahr. Die geförderten Grundwässer werden mittelbar oder unmittelbar in die Kleine Emscher eingeleitet und damit auf kurzem Wege dem Rhein zugeführt.



Abb. 2: Grundwassergleichen in mNN (Stichtagsmessung April 2016) Quelle: Emschergenossenschaft.

Im Umfeld der Grundwasserhaltung misst die EG zweimal pro Jahr die Grundwasserstände, vornehmlich jeweils im April und im Oktober. In Abb. 2 sind die

Grundwassergleichen der Stichtagsmessung vom April 2016 dargestellt. Die Grundwasserhaltung erzeugt einen markanten großräumigen Absenkungstrichter, dem allseitig die Grundwässer aus der Umgebung, auch aus dem Umfeld der Deponie und der beiden Bergehalden, zuströmen. In dem genannten Bereich ist die Grundwasserströmung generell in südwestlicher Richtung auf die Grundwasserhaltung hin orientiert. Der 3. BA liegt somit im Abstrombereich der Emscher.

Auf Nachfrage hat die Untere Wasserbehörde der Stadt Duisburg erklärt, dass es im Bereich zwischen den Halden und der Grundwasserhaltung keine genehmigten oder angezeigten Grundwassernutzungen gibt. Es kann also davon ausgegangen werden, dass von der Grundwassererwärmung oder möglichen dadurch hervorgerufenen Veränderungen in der Grundwasserqualität keine Nutzer betroffen sind.

Bezüglich Hydrochemie und Temperatur im Grundwasser unterhalb des 3. BA ist die hydraulische Funktion der Emscher von Bedeutung. An der Emscher werden Grundwasserstände von ca. 25 mNN, an der Leitstraße von 23,5 mNN und südlich der Bergehalden Wehofen-West und Wehofen-Ost ca. 22 mNN gemessen. Die Emscher ist auf dem betrachteten Abschnitt für das Grundwasser kein vollständiger Vorfluter in dem Sinne, dass ihr die Grundwässer von beiden Seiten des Flusses zuströmen und vom Fluss aufgenommen und abgeleitet werden. Das aus nordöstlicher Richtung anströmende Grundwasser unterströmt die Emscher überwiegend in Richtung auf die Grundwasserhaltung. Im Jahresmittel nimmt die Emscher aber auch Teile des anströmenden Grundwassers auf (eingeschränkte Vorflut). Die Auswertungen der Grundwassertemperaturen und der Grundwasserchemie (vgl. Kap. 4.1.3) belegt außerdem eine gewisse, von uns aber nicht quantifizierbare Aussickerung aus der Emscher, die sich in der Jahreszeit mit niedrigen Grundwasserständen, also vornehmlich im Sommer und Herbst, einstellt. Das Versickern von warmem Emscherwasser (schätzungsweise um 20°C) führt zu einer vorübergehenden Grundwassererwärmung, die im Bereich der Messstelle A3.1 (unmittelbar westlich der stillgelegten Eisenbahnbrücke über die Emscher) mit Temperaturerhöhungen um ca. 4 bis 5°C besonders deutlich ausfällt.

2.3 Grundwassertemperaturen

Durch tk SE wurden über die zurückliegenden Jahrzehnte Temperaturmessungen in Grundwassermessstellen durchgeführt. tk SE hat die Temperaturmesswerte für die Messstellen A1.1, A2.1, A3.1, B1.1, B1.2, B2.1, B2.2, B3.1, B3.2, BR10, BR11, BR12, BR13 und BR15 (deren Lage kann Abb. 1 und Abb. 3 entnommen werden) zusammengestellt und als Ganglinien dargestellt. Sie bildeten die Grundlage für das DMT-Gutachten zu den Grundwassertemperaturen in der Umgebung der Deponien im Bereich Wehofen vom 28.09.2016 und sind in ihm dokumentiert. Die jüngeren Temperaturmessungen ab 2000 sind zusätzlich im Anhang 1 dieses Gutachtens dokumentiert. Zur Ausweitung der Datengrundlage für dieses Gutachten hat tk SE die Grundwassertemperaturen in allen ihren Messstellen im Laufe des Februar 2017 an 8 Stichtagen gemessen. Zusätzlich zu den oben genannten 14 Grundwassermessstellen wurden die Temperaturen nun auch in den Messstellen BR8, BR14, BR16, BR17, BR18, BR19, BR20 und BR34 gemessen. Die Lage dieser 8 zusätzlichen Messstellen kann wieder Abb. 3 entnommen werden. Die Temperaturmesswerte aus dem Februar 2017 sind in Tab. 1 zusammengestellt. Bei den Messstellen mit der Bezeichnung BRx wird in der Tabelle nur die Bezeichnung x (also die Nummer) verwendet.

Tab. 1: Temperaturmesswerte vom Februar 2017.

Deponie Wehofen																						
Grundwassertemperaturen [°C]																						
vor 2011	1a	2b	3a	4	6	7	8	8	9		10	11a	12	13	14	15	16	17	18	19	20	34
	umbez.	umbez.	neu	umbez.	neu	neu	alt	neu	neu	neu												
Brunnen	B 1.1	B 2.1	A 2.1	B 2.2	A 1.1	A 3.1	8	B 3.2	B 3.1	B 1.2	10	11a	12	13	14	15	16	17	18	19	20	34
3. Feb. 17	14,3	18,9	12,2	17,1	12,1	13,4	13,3	13,3	12,6	22,1	18,3	15,1	12,9	12,7	13,0	13,7	13,1	19,3	16,0	11,3	13,1	12,3
7. Feb. 17	13,0	18,9	12,2	16,8	12,3	13,3	13,8	13,7	12,7	25,3	18,5	13,7	14,7	14,1	12,8	13,5	13,5	18,6	15,9	11,5	12,8	13,0
9. Feb. 17	13,1	18,9	12,1	16,5	12,6	13,4	13,8	13,2	12,5	24,8	18,4	20,8	15,3	12,2	12,6	13,8	13,1	19,3	16,0	11,3	11,8	12,1
14. Feb. 17	13,5	18,8	12,1	16,6	12,6	13,3	13,7	13,3	12,7	25,8	18,5	21,1	15,4	14,5	12,4	13,2	13,3	19,8	16,1	11,7	11,7	11,9
16. Feb. 17	13,3	18,8	12,2	16,3	12,7	13,3	14,2	13,5	12,6	25,3	18,6	20,8	15,7	14,4	13,0	13,8	13,1	19,8	16,3	11,9	11,8	12,3
21. Feb. 17	13,4	18,8	12,1	16,5	12,5	13,2	13,8	13,6	12,6	25,6	17,7	21,4	15,5	15,1	13,1	13,6	13,4	19,9	16,2	11,2	11,6	12,5
23. Feb. 17	13,5	19,2	13,1	16,9	12,9	13,7	13,0	13,3	12,7	25,9	17,4	20,9	15,5	14,7	13,5	14,1	13,8	19,1	16,4	11,4	12,1	12,1
28. Feb. 17	13,3	18,7	12,0	16,8	12,5	13,0	13,6	13,3	12,6	24,6	17,4	20,5	15,4	14,9	13,3	14,2	13,7	18,9	16,0	11,5	11,9	12,3

Die Messungen im Februar zeigen eine stabile Temperatursituation mit den üblichen Messschwankungen um ca. 1 °C. Die zum Beginn der Messkampagne etwas stärker schwankenden Temperaturmesswerte an den Messstellen B1.2,

BR11 (in der Tabelle als 11a bezeichnet), BR12 und BR13 wurden in Anbetracht der später stabilen Temperaturmesswerte vernachlässigt.

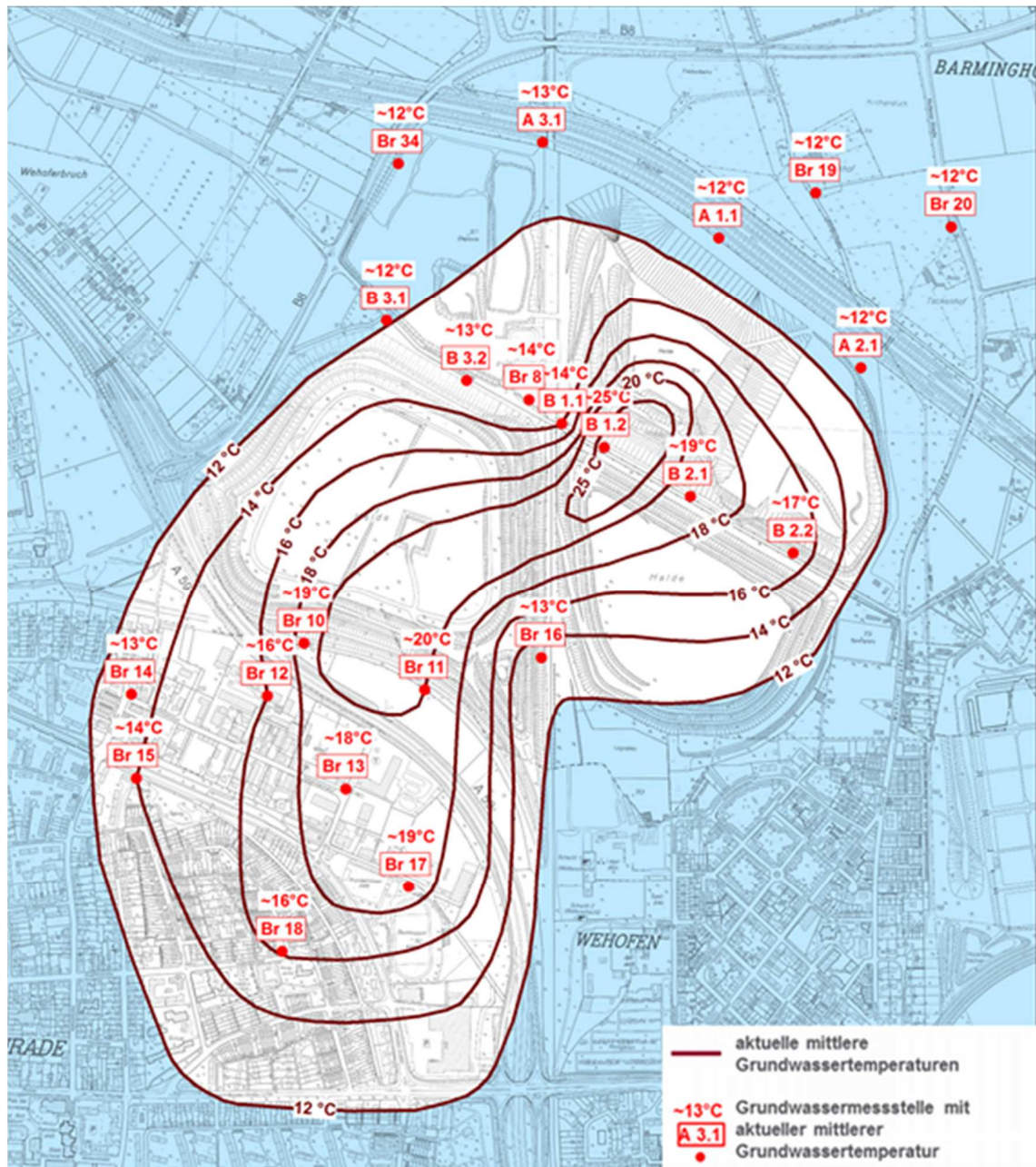


Abb. 3: Isolinen der aktuellen mittleren Grundwassertemperaturen.

Auf der Grundlage der bisherigen Temperaturmesswerte mit besonderer Wichtung der Messwerte aus Februar 2017 wurden für alle 22 tk SE-Messstellen aktuelle mittlere Grundwassertemperaturen ausgewertet. Die Ergebnisse dieser Auswertung sind in Abb. 3 dargestellt. Sie entsprechen weitestgehend den in unse-

rem Gutachten vom 28.09.2016 genannten mittleren Grundwassertemperaturen an den Messstellen (siehe dort Anhang 2.1). An einigen wenigen Messstellen haben wir die Temperaturen an die neueren Messwerte angepasst (max. Anpassung um 1 °C). Nur an der Messstelle BR11 wurde ein um 3 °C geringerer Wert von 20 °C festgelegt, da die Februar-Messwerte doch stabil eine niedrigere Temperatur auswiesen und der niedrigere Messwert für die nachfolgende Interpretation in Form von Temperaturisolines (Abb. 3) der ungünstigere Wert ist. Der niedrigere Wert führt abstromig gesehen zu einem geringeren Temperaturgradienten, was ein Unterschätzen der Ausdehnung der Grundwassererwärmung verhindert.

Anschließend wurden aus den Messwerten unter Berücksichtigung der Fließrichtung des Grundwassers Temperaturisolines abgeleitet. Für die Bereiche zwischen den Messstellen wurde interpoliert. Für den Grundwasserabstrombereich musste extrapoliert werden, um die Reichweite der Grundwassererwärmung abzuschätzen und darzustellen. Dabei wurden die aus den Messwerten erkennbaren Temperaturgradienten nach Süden bzw. Südwesten fortgesetzt. Die Temperaturisolines sind in Abb. 3 dargestellt. Es zeigt sich, dass die vom Wärmeeintrag aus der Deponie und der Halde Wehofen-West unbeeinflussten Grundwassertemperaturen etwa bei 12 °C liegen. Die 12 °C-Isolinie stellt in diesem Sinne die Umhüllende des Erwärmungsbereichs dar. Aus diesem Grund wurde außerhalb der 12 °C-Isolinie liegende Bereich hellblau unterlegt, um ihn als unbeeinflussten Bereich hervorzuheben.

Trotz der deutlichen Temperaturschwankungen in Folge der sommer- und herbstlichen Aussickerung warmen Emscherwassers wurde das Umfeld der Emscher im Bereich der Messstelle A3.1 zu dem unbeeinflussten Bereich gezählt. Da die abstromig gelegene Messstelle B3.1 jahreszeitliche Temperaturschwankungen von nur ca. 1 °C zeigt, hat dieser punktuelle Wärmeeintrag keine weitreichenden markanten Auswirkungen. Dies ist auf die Versickerung von überwiegend kühler Grundwasserneubildung im Bereich des heutigen Bodens (geplanter 3. BA) zurückzuführen, die sich auf den Grundwasserkörper auflegt und zu einer Abkühlung des gesamten Grundwasserabstroms führt.

Der Isolinesplan zeigt maximale Temperaturen im Bereich der Messstelle B1.2. Diese hohen Temperaturen sind nicht nur auf den 1. BA als Wärmequelle zurückzuführen, sondern auch auf die Verrottungswärme, die sich dort befindenden

Mülleinlagerungen in den früheren Aussandungen (DMT-Gutachten vom 28.09.2016). Der Erwärmungsbereich erstreckt sich von dort mit einem gleichförmigen Temperaturgradienten bis an den östlichen Rand des 2. BA, der eine weitere Wärmequelle darstellt. Wegen der Basisabdichtung findet im 2. BA nur ein konduktiver Wärmeübergang in den Grundwasserleiter statt, während im Bereich des 1. BA auch ein konvektiver Wärmeeintrag in Folge versickernder aufgewärmter Niederschlagswässer stattfindet. Nach den Erkenntnissen aus den Bohrarbeiten zur Errichtung der Wärmemesstellen im 1. BA versickern dort nur noch vergleichsweise geringe Wassermengen. In westlicher Richtung kühlt sich das Grundwasser über eine kurze Entfernung auf ein Niveau von 14 °C ab. Nach unserer Einschätzung hängt dies auch mit der wasserrechtlich zugelassenen Versickerung der gereinigten Abwässer der dort befindlichen LKW-Reifenwaschanlage zusammen.

Im weiteren Abstrom unterqueren die erwärmten Grundwässer die Halde Wehofen-West bzw. Wehofen-Ost. Von der Halde Wehofen-Ost liegen uns keine Erkenntnisse über einen Wärmeeintrag in das Grundwasser vor, während von der Halde Wehofen-West sehr hohe Temperaturen bekannt sind und eine entsprechende Wärmefahne im Grundwasser gemessen wird. Diese Wärmefahne ist im Isolinenplan in Abb. 3 gut zu erkennen. Nach unseren Abschätzungen reicht die Wärmefahne bis zur Dr.-Hans-Böckler-Straße. Die signifikante Einschnürung der Temperaturisolinen im Bereich der Messstelle BR16 ist nach unserer Einschätzung auf die dort betriebene Anlage zur Versickerung der Oberflächenabflüsse von der Halde Wehofen-Ost zurückzuführen, durch die eine größere Menge an überwiegend kühlem Wasser in den Grundwasserabstrom eingemischt wird.

Grund- oder Förderwassertemperaturen werden durch die EG nach ihren Angaben nicht gemessen. Eine Auswirkung der Grundwassererwärmung im Bereich der Deponie und der Halden auf die Förderwassertemperaturen der Grundwasserhaltung Duisburg-Aldenrade kann nach unserer Auswertung ausgeschlossen werden. Dabei ist zusätzlich zu bedenken, dass die aus dem Bereich der Deponie und der Halden kommenden Grundwässer nur einen Teil der Förderwässer der Grundwasserhaltung bilden.

3 Weitere Entwicklung der Grundwassertemperaturen

Aufbauend auf den vorliegenden Messwerten wurden die zum Ende des Schüttbetriebs im 3. BA als ungünstigstem Zeitpunkt zu erwartenden Temperaturen abgeschätzt. Aussagen zu den in Zukunft zu erwartenden Temperaturentwicklungen sind bereits in unserem Gutachten vom 28.09.2016 enthalten.

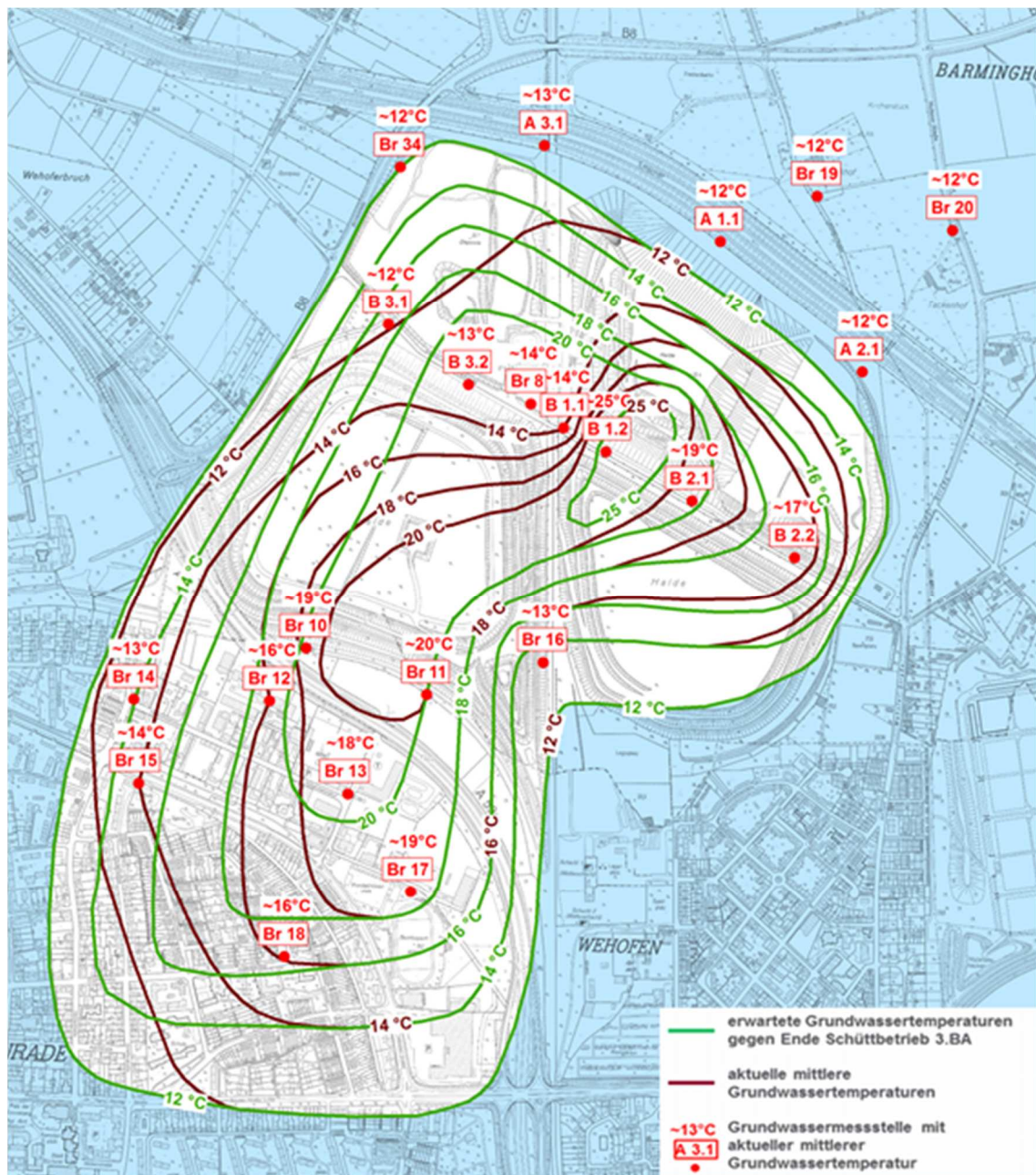


Abb. 4: Isolinen der aktuellen mittleren und für den Endzeitpunkt der Schüttung des 3.BA erwarteten Grundwassertemperaturen.

Sie können wie folgt zusammengefasst werden:

- Für den 1. BA ist in Folge eines langanhaltenden Auskühlungsprozesses mit stabilen Grundwassertemperaturen für die kommenden Jahre zu rechnen.
- Für den 2. BA halten wir für die nächsten Jahre ein Anhalten der leicht ansteigenden Temperaturtendenz für plausibel.
- Wir rechnen für die Grundwässer im 3. BA mit einer zum 2. BA ähnlichen Temperaturentwicklung nach Beginn der Schüttung. Dabei erwarten wir in Folge des größeren Volumens generell etwas höhere Temperaturen im Schüttkörper und im Grundwasser des geplanten 3. BA als im 2. BA.

Konkret erwarten wir für den 2. BA im Vergleich zu heute um ca. 1 °C höhere Grundwassertemperaturen. Außerdem schätzen wir, dass die Grundwassertemperaturen im 3. BA um bis zu 2 °C höher sein können als im 2. BA (ungünstiger Ansatz). Die Versickerung der gereinigten Abwässer der LKW-Reifenwaschanlage an der heutigen Stelle wird beseitigt. Außerdem wird sich die Wärmefahne südlich der Halde Wehofen-West weiter nach Westen ausdehnen, da sich die hinzukommende Wärmequelle primär im westlichen Abstrom bemerkbar machen wird. Hingegen rechnen wir nicht damit, dass eine Verlängerung der Wärmefahne im Abstrom eintreten wird, da sich die Abkühlungstendenzen insbesondere durch kühle Grundwasserneubildung an der gesamten Fahnenfront gleichmäßig auswirken werden.

Die aus den genannten Effekten resultierenden Temperaturverteilungen sind zusammen mit denen des heutigen Zustands in Abb. 4 dargestellt. Die Überlagerung der jeweiligen Isolinienpaare machen die Veränderungen deutlich. Im südöstlichen Abstrombereich südlich der Halde Wehofen-West erwarten wir keine Veränderungen. Da die Oberflächenabflüsse der Halde Wehofen-West in Zukunft in vier Versickerungsanlagen (im Nordwesten, Nordosten, Südosten und Südwesten der Halde) versickert werden sollen, ist mit zusätzlichen deutlichen Abkühlungen im Grundwasserabstrom der Deponie zu rechnen. Diese Effekte sind bei der Ableitung der Temperaturisolinien in Abb. 4 nicht berücksichtigt worden. Die Versickerungsanlagen sind bereits errichtet und werden in 2017 in Betrieb genommen. Die dargestellte Temperaturverteilung bildet insgesamt einen ungünstigen

Zustand ab, der auf der sicheren Seite liegend etwas höhere Temperaturen ausweist, als sie tatsächlich zu erwarten sind.

Nennenswerte Erwärmungen des Grundwassers in Folge der Errichtung des 3. BA sind nur im Bereich des geplanten 3. BA selber, der nordwestlichen Hälfte der Halde Wehofen-West und der westlichen Flanke des heute erwärmten Grundwasserabstroms zu erwarten. Nutzer sind hiervon nicht betroffen.

4 Auswirkungen der Temperaturerhöhung auf die Grundwasserbeschaffenheit

Im Bereich des 3. BA sind in Folge der geplanten Schüttung Temperaturerhöhungen des Grundwassers um bis zu 8 °C zu erwarten (vgI. Kap. 3). Des Weiteren geht aus den zuvor dargestellten Temperaturgrundlagen (s. Kap. 2.3) hervor, dass ähnliche durch den 1. und 2. BA bedingte Temperaturveränderungen bereits früher erfolgt sind. Darüber hinaus existieren auch Temperaturbeeinflussungen durch die Bergehalden im südlichen Abstrom (vgl. Kap. 2.1). Die Spannbreite der aktuellen mittleren Grundwassertemperaturen am Standort umfasst ca. 16 °C (von 12 °C bis 28 °C).

Es bestehen somit verschiedene Möglichkeiten, durch das Monitoring der letzten Jahre bzw. Jahrzehnte in diesem Raum hydrochemische Veränderungen zu identifizieren und auf deren Verursachung durch die o.g. Temperaturveränderungen zu überprüfen. Ausgewertet wurden Daten von 1976 bis 2016, die von tk SE und ELE Beratende Ingenieure GmbH, Erdbaulaboratorium Essen (ELE) zur Verfügung gestellt wurden. Bezüglich der Historie der einzelnen Messstellen (Ersatzmessstellen, Neubau, Bezeichnungen) sei auf frühere Berichte verwiesen.

Die Untersuchungen erstreckten sich auf die folgenden Fragestellungen:

- Lassen sich chemische Unterschiede der Grundwasserbeschaffenheit in Messstellen mit unterschiedlicher Grundwassertemperatur als temperaturbedingt identifizieren ?
- Welche möglichen Veränderungen lassen sich aus theoretischen thermodynamischen Betrachtungen ableiten ?
- Welchen temperaturabhängigen Einfluss können indirekt mikrobiell gesteuerte Prozesse auf die Grundwasserzusammensetzung haben ?

- Sind Änderungen des mikrobiologischen Bestandes möglich, die dann auch Auswirkungen auf die mikrobiologische Qualität des Grundwasser haben (pathogene Keime) ?

4.1 Sickerwasserbeeinflussungen

Um Veränderungen auf die Grundwasserbeschaffenheit als temperaturbedingt zu identifizieren, ist es zunächst erforderlich, andere Einflussgrößen auszuschließen. Daher wurden die Grundwasseranalysen zunächst auf mögliche Stoffeinträge mit Sickerwasser aus den verschiedenen im Einzugsbereich vorhandenen potenziellen Quellen überprüft. Dies geschieht vor allem durch Auswertung von zeitlich veränderten Konzentrationen.

Dazu ist es zunächst erforderlich, neben der aktuellen Temperaturverteilung auch die Temperaturentwicklung in den verschiedenen Standortbereichen zu kennen, um Quellen und Einwirkungsbereiche voneinander abgrenzen zu können. Schließlich befinden sich Bereiche erhöhter Grundwassertemperatur sowohl südlich der Bergehalde West als auch entlang der Leitstraße.

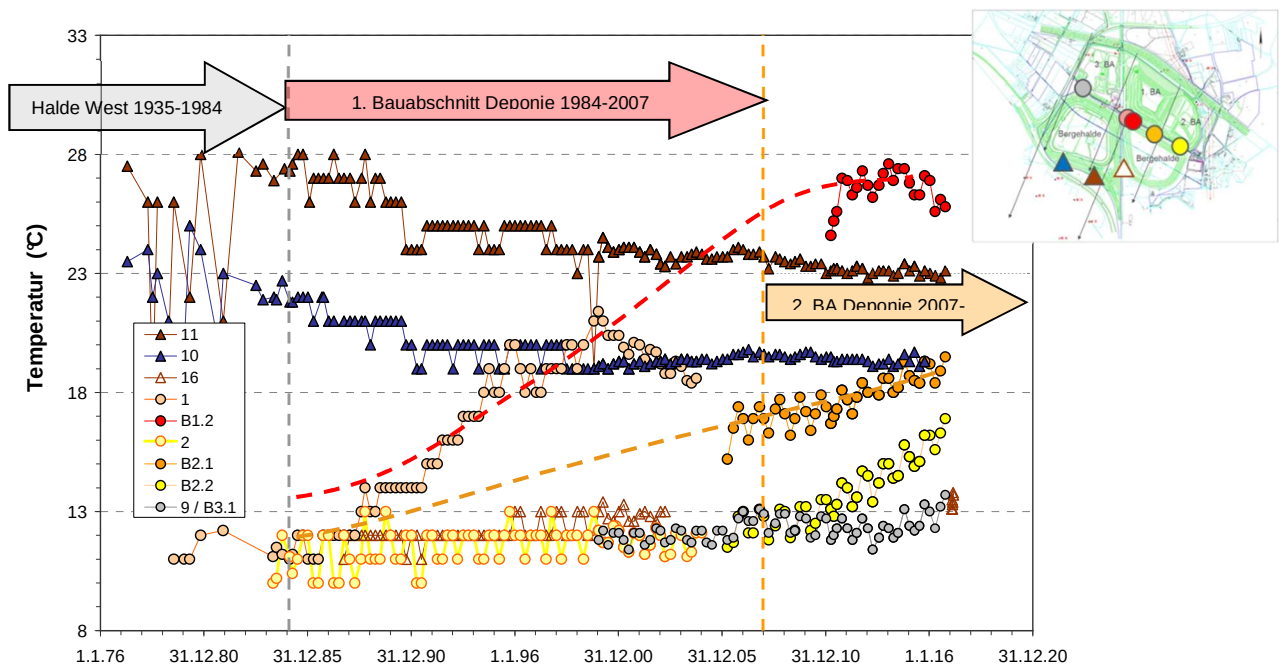


Abb. 5: Temperaturentwicklung in wichtigen Grundwassermessstellen.

Abb. 5 zeigt für wichtige Messstellen im Abstrom der tk SE-Deponie sowie der Bergehalde West die Temperaturentwicklungen im Kontext der verschiedenen Bauphasen. Es ist erkennbar, dass die Temperaturen im Abstrom der Bergehalde bereits in den 1970er Jahren ihr Maximum hatten, aber auch derzeit noch einen weitgehend konstanten Wärmeeintrag widerspiegeln. Dies korreliert mit dem Befund auch derzeit noch vorhandener Wärmenester auf der Nordböschung der Bergehalde West. Die beiden Messstellen 10 und 11 liegen überwiegend im Abstrom des geplanten 3. BA. Diese Messungen belegen somit, dass schon lange vor Errichtung der tk SE-Deponie Erwärmungen des Grundwassers in diesem Bereich stattgefunden haben.

Die zeitliche Dynamik, in der sich der Wärmeeintrag aus dem 1. und 2. BA dem Grundwasser mitteilt, zeigt sich in den Messstellen südlich des 1. BA. Wenige Jahre nach Baubeginn steigen die Temperaturen an und erreichen ihr Maximum ca. 20 Jahre später. Wie auch im Abstrom der Bergehalde Wehofen-West ersichtlich, variieren die Temperaturen lateral vom Wärmezentrum deutlich. Die im 1. BA gefundene Entwicklung wiederholt sich derzeit südlich des 2. BA und ist in dieser Form auch für den 3. BA zu erwarten. Der unbeeinflusste Temperatur-Ausgangszustand im Bereich der Leitstraße kann aufgrund der Verhältnisse im geplanten 3. BA und der Altdaten weiter östlich bei 11-12 °C festgelegt werden.

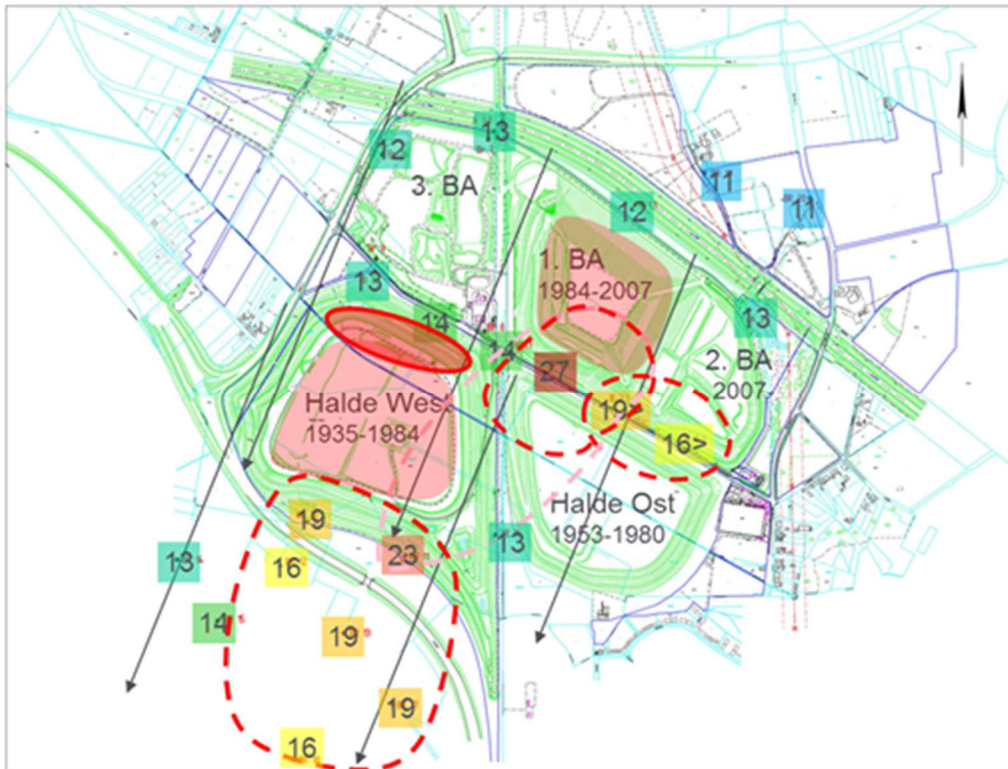


Abb. 6: Verteilung von Grundwassertemperaturen und Wärmequellen.

Nicht ganz eindeutig lässt sich der Einwirkungsbereich der einzelnen Wärmequellen bestimmen, da die Bergehalden den Abstrom von der Leitstraße überlagern und beeinflussen (Abb. 6). Es ist aber davon auszugehen, dass die Temperatureinflüsse der tk SE-Deponie bis in den Bereich des Bergehaldenabstromes hineinreichen. Wir schätzen den Einfluss der Deponie auf die Temperaturen südlich der Bergehalde Wehofen-West mit wenigen °C, höchstens 2 bis 3 °C, ein, also deutlich geringer als den Einfluss der Bergehalde Wehofen-West selber (vgl. Kap. 2.3, Abb. 4).

Aus dem vorher Gesagten lassen sich die beiden Bergehalden, die tk SE-Deponie (1. BA und Hausmüllablagerungen unterhalb des Deponiekörpers) und die Emscher als potenzielle Quellen für Stoffeinträge in den Grundwasserleiter ableiten. Das mögliche Spektrum an Sickerwasserinhaltsstoffen ist dabei höchst unterschiedlich.

4.1.1 Bergehalden

Sickerwasser aus Bergehalden des Steinkohlebergbaus enthält in zeitlich veränderlichen Konzentrationen typischerweise die folgenden Stoffgruppen bzw. Komponenten:

Restsalze aus Grubenwasseranhaftungen	Na, K, Ca, B, Cl
Pyritoxidationsprodukte	SO ₄ , Fe, Mn
Karbonatpuffer Pyritoxidation	Ca, HCO ₃

Um eine Zuordnung der stofflichen Zusammensetzungen des Grundwassers zu thermischen Beeinflussungen bzw. Sickerwässern vorzunehmen, wurden Korrelationsdiagramme einzelner Inhaltsstoffe mit den Temperaturen im Grundwasser erstellt. Aus der Streubreite der im betrachteten Zeitraum analysierten Proben ergeben sich Punktwolken für die verschiedenen Messstellen. Dabei wurden die folgenden Signaturen verwendet: □ emschernah, ○ Leitstraße, △ Abstrom Bergehalden.

Eine sehr eindeutige Verteilung zeigt der Parameter Sulfat (Abb. 7). Der unbelastete Anstrom zeigt sich in der Probenverdichtung zwischen 11 und 13 °C und 100 bis 250 mg/L Sulfat, von der Trends zu höheren Sulfatgehalten bzw. höheren Temperaturen ausgehen. Sämtliche Bergehalden-Abstrommessstellen zeigen Sulfateinträge aus der Halde an, immer verbunden mit einer Temperaturerhöhung. Der Verteilung der Messungen sowie die Einordnung von Sulfat als typischer Sickerwasserkomponente machen plausibel, dass Stoffeintrag und Temperaturerhöhung aus parallelen Prozessen resultieren und die Sulfatgehalte nicht aus einer sekundären temperaturinduzierten Reaktion stammen. Dazu passt, dass die hohen Temperaturen in B 1.2 (Abstrom 1. BA) zu keiner Sulfatmobilisation im Grundwasserleiter geführt haben.

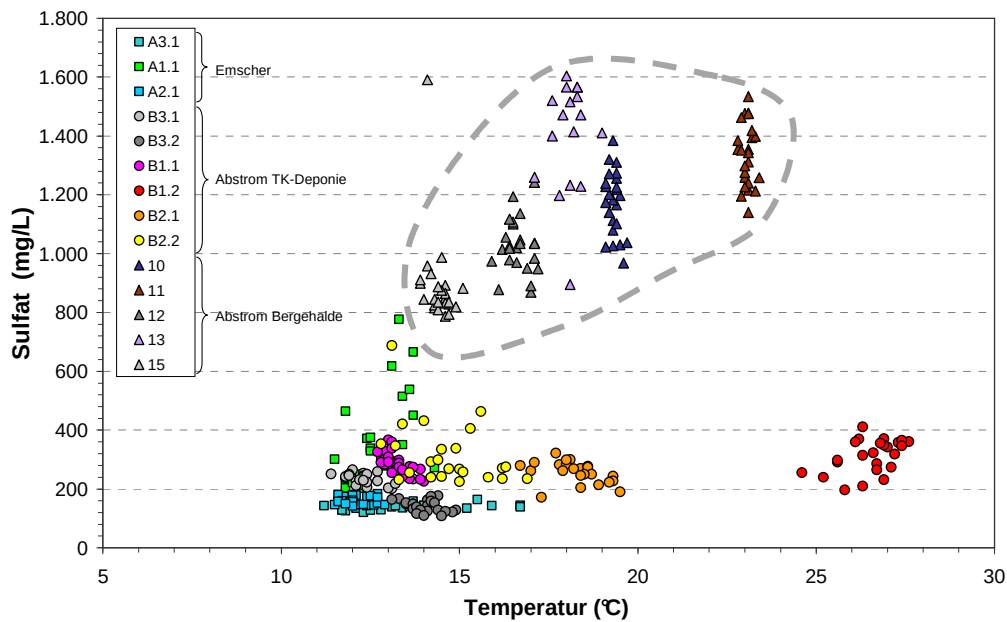


Abb. 7: Korrelation Sulfatgehalt mit Temperatur in den Grundwassermessstellen.

Sulfat wird in Bergehalden über sehr lange Perioden durch Sauerstoffeintrag in die Halden freigesetzt. Leichtlösliche Salze werden hingegen rasch ausgewaschen und dürften ihr Konzentrationsmaximum bereits überschritten haben. Dennoch spiegelt sich der Natriumeintrag mit dem Sickerwasser deutlich wieder.

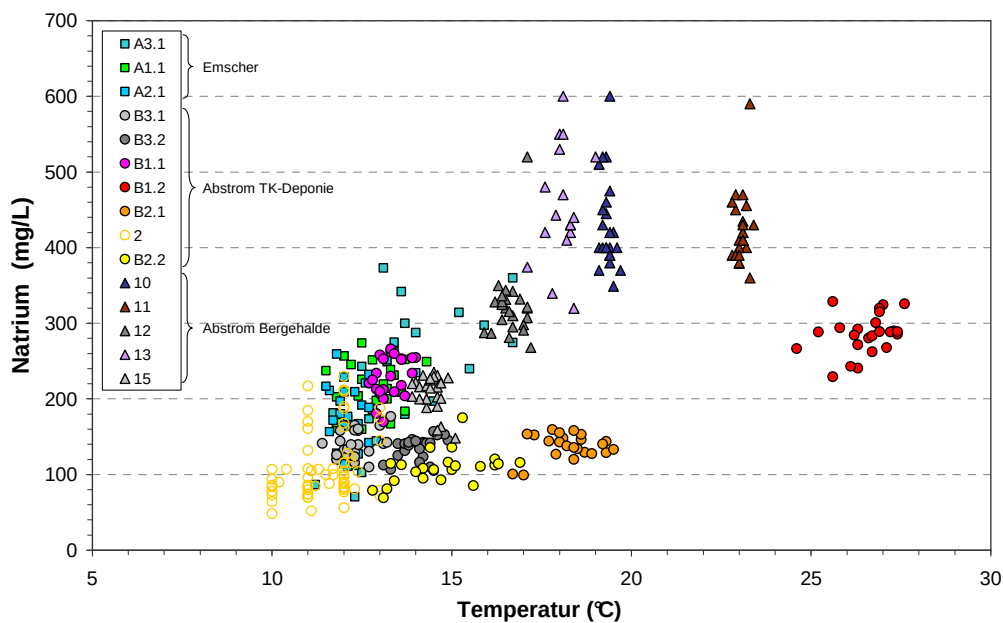


Abb. 8: Korrelation Natriumgehalt mit Temperatur in den Grundwassermessstellen.

Ganz entsprechende Verteilungen lassen sich für die übrigen o.g. Bergehalden-Komponenten in solchen Diagrammen wiederfinden, wobei die Signifikanz mit abnehmender Sickerwasserkonzentration bzw. höherem Gehalt im Grundwasseranstrom abnimmt. Umgekehrt finden sich erhöhte Konzentrationen von Stoffen, die nicht als Bestandteile des Haldensickerwassers angesprochen werden können, nicht. Ganz offensichtlich dominiert hier somit der stoffliche Eintrag mit dem Sickerwasser mögliche sekundäre temperaturinduzierte Effekte.

4.1.2 tk SE-Deponie

Komplexer stellen sich die potenziellen Stoffquellen im Bereich der tk SE-Deponie dar, da hier zum einen neben den eigentlichen Schüttkörpern auch verfüllte Aussandungen existieren (Abb. 9, vgl. Kap. 2.1). Eine Besonderheit stellen die Hausmüllablagerungen im 1. BA dar. Die Darstellung zeigt, dass es so sowohl innerhalb des basisabgedichteten 2. BA als auch des noch nicht begonnenen 3. BA zu Stoffausträgen mit dem bzw. in das Grundwasser kommen kann.

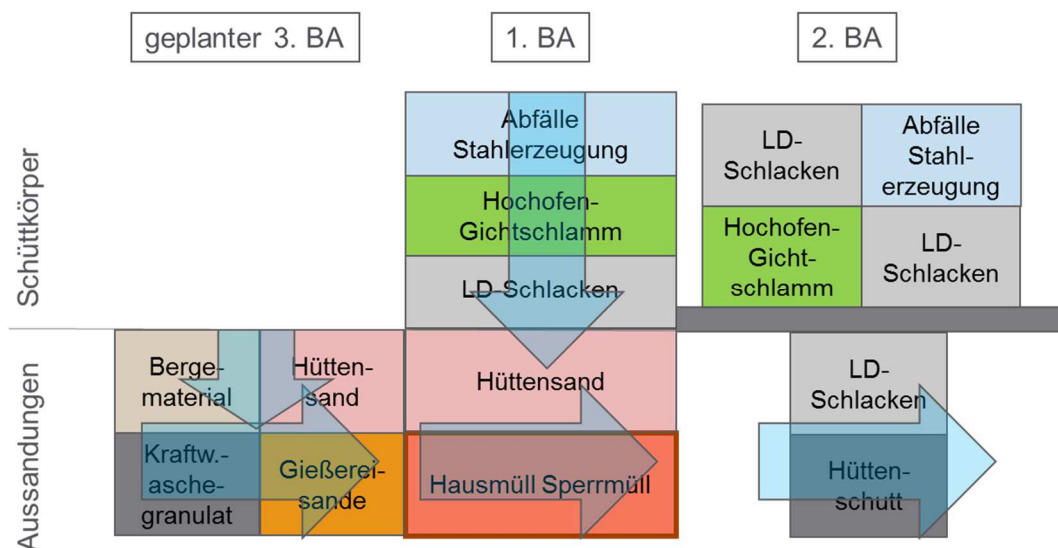


Abb. 9: Verteilung von Stoffen in den Bauabschnitten nördlich der Leitstraße. Die Pfeile zeigen mögliche Stoffausträge an.

Die in Abb. 9 aufgeführten Materialien enthalten eine Vielzahl von mobilen Komponenten, die so in das Grundwasser gelangen können:

LD-Schlacke	K, B, HCO ₃ , Na, K, OH, Ca
Gichtschlamm	K, B, CN, TOC, PAK, Pb, Zn
Abfälle aus der Stahlerzeugung	Ca, Na, K, OH, Cl, SO ₄ , HCO ₃ , NH ₄ , TOC

Hüttensand

SO₄, Cr, V

Hausmüll

NH₄, Cl, TOC, HCO₃, AOX, K, B

Kraftwerksasche

Cl, SO₄

Dass dieser Eintrag auch so stattfindet, ist an typischen Inhaltsstoffen dieses Materialspektrums erkennbar, die nicht aus dem Grundwasserleiter mobilisierbar sind. Dazu zählt in jedem Fall das für Hochofen-Gichtschlamm typische Cyanid (Abb. 10). Für diese wie auch für andere Komponenten (Ammonium, Hydrogencarbonat, TOC) hebt sich die Messstelle B 1.2 im Abstrom 1. BA besonders hervor.

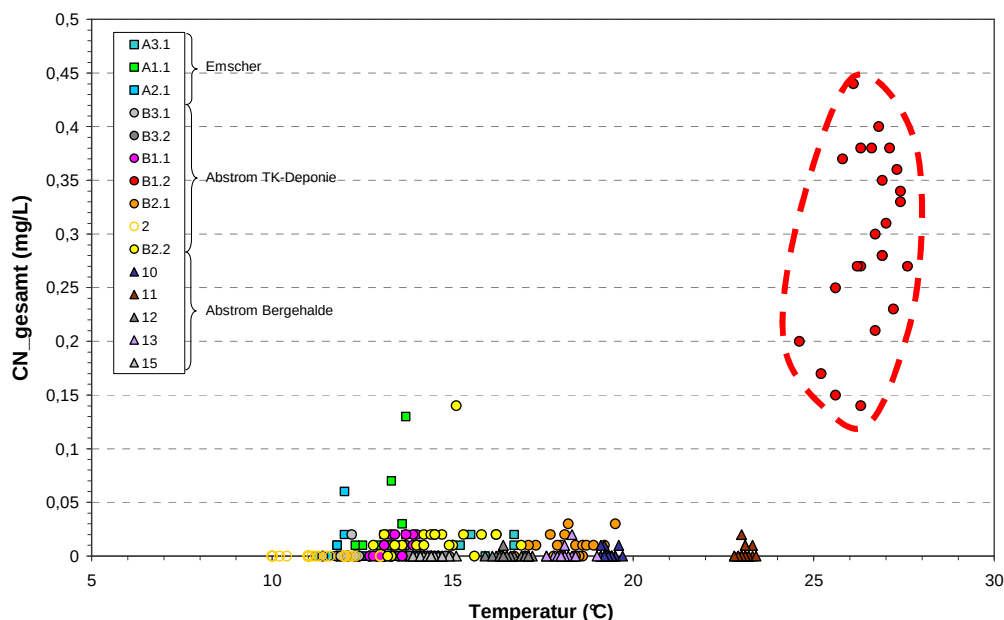


Abb. 10: Korrelation Cyanidgehalt mit Temperatur in den Grundwassermessstellen.

Differenzierter stellt sich die Verteilung für Bor (Abb. 11) und Kalium (Abb. 12) dar. An solchen Stoffen, die aus verschiedenen Quellen und Bereichen stammen können, überlagern sich die Probenverteilungen. Bor kann ähnlich wie Kalium als Grubenwasserbestandteil aus Bergematerialien ausgewaschen werden und ist auch Bestandteil von Stahlwerksreststoffen und insbesondere ein Spurenelement aus Hausmüll.

Auch hier wird deutlich, dass erhöhte Temperaturen mit erhöhten Konzentrationen von Stoffen einhergehen, die nicht im Grundwasserleiter mobilisiert oder gebildet wurden, sondern mit Sicker- oder Grundwasser aus Materialien in den oder unter den Bauabschnitten der Deponie herausgelöst wurden.

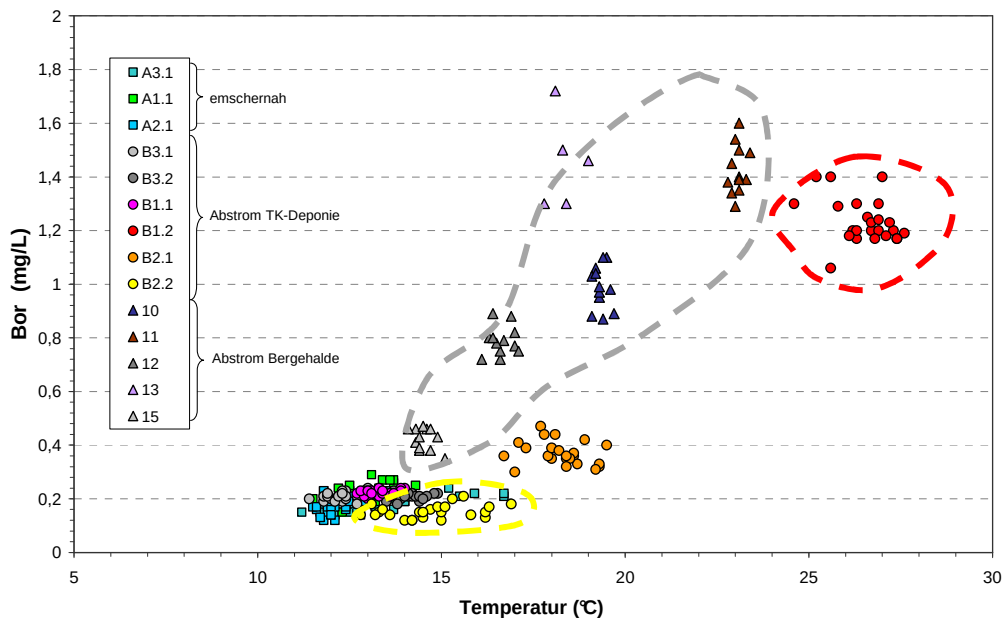


Abb. 11: Korrelation Borgehalt mit Temperatur in den Grundwassermessstellen.

Die Daten zeigen auch, dass die Stoffverteilungen im Abstrom des 2. BA nicht den ansteigenden Temperaturen in der Messstelle B 2.2 (Abb. 5) folgen. Die Gehalte von Bor sind in allen Messungen auf Hintergrundniveau (Abb. 11), die von Kalium erhöht (Abb. 12). Die Mobilisation ist somit quellenabhängig und quellen-spezifisch und nicht temperaturgesteuert. Dies lässt sich auch durch die zeitliche Entwicklung der Konzentrationen belegen.

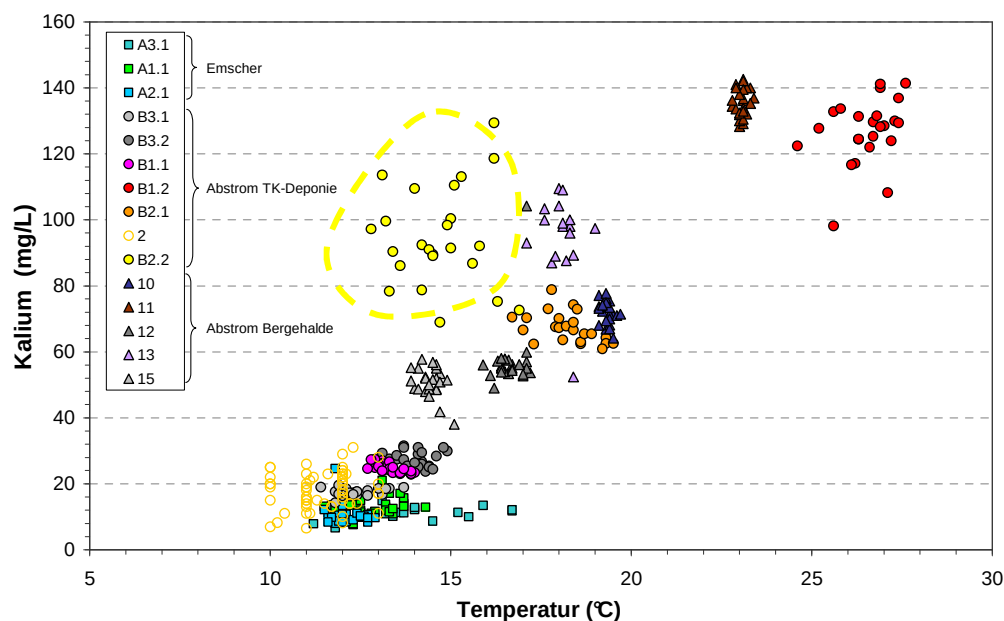


Abb. 12: Korrelation Kaliumgehalt mit Temperatur in den Grundwassermessstellen.

Auch hier lassen sich somit aufgrund der intensiven Stoffeinträge keine Anhaltspunkte für temperaturbedingte Veränderungen der Grundwasserzusammensetzung ableiten. Der Einfluss des 1. BA zeigt sich im Grundwasser an Komponenten aus der Deponiebasis und der Deponie. Auch die Fläche des basisabgedichteten 2. BA beeinflusst die Grundwasserzusammensetzung durch Auswaschungen aus den Verfüllungen der ehemaligen Aussandungen unterhalb der Basisabdichtung mit dem Grundwasser.

4.1.3 Emscher

Abgesehen von den Schüttkörpern ist auch ein Einfluss der Emscher auf Temperatur und Zusammensetzung des Grundwassers (vor allem Chlorid) zu belegen (Abb. 13). Der in Kapitel 2.2 beschriebenen Vorflutsituation entsprechend ist dies insbesondere an der Messstelle A 3.1 im Anstrom des 3. BA auffällig. Jahreszeitlich schwanken hier der Temperaturen mit hohen Werten im Spätsommer, das heißt bei niedrigen Grundwasserständen (Infiltration von Emscherwasser in den Grundwasserleiter) und hohen Gewässertemperaturen (ca. 22 °C). Dieser Effekt nimmt nach Osten hin ab (vgl. Kap. 2.2).

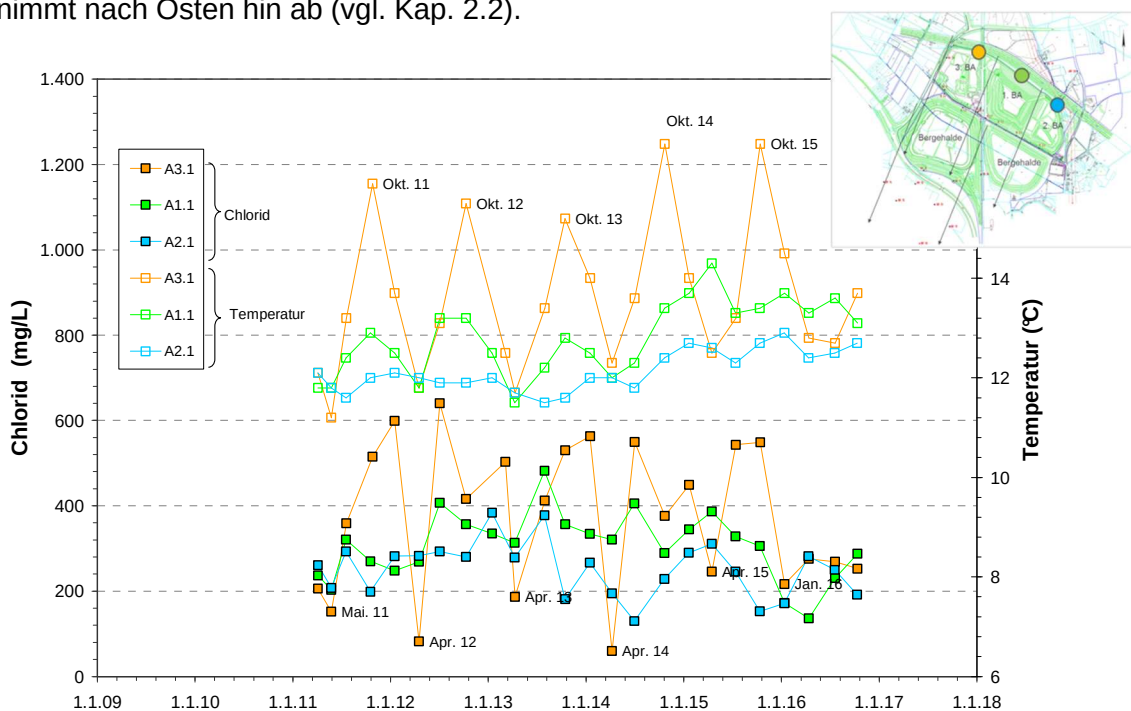


Abb. 13: Entwicklung von Temperatur und Chloridgehalt in den emschernahen Grundwassermessstellen.

Einen ähnlichen Effekt findet man bei Chlorid, das hier als Tracer für den Stoffeintrag stehen soll, da die Chloridkonzentrationen in der Emscher fast immer um den Faktor 10 oberhalb derjenigen des Grundwasseranstroms liegen. Hier zeigt sich bei den meisten Beprobungen (bis auf die Grundwasserhochstände im Frühjahr) eine Emscherinfiltration. Deutlich erkennbar ist auch hier deren Intensitätsabstufung von A 3.1 bis A 2.1 im Osten. Diese Stoffanreicherung im Emscherwasser gegenüber dem Grundwasser beschränkt sich nicht auf Chlorid, sondern betrifft fast alle Hauptkomponenten und auch organische Verbindungen (TOC, Abb. 14).

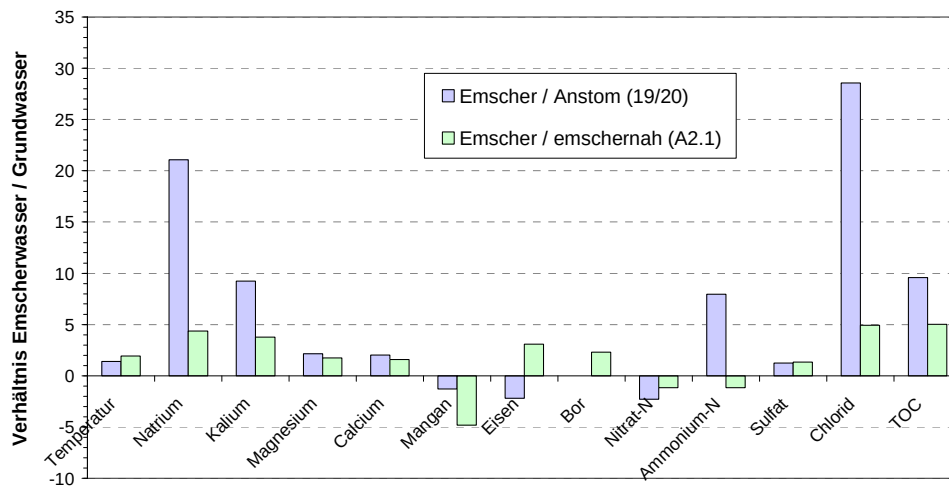


Abb. 14: Konzentrationsverhältnisse (Medianwerte) von Emscherwasser zu dem Grundwasseranstrom (Messstellen 19 u. 20) bzw. der östlichen Messstelle A 2.1.

Die Emscher infiltriert somit bei niedrigen Grundwasserständen in das Grundwasser und verändert so vor allem im Bereich des 3. BA die Grundwasserzusammensetzung schon im Anstrom dieser Fläche. Durch den künftigen Emscherumbau werden sich zwar nicht die infiltrierenden Mengen aber sehr wohl deren Stoffgehalte verändern. So ist geplant, zwar die Grubenwassereinleitungen sukzessive zu reduzieren, gleichzeitig entfallen aber Oberflächenwasseranteile, was zu einer verringerten Verdünnung der Abwässer führen wird. Es ist auch davon auszugehen, dass das hier abfließende gereinigte Emscherwasser auch noch einen ausgeprägten Bakterienbestand enthält.

4.2 Temperaturabhängigkeit chemischer Gleichgewichte

Die Auswertungen haben gezeigt, dass am Standort die Wärmeeinträge in den Grundwasserleiter immer von ausgeprägten Sickerwassereinträgen begleitet werden, die mögliche Temperatureinflüsse auf die chemische Zusammensetzung überlagern bzw. verdecken. Eine Überprüfung der möglichen Auswirkungen im 3. BA durch das Monitoring im bislang bereits temperaturveränderten Grundwasserleiter ist so nicht möglich.

Daher wurden die thermodynamischen Gleichgewichtsbedingungen im Grundwasser untersucht und wie sich diese bei einer Temperaturerhöhung um ca. 8 °C verändern. Dazu eignen sich thermodynamische Berechnungsprogramme, von denen PHREEQC (U.S. Geological Survey) sicher die weiteste Verbreitung hat und auch eine anerkannte Datengrundlage beinhaltet. Mit solchen Programmen lässt sich berechnen, wie sich die Sättigungsbedingungen eines Grundwassers in Bezug auf die im Gleichgewicht stehenden Mineralphasen darstellen.

Für diese Betrachtungen wurde die Wasserzusammensetzung aus der Messstelle A 1.1 ausgewählt (Abb. 15), die einen nur moderaten Emschereinfluss zeigt und den mittleren Anstrom auf die tk SE-Flächen repräsentiert. Die Berechnungen wurden durchgeführt für die Originalanstromtemperatur von 12,85 °C und für 20 °C. Annahmen mussten dabei für die Redoxbedingungen getroffen werden, für die Anhaltspunkte aus den geringen Sauerstoffgehalten und Eisenkonzentrationen in den Wässern vorlagen (schwach oxidierend).

```
TITLE Prüfung auf Reaktionen
#
# Database PHREEQC.dat
#
SOLUTION 1 A1.1
    units      mg/kgw
    pH         6.3
    pe         4.00
    temp       12.85
    Na          217
    K           12.55
    Ca          124
    Mg          42.7
    Fe           0.05
    Mn           0.03
    Si           7.38
    Al           0.035
    Cl          317      charge
    S(6)         320      # Sulfat
    Alkalinity   140      as HCO3
    N(+5)         8.13    # Nitrat-N
    F            0.49

PRINT
    -species false
END
```

Abb. 15: Dateneingabe für thermodynamische Gleichgewichtsberechnung mit PHREEQC.

Als Ergebnis der Berechnungen erhält man Sättigungsindizes für die Mineralphasen, die sich aus den als gelöst angegebenen Bestandteilen des Grundwassers (s. Abb. 15) bilden lassen und die in der jeweiligen Datenbank enthalten sind. Ein positiver Sättigungsindex sagt dabei aus, dass dieses Mineral eigentlich ausfallen müsste; ein negativer Sättigungsindex bedeutet, dass dieses Mineral gelöst werden könnte. Dass diese Lösung nicht tatsächlich erfolgt, kann an der mangelnden Verfügbarkeit dieser Phase liegen oder daran, dass diese Auflösung unter den gegebenen Bedingungen kinetisch gehemmt ist und deshalb nur sehr langsam erfolgt. Solche Ungleichgewichtsbedingungen z.B. bezüglich Silikaten sind typisch für Grundwässer.

Die ersten Berechnungen legten nahe, dass der für Aluminium gemessene Wert zu hoch ist (z.B. mitanalytierte Feinpartikel) und thermodynamisch keinen Sinn ergibt, weshalb der Eingabewert verringert wurde (0,001 mg/L). Diese Überlegung ist durchaus von Bedeutung, da viele Silikatminerale Aluminium enthalten.

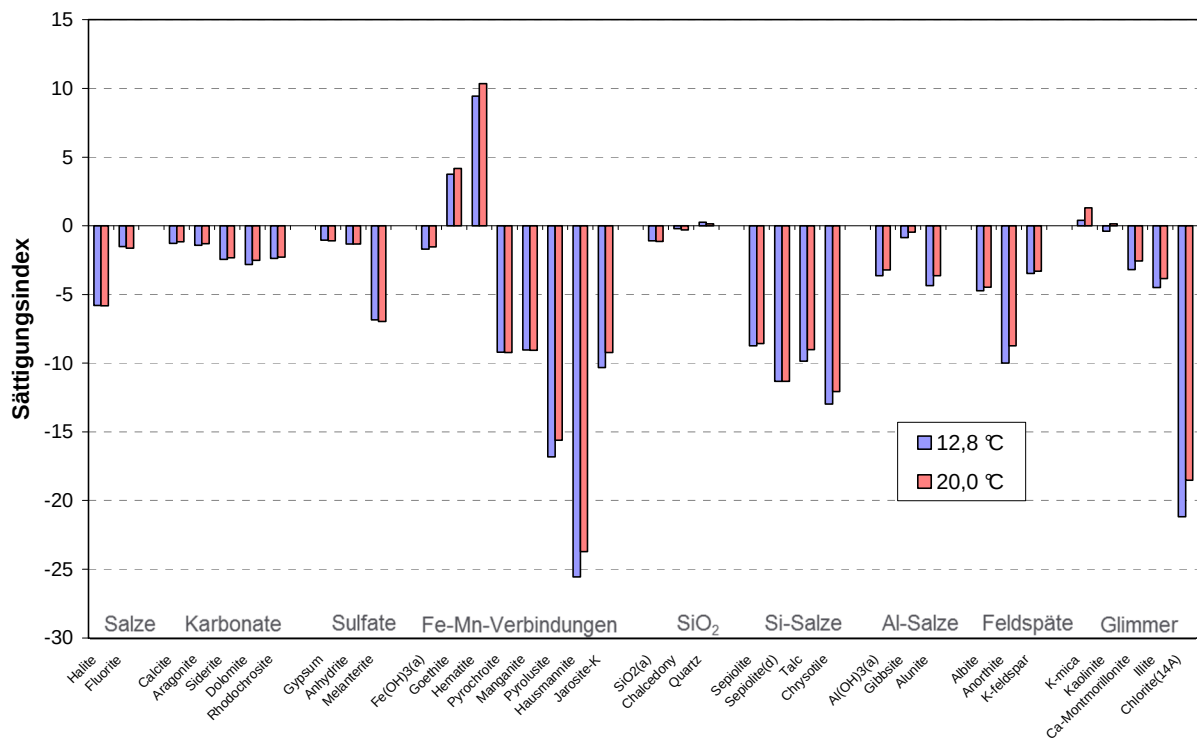


Abb. 16: Sättigungsverhältnisse in Wasser aus A 1.1 bei 12,8 und 20 °C.

Die Berechnungen zeigten, dass das Grundwasser in der Tat an den meisten Mineralphasen untersättigt ist. In Abb. 16 sind die Minerale gruppiert. Links befinden sich vereinfacht gesprochen die Salze, rechts die Silikate. Die Auswirkungen einer Temperaturerhöhung auf 20 °C auf diese Wasser-Feststoff-Gleichgewichte sind nur gering. In den meisten Fällen vermindern sich die Untersättigungen etwas, d.h. die negativen Sättigungsindizes (SI) steigen etwas an. Das bedeutet, dass sich die Tendenz, dass sich diese Minerale auflösen, vermindert und somit der aktuelle Zustand stabilisiert wird. Dies trifft für fast alle Silikate, Eisen-Mangan-Verbindungen und Karbonate zu. Die Übersättigungen von Goethit und Hämatit sind theoretischer Art und nur der Vollständigkeit halber aufgeführt, da diese Eisenphasen nicht direkt aus einem Wasser ausfallen (zunächst wird $\text{Fe}(\text{OH})_3$ gebildet) und daher hier nicht zu betrachten sind.

Anders verhalten sich leicht lösliche Salze (Chlorid-, Fluorid- und Sulfat-Salze). Hier nimmt die Löslichkeit mit der Temperatur etwas zu. Dies hat aber keine Auswirkungen, da die Untersättigung hier bei dieser kinetisch nicht gehemmten Lösung anzeigt, dass kein Reservoir an ungelösten Salzen mehr vorhanden ist. Die Temperaturerhöhung führt somit auch hier zu keiner veränderten Grundwasser-

zusammensetzung. Dies gilt auch für die SiO_2 -Phasen (wesentlich hier Quarz), wo zwar ein Reservoir vorhanden ist, aber die theoretische Löslichkeitserhöhung wieder auf eine stark gehemmte Kinetik trifft.

Rein chemisch sind somit durch eine solche Temperaturerhöhung keine relevanten oder messbaren Veränderungen in der Grundwasserzusammensetzung zu erwarten. Zu beachten sind aber Auswirkungen auf bakterielle Aktivitäten, die eine Verschiebung der Milieubedingungen bewirken bzw. die beschriebene kinetische Hemmung von Lösungsprozessen aufheben können.

4.3 Temperaturabhängigkeit mikrobieller Aktivität

Die mikrobiologische Beschaffenheit eines Grundwassers bzw. Grundwasserleiters hat verschiedene Aspekte. Zum einen spricht dies die im Porenraum des Grundwasserleiters vorhandene Wirbellosenfauna an, die durch Filtration zur - auch bakteriologischen - Beschaffenheit des Grundwassers beiträgt. Dieser bereits derzeit im Betrachtungsraum stark überprägte Zustand wird sich bei Umsetzung des 3. BA nicht wesentlich verändern, vor allem da sich die starke Wärmequelle Bergehalde Wehofen-West im direkten Abstrom befindet. Es ist davon auszugehen, dass mit der langjährigen Vorgeschichte bereits Anpassungen und Neubesiedlungen stattgefunden haben. Untersuchungen liegen hierzu allerdings nicht vor.

Die Bakterien-Population im Grundwasser(leiter) hat zweierlei Bedeutung. Sie wirkt auf die chemischen Prozesse ein und kann so die Beschaffenheit des Grundwassers verändern und die Bakterien selbst können auch eine schädliche Wirkung auf den Menschen haben, insbesondere durch Krankheitserreger. Die mikrobielle Aktivität wird durch die Temperatur grundsätzlich beeinflusst. Dies wird auch in dem UBA-Text 54/2015 (Auswirkungen thermischer Veränderungen infolge der Nutzung oberflächennaher Geothermie auf die Beschaffenheit des Grundwassers und seiner Lebensgemeinschaften – Empfehlungen für eine umweltverträgliche Nutzung) so dargestellt. Eine Erwärmung bzw. Abkühlung des Grundwassers um wenige Grad Celsius wirkt sich demnach nur unwesentlich auf die Wasserbeschaffenheit und Ökosystemfunktionen aus, sofern das Grundwasser ‚sauber‘ bzw. das Ökosystem ‚energiearm‘ ist. Im umgekehrten Fall einer vorliegenden Hintergrundbelastung (erhöhte Konzentrationen an organischen Ver-

bindungen, Nährstoffen bzw. Schwermetallen) kann bereits eine geringe Temperaturerhöhung ($\geq 5K$) die Wasserqualität negativ beeinflussen.

Veränderte Temperaturen können sich sowohl auf die Diversität der Bakterienpopulation als auch auf deren Aktivität auswirken. Der Aktivitätsbegriff ist hier als Variation des Wachstums, d.h. der Teilungsrate und damit des Gesamtstoffwechsels der Population zu verstehen. Im Allgemeinen besitzen Bakterien ein Aktivitätsmaximum in einem gewissen Temperaturbereich. Zu höheren und niedrigeren Temperaturen nimmt die Aktivität ab (Abb. 17).

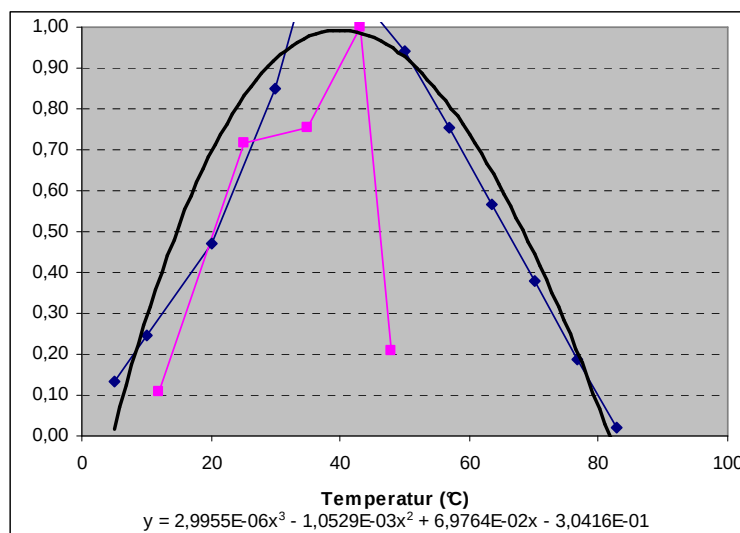


Abb. 17: Temperaturabhängige Aktivitätsverteilung am Beispiel sulfatreduzierender Bakterien (Literaturdaten und zusammenfassende Kurve).

Bakterien benötigen organische Substanz (Corg) zum Aufbau ihrer Zellen. Durch bakterielle Aktivität werden organische Bestandteile im Grundwasser umgesetzt und zudem Stoffreaktionen zur Energiegewinnung genutzt. Dadurch können die Milieubedingungen (pH-Wert, Redoxpotenzial) im Grundwasser verändert und indirekt (Milieu) oder direkt (katalytisch) Mineralphasen gelöst oder ausgefällt werden.

Zu der Bakterienpopulation im Grundwasser am Standort liegen keine direkten Untersuchungen vor. Gleichwohl ist eine hydrogeochemische Charakterisierung der mikrobiellen Milieubedingungen bzw. Aktivität über analytisch bestimmbare und auch im Monitoring erfasste Parameter möglich: O₂, SO₄, NO₃, Fe, Mn, und HCO₃. Die Parameter Redoxpotential und CH₄ wurden durch dieses Monitoring nicht erfasst.

Aus den vorliegenden Daten lassen sich Rückschlüsse zu den folgenden typischen bakteriellen Prozessen durchführen:

Parameter	Prozess
TOC / DOC / BTEX	→ Abbau durch Organismen, Corg-Quelle
Sauerstoffgehalt	→ Sauerstoffverbrauch $O_2 + C \rightarrow CO_2$
Nitrat	→ Abbau $NO_3^- + C \rightarrow CO_2 + N_2$
Eisen	→ Reduktionsprozesse $Fe(OH)_3 + C \rightarrow CO_2 + Fe^{2+}$
Sulfat-Sulfid	→ Sulfatreduktion (anaerob) $SO_4^{2-} + C \rightarrow CO_2 + S^{2-}$
Ammonium	→ Abbau $NH_4^+ + O_2 \rightarrow NO_3^-$ / $NH_4^+ + NO_2^- \rightarrow N_2$

Die angegebenen Reaktionen sollen die beteiligten Komponenten und Stoffumsätze charakterisieren und stellen keine stöchiometrisch korrekten Reaktionsgleichungen dar. Zudem erlaubt diese Form eine allgemeine Beschreibung der auf Basis verschiedener kohlenstoffhaltiger Verbindungen ablaufenden Prozesse. Die Standortdaten wurden bezüglich Anzeichen für diese Reaktionen überprüft.

Organischer Kohlenstoff (Corg) dürfte im gesamten Grundwasserleiter in ausreichendem Maße zur Verfügung stehen (Abb. 18). Auch die geringen TOC-Gehalte im Anstrom (2-4 mg/L) reichen (grundsätzlich und vorbehaltlich der Abbaubarkeit der zugrundeliegenden Verbindungen) aus, um Bakterienpopulationen zu etablieren. Im Abstrom an der Leitstraße bzw. auch der Bergehalden steigen die TOC-Gehalte auf 10-30 mg/L an. Allenfalls dieser wohl durch den Müllkörper unter dem 1. BA gespeiste Abstrom in B 1.2 kann als nährstoffreich (im Sinne des UBA, s.o.) eingestuft werden. Im 3. BA treten bis zu 10 mg/L auf. Hier liefert offensichtlich auch das Emscherwasser (10 mg/L) einen TOC-Beitrag (Abb. 18). Es ist jedoch kaum möglich, anhand dieses Parameters (potenziell Minderung der TOC-Gehalte) eine Überprüfung auf vorhandene bakterielle Aktivität vorzunehmen, da auch für hohe Bakterienanzahlen aufgrund der sehr geringen in einem Bakterium enthaltenen Masse nur sehr geringe Mengen an organischem Kohlenstoff als Nährmittel erforderlich sind.

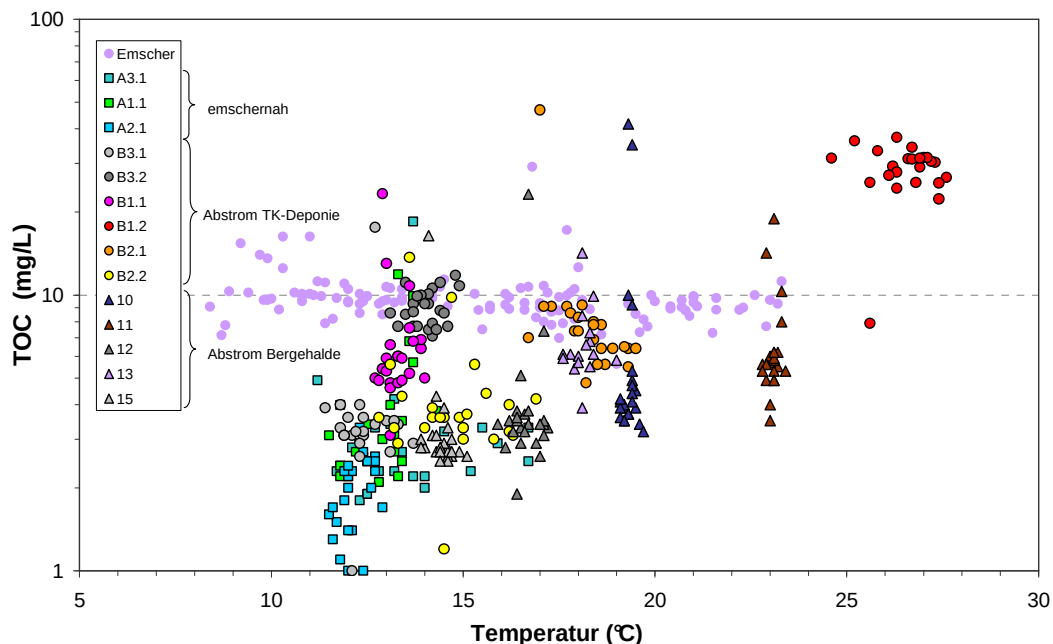


Abb. 18: Korrelation TOC-Gehalt mit Temperatur in den Grundwassermessstellen.

Die Sauerstoffgehalte sind z.T. auch im Anstrom eher gering, was typisch für einen solchen Grundwasserleiter ist. Sauerstoffzehrende Reaktionen sind somit mangels Verfügbarkeit von Sauerstoff unabhängig von der Temperatur am Standort eher gering und nur lokal vertreten.

Ganz offensichtlich findet aber ein Nitratabbau am Standort statt (Abb. 20). Höheren Nitratgehalten im Bereich der Emscher stehen deutlich verminderte Konzentrationen im Bereich der Leitstraße gegenüber. Auch bei Unterströmung der Fläche des geplanten 3. BA vermindern sich die Nitratkonzentrationen deutlich.

Ammonium, das vor allem in den Messstellen B 1.2 und B 3.2 auffällt (Abb. 19), stammt - wie die Stickstoffgehalte Nitrat/Ammonium anzeigen - ganz offensichtlich nicht aus dem Nitratabbau sondern aus Stoffquellen nördlich der Leitstraße. Ammonium ist ein typisches Produkt nährstoffreicher (Kohlenstoff, Stickstoffverbindungen) Milieus. Es ist daher plausibel und typisch für Hausmüllkörper, dass dieser Bereich auch intensive mikrobielle Aktivität in Form bakterieller Stickstoffreduktion aufweist. Es ist daher davon auszugehen, dass Ammonium bakteriell in den Hausmüllablagerungen gebildet wird. Ammonium wird dann aber, auch aufgrund fehlender Sauerstoffverfügbarkeit, nicht in relevantem Maße oxidativ abgebaut sondern verbleibt stabil im Grundwasser.

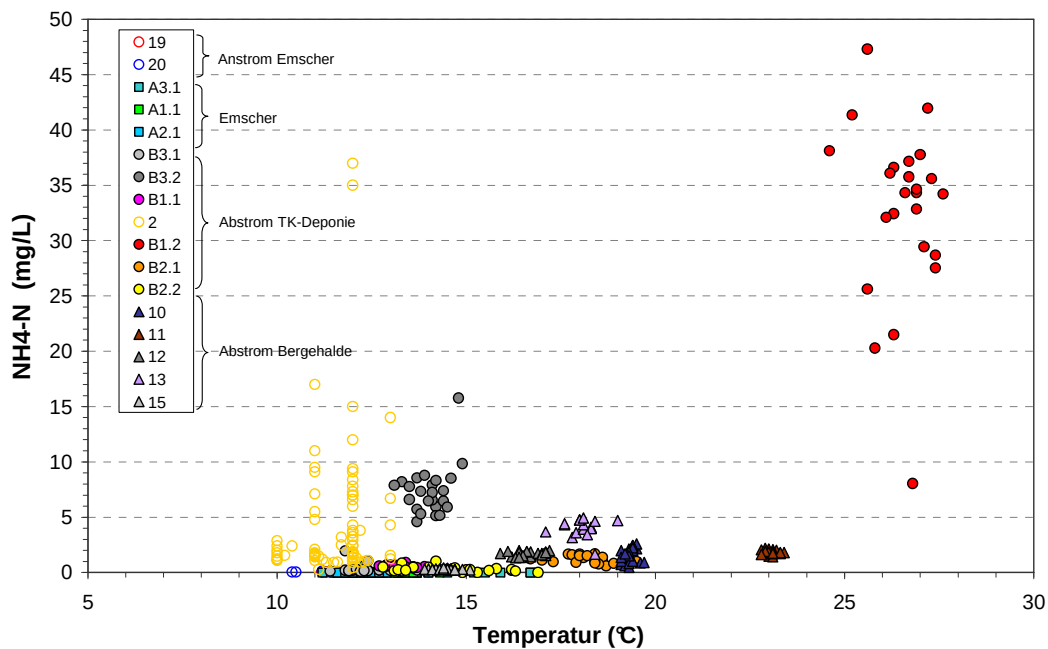


Abb. 19: Korrelation Ammonium-Gehalt mit Temperatur in den Grundwassermessstellen.

Bakterielle Sulfatreduktion findet lokal im Bereich des 2. BA (B 2.2) und wohl auch im Abstrom der Bergehalde West (Messstelle 10) statt. Solche allerdings geringen Sulfidgehalte (0,1 bis 0,2 mg/L) werden vor allem in B 2.2 regelmäßig bestätigt. Solche Stoffumsätze sind allerdings gering und schöpfen das TOC- und Sulfatpotenzial nicht aus. Anscheinend existieren (im hier erwärmten, vgl. Abb. 17) Grundwasser andere limitierende Faktoren, die intensivere Bakterienaktivität verhindern.

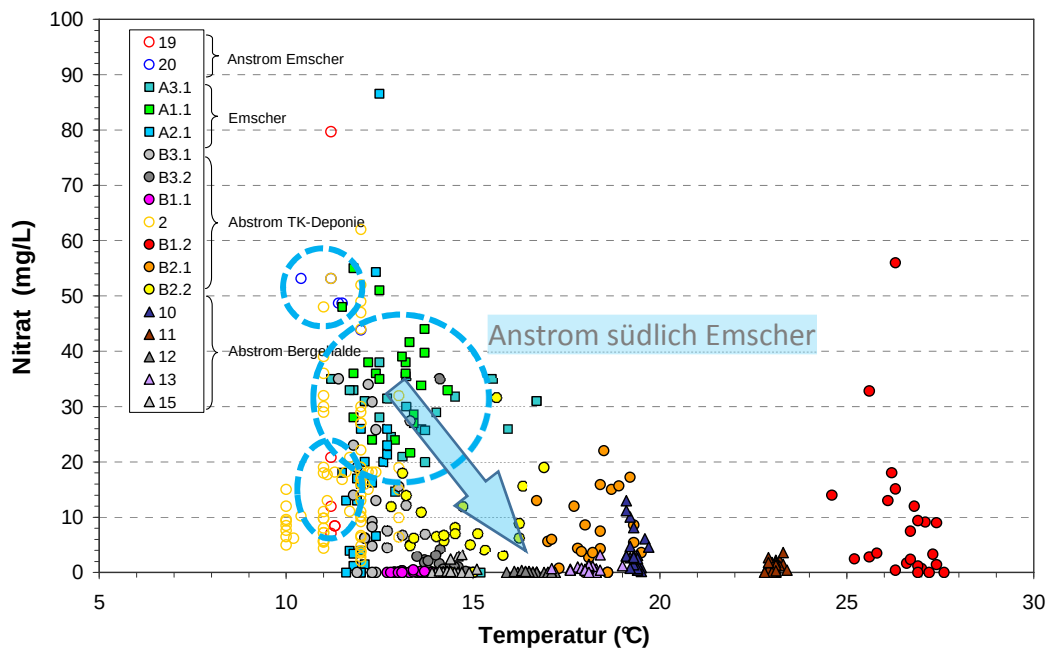


Abb. 20: Korrelation Nitratgehalt mit Temperatur in den Grundwassermessstellen.

Mit dem Eintrag von organischem Kohlenstoff im Bereich der Deponie (1. und 2. BA) und durch die Emscher wird das bereits im Anstrom vorhandene Nährstoffangebot im Grundwasserleiter erhöht. Damit ist die Grundvoraussetzung für mikrobielle Prozesse im Grundwasserleiter gegeben, allerdings würden wir den Zustand im größten Teil des Standortgrundwassers nicht als ausgesprochen nährstoffreich charakterisieren.

Bakterielle Prozesse finden denn auch im Untersuchungsgebiet statt. Am deutlichsten zeigt sich dies im Nitratabbau. Dieser erfolgt allerdings auch derzeit bei Normaltemperaturen im geplanten 3. BA. In Bereichen schon jetzt erhöhter Temperaturen werden diese Prozesse nicht erkennbar verstärkt. Daher ist davon auszugehen, dass auch bei Angleichung der Temperaturen unter der Teilfläche des 3. BA an diesen Umgebungszustand die aktuelle Situation nicht relevant verändert wird.

Grundsätzlich ist nicht auszuschließen, dass sich auch pathogene Bakterien in dem Grundwasser befinden und unter geeigneten Bedingungen vermehren. Auch wenn das Grundwasser im Abstrom des Deponiegeländes bis zur Fassung in der Grundwasserhaltung Duisburg-Aldenrade und Einleitung in den Rhein keine ent-

sprechende Nutzung erfährt, kann das für die Trinkwassernutzung zu beachtende Bakterienspektrum als Indikation für pathogene Bakterien dienen:

Clostridium perfringens (einschließlich Sporen), Coliforme Bakterien (speziell *Escherichia coli*), Enterokokken (*Enterococcus faecalis* als Leitkeim), *Pseudomonas aeruginosa* (steht nur im Zusammenhang mit „Flaschenabfüllung“ in der TrinkwV, wird aber häufig als zusätzlicher potentieller Krankheitserreger mit untersucht).

Untersuchungen des Grundwassers am Standort liegen nicht vor. Der Grundwasseranstrom nördlich der Emscher dürfte die genannten Indikatorkeime nicht enthalten, jedoch ist ein Eintrag solcher Bakterien mit dem Emscherwasser auch nach der Kläranlage nicht auszuschließen. Ein Eintrag pathogener Bakterien mit dem Sickerwasser ist für 1. BA (Hausmüll) unwahrscheinlich und kann durch die Basisabdichtung im 3. BA und die dort in den Aussandungen befindlichen Materialien ausgeschlossen werden.

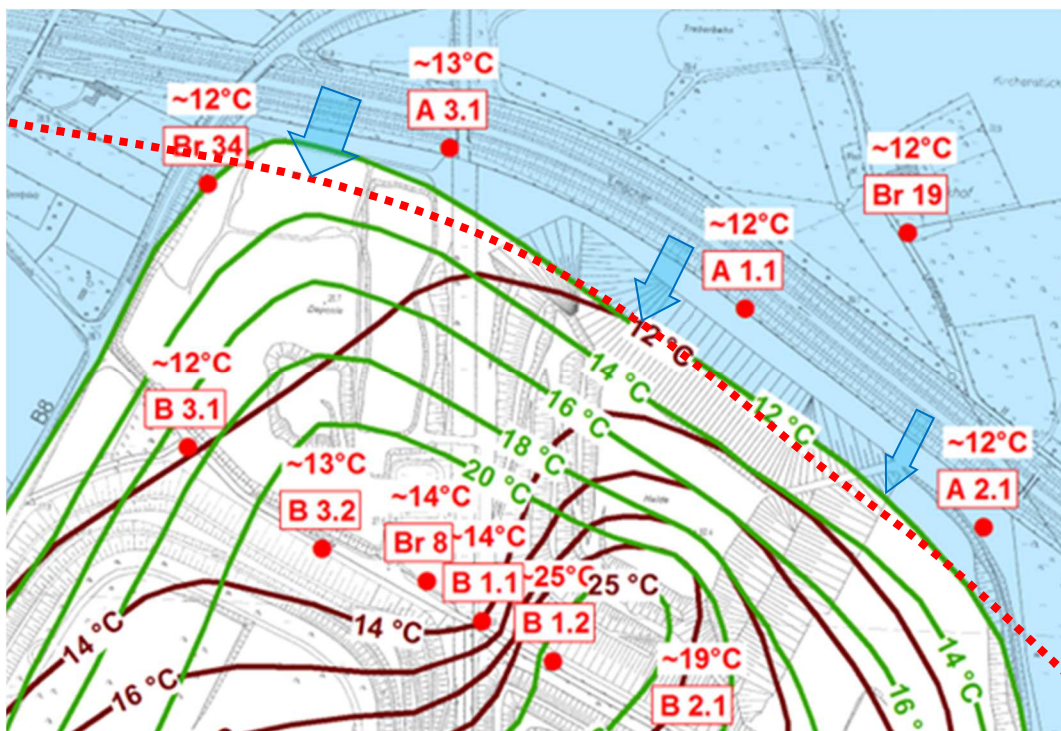


Abb. 21: 50-Tage Linie im Grundwasserabstrom von der Emscher.

Generell wird angenommen, dass unter ungestörten Verhältnissen eine Fließzeit von 50 Tagen ausreicht, um durch Filterwirkung des Grundwasserleiters eine Entkeimung des Wassers zu bewirken. Im Bereich der Fläche zwischen Emscher

und Leitstraße beträgt die Abstandsgeschwindigkeit (mittlere reale Fließgeschwindigkeit des Grundwassers) ca. 2,2 m/Tag. Das bedeutet für die o.g. 50 Tage eine Distanz von ca. 110 m. Diese 50-Tagelinie von der Emscher ist in ihrer ungefähren Lage in Abb. 21 eingezeichnet. Es ist erkennbar, dass zu diesem Zeitpunkt das Grundwasser die Zone der durch die Bauabschnitte erhöhten Temperaturen noch gar nicht erreicht hat, für den Grundwasserleiter also die normale Filterwirkung angesetzt werden kann. Demnach sollte das Grundwasser bei Erreichen der wärmebeeinflussten Zone bereits frei von den beispielhaft genannten pathogenen Keimen sein.

Für den Fall, dass dennoch solche Bakterien bis in den erwärmten Grundwasserleiter gelangen, ist von einer moderaten Verbesserung der Lebensbedingungen und einer erhöhten Wachstumsrate auszugehen. Allgemein wird im hier zu betrachtenden Temperaturbereich für solche Bakterien eine Verdoppelung der Wachstumsrate bei einer Temperaturerhöhung von 10 °C angesetzt. Diese Bedingungen bestätigen beispielhaft die Untersuchungen von Camper et. al. (1991) für einige Coliforme Bakterien (Abb. 22).

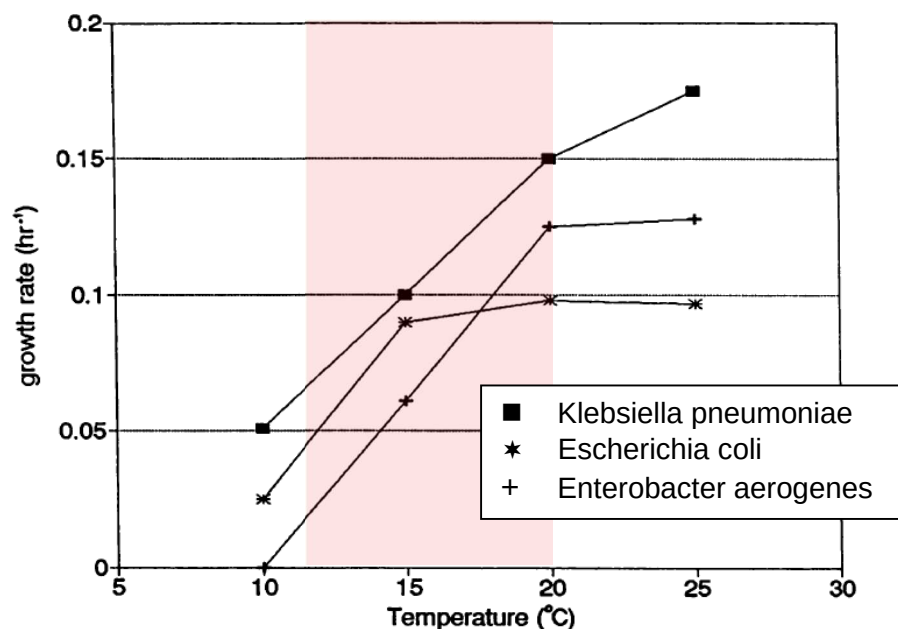


Abb. 22: Spezifische Wachstumsraten von natürlichen Coliformen-Isolaten als Funktion der Inkubations-Temperatur (aus Camper et. al. (1991)).

Aus verschiedenen Gründen ist daher eine signifikante Vermehrung und Verbreitung potenziell pathogener Bakterien im durch die im geplanten 3. BA im unterlie-

genden Grundwasserleiter erhöhten Temperaturen unwahrscheinlich. Zum einen sollten solche Keime gar nicht erst in diese Zone gelangen und dann ist die potenzielle Wachstumsrate zwar erhöht, wird aber unter Berücksichtigung der sonstigen Einflussfaktoren nicht zu einer markanten Verbreitung führen. Darüber hinaus sind die Fließzeiten bis zur Grundwasserfassung (auch in normal temperiertem Grundwasser) so lang, dass eine ausreichende Filterwirkung des Grundwasserleiters bis zur Entnahme gewährleistet ist.

4.4 Schlussfolgerungen

Der Standort ist in weiten Bereichen wärmemäßig überprägt und stellt daher umfangreiche Möglichkeiten zur Analyse und Bewertung der Auswirkungen der für den geplanten 3. BA prognostizierten Temperaturerhöhung im Grundwasser von bis zu 8 °C zur Verfügung. Aus dem bisherigen Monitoring lassen sich allerdings keine Belege für Temperatureinflüsse auf die Grundwasserqualität ableiten. Alle wärmeemittierenden Flächen emittieren zudem mit dem Sickerwasser Stoffe und verändern so die Grundwasserzusammensetzung in einem Maße, wie es aufgrund thermodynamischer Verhältnisse auf rein chemischem Wege überhaupt nicht möglich wäre. Dies gilt auch für die Fläche unter dem geplanten 3. BA durch unter der Basisabdichtung verbleibende Materialien. Allerdings wird sich dieser Stoffeintrag durch Wegfall des Sickerwassers vermindern. Solche Veränderungen dürften mögliche Temperatureffekte auch hier überwiegen. Parallel zur geplanten Umsetzung des Deponieprojekts 3. BA wird sich durch den Emscherumbau auch die Zusammensetzung des insbesondere im Anstrom dieses Bereiches infiltrierenden Emscherwassers verändern.

Am sensibelsten dürften mikrobiologische Prozesse im Grundwasserleiter auf diese Temperaturveränderungen reagieren. Trotz der in den Referenzbereichen z.T. deutlichen Temperaturerhöhungen und der Verfügbarkeit von für die Bakterien notwendigen Stoffen treten im Grundwasserleiter allgemein und auch in den temperaturerhöhten Bereichen keine außergewöhnlichen bakteriellen Aktivitäten und Stoffwechselprodukte auf. Auch für den geplanten 3. BA sind Beeinflussungen durch die prognostizierte erhöhte Temperatur als gering einzuschätzen. Auch Keime, die aufgrund ihrer pathogenen Wirkung generell im Grundwasser unerwünscht sind, können sich unter den Standortbedingungen kaum vermehrt entwi-

ckeln. Der geplante 3. BA dürfte somit unter den verschiedenen diskutierten Aspekten kaum Auswirkungen auf die Grundwasserzusammensetzung haben.

5 Fazit und Empfehlungen

Durch den Bau und Betrieb des geplanten 3. BA sind folgende Auswirkungen auf das Grundwasser zu erwarten

- Entwicklung der Grundwassertemperaturen

Für die Grundwässer im 3. BA ist mit einer zum 2. BA ähnlichen Erwärmung nach Beginn der Schüttung zu rechnen. Dabei sind in Folge des größeren Volumens generell etwas höhere Temperaturen im Schüttkörper und im Grundwasser des geplanten 3. BA zu erwarten als im 2. BA. Es ist generell anzumerken, dass es bereits heute im Anstrom auf die Deponie Wehofen-Nord einen jahreszeitlichen Wärmeeintrag im Sommer und Herbst durch versickerndes Emscherwasser gibt.

Es ist davon auszugehen, dass sich die Wärmefahne südlich der Halde Wehofen-West etwas weiter nach Westen ausdehnen wird, da sich die hinzukommende Wärmequelle (3. BA) primär auf die westliche Hälfte der heutigen Wärmefahne auswirken wird. Eine Verlängerung der Wärmefahne im Abstrom ist nicht zu erwarten, da sich die Abkühlungstendenzen insbesondere durch kühle Grundwasserneubildung an der gesamten Fahnenfront gleichmäßig auswirken werden. Hinzu kommt der für das Grundwasser kühlende Einfluss der in Kürze geplanten Versickerung der Niederschlagsabflüsse an der Halde Wehofen-West.

Da es im Bereich zwischen den Halden und der im Grundwasserabstrom gelegenen Grundwasserhaltung Duisburg-Aldenrade keine genehmigten oder angezeigten Grundwassernutzungen gibt, kann davon ausgegangen werden, dass von der Grundwassererwärmung oder möglichen dadurch hervorgerufenen Veränderungen in der Grundwasserqualität keine Nutzer betroffen sind.

- Auswirkungen auf die Hydrochemie

Auch vor dem geplanten 3. BA ist die Temperatur des Grundwasserleiters in verschiedenen Bereichen durch mehrere Quellen erhöht. Es hat sich jedoch

gezeigt, dass die in diesem Zusammenhang erhobenen Monitoringdaten keine Rückschlüsse darauf erlauben, inwiefern solche Temperaturveränderungen auch Veränderungen der chemischen Zusammensetzung bewirkt haben. Das hängt damit zusammen, dass die Wärmequellen durch Sickerwasser (Bergehalten, Deponie, Deponieuntergrund, Emscher) auch Stoffeinträge in das Grundwasser verursachen, die die potenziellen Temperatureinflüsse überdecken bzw. übersteigen.

Thermodynamische Berechnungen haben zudem gezeigt, dass rein chemisch betrachtet in Folge der zu erwartenden Temperaturerhöhung mit keinen relevanten oder messbaren Veränderungen der Grundwasserzusammensetzung zu rechnen ist.

Temperaturbedingt sind prinzipiell sekundär durch mikrobiologische Stoffumsätze auch Auswirkungen auf die Hydrochemie möglich. Hier haben die Vergleichsdaten aus den schon temperaturerhöhten Zonen im Grundwasserleiter gezeigt, dass dies am Standort nicht zu grundsätzlichen Veränderungen im Chemismus führt. Diese Aussage kann auf den Temperatureinflussbereich des geplanten 3. BA übertragen werden.

- Auswirkungen auf die Mikrobiologie

Im Bereich $< 30\text{ °C}$ führen Temperaturerhöhungen für fast alle Bakterien zu einer Verbesserung ihrer Lebensbedingungen und daher zur Erhöhung von Vermehrung und Stoffumsatz. Die Standortbedingungen sind hier aber derart, dass sich sowohl grundwassertypische Bakterien als auch Keime, die aufgrund ihrer pathogenen Wirkung generell im Grundwasser unerwünscht sind, kaum vermehrt entwickeln.

- Empfehlungen zum Grundwasser-Monitoring

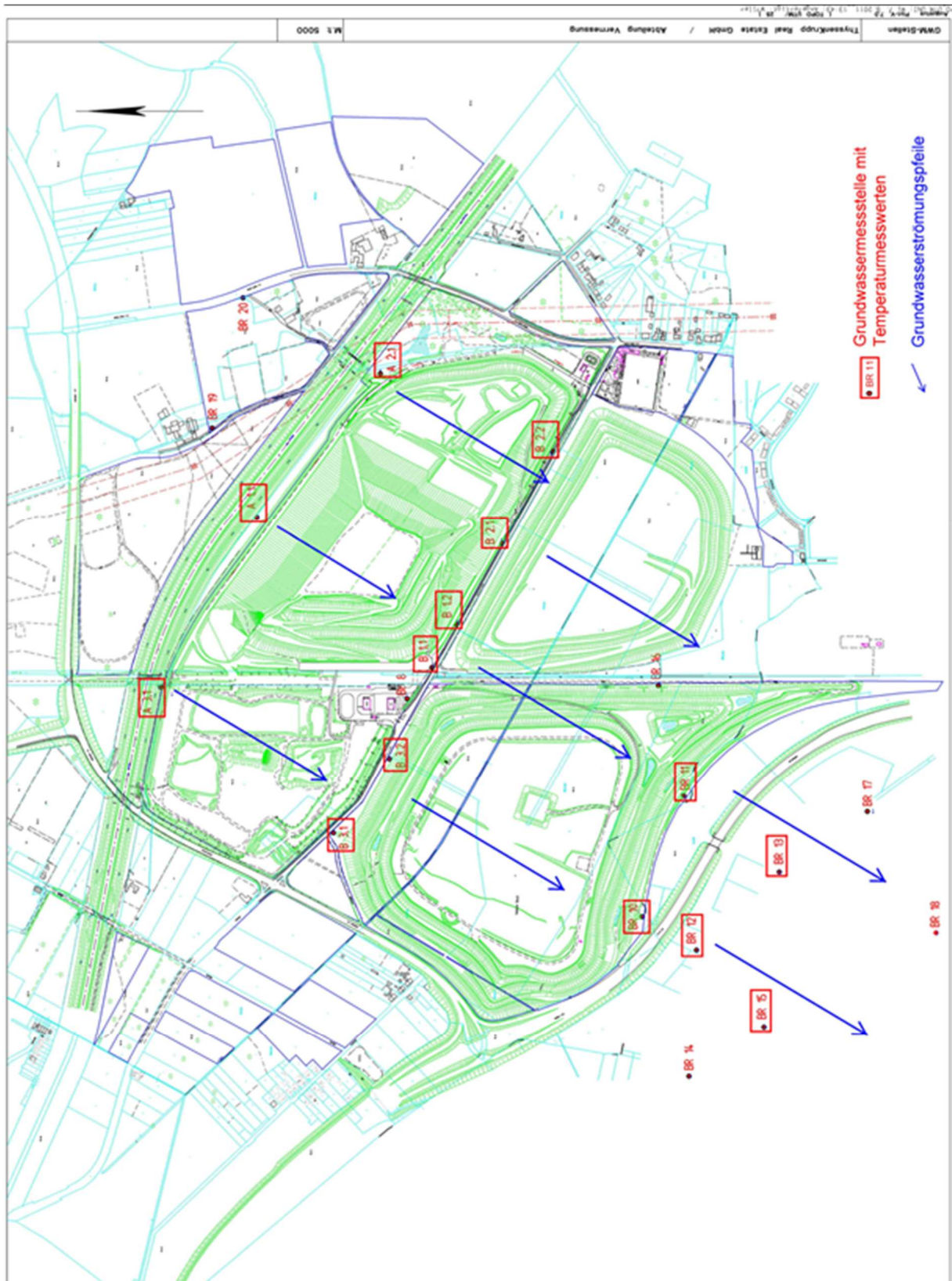
Das Monitoring der Grundwassertemperaturen sollte wie bisher mit vierteljährlichen Messungen fortgeführt werden. Die Ergebnisse der Probenahmen sind nachvollziehbar und die Analysenergebnisse plausibel. Das Monitoring sollte allerdings auf alle 22 im Februar 2017 gemessenen Grundwassermessstellen ausgedehnt werden. Zur genaueren Fassung der Temperaturverteilung im Grundwasserabstrom empfehlen wir die Ausweitung des Messstellennetzes um 2 oder 3 Grundwassermessstellen bis zur Dr.-Hans-

Böckler-Straße. Dabei kann ggf. auf vorhandene Messstellen der Stadt oder der EG zurückgegriffen werden.

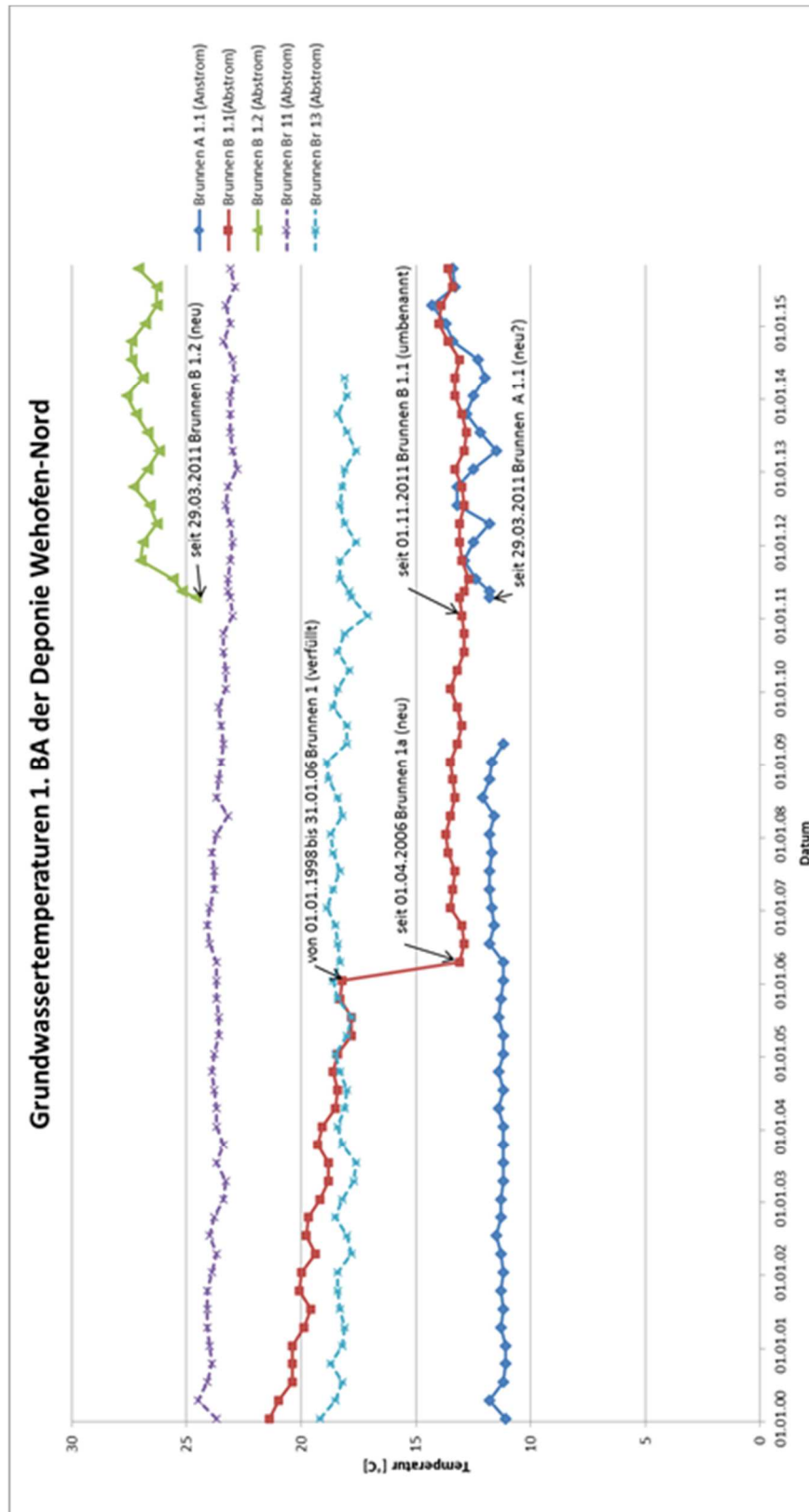
Der Parameter Redoxpotential sollte beim künftigen Monitoring in die vor Ort durchgeführten Messungen aufgenommen werden.

A handwritten signature in blue ink, which appears to read "D. Korte".

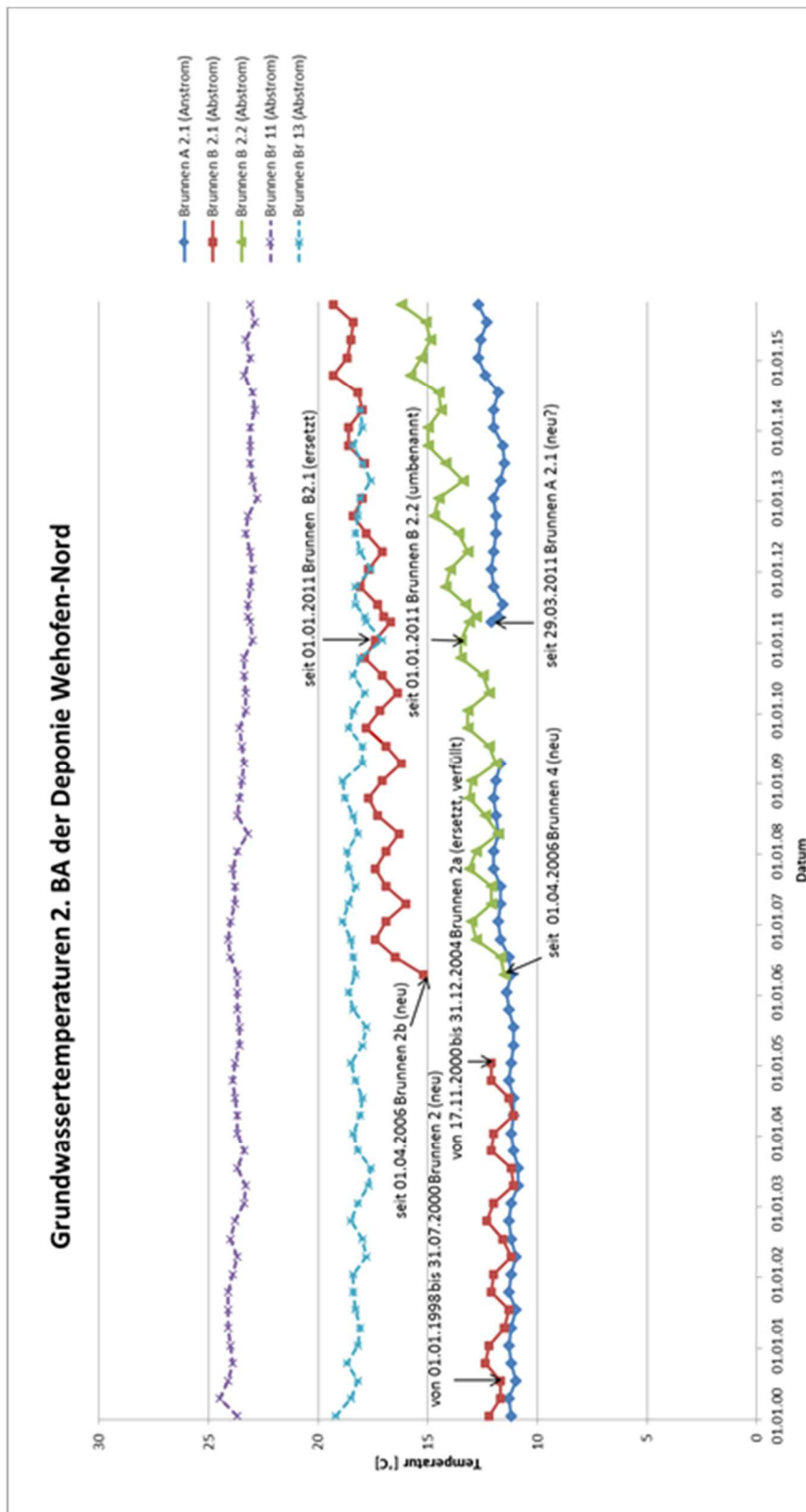
Anhang 1.1: Lageplan mit Grundwassermessstellen im Zeitraum 2000 bis 2015



Anhang 1.2: Ganglinien der Grundwassertemperaturen im 1. BA (2000 bis 2015)



Anhang 1.3: Ganglinien der Grundwassertemperaturen im 2. BA (2000 bis 2015)



Anhang 1.4: Ganglinien der Grundwassertemperaturen im 3. BA (2000 bis 2015)

