

Grundwassermodellierung im Bereich des Tanklagers Farge

Im Auftrag:

Performa Nord

Geschäftsbereich Bundesbau

Theodor Heuss Allee 14

28215 Bremen

Zwischenbericht zum Partikeltracking der Schad- stofffahne

Dezember 2023

M.Sc. Sina Julius

Dr. Björn Panteleit



Leobener Str. 8, 28359 Bremen

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
2	Methodik.....	1
2.1	MODPATH.....	1
2.2	Randbedingungen für das Partikeltracking mit MODPATH.....	2
2.3	Szenarien	3
3	Ergebnisse	4
3.1	Szenarien A bis F.....	4
3.2	Szenarien G und H	7
4	Zusammenfassung.....	8
5	Literaturverzeichnis.....	8

Abbildungsverzeichnis

Szenario A: Fördermenge Brunnen 16 = 2 Mio m ³ /a, Fördermenge Brunnen 17 = 0 m ³ /a	4
Szenario B: Fördermenge Brunnen 16 = 1,5 Mio m ³ /a, Fördermenge Brunnen 17 = 0,5 m ³ /a	5
Szenario C: Fördermenge Brunnen 16 = 1 Mio m ³ /a, Fördermenge Brunnen 17 = 1 m ³ /a	5
Szenario D: Fördermenge Brunnen 16 = 0,5 Mio m ³ /a, Fördermenge Brunnen 17 = 1,5 m ³ /a	6
Szenario E: Fördermenge Brunnen 16 = 0 Mio m ³ /a, Fördermenge Brunnen 17 = 2 m ³ /a	6
Szenario F: Fördermenge Brunnen 16 = 0,8 Mio m ³ /a, Fördermenge Brunnen 17 = 1,2 m ³ /a.....	6
Szenario G: Fördermenge Brunnen 16 = 0,8 Mio m ³ /a, Fördermenge Brunnen 17 = 1,5 m ³ /a.....	7
Szenario H: Fördermenge Brunnen 16 = 0 Mio m ³ /a, Fördermenge Brunnen 17 = 1,5 m ³ /a.....	7

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Genutzte Software bei der Modellierung.....	2
Tabelle 2: Beschreibung der Szenarien A, B, C, D, E, F, G und H	3

1 Einleitung

Dieser Bericht präsentiert die Ergebnisse des Partikeltracking der Schadstofffahne mit MODPATH im Bereich des Tanklagers Farge unter Betrachtung von acht verschiedenen Szenarien (A bis H). Die Modellierung basiert auf dem kalibrierten Strömungsmodell, das im Bericht „Grundwassermodellierung im Bereich des Tanklagers Farge – Erläuterungsbericht zur Strömungsmodellierung“ vom August 2022 vorgestellt wurde.

Das Partikeltracking mit MODPATH baut auf die Ergebnisse der Modellierung mit MODFLOW auf. Die MODPATH Simulation berechnet den Verlauf der Schadstofffahne ausgehend vom Verladebahnhof II sowie die Einzugsgebiete der Trinkwassergewinnungsbrunnen Brunnen 16 und Brunnen 17. Im Rahmen der Simulationen wurden Modellparameter wie die Anbindung von Oberflächengewässer weiter optimiert.

Die acht verschiedenen Szenarien (A bis H) unterscheiden sich in den Grundwasserentnahmemengen von Brunnen 16 und Brunnen 17. Die Ergebnisse der ersten fünf Szenarien (A bis E) wurden bereits während eines Treffens am 13. September im Hause der Senatorin für Umwelt, Klima und Wissenschaft vorgestellt. Sowohl diese Ergebnisse als auch die der verbleibenden drei Szenarien (F, G und H) werden in diesem Bericht umfassend erörtert.

2 Methodik

2.1 MODPATH

Zur Modellierung des Partikeltrackings wurden mehrere Softwareprogramme verwendet. Alle Modellierpakete können zusammen über die QGIS integrierte FREEWAT Modellierungsumgebung gesteuert werden. FREEWAT ist ein kostenloses open source Softwaretool für das Management von Wasserressourcen welches 2020 im Rahmen des HORIZON 2020 Projektes der EU entwickelt wurde. Zu den FREEWAT Modulen gehören, neben dem Grundwassermodellierungsmodul MODFLOW-2005, auch das MODPATH Partikeltracking-Postprocessing-Paket.

Die Software MODFLOW dient zur Modellierung der Grundwasserströmung und wurde bereits im „Erläuterungsbericht zur Strömungsmodellierung“ vom August 2022 näher beschrieben. Basierend auf dem modellierten Strömungsfeld können in einer Nachbearbeitung mit MODPATH die Wege einzelner Wasserpartikel zurückverfolgt und visualisiert werden. Das Partikeltracking stellt einen konservativen Transport dar, der keinen physikalischen, chemischen oder biologischen Veränderungen wie Abbau- oder Dispersionsprozessen unterliegt. Die resultierenden Schadstofffahnen stellen somit ein Worst-Case Szenario dar.

Tabelle 1: Genutzte Software bei der Modellierung

Software	Verwendung	Version	Quelle
MODFLOW	Grundwasserströmungsmodellierung	mf2005	Harbaugh 2005
MODPATH	Partikeltransport	modpath6	Pollock 2012
FREEWAT	Open Source Tool zur Modellierung Benutzer- oberfläche in QGIS für die o.g. Pakete	freewat 1.2.0	Rossetto 2018
QGIS	Geoinformationssystem zur Visualisierung	QGIS 2.18.21	QGIS.org 2023

Die Nachbearbeitungssoftware MODPATH nutzt die Ausgabedateien der Strömungsmodellierung Software MODFLOW. Als Eingabeinformationen für MODPATH wird zunächst eine Startposition anhand des Modellgitters für den zu untersuchenden Partikelweg definiert. Anschließend wird festgelegt, ob der Verlauf der Partikel im Zustrom oder im Abstrom dieser Startposition betrachtet werden soll. Über den Zustrom (Backward Tracking) können zum Beispiel die Einzugsgebiete der Brunnen berechnet werden; über den Abstrom (Forward Tracking) die Schadstofffahne.

Die Berechnungen sind immer an den im MODFLOW festgelegten Modell Zeitplan gekoppelt. Dieser umfasst in diesem Fall einen Zeitraum von 100 Jahren. Dieser Zeitraum spiegelt sich beim Backward Tracking in den Einzugsgebieten von Brunnen 16 und Brunnen 17 wieder. Dagegen ist das Forward Tracking durch die Randbedingung der Weser begrenzt. Sobald die Partikel den Fluss erreichen, endet das Partikeltracking dort.

2.2 Randbedingungen für das Partikeltracking mit MODPATH

Die vorliegenden Ergebnisse werden mittels Partikeltracking mit MODPATH (Pollock 2012) generiert, das auf das mit der Software MODFLOW (Harbaugh 2005) erstellte Strömungsmodell aus dem Jahr 2022 aufbaut.

In der durchgeführten Simulation erfolgt der Schadstoffeintrag über die gesamte Modelldauer von 100 Jahren. Dieses stationäre, also zeitunabhängige Modell, rechnet mit den Entnahmen aller Brunnen wie sie im Jahr 2019 erfolgt sind (abgesehen von den szenariospezifischen Entnahmen von Brunnen 16 und Brunnen 17). Als Startpunkt des Partikeltrackings werden der südliche Teil des Verladebahnhofs II für die Schadstofffahne und die Modellzellen von Brunnen 16 und Brunnen 17 für die jeweiligen Einzugsgebiete gewählt.

2.3 Szenarien

Die gewählten Szenarien sind in zwei Gruppen zu klassifizieren. Beruhend auf der Leistungsfähigkeit der Anbindung an das Wasserwerk liegt die maximal mögliche gemeinsame Förderrate bei ca. 2 Mio m³/Jahr. Da die Brunnen zu einem wesentlichen Anteil an der Trinkwasserversorgung in Bremen-Nord beitragen, wurde diese Fördermenge in der Vergangenheit regelmäßig ausgenutzt. In den Szenarien A bis F wurde diese Fördermenge in verschiedenen Abstufungen zwischen den beiden Förderbrunnen aufgeteilt. Um ein besseres Verständnis für das hydraulische Zusammenspiel der beiden Einzugsbereiche zu erlauben, wurden hierbei bewusst wasserrechtliche oder technische Grenzen unberücksichtigt gelassen. Diese liegen bei einer Fördermenge von 1,5 Mio m³/Jahr pro Brunnen.

Aus wasserrechtlicher Sicht sind zudem zwei weitere Szenarien betrachtet worden. Hierbei handelt es sich im Szenario G um eine theoretische (aber technisch nicht realisierbare) Ausschöpfung der wasserrechtlich erlaubten Entnahmemengen beider Brunnen (unter Berücksichtigung einer vorübergehenden bedingten Beschränkung der erlaubten Fördermenge aus dem Brunnen 16 von 0,8 Mio m³/Jahr). Im Szenario H wurde eine Ausschöpfung der bewilligten Fördermenge aus Brunnen 16 in Höhe von 1,5 Mio m³/Jahr betrachtet, die im Falle eines Ausfalls von Brunnen 17 erforderlich sein könnte.

Tabelle 2: Beschreibung der Szenarien A, B, C, D, E, F, G und H zum Partikeltracking mit modpath

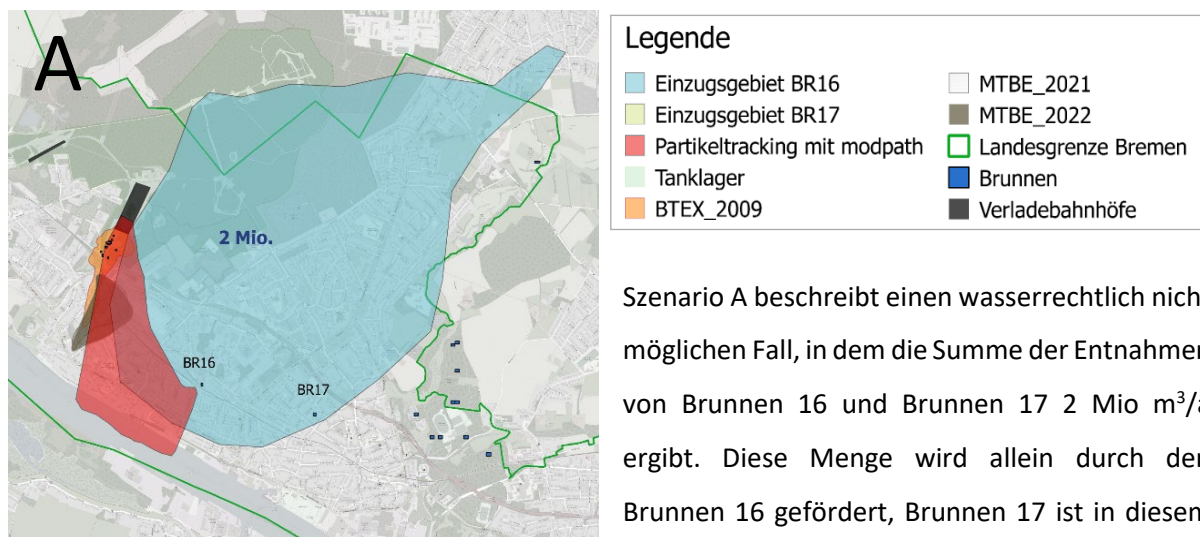
Szenario	Fördermenge		Beschreibung
	Brunnen 16 [m ³ /a]	Brunnen 17 [m ³ /a]	
A	2 Mio	0 Mio	Summe d. Entnahmen BR16+BR17 = 2 Mio
B	1,5 Mio	0,5 Mio	Summe d. Entnahmen BR16+BR17 = 2 Mio
C	1 Mio	1 Mio	Summe d. Entnahmen BR16+BR17 = 2 Mio
D	0,5 Mio	1,5 Mio	Summe d. Entnahmen BR16+BR17 = 2 Mio
E	0 Mio	2 Mio	Summe d. Entnahmen BR16+BR17 = 2 Mio
F	0,8 Mio	1,2 Mio	aktuelle Fördermenge
G	0,8 Mio	1,5 Mio	geplante vorübergehend maximal erlaubte Fördermenge
H	1,5 Mio	0 Mio	max. Fördererlaubnis von Brunnen 16

3 Ergebnisse

Im Folgenden sind die Ergebnisse des Partikeltrackings mit MODPATH für die Förderszenarien A bis H (s. Kapitel 2.3) dargestellt. Dabei repräsentiert die rötliche Fläche die modellierte Schadstofffahne in der Draufsicht, ausgehend vom südlichen Teil des Verladebahnhofs II. Da nur der konservative Transport betrachtet wird, erfolgt im Modell keine Differenzierung zwischen den Schadstoffgruppen MTBE und BTEX. In blau und gelb sind die Einzugsgebiete von Brunnen 16 und Brunnen 17 über einen Zeitraum von 100 Jahren dargestellt.

3.1 Szenarien A bis F

Die Szenarien A bis F beruhen auf unterschiedlichen Verteilungen der langjährigen Gesamtfördermenge aus den Brunnen 16 und 17 von ca. 2 Mio m³/Jahr. Diese stellt aufgrund der Anbindung an das Wasserwerk eine technische Begrenzung dar. Für ein besseres Systemverständnis wurden bewusst auch Szenarien berechnet, die nicht den wasserrechtlichen Bewilligungen einer Entnahme von max. 1,5 Mio m³/Jahr eines einzelnen Brunnens entsprechen.

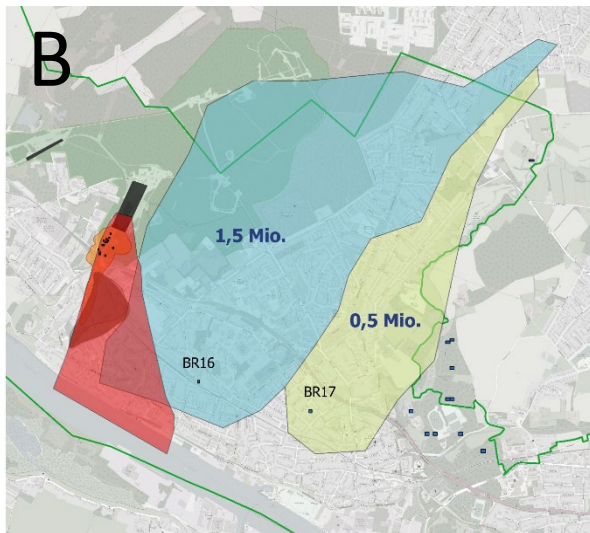


Szenario A: Fördermenge Brunnen 16 = 2 Mio m³/a, Fördermenge Brunnen 17 = 0 m³/a

Szenario A beschreibt einen wasserrechtlich nicht möglichen Fall, in dem die Summe der Entnahmen von Brunnen 16 und Brunnen 17 2 Mio m³/a ergibt. Diese Menge wird allein durch den Brunnen 16 gefördert, Brunnen 17 ist in diesem Modelldurchlauf ausgeschaltet. Ein solches Szenario wäre in diesem Ausmaß nicht erlaubt, da

die maximale Entnahmemengen von Brunnen 16 auf 1,5 Mio m³/a begrenzt ist und vorübergehend sogar auf 0,8 Mio m³/a reduziert werden soll.

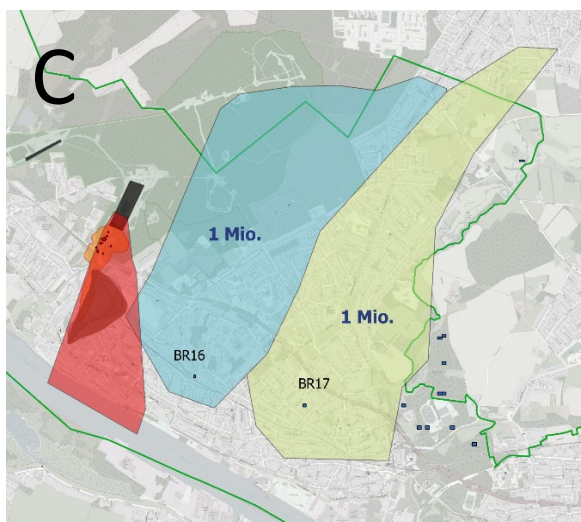
Der modellierte Verlauf der Partikel, ausgehend vom Verladebahnhof II, reicht in diesem Szenario bis in den Trinkwassergewinnungsbrunnen 16. In einem realen Szenario wäre in diesem Fall mit einem Durchbruch der Schadstoffe in den Brunnen 16 zu rechnen. Durch die hohe Förderrate von Brunnen 16 in diesem Szenario werden die potentiellen Schadstoffpartikel stark nach Osten abgelenkt; die Westflanke der kartierten MTBE-Fahne bleibt dadurch vom Partikeltracking unbedeckt.



Szenario B: Fördermenge Brunnen 16 = 1,5 Mio m³/a,
Fördermenge Brunnen 17 = 0,5 m³/a

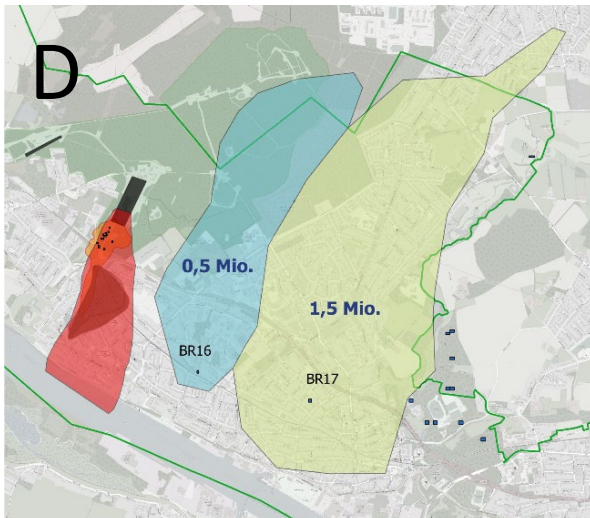
Im Szenario B fördern Brunnen 16 mit 1,5 Mio m³/a und Brunnen 17 mit 0,5 Mio m³/a, wodurch sie zusammen auf eine Gesamtentnahme von 2 Mio m³/a kommen. Dieses Szenario wäre wasserrechtlich erlaubt, jedoch unwahrscheinlich, da in der Realität momentan Brunnen 16 nur mit der halben Rate (~0,8 Mio m³/a) und Brunnen 17 mit mehr als der doppelten Rate (~1,2 Mio m³/a) fördert.

Das Partikeltracking zeigt in diesem Szenario eine nahezu vollständige Übereinstimmung mit der kartierten MTBE-Fahne. Einzige Ausnahme bildet ein kleiner Teil der südwestlichen Spitze der kartierten Fahne, die nicht abgedeckt wird. Auch in diesem Szenario wird die Richtung der Partikel, die grundsätzlich in Richtung des Vorfluters Weser gerichtet ist, durch die hohe Förderrate vom Brunnen 16 in Richtung Osten abgelenkt. Dabei überschneiden sich die Wege der Partikel mit dem Einzugsgebiet von Brunnen 16, ohne diesen jedoch zu erreichen. Dieser Effekt ist auf die unterschiedlichen Tiefenlagen der Partikel der Fahne und der des Einzugsgebiets zurückzuführen. Diese müssen nicht zwingend deckungsgleich sein. In den Abbildungen wird jeweils nur die Draufsicht für alle 25 Modellschichten gezeigt. Im dreidimensionalen Raum würden sich die Fahne und das Einzugsgebiet in diesem Fall nicht schneiden, sondern unter- und überlagern. Im Szenario B ist daher keine Gefährdung des Brunnen 16 durch Schadstoffeintrag aus dem Verladebahnhof II zu erwarten.



Szenario C: Fördermenge Brunnen 16 = 1 Mio m³/a,
Fördermenge Brunnen 17 = 1 m³/a

Szenario C beschreibt den Fall der gleichmäßig aufgeteilten Entnahmen beider Brunnen 16 und 17 mit jeweils 1 Mio m³/a. In diesem wasserrechtlich vorstellbaren und technisch möglichem Szenario wird die kartierte MTBE Fahne vollständig durch das Partikeltracking abgedeckt. Alle Partikel, die im Verladebahnhof II starten, gelangen am Ende in die Weser, sodass Brunnen 16 durch diese potentiellen Schadstoffe nicht gefährdet ist. Am östlichen Rand des Partikeltrackings gibt es eine kleine Überschneidung mit dem Einzugsgebiet von Brunnen 16.



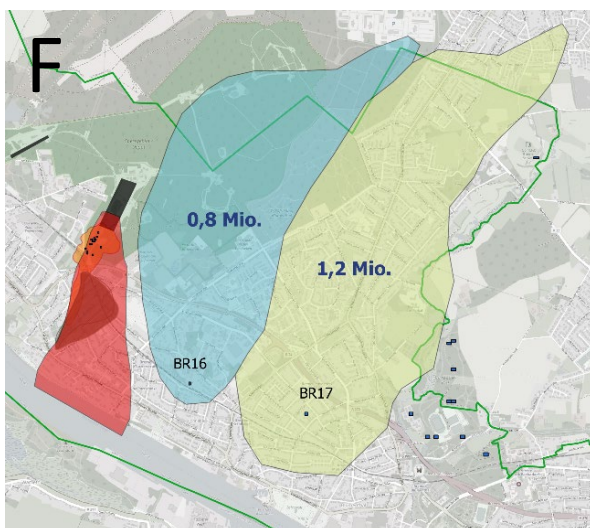
Szenario D: Fördermenge Brunnen 16 = 0,5 Mio m³/a,
Fördermenge Brunnen 17 = 1,5 m³/a

Szenario D simuliert einen realistisch durchführbaren Fall, bei dem Brunnen 16 mit 0,5 Mio m³/a und Brunnen 17 mit 1,5 Mio m³/a fördern. Auch hier wird die 2022 kartierte MTBE Fahne durch das Partikeltracking vollständig abgedeckt. Die Schadstofffahne aus dem Partikeltracking wird kaum in Richtung der Brunnen 16 und 17 abgelenkt und fließt vollständig in die Weser. Zwischen der Fahne und dem Einzugsgebiet von Brunnen 16 gibt es keine Überschneidungen. Brunnen 16 ist in diesem Szenario nicht durch einen Schadstoffeintrag vom Verladebahnhof II gefährdet.



Szenario E: Fördermenge Brunnen 16 = 0 Mio m³/a,
Fördermenge Brunnen 17 = 2 m³/a

Im wasserrechtlichen nicht zulässigen und hypothetischen Szenario E fördert Brunnen 17 mit 2 Mio m³/a, Brunnen 16 ist ausgeschaltet. Das Partikeltracking der Schadstofffahne deckt fast vollständig die kartierte MTBE Fahne ab; ausschließlich die östlichste Ausbuchtung wird nicht erfasst. Auch in diesem Szenario ist Brunnen 16 nicht durch einen Schadstoffeintrag gefährdet.

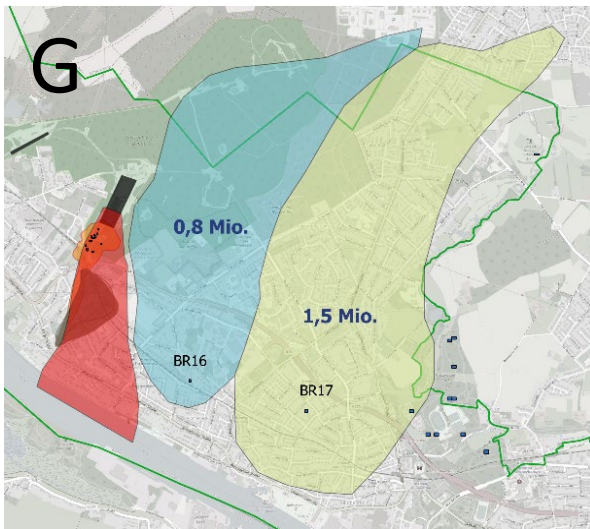


Szenario F: Fördermenge Brunnen 16 = 0,8 Mio m³/a,
Fördermenge Brunnen 17 = 1,2 m³/a

Szenario F kommt mit 0,8 Mio m³/a in Brunnen 16 und 1,2 Mio m³/a in Brunnen 17 den tatsächlichen Förderverhältnissen am nächsten. Auch hier ist keine Gefährdung von Brunnen 16 durch Schadstoffe ausgehend vom Verladebahnhof II zu erwarten. Die kartierte MTBE Fahne wird, außer eines kleinen Randes an der südwestlichen Spitze, durch das Partikeltracking komplett abgedeckt.

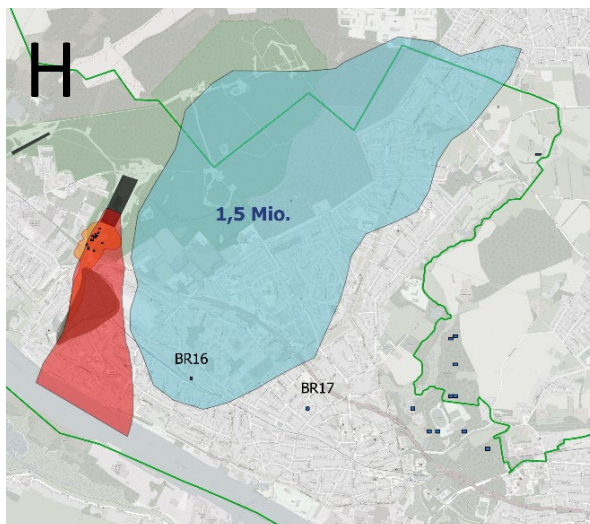
3.2 Szenarien G und H

Die Szenarien G und H wurden zur Betrachtung rein wasserrechtlicher Fragestellungen berechnet. Hierbei wird im Szenario G eine maximale Ausschöpfung der Wasserrechte beider Brunnen und im Szenario H die Maximalförderung im Brunnen 16 bei Ausfall des Brunnen 17 betrachtet. Bei beiden Szenarien handelt es sich um theoretische Zustände. Das Szenario G ist zudem in dieser Form aktuell technisch nicht realisierbar, da die Leistung der Zuleitung zum Wasserwerk hier überschritten würde.



Szenario G: Fördermenge Brunnen 16 = 0,8 Mio m³/a,
Fördermenge Brunnen 17 = 1,5 m³/a

Das Szenario G simuliert die derzeit geplanten vorübergehenden maximalen Grundwasserfördermengen von Brunnen 16 (0,8 Mio m³/a) und Brunnen 17 (1,5 Mio m³/a). Die Summe der beiden Brunnen übersteigt mit 2,3 Mio m³/a die Szenarien A bis H um 0,3 Mio. Ähnlich wie im Szenario F wird die kartierte MTBE Fahne, außer in der westlichsten Spitze, großflächig vom Partikeltracking überdeckt. Einen Eintrag von Schadstoffpartikel in den Brunnen 16 ist auch hier nicht zu erwarten.



Szenario H: Fördermenge Brunnen 16 = 1,5 Mio m³/a,
Fördermenge Brunnen 17 = 0 m³/a

Im rein theoretischen Szenario H, in dem Brunnen 16 unter der vollen Erlaubnislast von 1,5 Mio m³/a fördert, während Brunnen 17 ausgeschaltet ist, ist ebenfalls keine Gefährdung durch Schadstoffe in Brunnen 16 zu erwarten. Auch hier deckt das Partikeltracking, wie in Szenario F und G, die kartierte MTBE Fahne größtenteils ab. Ausnahme bildet die westliche Spitze.

Die Szenarien F und G, die sich einzig durch die Entnahmemengen von Brunnen 17 unterscheiden, verdeutlichen den signifikanten Einfluss dieses Brunnens auf den Verlauf der Schadstofffahne und die Lage des Einzugsgebietes von Brunnen 16. Um die Entwicklung der Fahne ganzheitlich beurteilen zu können, sollten daher stets die Entnahmen beider Brunnen (Brunnen 16 und Brunnen 17) berücksichtigt werden.

4 Zusammenfassung

In diesem Bericht werden verschiedene Szenarien gezeigt, die sich durch unterschiedliche Grundwasserfördermengen in Brunnen 16 und Brunnen 17 auszeichnen. Mittels Partikeltracking mit MODPATH wurde das Einzugsgebiet dieser beiden Brunnen sowie der Verlauf einer Schadstofffahne ausgehend vom südlichen Teil des Verladebahnhofs II berechnet. Die Ergebnisse der Szenarien erlauben eine Gefährdungseinschätzung durch Schadstoffeintrag in Brunnen 16.

In den meisten Szenarien ist Brunnen 16 durch einen Schadstoffeintrag ausgehend vom Verladebahnhof II nicht gefährdet. Einzig im unrealistischen Szenario A käme es zu einem Schadstoffeintrag in den Brunnen. Sowohl das realistische Szenario F mit aktueller und auch das technisch nicht realisierbare Szenario G mit Grundwasserentnahme in Höhe der maximal erlaubten Jahresmengen von Brunnen 16 und Brunnen 17 zeigen keine zu erwartende Gefährdung.

5 Literaturverzeichnis

Harbaugh, A.W., 2005, MODFLOW-2005, the U.S. Geological Survey modular ground-water model -- the Ground-Water Flow Process: U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A16. This report describes the theory and input instructions at the time of the initial MODFLOW-2005 v1.00 release.

Julius, S., Jensen, S., Panteleit, B., 2022, Grundwassermodellierung im Bereich des Tanklagers Farge – Erläuterungsbericht zur Strömungsmodellierung

Pollock, D.W., 2012, User Guide for MODPATH Version 6—A Particle-Tracking Model for MODFLOW: U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6–A41, 58 p.

QGIS.org (2023), QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. <http://qgis.org>

Rossetto, R., De Filippis, G., Borsi, I., Foglia, L., Cannata, M., Criollo, R., Vázquez-Suñé, E., 2018. Integrating free and open source tools and distributed modelling codes in GIS environment for data-based groundwater management, Environmental Modelling & Software, 107:210-230