

# **Numerisches Grundwassermodell**

**zur Abschätzung der Grundwasserbeeinflussung einer geplanten thermischen Grundwassernutzung für das Neubaugebiet Freiburg-Dietenbach**

**Fortführung der Modellierungen vom  
03.04.2020 und 23.12.2020.**

12.05.2021

Institut für Angewandte Geowissenschaften (AGW)  
Abteilungen Hydrogeologie und Ingenieurgeologie  
Adenauerring 20b  
76131 Karlsruhe

## Kurzfassung

Der vorliegende Bericht ist die zweite Fortführung des Berichtes „Numerisches Grundwassermodell zur Abschätzung einer thermischen Grundwassernutzung für Freiburg Dietenbach“ vom 03.04.2020 sowie der ersten Fortführung vom 23.12.20.

Um die Auswirkung von Grundwasserwärmepumpenanlagen (GWWP) auf das System Grundwasser (GW) im Bereich des Bollerstaudenweges (siehe Variante 2) zu simulieren, wurde das vorliegende Strömungs- und Wärmetransportmodell (Stand 23.12.2020) in südlicher und nordwestlicher Richtung erweitert. Dies erforderte einen Neuaufbau der Modellgeometrie und der Parametrisierung mit anschließender Neukalibrierung auf Basis der aktuellen hydrogeologischen Kenntnisse.

Eine Implementierung der Brunnengalerien in das Modell erfolgte in drei Modellvarianten. Die Berechnung erfolgte hier dabei jeweils mit einer Variante a, zur Versorgung des Gesamtgebiets und einer Variante b, mit einer reduzierten Anzahl an Brunnen, zur isolierten Deckung des Wärmebedarfs von Bauabschnitts 1 (BA-1). Dies untersucht die Option einer modularen Erweiterung der Brunnengalerien im Laufe der Bauabschnitte. Alle Varianten wurden mit einer Temperaturspreizung von 5 K und 4 K berechnet. Die Simulationen erfolgten mit Entnahmeraten auf Tagesmittel. Die zugrundeliegende Wärmelastprofile wurde von EGS-plan zur Verfügung gestellt.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Anordnung und Anzahl der Brunnen für die Wärmeversorgung des Bauabschnittes 1 (Variante 1b, 2b, 3b) ausreichend sind. Sowohl bei einer Temperaturspreizung von 5 K als auch 4 K entstehen nur lokal begrenzte Grundwasserspiegeländerungen von wenigen Zentimetern. Die Anlagen zeigen keinen negativen Einfluss auf das Versickerungsbecken im Schildkrötenkopf.

Unter der Vorgabe, dass keine Grundwassererhöhung am Versickerungsbecken zulässig ist, sind die Varianten zur Deckung des gesamten Wärmebedarfs von Dietenbach (Variante 1a, 2a, 3a) in dieser Form nicht umsetzbar.

Daher erfolgte die Berechnung von insgesamt 5 Zusatzvarianten. Bei diesen Varianten wurden die Injektionsbrunnen im Zustrom des Versickerungsbecken eliminiert (Variante 2.1) oder mit Brunnen an anderen Lokationen ersetzt (Variante 4, 5, 6, 7). Bei allen Zusatzvarianten konnte der Einfluss auf das Becken verringert werden, bei den Varianten 4, 6 und 7 kommt es zu einer Entlastung des Beckens.

Weiterhin wurden drei Varianten mit einem reduzierten Lastprofil (Variante 7.1, 7.2, 8) simuliert. Diese zeigen einen deutlich geringeren Einfluss auf den Grundwasserspiegel. Innerhalb dieser Varianten hat sich die Variante 8 als vielversprechendste herauskristallisiert, da diese den geringsten Einfluss auf die Grundwasseroberfläche und -temperatur zeigt und es zu einer deutlichen Entlastung des Versickerungsbeckens Schildkrötenkopf kommt. Vor einer möglichen Realisierung dieser Variante sollte allerdings, aufbauend auf den Resultaten dieser Modellierung, in einem Fachgutachten untersucht werden, ob es zu negativen Auswirkungen auf das Bestandsgebiet von Riesefeld, das zukünftige Baugebiet Dietenbach oder die Entwässerung durch die vorhandenen Gräben und Bäche kommen kann..

## Inhaltsverzeichnis

	Kurzfassung .....	2
<b>1</b>	<b>Aufgabenstellung und Zielsetzung .....</b>	<b>9</b>
	1.1 Datengrundlage .....	9
	1.1.1 Verwendete Datenquellen .....	9
	1.1.2 Verwendete Software.....	9
<b>2</b>	<b>Natürliche Grundwasserschwankung .....</b>	<b>10</b>
<b>3</b>	<b>Flurabstand Mittlere Höchste Wasserstand 2019 .....</b>	<b>11</b>
<b>4</b>	<b>Aufbau des Modells.....</b>	<b>12</b>
	4.1 Modellgröße und Geometrie .....	12
	4.2 Grenzen, Randbedingungen und Modellparameter .....	13
	4.3 Bestimmung der Modellgüte.....	14
	4.4 Wasserhaushaltsbilanz .....	15
<b>5</b>	<b>Implementierung des Neubaugebietes Freiburg-Dietenbach .....</b>	<b>16</b>
	5.1 Wärmebedarf.....	16
<b>6</b>	<b>Modellergebnisse.....</b>	<b>17</b>
	6.1 Varianten mit 5 K-Temperaturspreizung .....	18
	6.1.1 Variante 1a, 5K.....	18
	6.1.2 Variante 2a, 5 K.....	21
	6.1.3 Variante 3a, 5 K.....	24
	6.1.4 Variante 1b, 5 K.....	27
	6.1.5 Variante 2b, 5K.....	30
	6.1.6 Variante 3b, 5K.....	33
	6.2 Varianten mit 4K Temperaturspreizung .....	36
	6.2.1 Variante 1a, 4K.....	36
	6.2.2 Variante 2a, 4 K.....	39
	6.2.3 Variante 3a, 4K.....	42
	6.2.4 Variante 1b, 4 K.....	45
	6.2.5 Variante 2b, 4K.....	48
	6.2.6 Variante 3b, 4 K.....	51
	6.3 Zusatzvarianten mit 5 K-Temperaturspreizung.....	54
	6.3.1 Variante 2.1a , 5 K .....	55
	6.3.2 Variante 4, 5 K.....	59
	6.3.3 Variante 5, 5 K.....	63
	6.3.4 Variante 6, 5 K.....	66
	6.3.5 Variante 7, 5 K.....	70
	6.4 Zusatzvarianten mit reduzierter Entnahmerate und 5K Temperaturspreizung .....	75
	6.4.1 Variante 7.1, 5 K.....	76
	6.4.2 Variante 7.2, 5 K.....	82

6.4.3 Variante 8, 5 K.....	87
7 Fazit und Empfehlungen.....	92

Abbildung 1: oben: Grundwasserganglinien der Messstellen 2110/070-6, 95/069-1 und 282/069-5 von Jan 2015 bis Dez 2021. Saisonale Veränderung der Grundwasserhöhe gegenüber dem Jahresmittelwert.....	10
Abbildung 2: Grundwasserflurabstand im Bereich von Dietenbach. Basierend auf MHW 2019 (graue Linie) und Lidar-Geländemodell. ....	11
Abbildung 3: Modellerweiterung (grüne Fläche) in südwestlicher- und nordwestlicher Richtung.....	12
Abbildung 4: Verteilung der hydraulischen Durchlässigkeiten für den Oberen Grundwasserleiter. ....	13
Abbildung 5: a): Verteilung der hydraulischen Durchlässigkeiten des ersten Modells von Mai 2020. b) Vergleich der hydraulischen Durchlässigkeiten des aktuellen Modells und des Modells von Mai 2020. ....	14
Abbildung 6: Ergebnisse der stationären Kalibrierung. ....	14
Abbildung 7: Verwendete Jahreswärmeprofile auf Tagesbasis für Temperaturspreizungen von 4 K (orange) und 5 K (blau). Grüne Linie: Im Bericht Mai 2020 verwendetes Jahreswärmeprofil.....	16
Abbildung 8: Überblick der Brunnenanordnungen der zu simulierenden Varianten. Variante a: Abdeckung Gesamtwärmebedarf Dietenbach Varianten b: Abdeckung Wärmebedarf Bauabschnitt 1. ....	17
Abbildung 9: Variante 1a, 5 K: Durch den Anlagenbetrieb bedingte Grundwasserspiegeländerung zum Zeitpunkt der größten Entnahme und Injektionsraten (nach 3301 Tagen). ....	18
Abbildung 10: Variante 1a, 5 K: Zeitliche Entwicklung der Grundwasserhöhen an den Extraktionsbrunnen (rot) und Injektionsbrunnen (blau) für den Simulationszeitraum von 10 Jahren. ....	19
Abbildung 11: Variante 1a, 5 K: Zeitliche Entwicklung der Grundwasserhöhen an den Extraktionsbrunnen (rot) und Injektionsbrunnen (blau) innerhalb eines Kalenderjahres.....	19
Abbildung 12: Variante 1a, 5 K: Durch den Anlagenbetrieb erzeugte Temperaturfahnen nach einer Simulationsdauer von 10 Jahren. ....	20
Abbildung 13: Variante 2a, 5K: Durch den Anlagenbetrieb bedingte Grundwasserspiegeländerung zum Zeitpunkt der größten Entnahme und Injektionsraten (nach 3301 Tagen). ....	21
Abbildung 14: Variante 2a, 5K: Zeitliche Entwicklung der Grundwasserhöhen an den Extraktionsbrunnen (rot) und Injektionsbrunnen (blau) für den Simulationszeitraum von 10 Jahren. ....	22
Abbildung 15: Variante 2a, 5K: Zeitliche Entwicklung der Grundwasserhöhen an den Extraktionsbrunnen (rot) und Injektionsbrunnen (blau) innerhalb eines Kalenderjahres.....	22
Abbildung 16: Variante 2a, 5K: Durch den Anlagenbetrieb erzeugte Temperaturfahnen nach einer Simulationsdauer von 10 Jahren. ....	23
Abbildung 17: Variante 3a, 5K: Durch den Anlagenbetrieb bedingte Grundwasserspiegeländerung zum Zeitpunkt der größten Entnahme und Injektionsraten (nach 3301 Tagen). ....	24
Abbildung 18: Variante 3a, 5K: Zeitliche Entwicklung der Grundwasserhöhen an den Extraktionsbrunnen (rot) und Injektionsbrunnen (blau) für den Simulationszeitraum von 10 Jahren. ....	25
Abbildung 19: Variante 3a, 5K: Zeitliche Entwicklung der Grundwasserhöhen an den Extraktionsbrunnen (rot) und Injektionsbrunnen (blau) innerhalb eines Kalenderjahres.....	25

Abbildung 20: Variante 3a, 5K: Durch den Anlagenbetrieb erzeugte Temperaturfahnen nach einer Simulationsdauer von 10 Jahren. ....	26
Abbildung 21: Variante 1b, 5K: Durch den Anlagenbetrieb bedingte Grundwasserspiegeländerung zum Zeitpunkt der größten Entnahme und Injektionsraten (nach 3301 Tagen). ....	27
Abbildung 22: Variante 1b, 5K: Zeitliche Entwicklung der Grundwasserhöhen an den Extraktionsbrunnen (rot) und Injektionsbrunnen (blau) für den Simulationszeitraum von 10 Jahren. ....	28
Abbildung 23: Variante 1b, 5K: Zeitliche Entwicklung der Grundwasserhöhen an den Extraktionsbrunnen (rot) und Injektionsbrunnen (blau) innerhalb eines Kalenderjahres.....	28
Abbildung 24: Variante 1b, 5K: Durch den Anlagenbetrieb erzeugte Temperaturfahnen nach einer Simulationsdauer von 10 Jahren. ....	29
Abbildung 25: Variante 2b, 5K: Durch den Anlagenbetrieb bedingte Grundwasserspiegeländerung zum Zeitpunkt der größten Entnahme und Injektionsraten (nach 3301 Tagen). ....	30
Abbildung 26: Variante 2b, 5K: Zeitliche Entwicklung der Grundwasserhöhen an den Extraktionsbrunnen (rot) und Injektionsbrunnen (blau) für den Simulationszeitraum von 10 Jahren. ....	31
Abbildung 27: Variante 2b, 5K: Zeitliche Entwicklung der Grundwasserhöhen an den Extraktionsbrunnen (rot) und Injektionsbrunnen (blau) innerhalb eines Kalenderjahres.....	31
Abbildung 28: Variante 2b, 5K: Durch den Anlagenbetrieb erzeugte Temperaturfahnen nach einer Simulationsdauer von 10 Jahren. ....	32
Abbildung 29: Variante 3b, 5K: Durch den Anlagenbetrieb bedingte Grundwasserspiegeländerung zum Zeitpunkt der größten Entnahme und Injektionsraten (nach 3301 Tagen) .....	33
Abbildung 30: Variante 3b, 5K: Zeitliche Entwicklung der Grundwasserhöhen an den Extraktionsbrunnen (rot) und Injektionsbrunnen (blau) für den Simulationszeitraum von 10 Jahren. ....	34
Abbildung 31: Variante 3b, 5K: Zeitliche Entwicklung der Grundwasserhöhen an den Extraktionsbrunnen (rot) und Injektionsbrunnen (blau) innerhalb eines Kalenderjahres.....	34
Abbildung 32: Variante 3b, 5K: Durch den Anlagenbetrieb erzeugte Temperaturfahnen nach einer Simulationsdauer von 10 Jahren. ....	35
Abbildung 33: Variante 1a, 4K: Durch den Anlagenbetrieb bedingte Grundwasserspiegeländerung zum Zeitpunkt der größten Entnahme und Injektionsraten (nach 3301 Tagen) .....	36
Abbildung 34: Variante 1a, 4K: Zeitliche Entwicklung der Grundwasserhöhen an den Extraktionsbrunnen (rot) und Injektionsbrunnen (blau) für den Simulationszeitraum von 10 Jahren. ....	37
Abbildung 35: Variante 1a, 4K: Zeitliche Entwicklung der Grundwasserhöhen an den Extraktionsbrunnen (rot) und Injektionsbrunnen (blau) innerhalb eines Kalenderjahres.....	37
Abbildung 36: Variante 1a, 4K: Durch den Anlagenbetrieb erzeugte Temperaturfahnen nach einer Simulationsdauer von 10 Jahren. ....	38
Abbildung 37: Variante 2a, 4 K: Durch den Anlagenbetrieb bedingte Grundwasserspiegeländerung zum Zeitpunkt der größten Entnahme und Injektionsraten (nach 3301 Tagen) .....	39
Abbildung 38: Variante 2a, 4 K: Zeitliche Entwicklung der Grundwasserhöhen an den Extraktionsbrunnen (rot) und Injektionsbrunnen (blau) für den Simulationszeitraum von 10 Jahren. ....	40
Abbildung 39: Variante 2a, 4 K: Zeitliche Entwicklung der Grundwasserhöhen an den Extraktionsbrunnen (rot) und Injektionsbrunnen (blau) innerhalb eines Kalenderjahres.....	40
Abbildung 40: Variante 2a, 4 K: Durch den Anlagenbetrieb erzeugte Temperaturfahnen nach einer Simulationsdauer von 10 Jahren. ....	41

Abbildung 41: Variante 3a, 4 K: Durch den Anlagenbetrieb bedingte Grundwasserspiegeländerung zum Zeitpunkt der größten Entnahme und Injektionsraten (nach 3301 Tagen). .....	42
Abbildung 42: Variante 3a, 4 K: Zeitliche Entwicklung der Grundwasserhöhen an den Extraktionsbrunnen (rot) und Injektionsbrunnen (blau) für den Simulationszeitraum von 10 Jahren. 43	43
Abbildung 43: Variante 3a, 4 K: Zeitliche Entwicklung der Grundwasserhöhen an den Extraktionsbrunnen (rot) und Injektionsbrunnen (blau) innerhalb eines Kalenderjahres.....	43
Abbildung 44: Variante 3a, 4 K: Durch den Anlagenbetrieb erzeugte Temperaturfahnen nach einer Simulationsdauer von 10 Jahren. ....	44
Abbildung 45: Variante 1b, 4 K: Durch den Anlagenbetrieb bedingte Grundwasserspiegeländerung zum Zeitpunkt der größten Entnahme und Injektionsraten (nach 3301 Tagen) .....	45
Abbildung 46: Variante 1b, 4 K: Zeitliche Entwicklung der Grundwasserhöhen an den Extraktionsbrunnen (rot) und Injektionsbrunnen (blau) für den Simulationszeitraum von 10 Jahren. 46	46
Abbildung 47: Variante 1b, 4 K: Zeitliche Entwicklung der Grundwasserhöhen an den Extraktionsbrunnen (rot) und Injektionsbrunnen (blau) innerhalb eines Kalenderjahres.....	46
Abbildung 48: Variante 1b, 4 K: Durch den Anlagenbetrieb erzeugte Temperaturfahnen nach einer Simulationsdauer von 10 Jahren. ....	47
Abbildung 49: Variante 2b, 4 K: Durch den Anlagenbetrieb bedingte Grundwasserspiegeländerung zum Zeitpunkt der größten Entnahme und Injektionsraten (nach 3301 Tagen) .....	48
Abbildung 50: Variante 2b, 4K: Zeitliche Entwicklung der Grundwasserhöhen an den Extraktionsbrunnen (rot) und Injektionsbrunnen (blau) für den Simulationszeitraum von 10 Jahren. 49	49
Abbildung 51: Variante 2b, 4 K: Zeitliche Entwicklung der Grundwasserhöhen an den Extraktionsbrunnen (rot) und Injektionsbrunnen (blau) innerhalb eines Kalenderjahres.....	49
Abbildung 52: Variante 2b, 4 K: Durch den Anlagenbetrieb erzeugte Temperaturfahnen nach einer Simulationsdauer von 10 Jahren. ....	50
Abbildung 53: Variante 3b, 4 K: Durch den Anlagenbetrieb bedingte Grundwasserspiegeländerung zum Zeitpunkt der größten Entnahme und Injektionsraten (nach 3301 Tagen) .....	51
Abbildung 54: Variante 3b, 4 K: Zeitliche Entwicklung der Grundwasserhöhen an den Extraktionsbrunnen (rot) und Injektionsbrunnen (blau) für den Simulationszeitraum von 10 Jahren. 52	52
Abbildung 55: Variante 1b, 4 K: Zeitliche Entwicklung der Grundwasserhöhen an den Extraktionsbrunnen (rot) und Injektionsbrunnen (blau) innerhalb eines Kalenderjahres.....	52
Abbildung 56: Variante 3b, 4 K: Durch den Anlagenbetrieb erzeugte Temperaturfahnen nach einer Simulationsdauer von 10 Jahren. ....	53
Abbildung 57: Überblick der Brunnenanordnungen der zu simulierenden Zusatzvarianten. ....	54
Abbildung 58: Variante 2.1 a, 5 K: Durch den Anlagenbetrieb bedingte Grundwasserspiegeländerung zum Zeitpunkt der größten Entnahme und Injektionsraten (nach 3301 Tagen).....	56
Abbildung 59: Variante 2.1a, 5 K: Zeitliche Entwicklung der Grundwasserhöhen an den Extraktionsbrunnen (rot) und Injektionsbrunnen (blau) für den Simulationszeitraum von 10 Jahren. 57	57
Abbildung 60: Variante 2.1a, 5 K: Zeitliche Entwicklung der Grundwasserhöhen an den Extraktionsbrunnen (rot) und Injektionsbrunnen (blau) innerhalb eines Kalenderjahres.....	57
Abbildung 61: Grundwasserspiegeländerung an den vier Eckpunkten des Versickerungsbeckens im Schildkrötenkopf.....	58
Abbildung 62: Variante 2.1a, 5K: Durch den Anlagenbetrieb erzeugte Temperaturfahnen nach einer Simulationsdauer von 10 Jahren. ....	58
Abbildung 63: Variante 4, 5 K: Durch den Anlagenbetrieb bedingte Grundwasserspiegeländerung zum Zeitpunkt der größten Entnahme und Injektionsraten (nach 3301 Tagen) .....	60

Abbildung 64: Variante 4, 5 K: Zeitliche Entwicklung der Grundwasserhöhen an den Extraktionsbrunnen (rot) und Injektionsbrunnen (blau) für den Simulationszeitraum von 10 Jahren.	61
Abbildung 65: Variante 4, 5 K: Zeitliche Entwicklung der Grundwasserhöhen an den Extraktionsbrunnen (rot) und Injektionsbrunnen (blau) innerhalb eines Kalenderjahres.....	61
Abbildung 66: Variante 4, 5 K: Grundwasserspiegeländerung an den vier Eckpunkten des Versickerungsbeckens im Schildkrötenkopf.....	62
Abbildung 67: Variante 4, 5 K: Durch den Anlagenbetrieb erzeugte Temperaturfahnen nach einer Simulationsdauer von 10 Jahren. ....	62
Abbildung 68: Variante 5, 5 K: Durch den Anlagenbetrieb bedingte Grundwasserspiegeländerung zum Zeitpunkt der größten Entnahme und Injektionsraten (nach 3301 Tagen). ....	63
Abbildung 69: Variante 5, 5K: Zeitliche Entwicklung der Grundwasserhöhen an den Extraktionsbrunnen (rot) und Injektionsbrunnen (blau) für den Simulationszeitraum von 10 Jahren.....	64
Abbildung 70: Variante 5, 5 K: Zeitliche Entwicklung der Grundwasserhöhen an den Extraktionsbrunnen (rot) und Injektionsbrunnen (blau) innerhalb eines Kalenderjahres.....	64
Abbildung 71: Variante 5, 5 K: Grundwasserspiegeländerung an den vier Eckpunkten des Versickerungsbeckens im Schildkrötenkopf.....	65
Abbildung 72: Variante 5, 5 K: Durch den Anlagenbetrieb erzeugte Temperaturfahnen nach einer Simulationsdauer von 10 Jahren. ....	65
Abbildung 73: Variante 6, 5 K: Durch den Anlagenbetrieb bedingte Grundwasserspiegeländerung zum Zeitpunkt der größten Entnahme und Injektionsraten (nach 3301 Tagen) .....	67
Abbildung 74: Variante 6, 5 K: Zeitliche Entwicklung der Grundwasserhöhen an den Extraktionsbrunnen (rot) und Injektionsbrunnen (blau) für den Simulationszeitraum von 10 Jahren.	68
Abbildung 75: Variante 6, 5 K: Zeitliche Entwicklung der Grundwasserhöhen an den Extraktionsbrunnen (rot) und Injektionsbrunnen (blau) innerhalb eines Kalenderjahres.....	68
Abbildung 76: Variante 6, 5 K: Grundwasserspiegeländerung an den vier Eckpunkten des Versickerungsbeckens im Schildkrötenkopf.....	69
Abbildung 77: Variante 6, 5 K: Durch den Anlagenbetrieb erzeugte Temperaturfahnen nach einer Simulationsdauer von 10 Jahren. ....	69
Abbildung 78: Variante 7, 5 K: Durch den Anlagenbetrieb bedingte Grundwasserspiegeländerung zum Zeitpunkt der größten Entnahme und Injektionsraten (nach 3301 Tagen) .....	71
Abbildung 79: Flurabstand, basierend auf der GW-Spiegeländerung zum Zeitpunkt der Entnahmespitze und MHW 2019. ....	72
Abbildung 93: Variante 7, 5 K: Zeitliche Entwicklung der Grundwasserhöhen an den Extraktionsbrunnen (rot) und Injektionsbrunnen (blau) für den Simulationszeitraum von 10 Jahren.	73
Abbildung 94: Variante 7, 5 K: Zeitliche Entwicklung der Grundwasserhöhen an den Extraktionsbrunnen (rot) und Injektionsbrunnen (blau) innerhalb eines Kalenderjahres.....	73
Abbildung 95: Variante 7, 5 K: Grundwasserspiegeländerung an den vier Eckpunkten des Versickerungsbeckens im Schildkrötenkopf.....	74
Abbildung 96: Variante 7, 5 K: Durch den Anlagenbetrieb erzeugte Temperaturfahnen nach einer Simulationsdauer von 10 Jahren. ....	74
Abbildung 78: Überblick der Brunnenanordnungen der zu simulierenden Zusatzvarianten mit reduzierter Entnahmerate und 5 K Temperaturspreizung.....	75
Abbildung 79: Variante 7.1, 5 K: Durch den Anlagenbetrieb bedingte Grundwasserspiegeländerung zum Zeitpunkt der größten Entnahme und Injektionsraten (nach 3301 Tagen).....	77

Abbildung 80: Variante 7.1, 5 K: Flurabstand, basierend auf der GW-Spiegeländerung zum Zeitpunkt der Entnahmespitze und MHW 2019. ....	78
Abbildung 81: Variante 7.1, 5 K: Zeitliche Entwicklung der Grundwasserhöhen an den Extraktionsbrunnen (rot) und Injektionsbrunnen (blau) für den Simulationszeitraum von 10 Jahren. ....	79
Abbildung 82: Variante 7.1, 5 K: Zeitliche Entwicklung der Grundwasserhöhen an den Extraktionsbrunnen (rot) und Injektionsbrunnen (blau) innerhalb eines Kalenderjahres.....	80
Abbildung 83: Variante 7.1, 5K: Grundwasserspiegeländerung an den vier Eckpunkten des Versickerungsbeckens im Schildkrötenkopf.....	80
Abbildung 84: Variante 7.1, 5 K: Durch den Anlagenbetrieb erzeugte Temperaturfahnen nach einer Simulationsdauer von 10 Jahren. ....	81
Abbildung 85: Variante 7.2, 5 K: Durch den Anlagenbetrieb bedingte Grundwasserspiegeländerung zum Zeitpunkt der größten Entnahme und Injektionsraten (nach 3301 Tagen).....	82
Abbildung 86: Variante 7.2, 5 K: Flurabstand, basierend auf der GW-Spiegeländerung zum Zeitpunkt der Entnahmespitze und MHW 2019. ....	83
Abbildung 87: Variante 7.2, 5 K: Zeitliche Entwicklung der Grundwasserhöhen an den Extraktionsbrunnen (rot) und Injektionsbrunnen (blau) für den Simulationszeitraum von 10 Jahren. ....	84
Abbildung 88: Variante 7.2, 5 K: Zeitliche Entwicklung der Grundwasserhöhen an den Extraktionsbrunnen (rot) und Injektionsbrunnen (blau) innerhalb eines Kalenderjahres.....	85
Abbildung 89: Variante 7.2, 5 K: Grundwasserspiegeländerung an den vier Eckpunkten des Versickerungsbeckens im Schildkrötenkopf.....	85
Abbildung 90: Variante 7.2, 5 K: Durch den Anlagenbetrieb erzeugte Temperaturfahnen nach einer Simulationsdauer von 10 Jahren. ....	86
Abbildung 97: Variante 8, 5 K: Durch den Anlagenbetrieb bedingte Grundwasserspiegeländerung zum Zeitpunkt der größten Entnahme und Injektionsraten (nach 3301 Tagen). ....	88
Abbildung 98: Variante 8, 5 K: Flurabstand, basierend auf der GW-Spiegeländerung zum Zeitpunkt der Entnahmespitze und MHW 2019.....	89
Abbildung 99: Variante 8, 5 K: Zeitliche Entwicklung der Grundwasserhöhen an den Extraktionsbrunnen (rot) und Injektionsbrunnen (blau) für den Simulationszeitraum von 10 Jahren. ....	90
Abbildung 100: Variante 8, 5 K: Zeitliche Entwicklung der Grundwasserhöhen an den Extraktionsbrunnen (rot) und Injektionsbrunnen (blau) innerhalb eines Kalenderjahres.....	90
Abbildung 101: Variante 8, 5 K: Grundwasserspiegeländerung an den vier Eckpunkten des Versickerungsbeckens im Schildkrötenkopf.....	91
Abbildung 102: Variante 8, 5 K: Durch den Anlagenbetrieb erzeugte Temperaturfahnen nach einer Simulationsdauer von 10 Jahren. ....	91
Tabelle 1: Vergleich zwischen den Grundwasserhöhen gemessen und modelliert, vor und nach der Kalibrierung. ....	15
Tabelle 2: Wasserhaushaltsbilanz des stationären Strömungsmodells. ....	15

# 1 Aufgabenstellung und Zielsetzung

## 1.1 Datengrundlage

### 1.1.1 Verwendete Datenquellen

Für die Erstellung dieses Berichtes und des Modells wurden folgende Datenquellen verwendet:

- **Ohmer, M., Menberg K., Liesch T., Blum P., KIT (2020a):** Bericht: Numerisches Grundwassermodell zur Abschätzung der Grundwasserbeeinflussung einer geplanten thermischen Grundwassernutzung für das Neubaugebiet Freiburg-Dietenbach, Version vom 03.04.2020
- **Ohmer, M., Menberg K., Liesch T., Blum P., KIT (2020b):** Bericht: Fortführung des Numerischen Grundwassermodells für das Neubaugebiet Freiburg Dietenbach vom 23.12.2020
- **Wirsing, G. & Luz, A. (2007).** Hydrogeologischer Bau und Aquifereigenschaften der Lockergesteine im Oberrheingraben (Baden-Württemberg). – LGRB-Informationen, 19, S. 1–130.
- **Neumann, J. (2005):** Flächendifferenzierte Grundwasserneubildung von Deutschland - Entwicklung und Anwendung des makroskaligen Verfahrens HAD-GWNeu. Dissertation Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Halle/Saale.
- **VDI-Richtlinie 4640 Thermische Nutzung des Untergrundes Blatt 1 (2010):** „Grundlagen, Genehmigungen, Umweltaspekte“, Verband Deutscher Ingenieure e.V., Düsseldorf.
- **VDI-Richtlinie 4640 Thermische Nutzung des Untergrundes Blatt 2 (2019):** „Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen“, Verband Deutscher Ingenieure e.V., Düsseldorf.
- **DVGW W 107 (A) Technische Regel Arbeitsblatt 2016-02 (2016):** Aufbau und Anwendung numerischer Grundwassermodelle in Wassergewinnungsgebieten, Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V., Bonn.
- **Umweltministerium Baden-Württemberg, UMWB (2009):** Leitfaden zur Nutzung von Erdwärme mit Grundwasserwärmepumpen, Stuttgart.
- **Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V., DGG (2015):** Empfehlungen Oberflächennahe Geothermie – Planung, Bau, Betrieb und Überwachung, Hannover
- **Huisman, L (1972):** Groundwater Recovery. Macmillan Publishers, London.

### 1.1.2 Verwendete Software

Die Grundwassermodellierung wurde, wie bei den Modellen zuvor mit dem Softwarepaket FEFLOW (Version 7.3) durchgeführt. FEFLOW ist ein Finite-Element-Simulationssystem zur 3-dimensionalen Berechnung der Grundwasserströmung, Wärme- und des Stofftransports im Grundwasser. Für die Kalibrierung wurde FEPEST, eine Schnittstelle zwischen FEFLOW und PEST, verwendet. Dabei wird eine Zielfunktion durch iterative Veränderung der Modellparameter nach Levenberg-Marquardt minimiert.

## 2 Natürliche Grundwasserschwankung

Abbildung 1 zeigt die natürlichen jahreszeitlichen Schwankungen des Grundwasserspiegels an den Grundwassermessstellen 2110/070-6, 95/069-1 und 282/069-5. Die Lage der Grundwassermessstellen ist in Abbildung 3 dargestellt. Im Sommerhalbjahr sinkt das Grundwasser, da die Verdunstung bei höherer Temperatur und aktiver Vegetation groß ist. Im Winterhalbjahr wird es durch einen größeren versickernden Teil der Niederschläge wieder aufgefüllt. Die mittlere saisonale Grundwasserschwankung beträgt knapp einen Meter. Durch Hochwasserereignisse in den Monaten April bis Mai wurden in diesem Zeitraum Grundwasserhöhen von bis zu 2 m über dem Jahresdurchschnitt aufgezeichnet. Die aufgezeichnete maximale Schwankungsbreite in diesem Zeitraum beträgt 2,9 m.

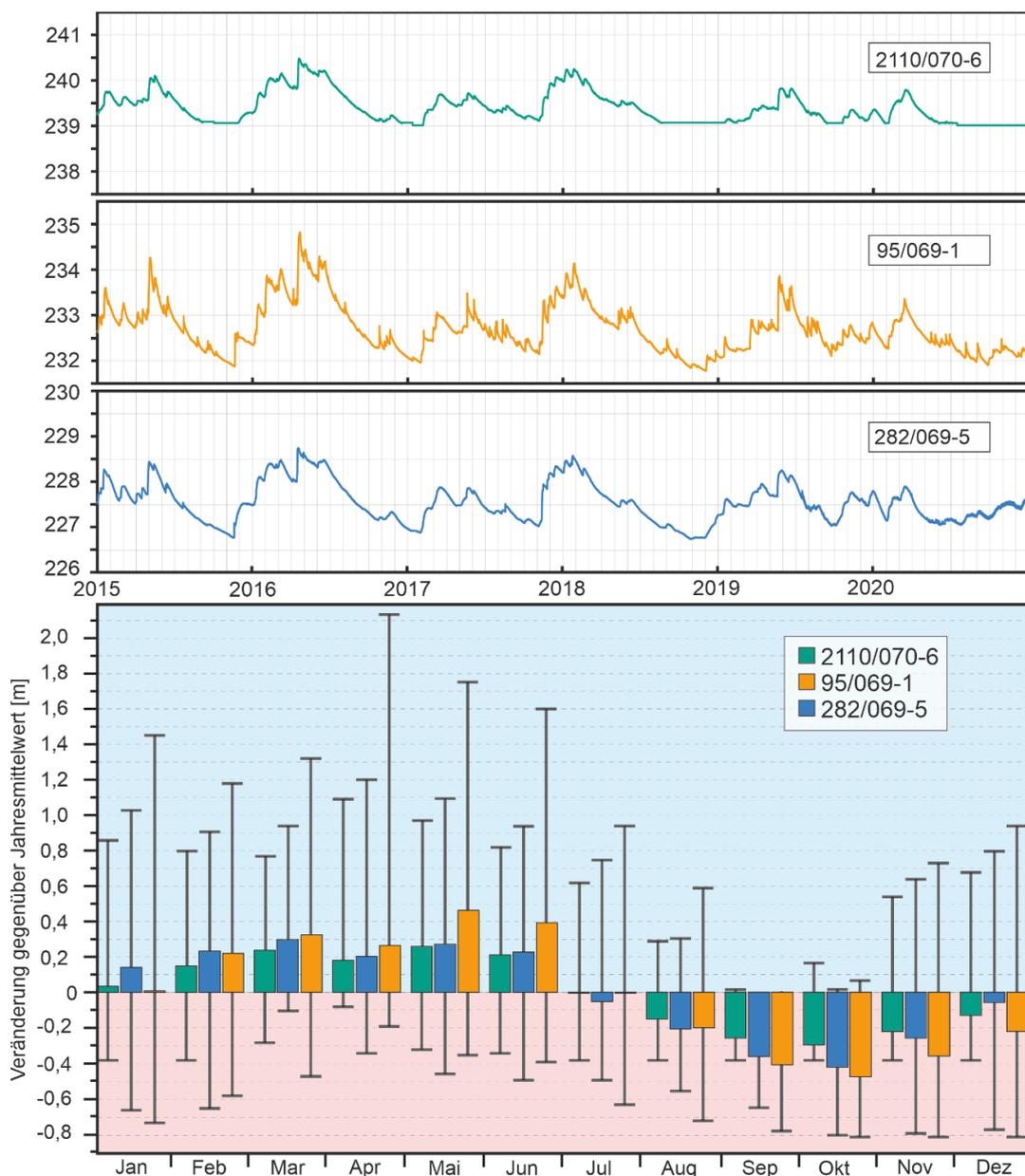


Abbildung 1: oben: Grundwasserganglinien der Messstellen 2110/070-6, 95/069-1 und 282/069-5 von Jan 2015 bis Dez 2021. Saisonale Veränderung der Grundwasserhöhe gegenüber dem Jahresmittelwert.

### 3 Flurabstand Mittlere Höchste Wasserstand 2019

Abbildung 2 zeigt den berechneten Flurabstand für das zukünftige Baugebiet Dietenbach. Datengrundlage bildet der Mittlere Höchste Wasserstand (MHW) Gleichenplan 2019 und ein digitales Geländemodell aus einer Laserbefliegung von 2017. Da MHW 2019 nur den direkten Bereich von Dietenbach abdeckt (siehe Abbildung 2), wurden die Bereiche außerhalb des Bereichs mit dem großräumigen MHW 2017 konstruiert. Der Flurabstand im baulich noch unveränderten Teil des Baugebietes Dietenbach liegt im Mittel bei 1,46 m. Die geringsten Flurabstände finden sich entlang der Verläufe von Dietenbach und Käserbach. Der Flurabstand an den Injektionsbrunnen entlang der Straße zum Tiergehege liegt zwischen 0,83 und 2,53 m. Entlang des Bollerstaudenweges (Rieselfeld) und im Bereich Parkplatz Mundenhof/ZMF-Standort ergeben sich bei MHW Flurabstände zwischen 3 und 6 m.

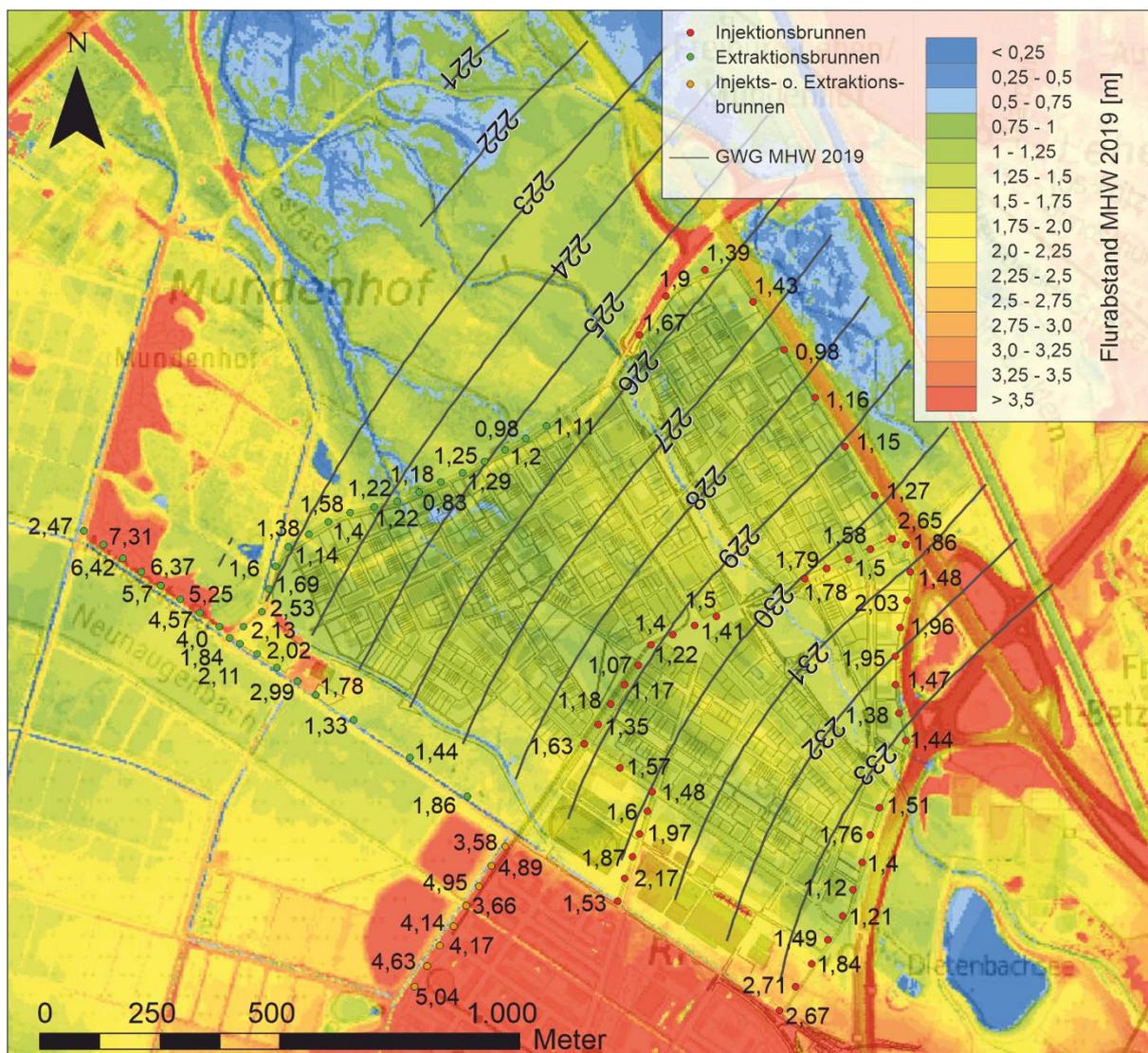


Abbildung 2: Grundwasserflurabstand im Bereich von Dietenbach. Basierend auf MHW 2019 (graue Linie) und Lidar-Geländemodell.

## 4 Aufbau des Modells

### 4.1 Modellgröße und Geometrie

Um die Auswirkung von Brunnen im Grundwasserabstrom entlang des Bollerstaudenwegs (Rieselfeld ausreichend zu simulieren, wurde das Modell in südwestlicher Richtung erweitert (Abbildung 3). Durch die zusätzliche Erweiterung des Modells in nordwestlicher Richtung sollen die Temperaturfahnen weitreichender abgebildet werden. Die neue Modellfläche beträgt nun 10,73 km<sup>2</sup> (vorher 6,3 km<sup>2</sup>). Der vertikale Modellaufbau ist zu den vorigen Modellen unverändert. Näheres dazu ist in den Berichten von Mai 2020 und Dezember 2020 zu finden. Um die aktuelle Anlagenplanung in das Modell zu implementieren, wurde die Modell-Diskretisierung neu aufgesetzt. Die Lage aller im Modell verwendeten Brunnen ist u.a. in Abbildung 2 zu finden.

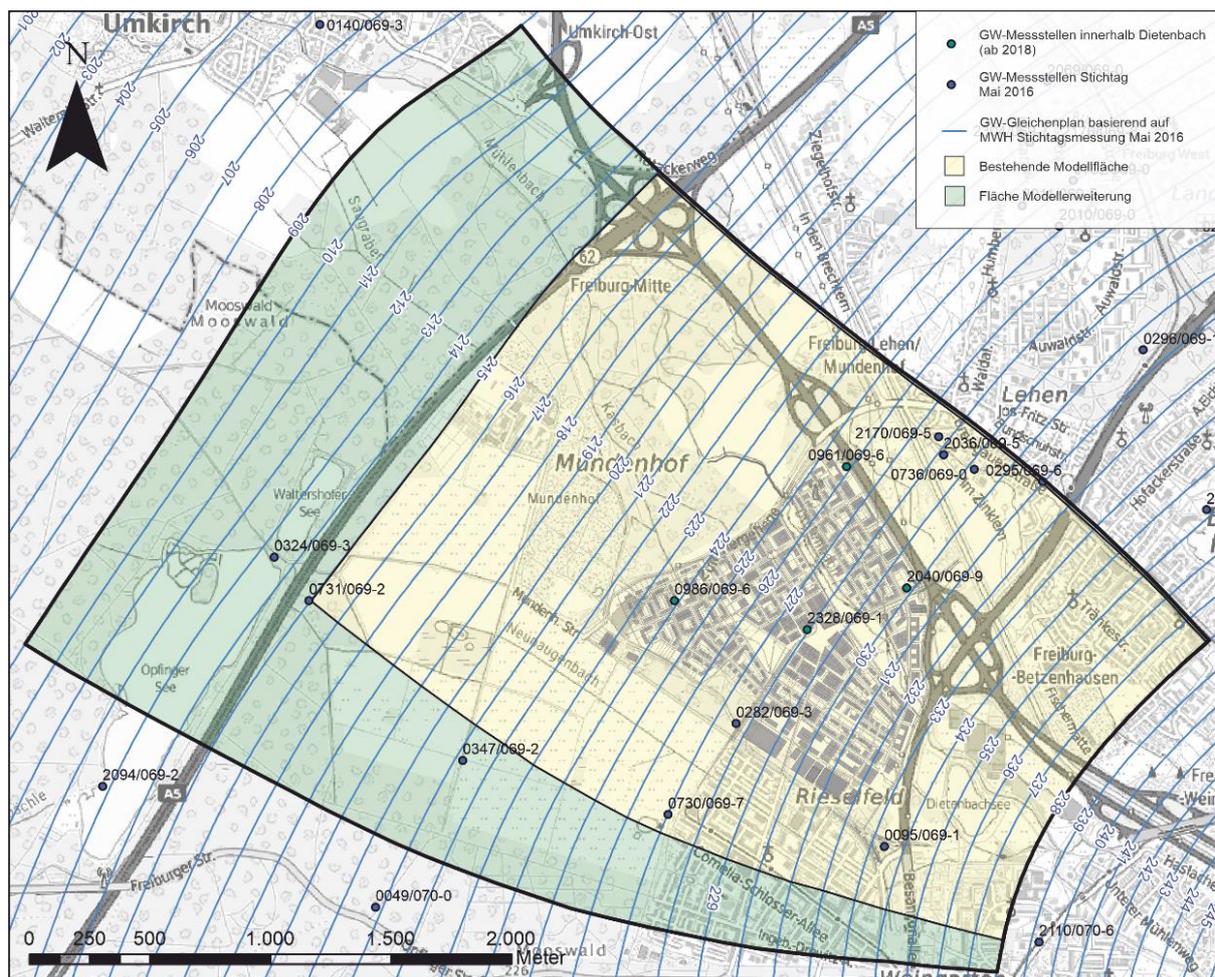


Abbildung 3: Modellerweiterung (grüne Fläche) in südwestlicher- und nordwestlicher Richtung.

## 4.2 Grenzen, Randbedingungen und Modellparameter

Die  $k_f$ -Wert-Verteilung ist zu dem Modell vom Dezember 2020 unverändert (Abbildung 4a). Die Zonen mit ähnlicher hydraulischer Durchlässigkeit wurden auf die erweiterten Modellflächen übertragen. Die Mächtigkeiten von Neuenburg-Formation (Oberer Grundwasserleiter) und Breisgau-Formation (Untere Grundwasserleiter), Randbedingungen sowie Modellparametrisierung sind zum Modell Dez. 2020 unverändert. Neuer Festpotentialrand (Randbedingung 1. Art) im Modellabstrom ist nun Grundwassergleiche 209 m (vorher 215 m) (siehe Abbildung 3). In Abbildung 5 ist die hydraulische Durchlässigkeitsverteilung des ersten Modells von Mai 2020 und ein Vergleich der hydraulischen Durchlässigkeiten beider Modelle dargestellt. Basierend auf den Ergebnissen der Pumpversuche zeigt das aktuelle Modell geringere hydraulische Durchlässigkeiten im Zustrom sowie südlich und westliche von Dietenbach. Entlang der Dreisam hat sich die Durchlässigkeit dagegen erhöht. Durch die geringeren  $k_f$ -Werte am Zustromrand verringert sich der laterale Grundwasserzustrom bei der stationären Modellsimulation um 29,5 %.

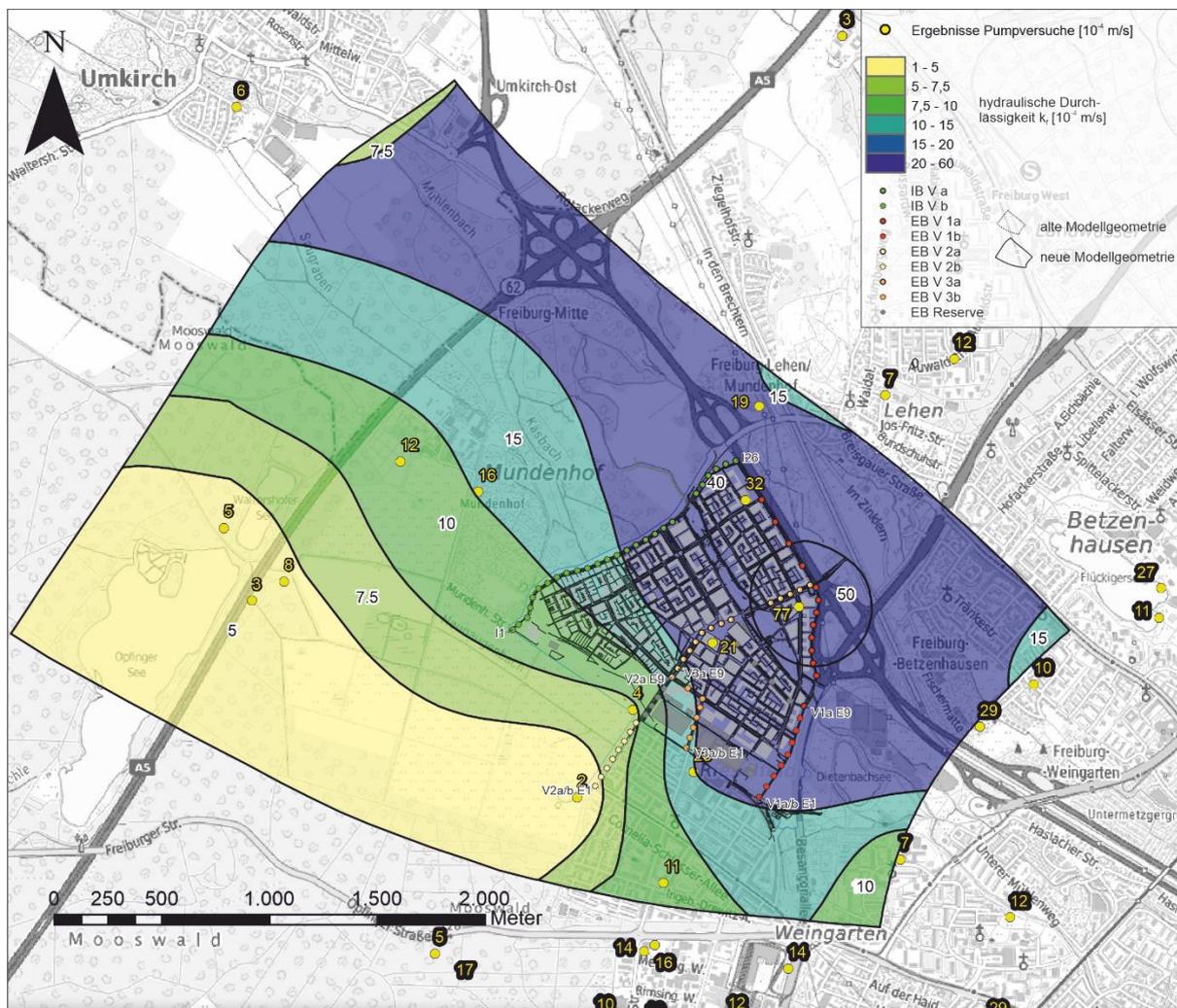


Abbildung 4: Verteilung der hydraulischen Durchlässigkeiten für den Oberen Grundwasserleiter.

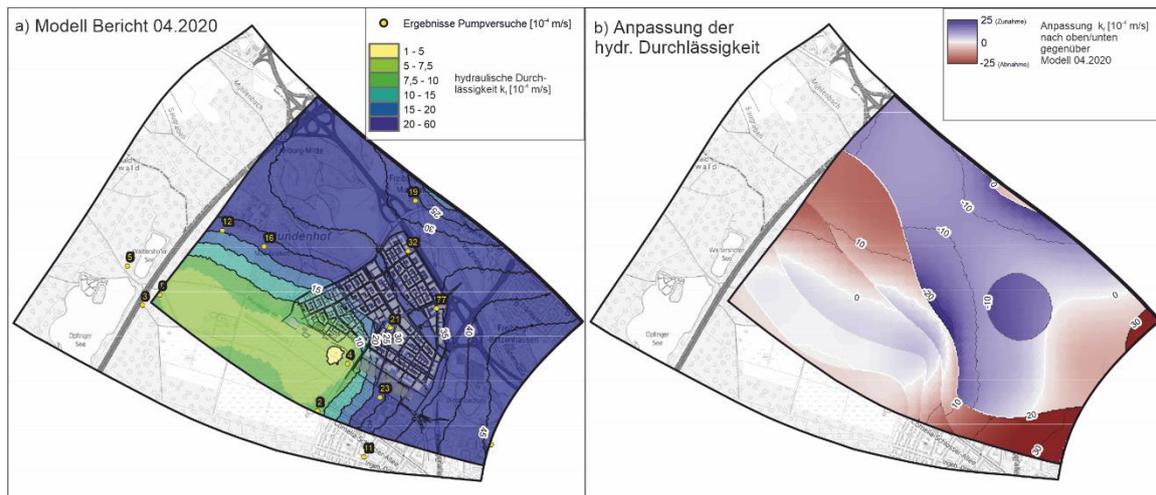


Abbildung 5: a): Verteilung der hydraulischen Durchlässigkeiten des ersten Modells von Mai 2020. b) Vergleich der hydraulischen Durchlässigkeiten des aktuellen Modells und des Modells von Mai 2020.

### 4.3 Bestimmung der Modellgüte

Zur Beurteilung der Qualität der Kalibrierung wurde der Mittlere Relative Fehler (mittlere absolute Abweichung zwischen berechneten und gemessenen Werten im Verhältnis zu der maximalen Differenz der Standrohrspiegelhöhen im Modellraum) sowie der Mittlere Absolute Fehler (Mean Absolute Error, MAE) und das Bestimmtheitsmaß  $R^2$  errechnet. Die Ergebnisse der stationären Kalibrierung finden sich in Tabelle 1 und Abbildung 6. Aufgrund der Modellerweiterung wurden zusätzlich zu den vier Grundwassermessstellen innerhalb von Dietenbach (0961/069-6, 0986/069-6, 2040/069-9, 2328/069-1) neun weitere Messstellen im Modellbereich verwendet. Da für diese Messstellen keine Daten für den Zeitraum 2018 vorliegen, wurde eine MHW Stichtagsmessung von Mai 2017 für diese Messstellen verwendet. Der mittlere relative Fehler beträgt 2,97 %. Somit kann nach DVGW W 107 von einer guten stationären Modellanpassung gesprochen werden.

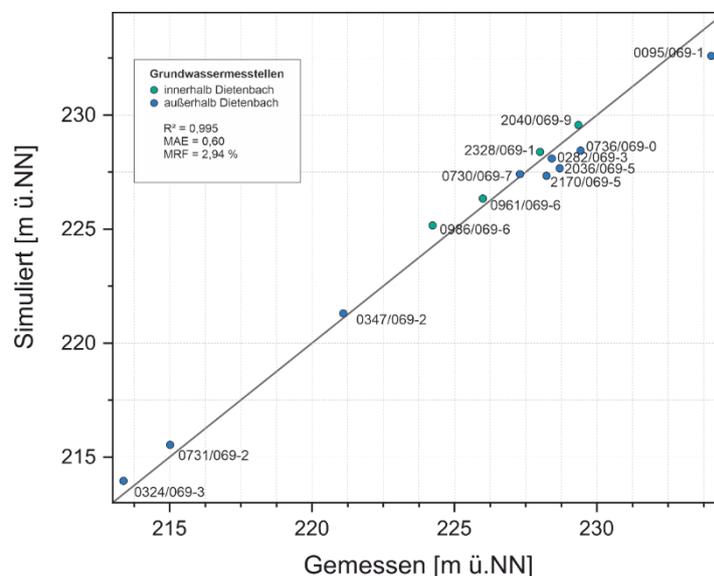


Abbildung 6: Ergebnisse der stationären Kalibrierung.

Tabelle 1: Vergleich zwischen den Grundwasserhöhen gemessen und modelliert, vor und nach der Kalibrierung.

Messstellen- Nummer	Rechts- wert	Hoch- wert	GW-Höhe [m ü. NN], gemessen	GW-Höhe [m ü. NN], kalibriert (KIT 2020)	Zeitraum
0961/069-6	3410210	5320194	226,00	226,35	2018 (Mittel)
0986/069-6	3409497	5319633	224,24	225,01	2018 (Mittel)
2040/069-9	3410461	5319687	229,35	230,10	2018 (Mittel)
2328/069-1	3410048	5319512	228,01	228,30	2018 (Mittel)
0095/069-1	3410349	5318685	234,01	232,73	MHW Mai 2016
0282/069-3	3409734	5319199	228,42	228,15	MHW Mai 2016
0324/069-3	3407817	5319894	213,38	213,46	MHW Mai 2016
0347/069-2	3408599	5319044	221,09	221,08	MHW Mai 2016
0730/069-7	3409453	5318818	227,30	227,47	MHW Mai 2016
0736/069-0	3410723	5320262	229,35	229,27	MHW Mai 2016
2036/069-5	3410596	5320323	228,70	227,70	MHW Mai 2016
2170/069-5	3410575	5320399	228,24	227,36	MHW Mai 2016
0731/069-2	3407961	5319712	215,02	215,0	MHW Mai 2016

#### 4.4 Wasserhaushaltsbilanz

Die Ergebnisse der modellinternen Wasserbilanz finden sich in Tabelle 2. Die einzelnen Größen erscheinen plausibel. Die Abweichung zwischen Zu- und Abstrom in der Wasserbilanz ist mit unter 0,005 % vernachlässigbar.

Tabelle 2: Wasserhaushaltsbilanz des stationären Strömungsmodells.

	Zuflüsse [m <sup>3</sup> /d]	Abflüsse [m <sup>3</sup> /d]	Zuflüsse [%]	Abflüsse [%]
<b>Festpotential (West/Ost)</b>	65.959	65.959	92.4	100
<b>Grundwasserneubildung</b>	5438.2	0	7.6	0
<b>Summe</b>	71.355,2	71.355,2	100	100

## 5 Implementierung des Neubaugebietes Freiburg-Dietenbach

### 5.1 Wärmebedarf

Die verwendeten Entnahme- und Infiltrationsraten basieren auf den von EGS-plan zur Verfügung gestellten täglichen Wärmebedarfsprofilen das gesamte Baugebiet Dietenbach (Varianten a) und für den Bauabschnitt 1 (Variante b). Es erfolgt eine Simulation der Raten mit einer Temperaturspreizung von 5K (orange Linie) und 4K (blaue Linie).

Der jährliche Energiebedarf, der über die Brunnen gedeckt werden soll, liegt bei 27.870 MWh mit einer Jahreshöchstleistung von 11.370 kW am 25. Januar. Nach der Formel (1) ergibt sich eine jährliche Entnahmemenge 5,99 Mio. m<sup>3</sup> bei 4 K und 4.77 Mio. m<sup>3</sup> bei 5 K-Temperaturspreizung. Die maximale Entnahmerate liegt bei 4 K bei 2.444 m<sup>3</sup>/h und bei 5 K bei 1.955m<sup>3</sup>/h.

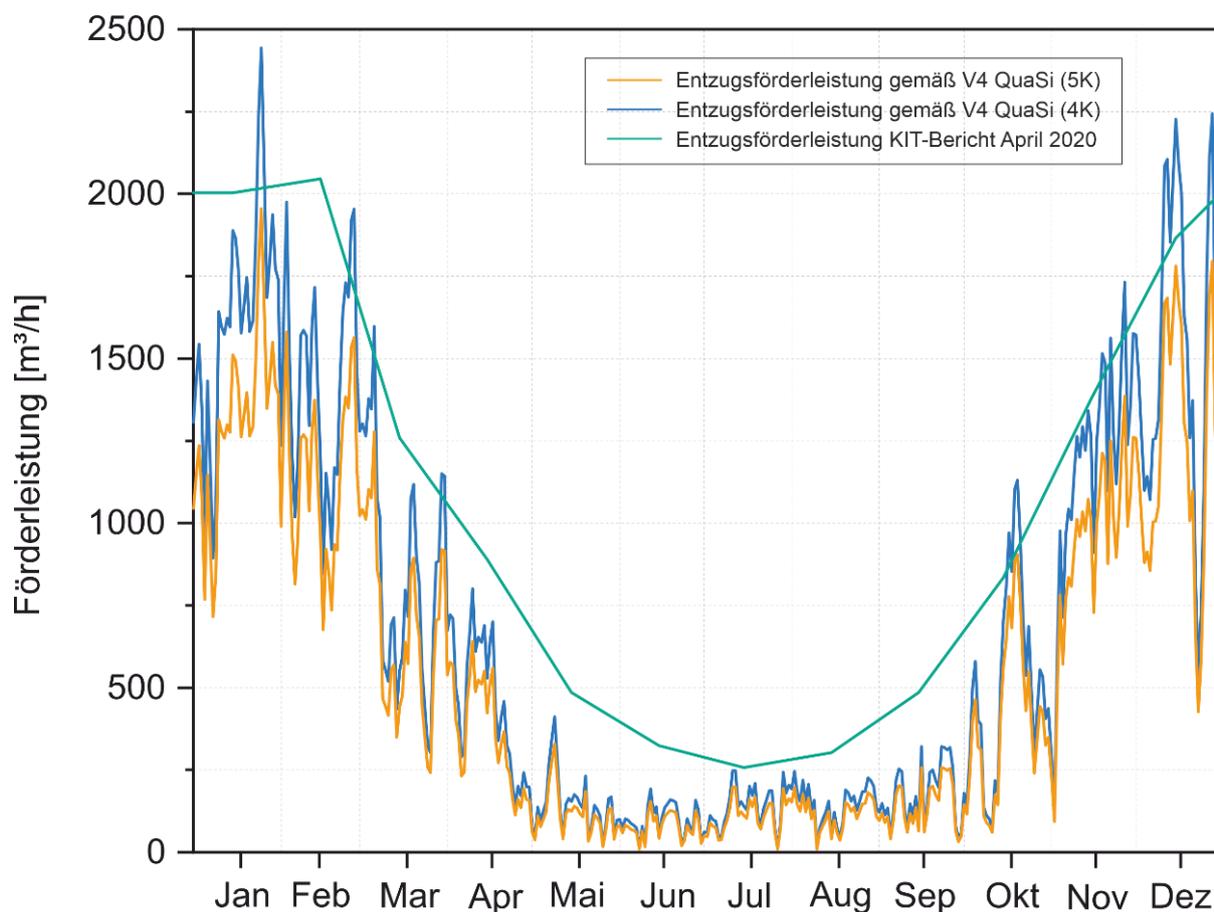


Abbildung 7: Verwendete Jahreswärmeprofile auf Tagesbasis für Temperaturspreizungen von 4 K (orange) und 5 K (blau). Grüne Linie: Im Bericht Mai 2020 verwendetes Jahreswärmeprofil.

## 6 Modellergebnisse

Die nachfolgenden Abschnitte zeigen die Ergebnisse der drei Modellvarianten 1a-3a. Zusätzlich wurden drei Untervarianten 1b-3b zur Deckung des 1. Bauabschnitts (BA 1) mit einer reduzierten Anzahl an Brunnen und Raten gerechnet. Die Brunnen sollen so modular im Laufe der Bauabschnitte erweitert werden. Die Simulationen wurden sowohl mit einer Temperaturspreizung von 5 K und 4 K durchgeführt. Bei allen Varianten befinden sich die Galerie der Injektionsbrunnen entlang der Straße zum Tiergehege zwischen Mundenhofer Str. und B31a. In Variante 1 werden die Entnahmebrunnen gemäß den Lokationen des ersten Modells vom Mai 2020 im Grundwasser-Zustrom von Dietenbach, entlang der Besançonallee, implementiert. In Variante 2 liegen die Entnahmebrunnen entlang des Bollerstaudenweges, in Variante 3 im Bereich des Schulcampus/Verlängerung Carl-von-Ossietzky-Straße. In Abschnitt 6.1 werden die Ergebnisse der Varianten mit einer Temperaturspreizung von 5K dargestellt, die Ergebnisse mit einer Spreizung von 4 K in Abschnitt 6.2. In Abschnitt 6.3 finden sich die Ergebnisse der zusätzlich beauftragten Varianten 2.1a und Varianten 4-7. Die Entnahme- und Injektionsraten wurde entsprechend der Fassungsvermögen auf die Brunnen verteilt.

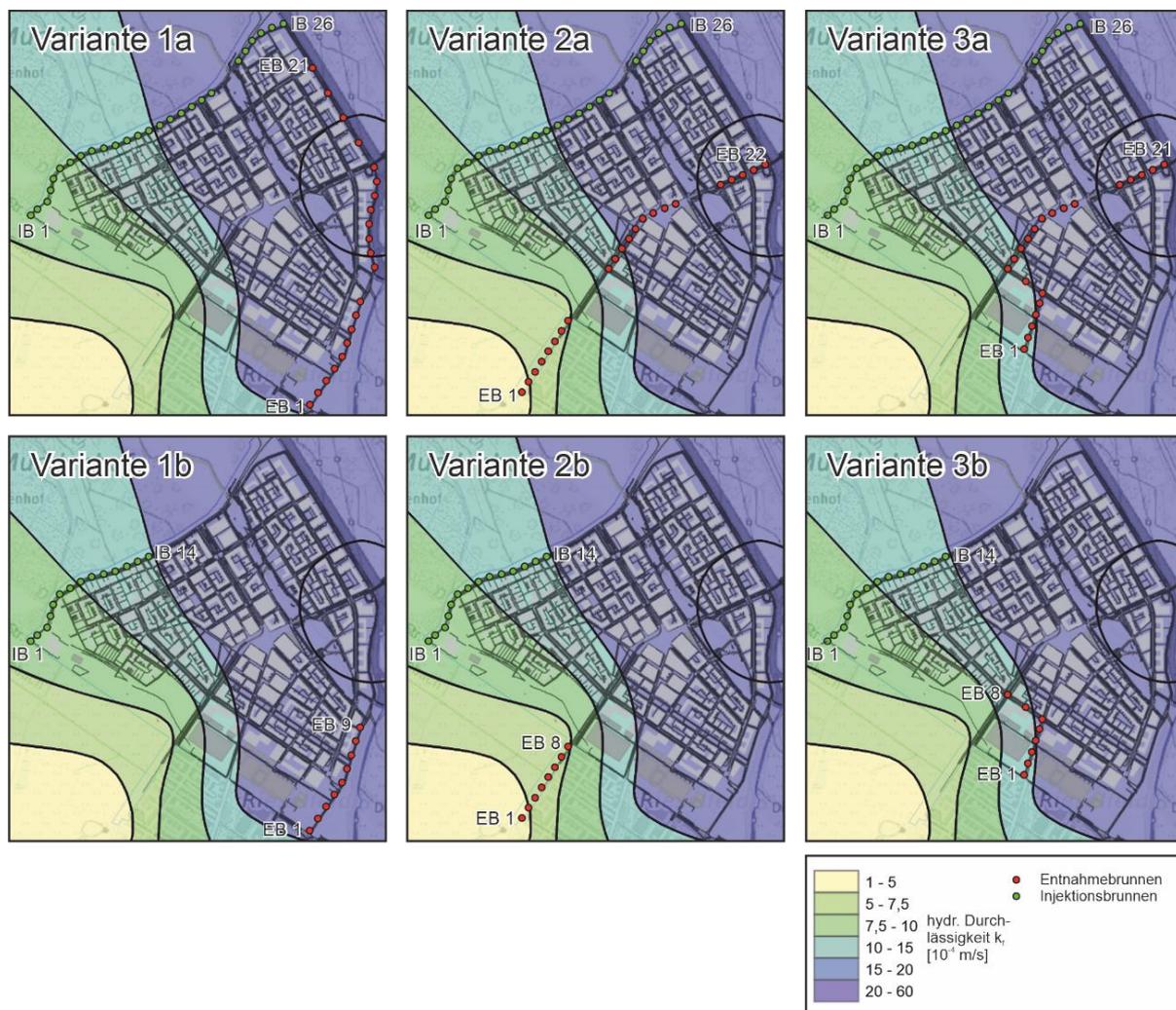


Abbildung 8: Überblick der Brunnenanordnungen der zu simulierenden Varianten. Variante a: Abdeckung Gesamtwärmebedarf Dietenbach Varianten b: Abdeckung Wärmebedarf Bauabschnitt 1.

## 6.1 Varianten mit 5 K-Temperaturspreizung

### 6.1.1 Variante 1a, 5K

In Variante 1a, 5K wurde eine Brunnengalerie aus 21 Entnahmehäusern im südöstlichen Zustrombereich von Dietenbach, entlang der Besançonallee und B31a und eine Brunnengalerie von 26 Infiltrationsbrunnen entlang der Straße zum Tiergehege konzipiert. Die Brunnen haben einen Mindestabstand von 50 m zueinander. Abbildung 9 zeigt die berechnete Grundwasseroberfläche zum Zeitpunkt der maximalen Entnahme- und Infiltrationsrate von 1.955 m<sup>3</sup>/h bzw. zum Zeitpunkt der größten zu erwartenden Grundwasserabsenkung nach 3.301 Tagen (25. Januar). Im Bereich des Versickerungsbeckens im Schildkrötenkopf kommt es bei diesem Szenario zu einer GW-Erhöhung von über 50 cm. Auch im Bereich des 3. Bauabschnitts kommt es zu einer saisonalen GW-Erhöhung von über 1 m. Die Entnahmen führen zu lokalen Grundwasserspiegelsenkungen innerhalb der Entnahmehäusern von bis zu 1,31 m und zu Aufhöhungen von bis zu 1,52 m innerhalb der Infiltrationsbrunnen (Abbildung 10). Abbildung 11 zeigt den saisonalen Verlauf der induzierten GW-Änderung innerhalb der Brunnen. Von Ende November bis Ende Februar liegt die GW-Spiegeländerung lokal über 1 m. Abbildung 12 zeigt die Ausbreitung der Temperaturfahnen nach 10 Jahren. Zu Temperaturerniedrigungen über 1 K kommt es nur im nahen Abstrombereich der Infiltrationsbrunnen. Im weiteren Abstrom der Anlagen ist die Temperaturerniedrigung weniger als 1,5 K.

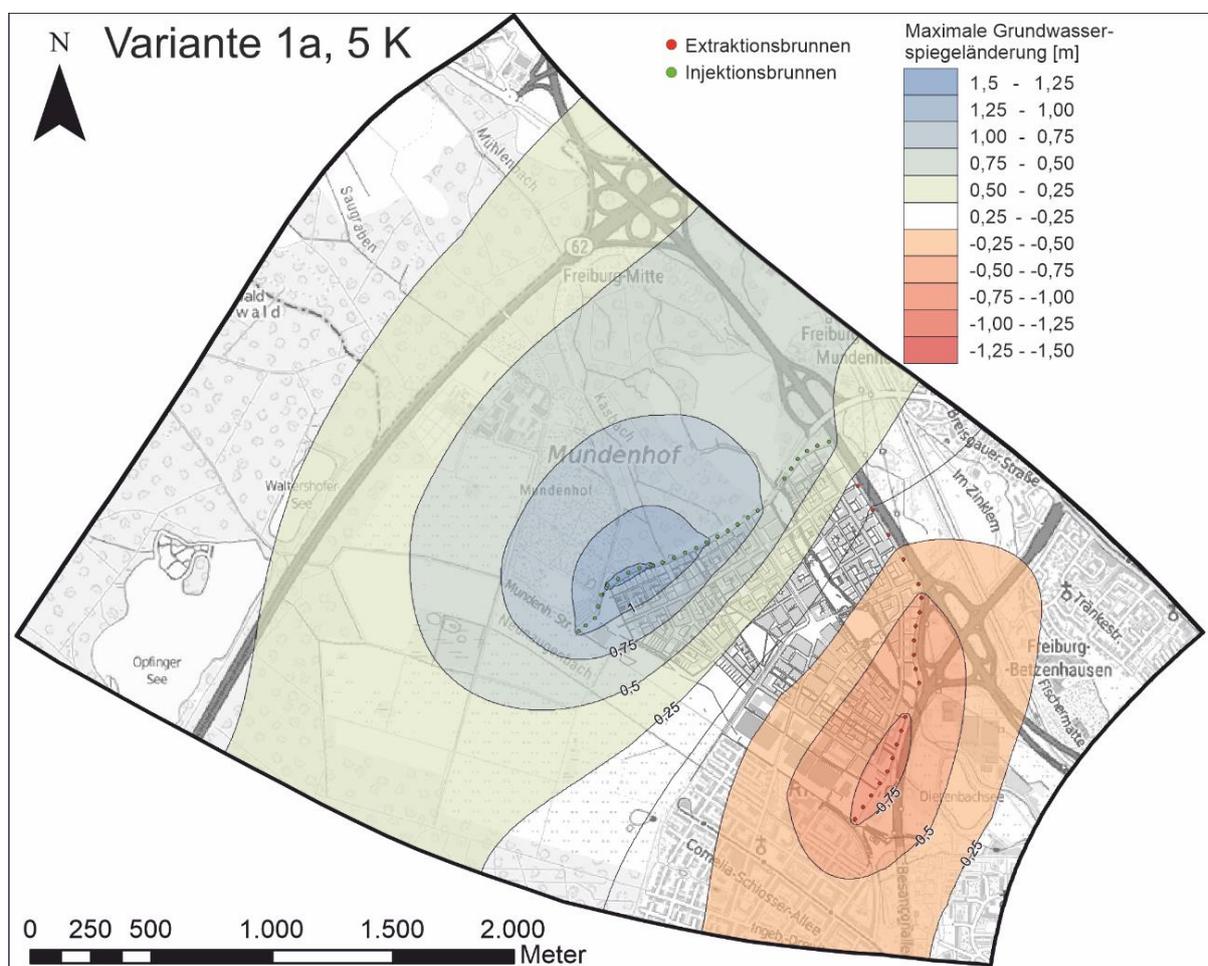


Abbildung 9: Variante 1a, 5 K: Durch den Anlagenbetrieb bedingte Grundwasserspiegeländerung zum Zeitpunkt der größten Entnahme und Injektionsraten (nach 3301 Tagen).

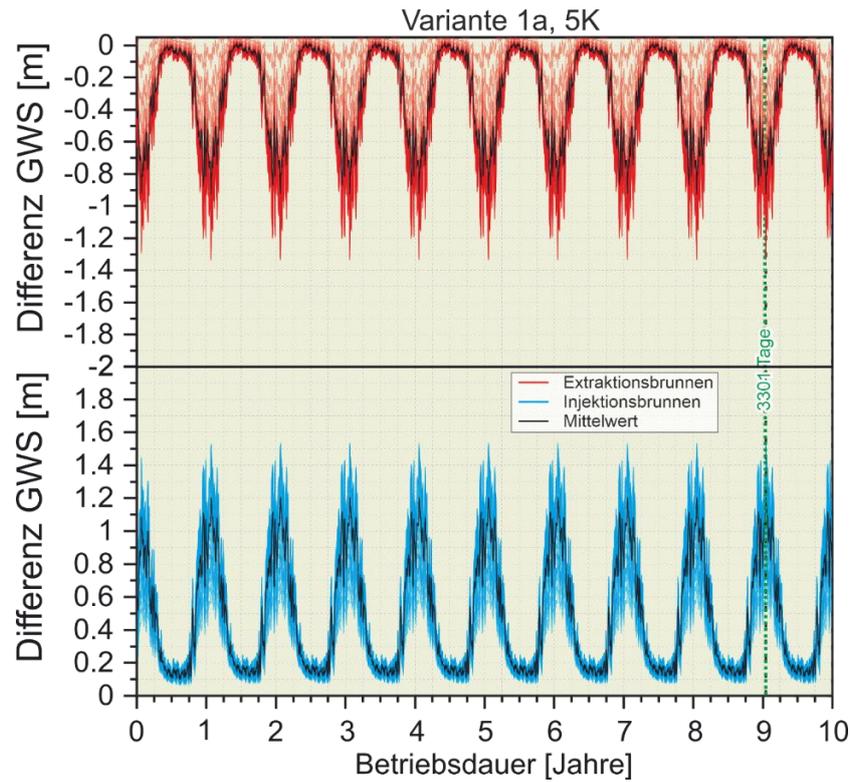


Abbildung 10: Variante 1a, 5 K: Zeitliche Entwicklung der Grundwasserhöhen an den Extraktionsbrunnen (rot) und Injektionsbrunnen (blau) für den Simulationszeitraum von 10 Jahren.

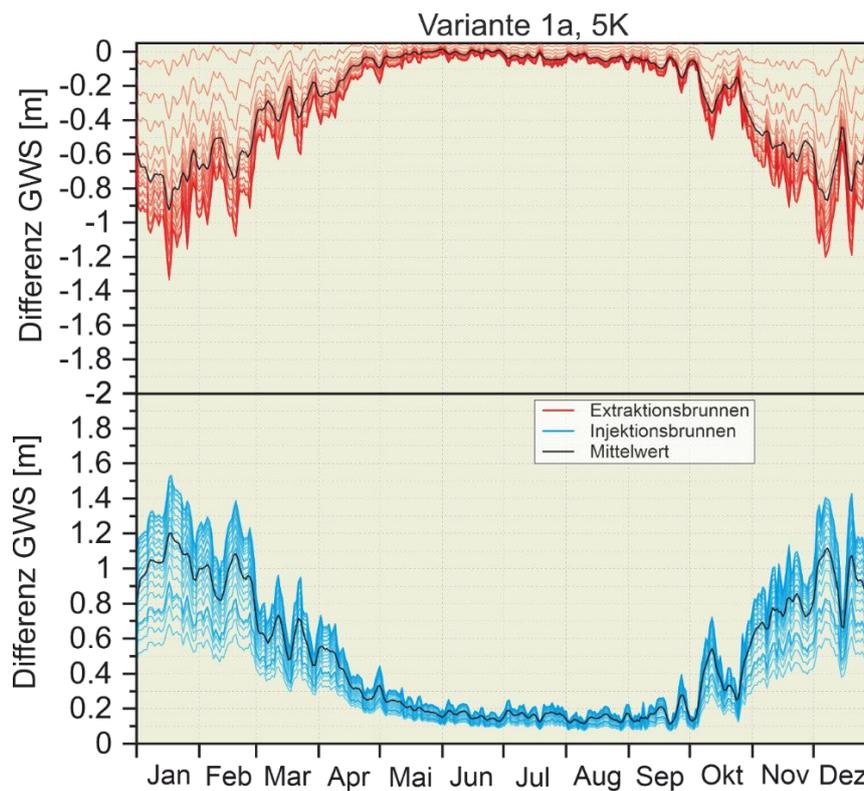


Abbildung 11: Variante 1a, 5 K: Zeitliche Entwicklung der Grundwasserhöhen an den Extraktionsbrunnen (rot) und Injektionsbrunnen (blau) innerhalb eines Kalenderjahres.

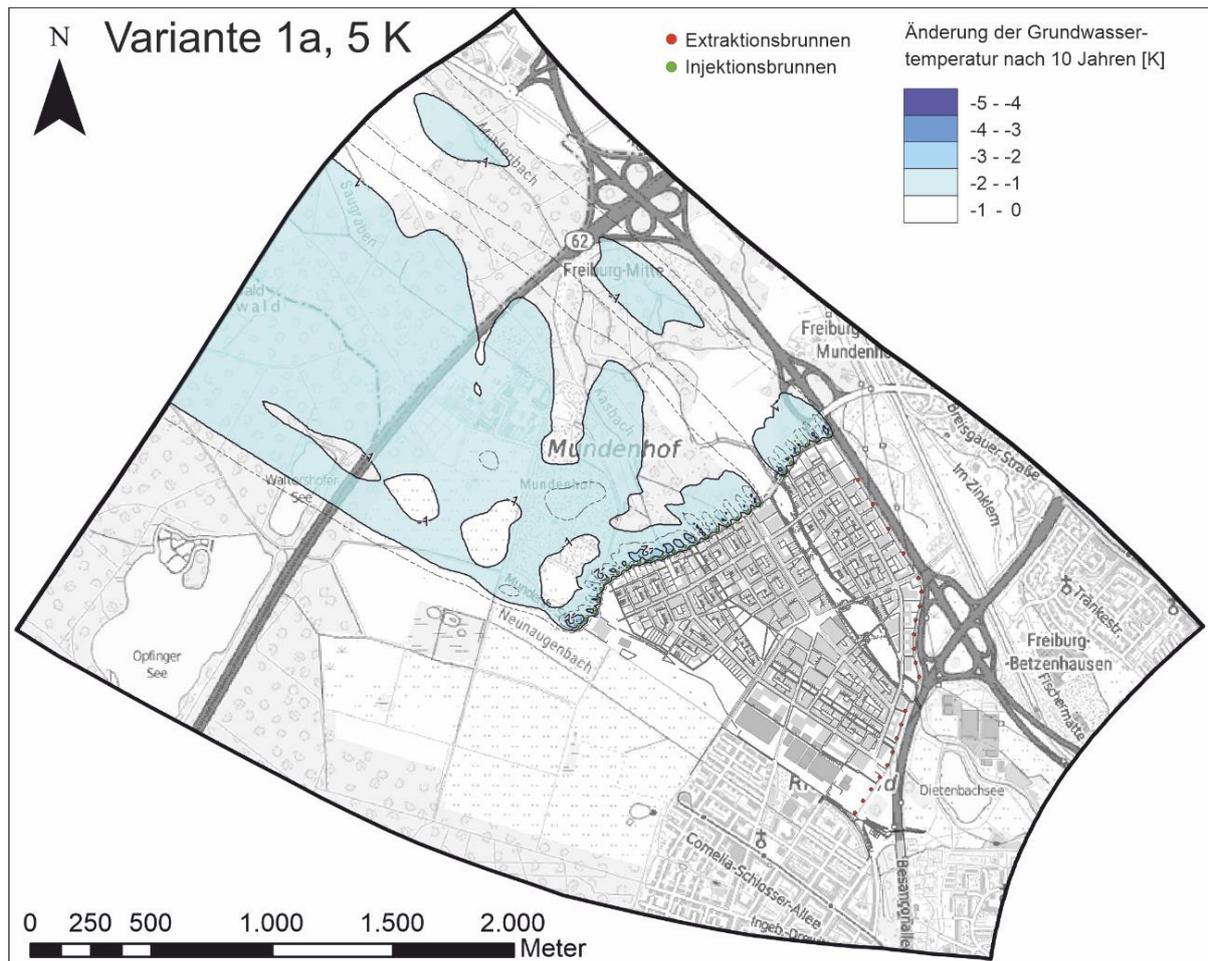


Abbildung 12: Variante 1a, 5 K: Durch den Anlagenbetrieb erzeugte Temperaturfahnen nach einer Simulationsdauer von 10 Jahren.

### 6.1.2 Variante 2a, 5 K

In Variante 2 liegen die Entnahmebrunnen entlang des Bollerstaudenweges und im Bereich der zukünftigen S-Bahn-Trasse. Der Standort der 26 Injektionsbrunnen ist zur Variante 1a unverändert. Die Brunnen besitzen einen Mindestabstand von 50 m. In Abbildung 13 ist die berechnete Grundwasseroberfläche nach 3.301 Tagen, zum Zeitpunkt der maximalen Entnahme- und Infiltrationsrate von  $1.955 \text{ m}^3/\text{h}$  dargestellt. Die Aufhöhung im Bereich des Versickerungsbeckens liegt zwischen 0,5 , und 0,75 m. Wie bei Variante 1 führen die Injektionsbrunnen im südwestlichen Teil der Straße zum Tiergehege zu einer GW-Aufhöhung von knapp 1 m, bis in das Gebiet des 3 Bauabschnittes hinein. Bei den Entnahmebrunnen zeigt sich die größte Absenkung, aufgrund der dortigen vergleichsweise geringen hydraulischen Durchlässigkeit, im Bereich Bollerstaudenweg. Diese liegt am Rand von Rieselfeld über 1 m. Die südwestlichen Injektionsbrunnen zeigen zum Zeitpunkt der Spitzenlast GW-Aufhöhungen von bis zu 1,33 m (Abbildung 14 und Abbildung 15). Dies liegt teilweise über dem Flurabstand für diesen Bereich (Abbildung 2) Für die Extraktionsbrunnen ergeben sich Absenkungen von bis zu 1,26 m. Die resultierende Kältefahne nach 10 Jahren ist nahezu identisch mit der von Variante 1. Temperatureniedrigungen über 1 K gibt es nur im nahen Abstrombereich der Brunnen. Im weiteren Abstrom liegt die Temperatureniedrigung unter 1,5 K.

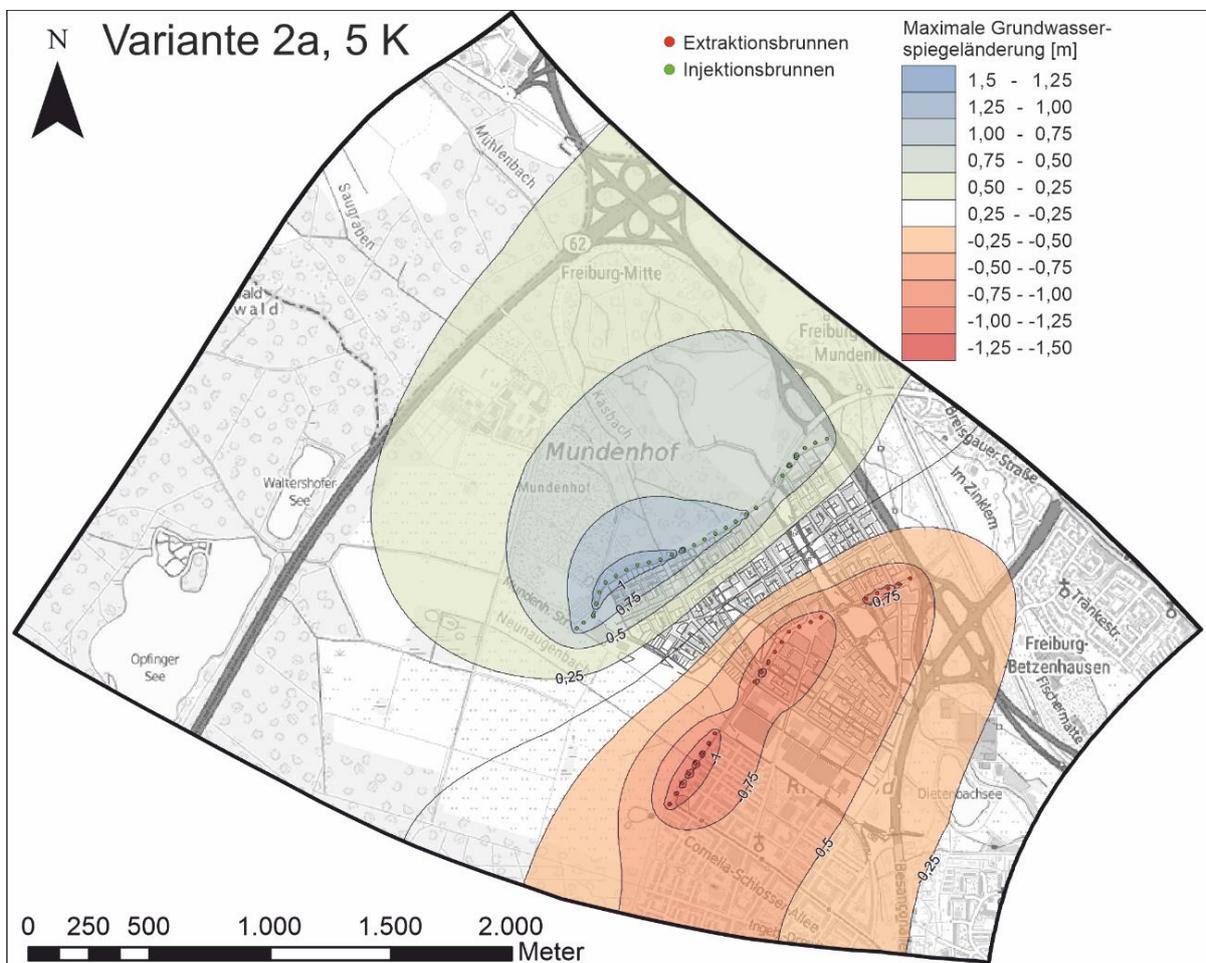


Abbildung 13: Variante 2a, 5K: Durch den Anlagenbetrieb bedingte Grundwasserspiegeländerung zum Zeitpunkt der größten Entnahme und Injektionsraten (nach 3301 Tagen).

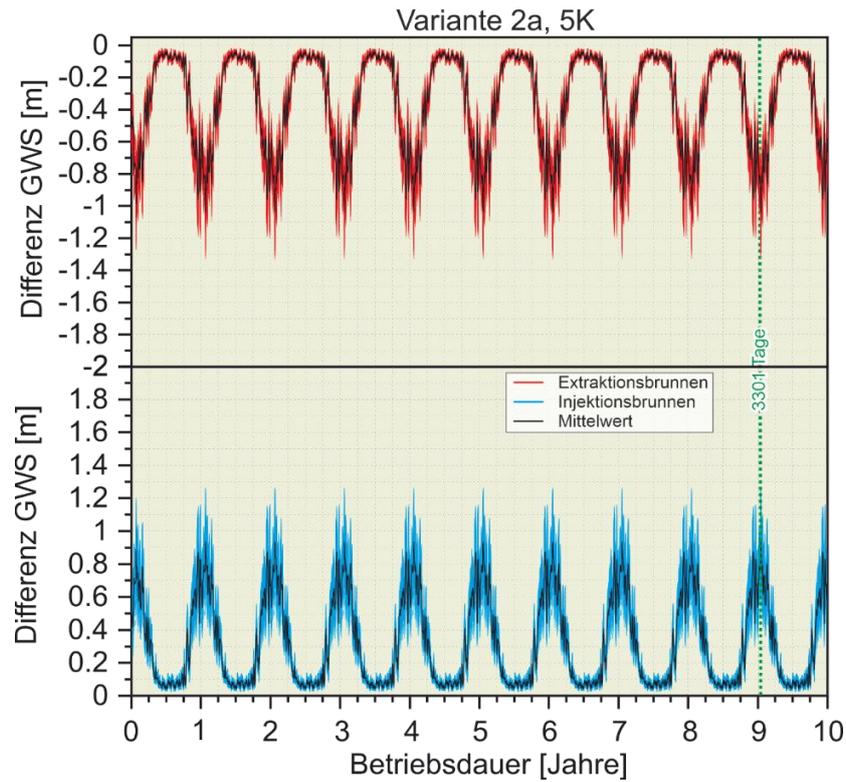


Abbildung 14: Variante 2a, 5K: Zeitliche Entwicklung der Grundwasserhöhen an den Extraktionsbrunnen (rot) und Injektionsbrunnen (blau) für den Simulationszeitraum von 10 Jahren.

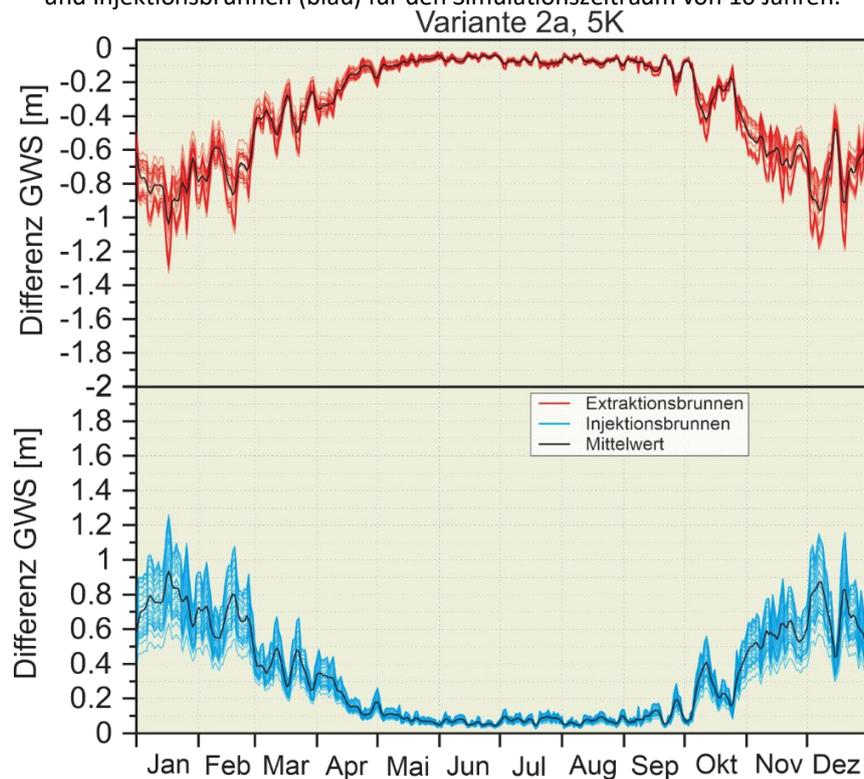


Abbildung 15: Variante 2a, 5K: Zeitliche Entwicklung der Grundwasserhöhen an den Extraktionsbrunnen (rot) und Injektionsbrunnen (blau) innerhalb eines Kalenderjahres.

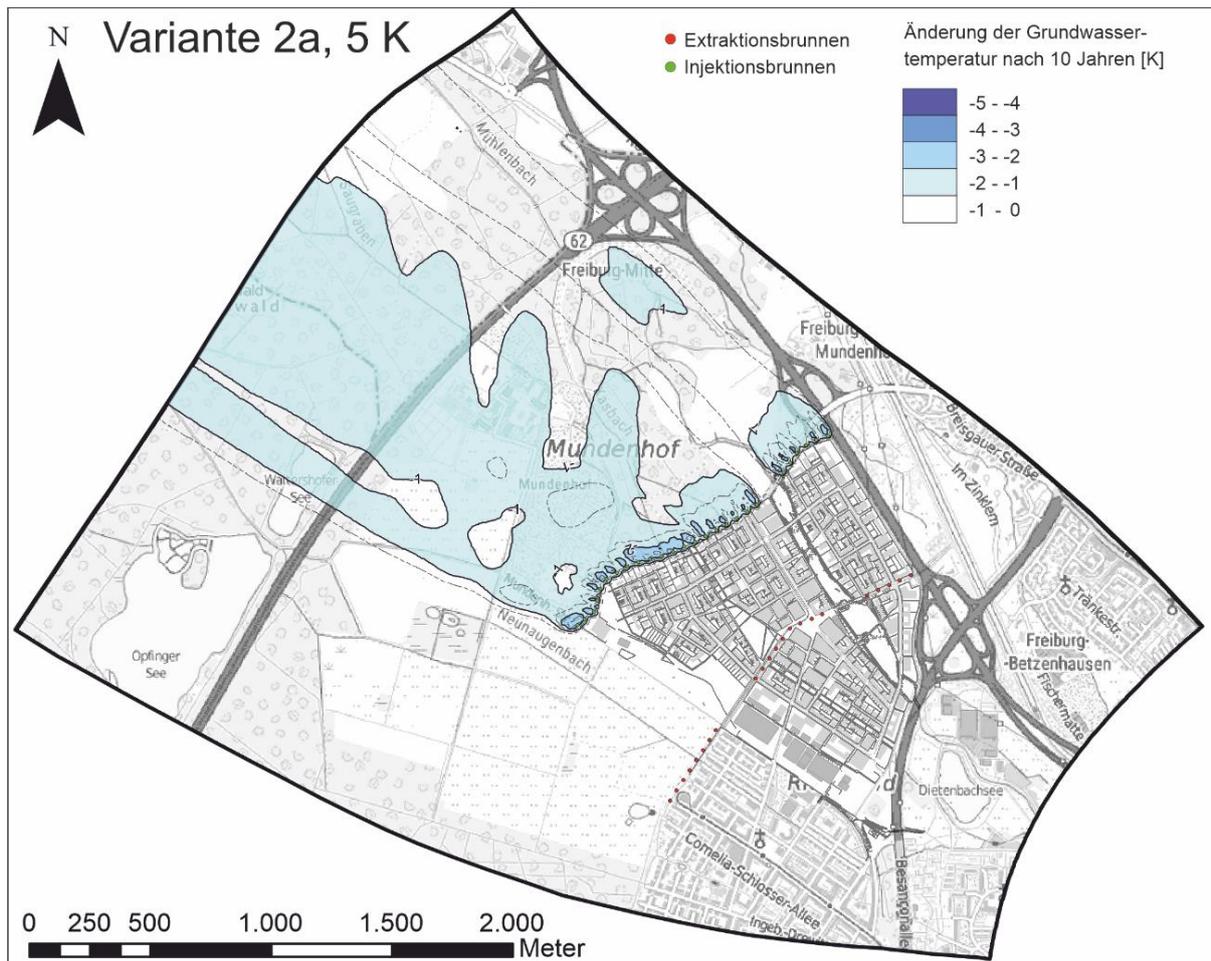


Abbildung 16: Variante 2a, 5K: Durch den Anlagenbetrieb erzeugte Temperaturfahnen nach einer Simulationsdauer von 10 Jahren.

### 6.1.3 Variante 3a, 5 K

In Variante 3a, 5 K ist die Entnahme entlang einer Brunnengalerie im Bereich des Schulcampus/Carl-von-Ossietsky-Str mit 21 Entnahmepumpen in das Modell implementiert. Lokation und Anordnung der Schluckbrunnen ist gegenüber der Varianten 1a und 2 a unverändert. Auch hier haben die Brunnen einen Mindestabstand von 50m zueinander. Abbildung 17 zeigt die durch den Anlagenbetrieb bedingte maximal zu erwartenden Grundwasserspiegeländerung nach 3031 Tagen, dem Zeitpunkt der Jahreshöchstleistung. Auch bei dieser Variante führen die GW-Injektionen zu einer Erhöhung der Grundwasseroberfläche im Bereich des Versickerungsbeckens im Schildkrötenkopf über 0,5m. Am Rand des Bauabschnittes 3 kommt es zu einer Erhöhung von bis zu 1m. Die Aufhöhung innerhalb der Infiltrationsbrunnen im südwestlichen Bereich der Straße zum Tiergehege liegt in der Spitze bei bis zu 1,28 m (Abbildung 18 und Abbildung 19). Die Aufhöhung liegt somit an manchen Bereichen über dem dortigen Flurabstand (Abbildung 2). Die größten Absenkungen ereignen sich mit bis zu 1,44 m im Bereich der Carl-von-Ossietsky-Str. Die Temperaturfahnen zeigen nur lokal im Brunnennahfeld Veränderung der GW-Temperatur über 2 Grad.

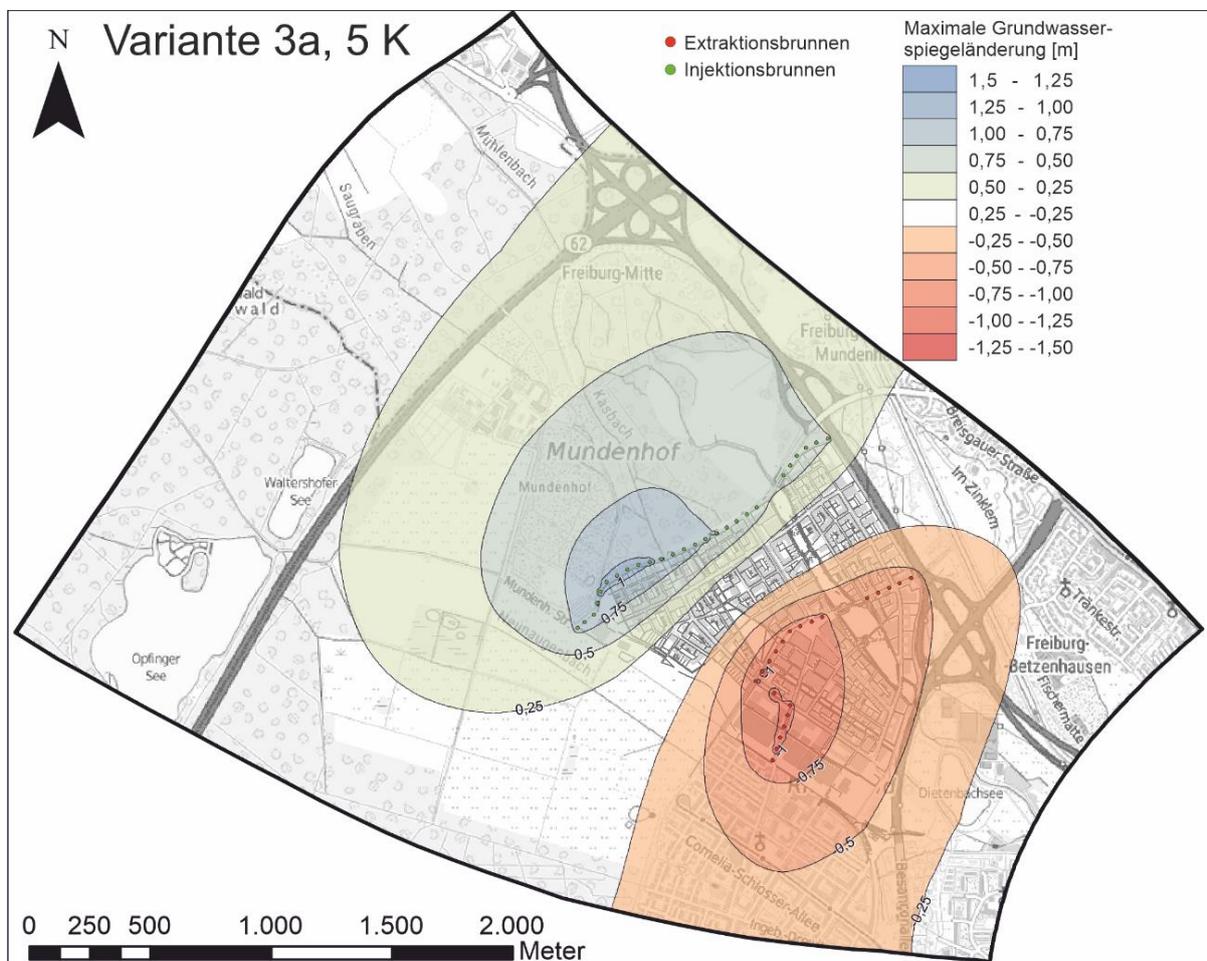


Abbildung 17: Variante 3a, 5K: Durch den Anlagenbetrieb bedingte Grundwasserspiegeländerung zum Zeitpunkt der größten Entnahme und Injektionsraten (nach 3301 Tagen).

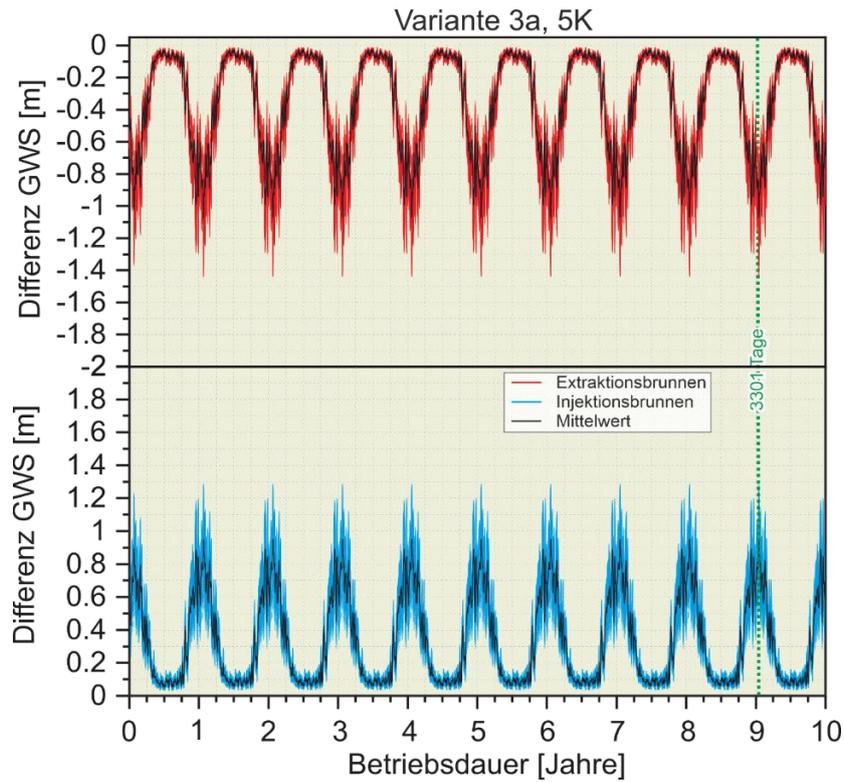


Abbildung 18: Variante 3a, 5K: Zeitliche Entwicklung der Grundwasserhöhen an den Extraktionsbrunnen (rot) und Injektionsbrunnen (blau) für den Simulationszeitraum von 10 Jahren.

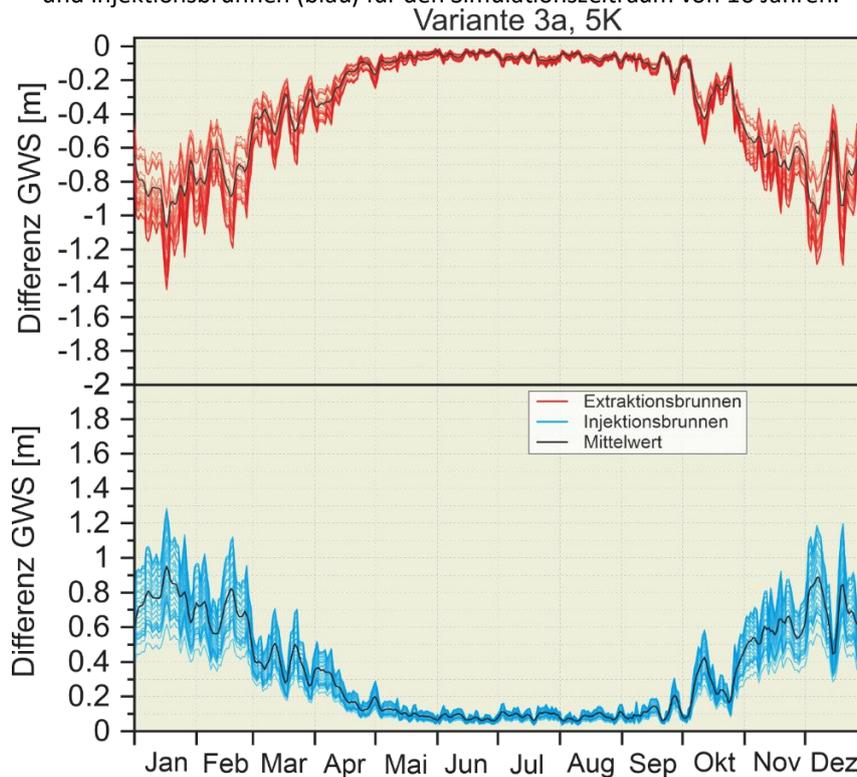


Abbildung 19: Variante 3a, 5K: Zeitliche Entwicklung der Grundwasserhöhen an den Extraktionsbrunnen (rot) und Injektionsbrunnen (blau) innerhalb eines Kalenderjahres.

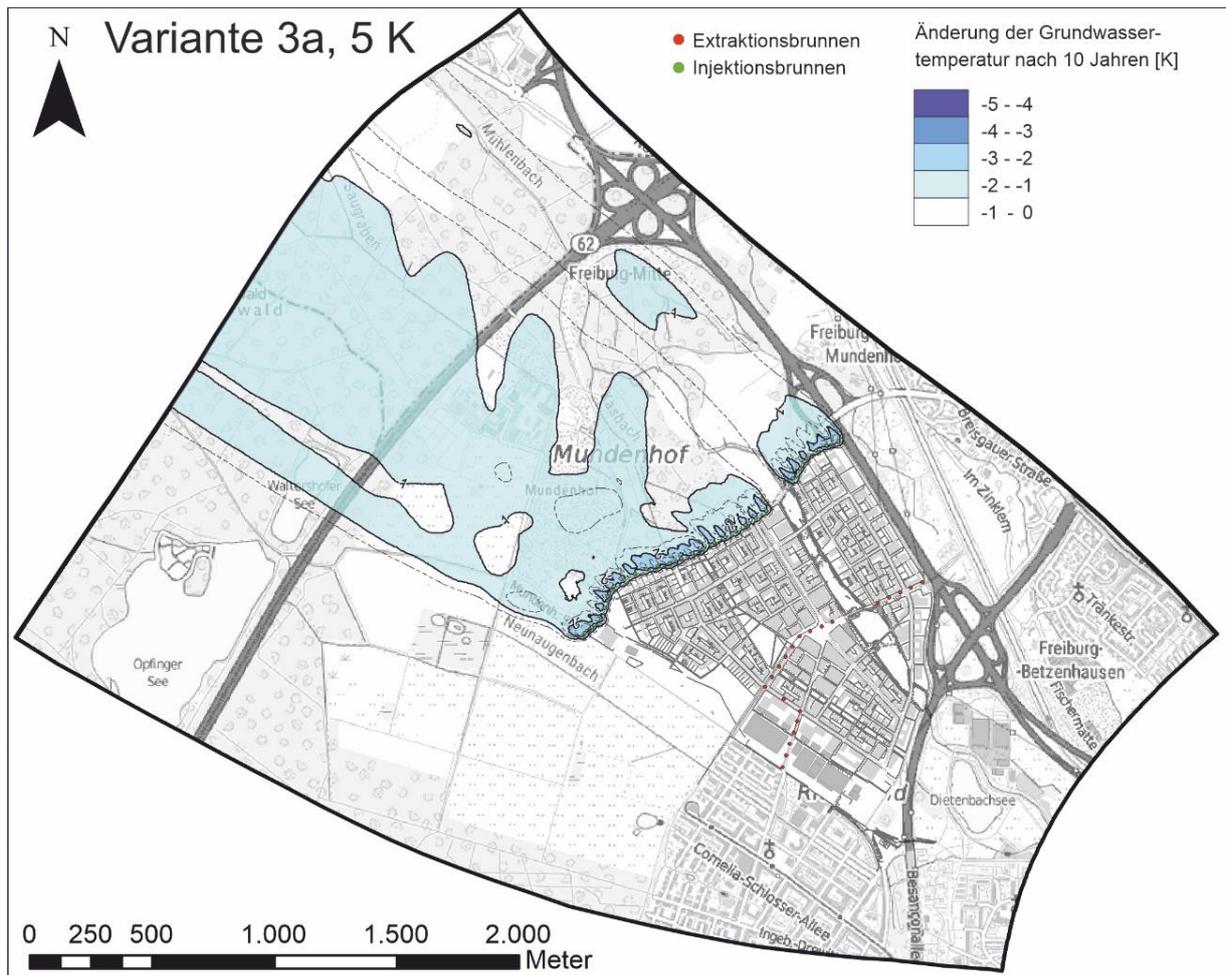


Abbildung 20: Variante 3a, 5K: Durch den Anlagenbetrieb erzeugte Temperaturfahnen nach einer Simulationsdauer von 10 Jahren.

#### 6.1.4 Variante 1b, 5 K

Variante 1 b, 5 K ist eine an Variante 1 a angelehnte Variante mit reduzierter Anzahl an Brunnen und verringertem Energieentzug zur ausschließlichen Deckung des Wärmebedarfs des Bauabschnittes 1. Die 14 Injektionsbrunnen liegen entlang der Straße zum Tiergehege zwischen Parkplatz Mundenhof und Käserbach. Die 9 Extraktionsbrunnen liegen entlang der Achse Besançonallee zwischen Kreisel und Anschlussstelle B 31a. Die Brunnen haben einen Mindestabstand von 50 m. Abbildung 21 zeigt die durch den Anlagenbetrieb größte zu erwartender Änderung des Grundwasserspiegels zum Zeitpunkt der Jahresspitzenlast. Die Absenkung innerhalb der Extraktionsbrunnen liegt unter 2 cm die höchste Aufhöhung innerhalb der Schluckbrunnen unter 3 cm (Abbildung 22 und Abbildung 23). Die Injektionsbrunnen erzeugen lokal begrenzte Kältefahnen mit einer Ausdehnung der 1K Isolinie in Strömungsrichtung unter 300 m (Abbildung 24).

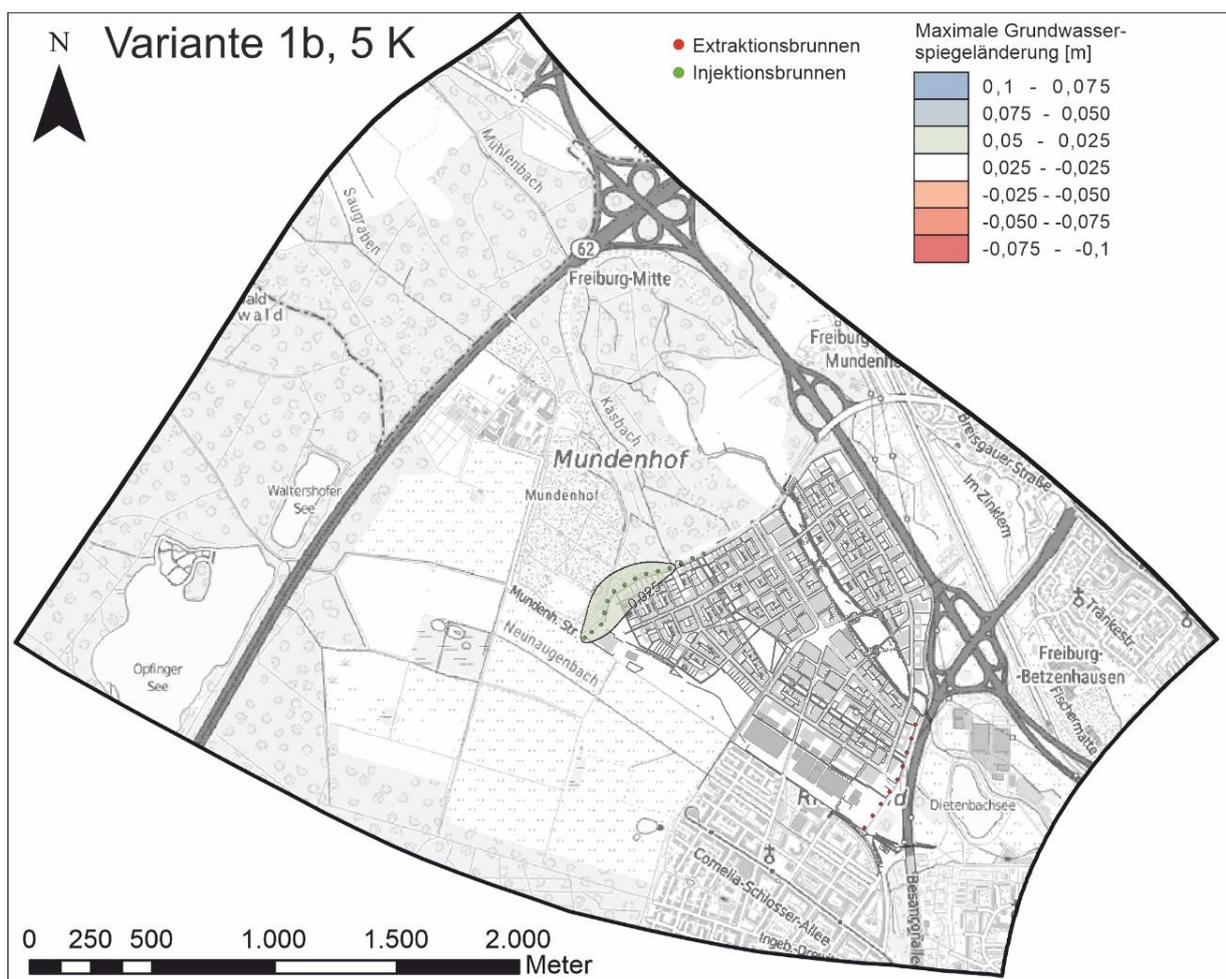


Abbildung 21: Variante 1b, 5K: Durch den Anlagenbetrieb bedingte Grundwasserspiegeländerung zum Zeitpunkt der größten Entnahme und Injektionsraten (nach 3301 Tagen).

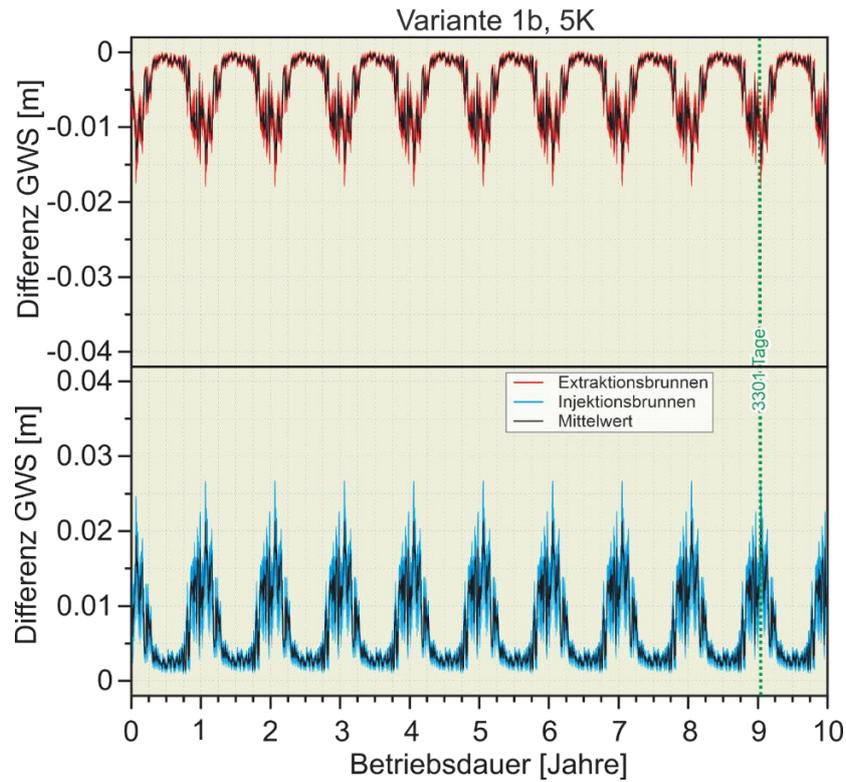


Abbildung 22: Variante 1b, 5K: Zeitliche Entwicklung der Grundwasserhöhen an den Extraktionsbrunnen (rot) und Injektionsbrunnen (blau) für den Simulationszeitraum von 10 Jahren.

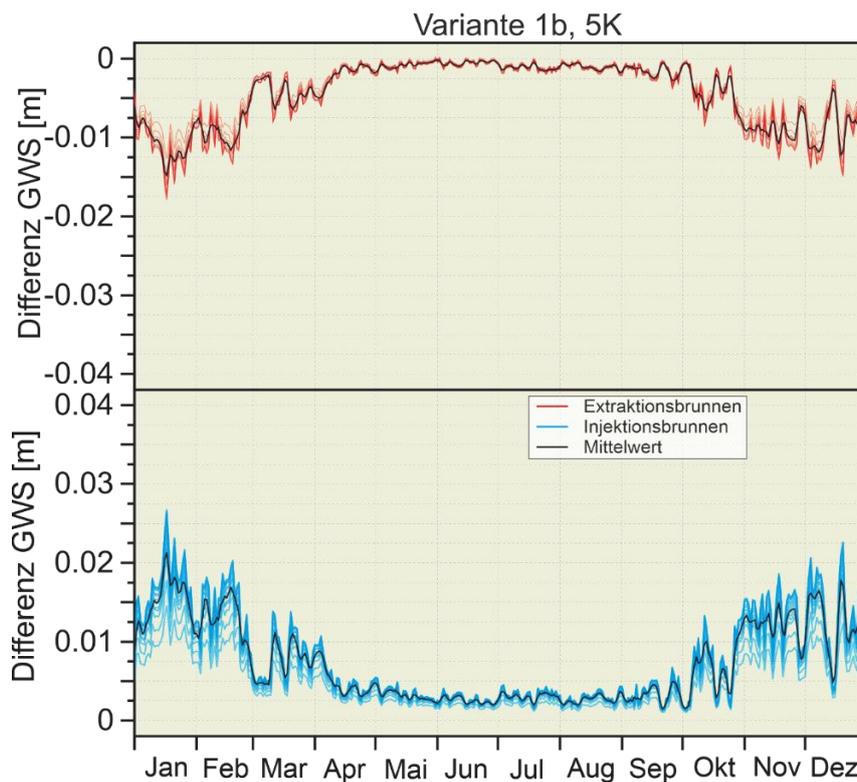


Abbildung 23: Variante 1b, 5K: Zeitliche Entwicklung der Grundwasserhöhen an den Extraktionsbrunnen (rot) und Injektionsbrunnen (blau) innerhalb eines Kalenderjahres.

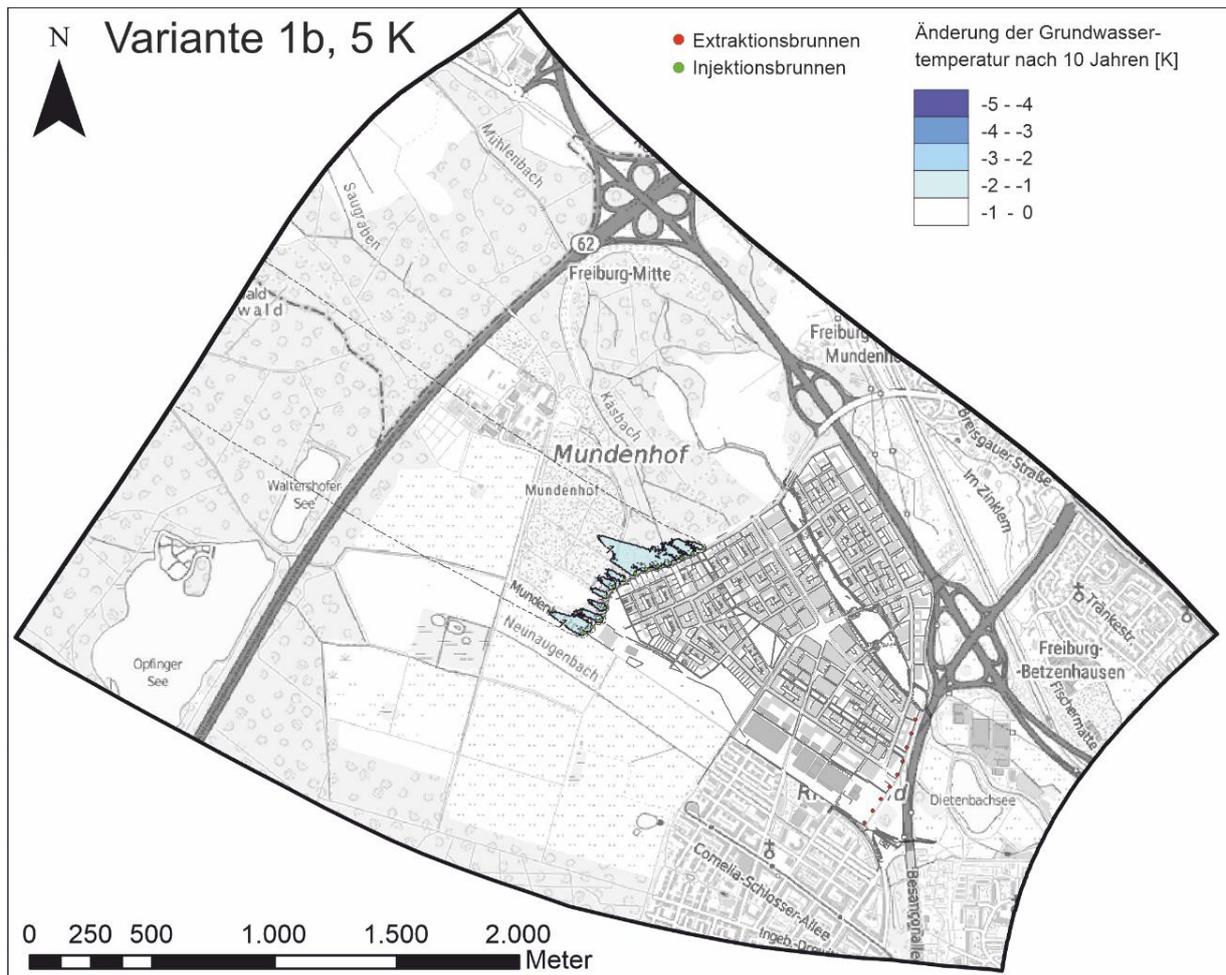


Abbildung 24: Variante 1b, 5K: Durch den Anlagenbetrieb erzeugte Temperaturfahnen nach einer Simulationsdauer von 10 Jahren.

### 6.1.5 Variante 2b, 5K

Anzahl und Lokation der Injektionsbrunnen ist identisch mit der Variante 1b. Die 8 Extraktionsbrunnen sind entlang des Bollerstaudenweges in das Modell implementiert. Der Mindestabstand der Brunnen beträgt 50 m. Zum Zeitpunkt der größten Jahresleistungsspitze (Abbildung 25) sind innerhalb der Extraktionsbrunnen GW-Absenkungen von unter 4 cm und innerhalb der Schluckbrunnen GW-Aufhöhungen von 2 cm zu erwarten (Abbildung 26 und Abbildung 27). Die lokal begrenzte 1K-Kältefahne ist identisch mit der Kältefahne aus Variante 1b (Abbildung 28).

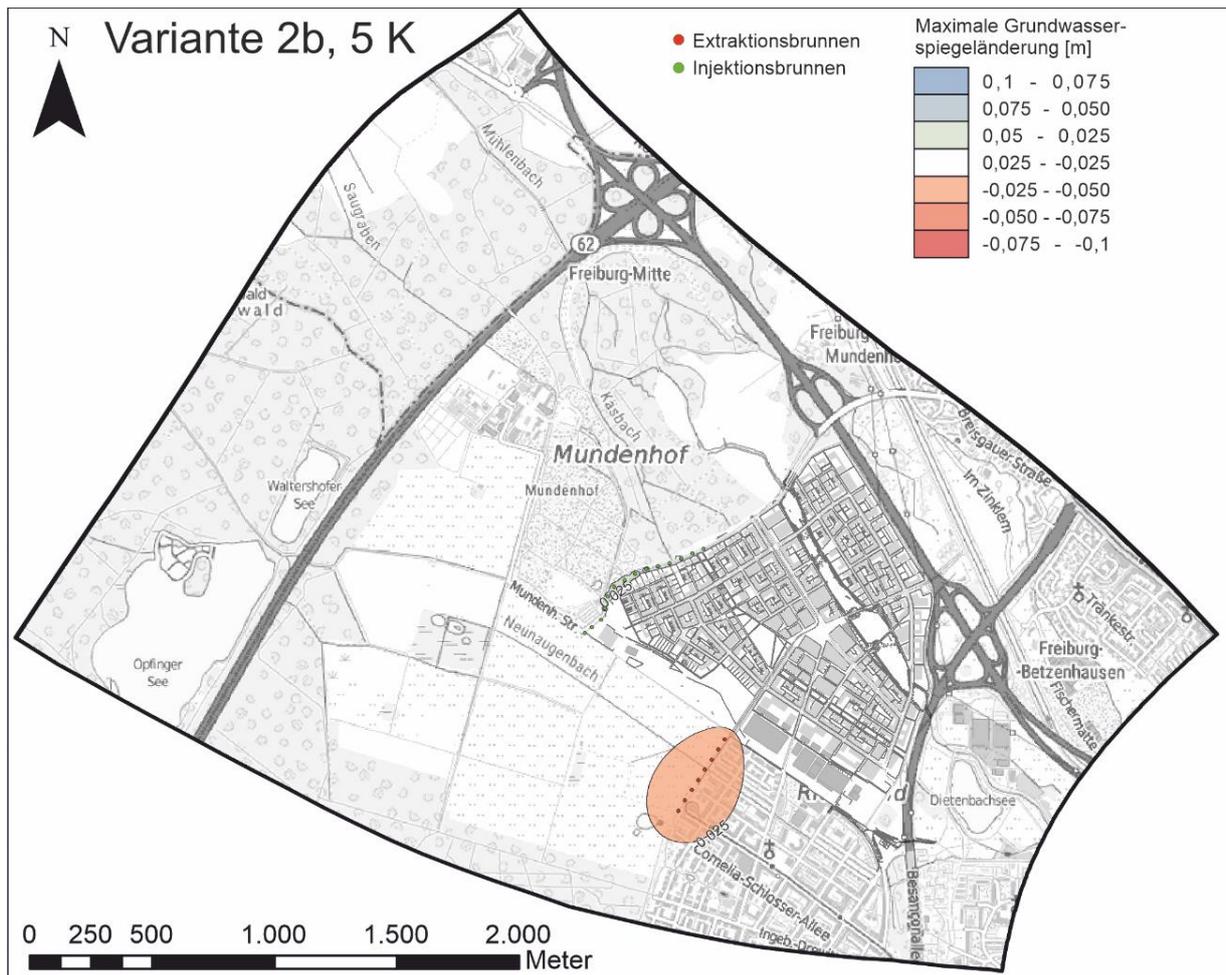


Abbildung 25: Variante 2b, 5K: Durch den Anlagenbetrieb bedingte Grundwasserspiegeländerung zum Zeitpunkt der größten Entnahme und Injektionsraten (nach 3301 Tagen).

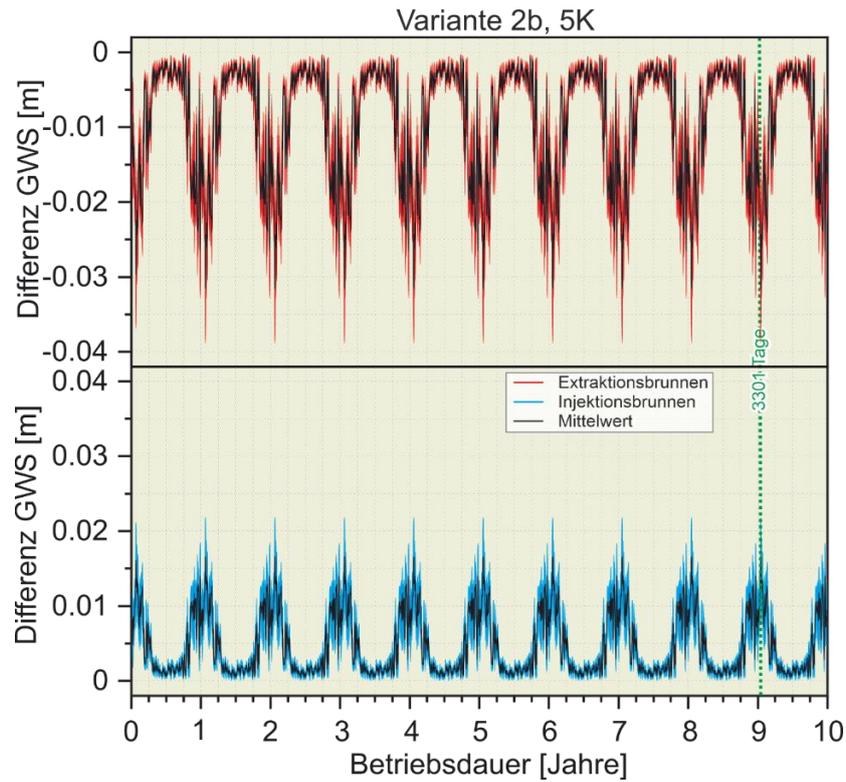


Abbildung 26: Variante 2b, 5K: Zeitliche Entwicklung der Grundwasserhöhen an den Extraktionsbrunnen (rot) und Injektionsbrunnen (blau) für den Simulationszeitraum von 10 Jahren.

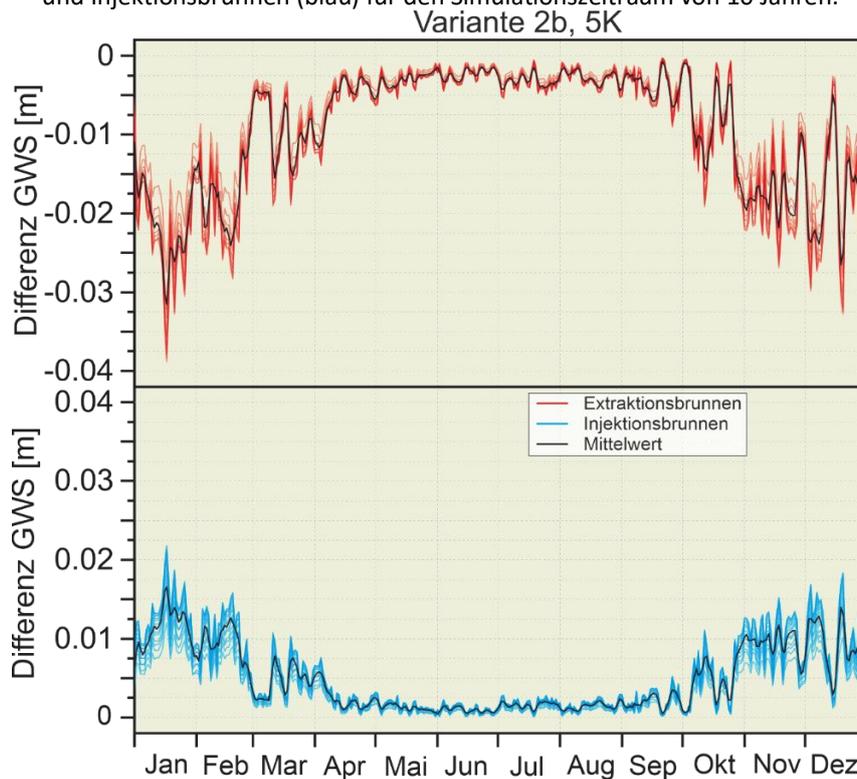


Abbildung 27: Variante 2b, 5K: Zeitliche Entwicklung der Grundwasserhöhen an den Extraktionsbrunnen (rot) und Injektionsbrunnen (blau) innerhalb eines Kalenderjahres.

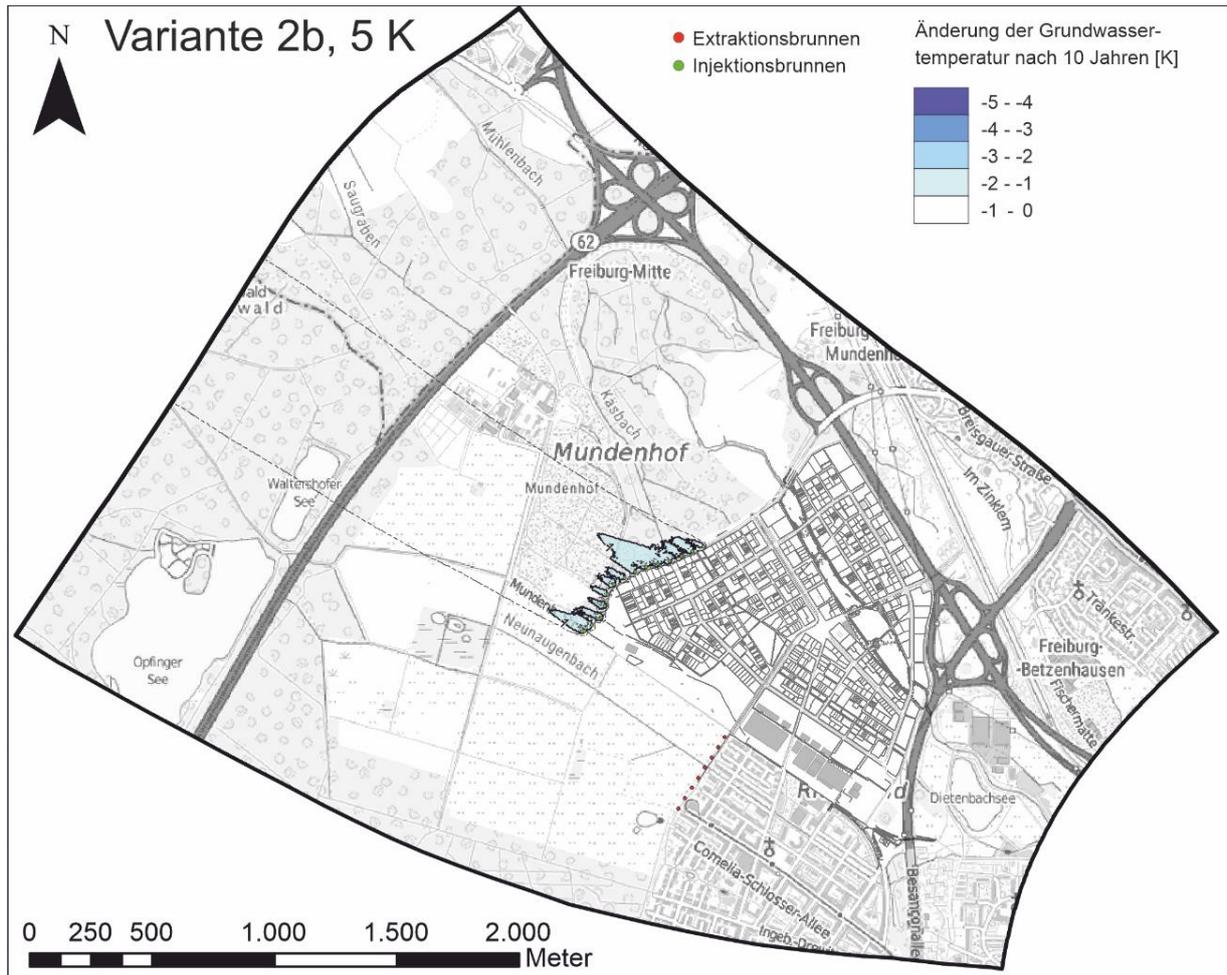


Abbildung 28: Variante 2b, 5K: Durch den Anlagenbetrieb erzeugte Temperaturfahnen nach einer Simulationsdauer von 10 Jahren.

### 6.1.6 Variante 3b, 5K

In Variante 3b sind 8 Extraktionsbrunnen im Bereich der Carl-von Ossietzky-Str konzipiert. Lage und Anzahl der Injektionsbrunnen entlang der Straße zum Tiergehege ist identisch mit Variante 1b und 3b. Der Abstand der Brunnen beträgt 50 m. Abbildung 29 zeigt die größtmögliche zu erwartende Veränderung des Grundwasserspiegels zum Zeitpunkt der Spitzenlast. Diese beträgt lediglich wenige cm und ist begrenzt auf den Nahbereich der Brunnen. Die GW-Absenkungen an den Entnahmebrunnen beträgt zur Spitzenlast 2 cm, die GW-Aufhöhung an den Injektionsbrunnen unter 3 cm. Die erzeugte Kältefahne ist identisch mit den Kältefahnen von Variante 1b und 2b. Ein negativer Einfluss auf andere GWWP-Anlagen im Grundwasserabstrom von Dietenbach kann bei alle drei b-Varianten ausgeschlossen werden.

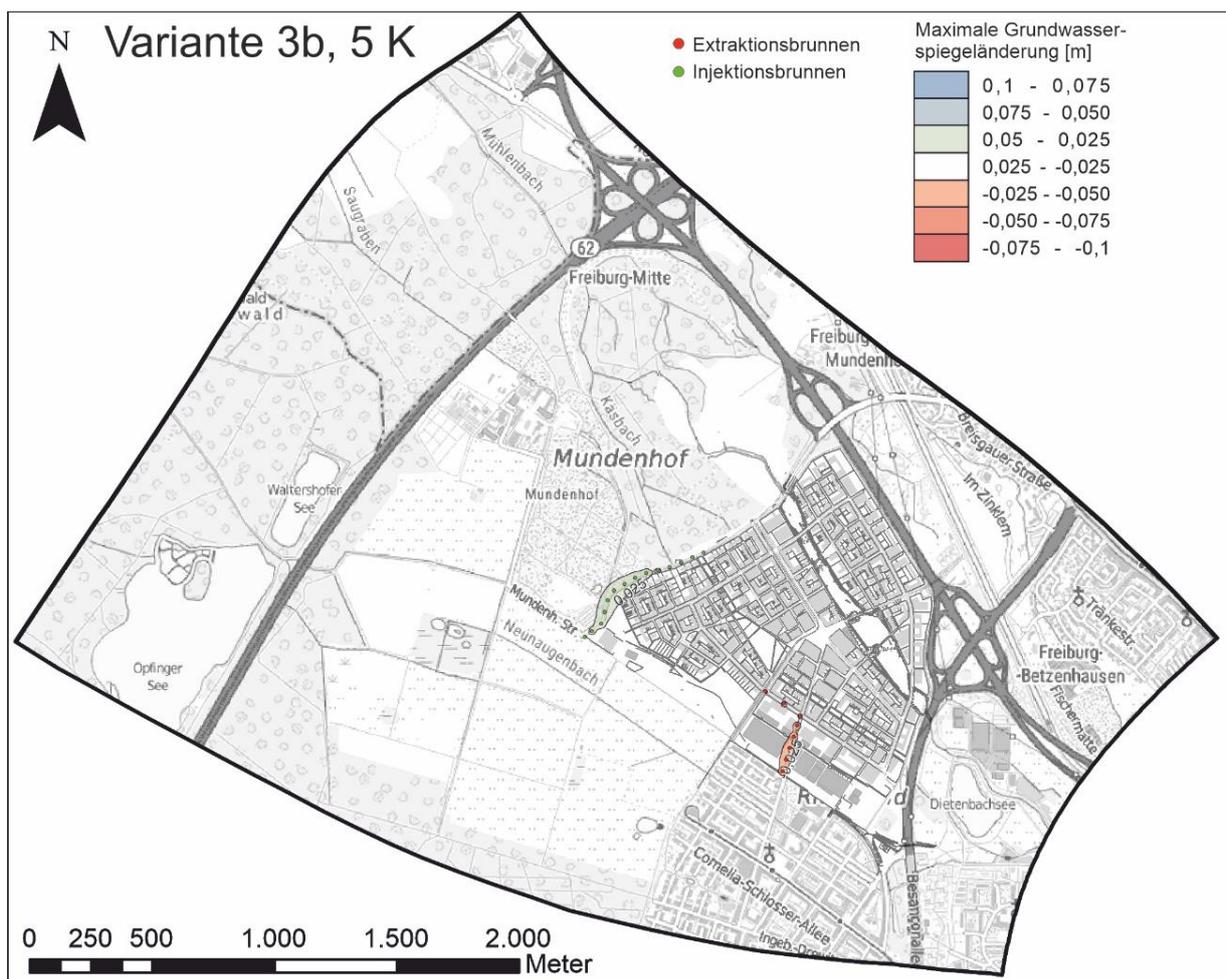


Abbildung 29: Variante 3b, 5K: Durch den Anlagenbetrieb bedingte Grundwasserspiegeländerung zum Zeitpunkt der größten Entnahme und Injektionsraten (nach 3301 Tagen)

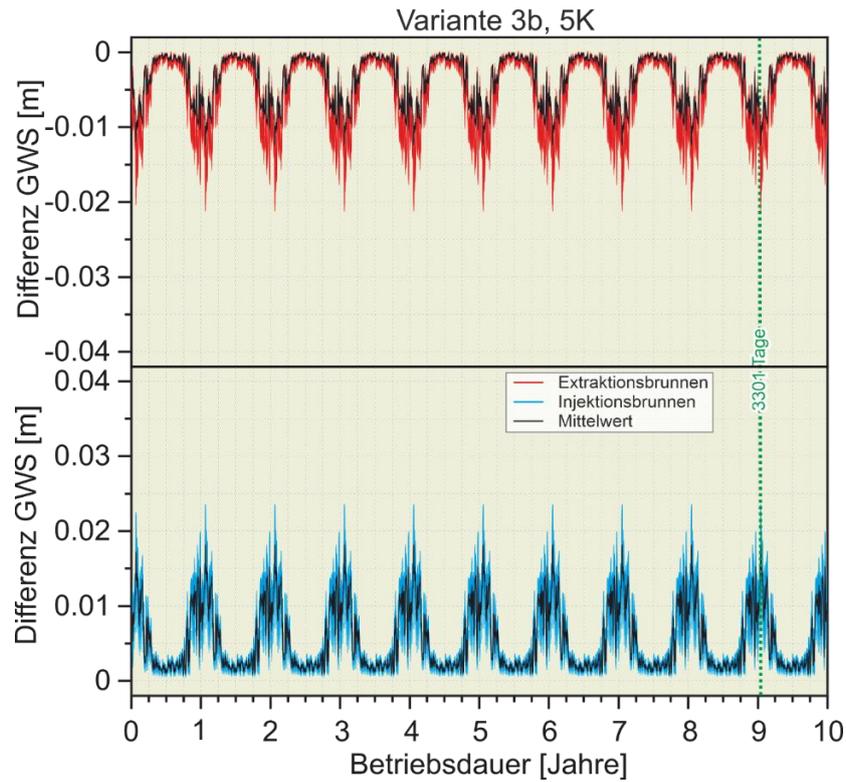


Abbildung 30: Variante 3b, 5K: Zeitliche Entwicklung der Grundwasserhöhen an den Extraktionsbrunnen (rot) und Injektionsbrunnen (blau) für den Simulationszeitraum von 10 Jahren.

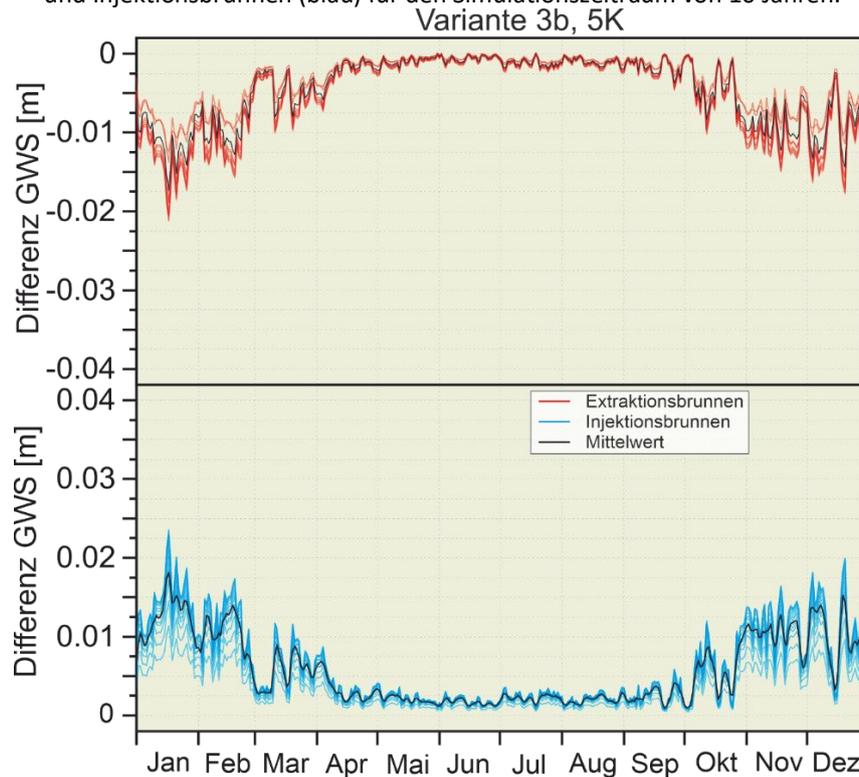


Abbildung 31: Variante 3b, 5K: Zeitliche Entwicklung der Grundwasserhöhen an den Extraktionsbrunnen (rot) und Injektionsbrunnen (blau) innerhalb eines Kalenderjahres.

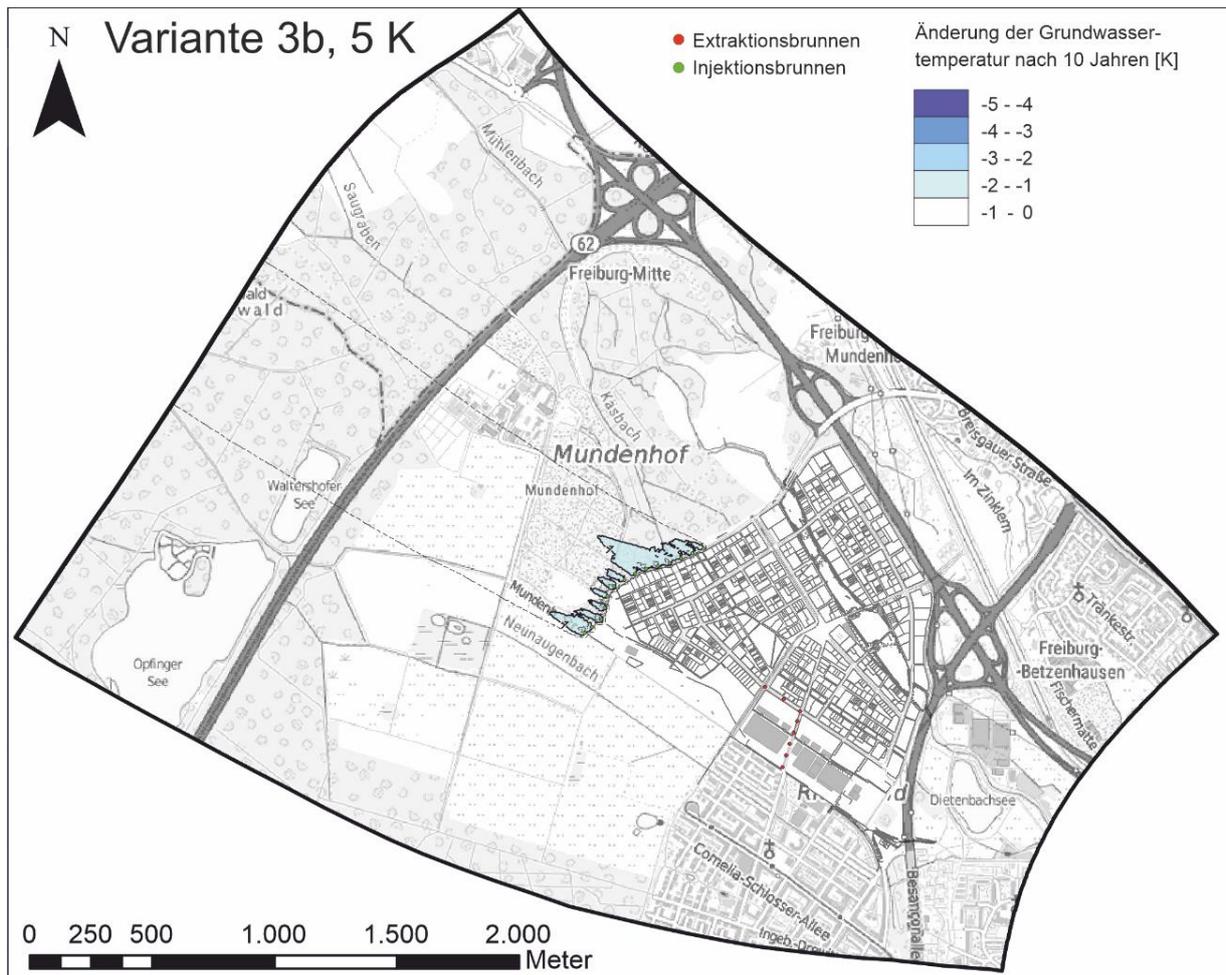


Abbildung 32: Variante 3b, 5K: Durch den Anlagenbetrieb erzeugte Temperaturfahnen nach einer Simulationsdauer von 10 Jahren.

## 6.2 Varianten mit 4K Temperaturspreizung

Lage und Anzahl der Brunnen und die Verteilung der Förderraten sind zu den Varianten mit 5K-Spreizung identisch. Durch die geringere Temperaturspreizungen von 5K auf 4K erhöht sich die benötigte Förderrate der Brunnen um 25%.

### 6.2.1 Variante 1a, 4K

Abbildung 33 zeigt die maximale Grundwasserspiegeländerung der Variante 1a, 4K. GW-Aufhöhungen und -Absenkungen fallen erwartungsgemäß höher aus im Vergleich zur Variante 1a. Die größten GW-Aufhöhungen innerhalb der Schluckbrunnen liegen nach Abbildung 34 und Abbildung 35 bei 1,87 m (1,53 m bei Variante 1a, 5K). Die größte Absenkung der Extraktionsbrunnen liegt bei 1,72 m (1,33 m bei Variante 1a, 5K). Die Extraktionsbrunnen erzeugen nur lokal begrenzte Kältefahnen über 1,5K (Abbildung 36). Die resultierenden 1K-Fahnenbereiche sind räumlich weniger ausgedehnt gegenüber der Varianten mit 5K Spreizung.

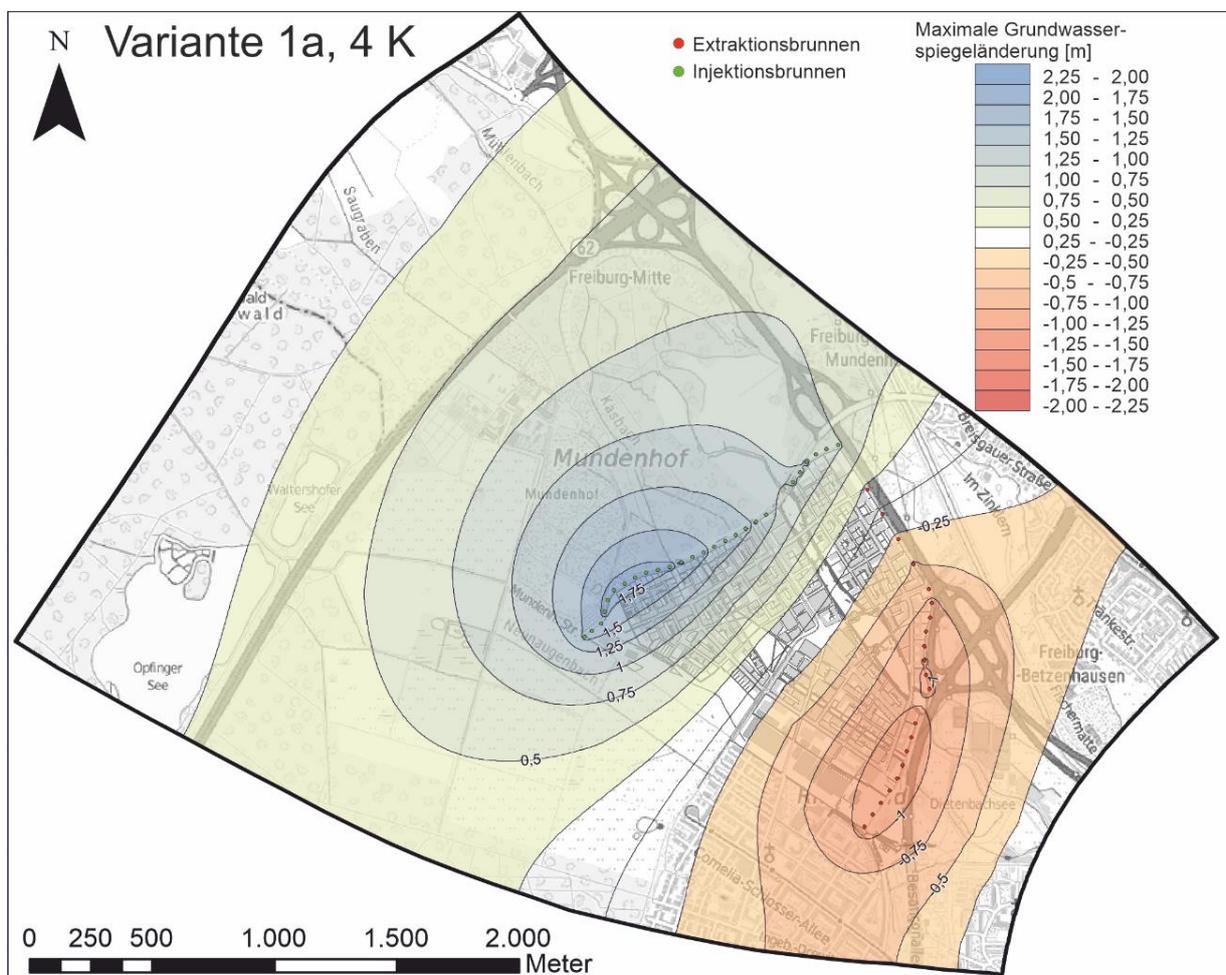


Abbildung 33: Variante 1a, 4K: Durch den Anlagenbetrieb bedingte Grundwasserspiegeländerung zum Zeitpunkt der größten Entnahme und Injektionsraten (nach 3301 Tagen)

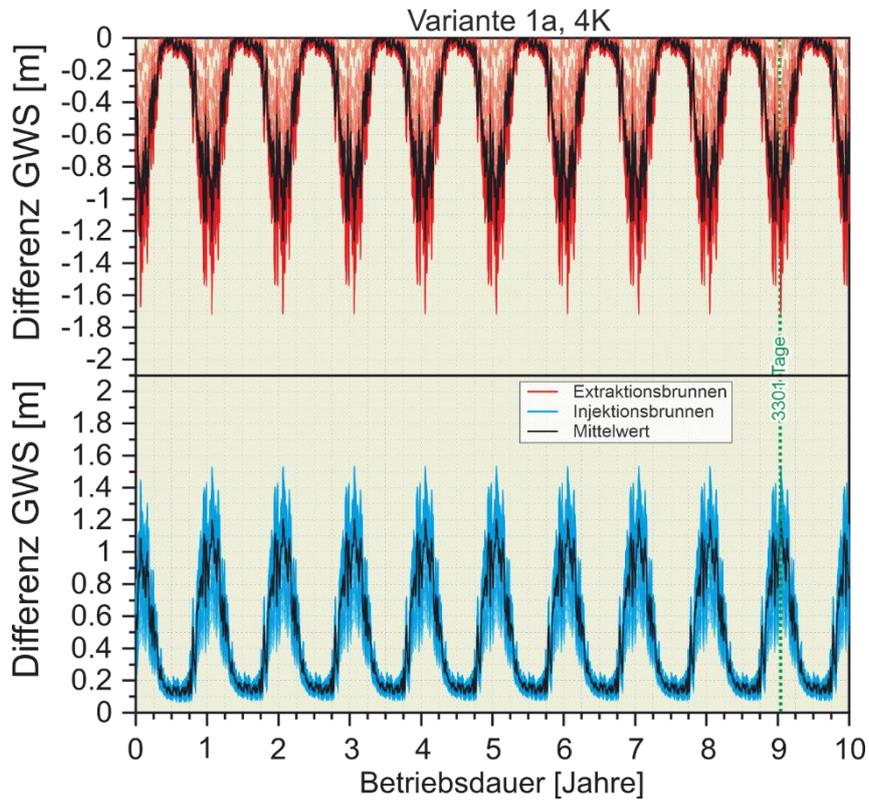


Abbildung 34: Variante 1a, 4K: Zeitliche Entwicklung der Grundwasserhöhen an den Extraktionsbrunnen (rot) und Injektionsbrunnen (blau) für den Simulationszeitraum von 10 Jahren.

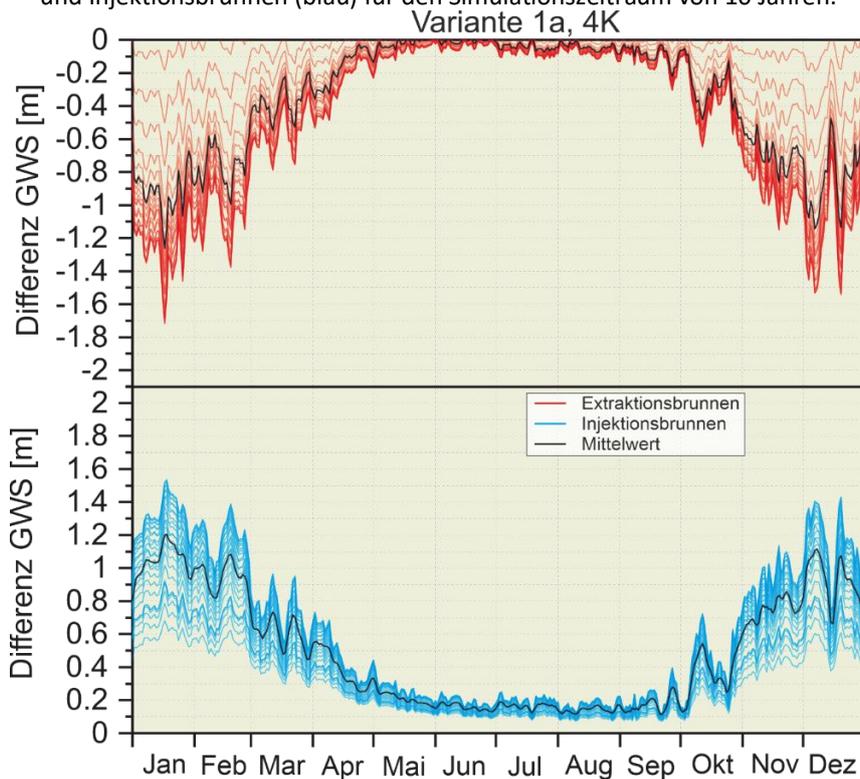


Abbildung 35: Variante 1a, 4K: Zeitliche Entwicklung der Grundwasserhöhen an den Extraktionsbrunnen (rot) und Injektionsbrunnen (blau) innerhalb eines Kalenderjahres.

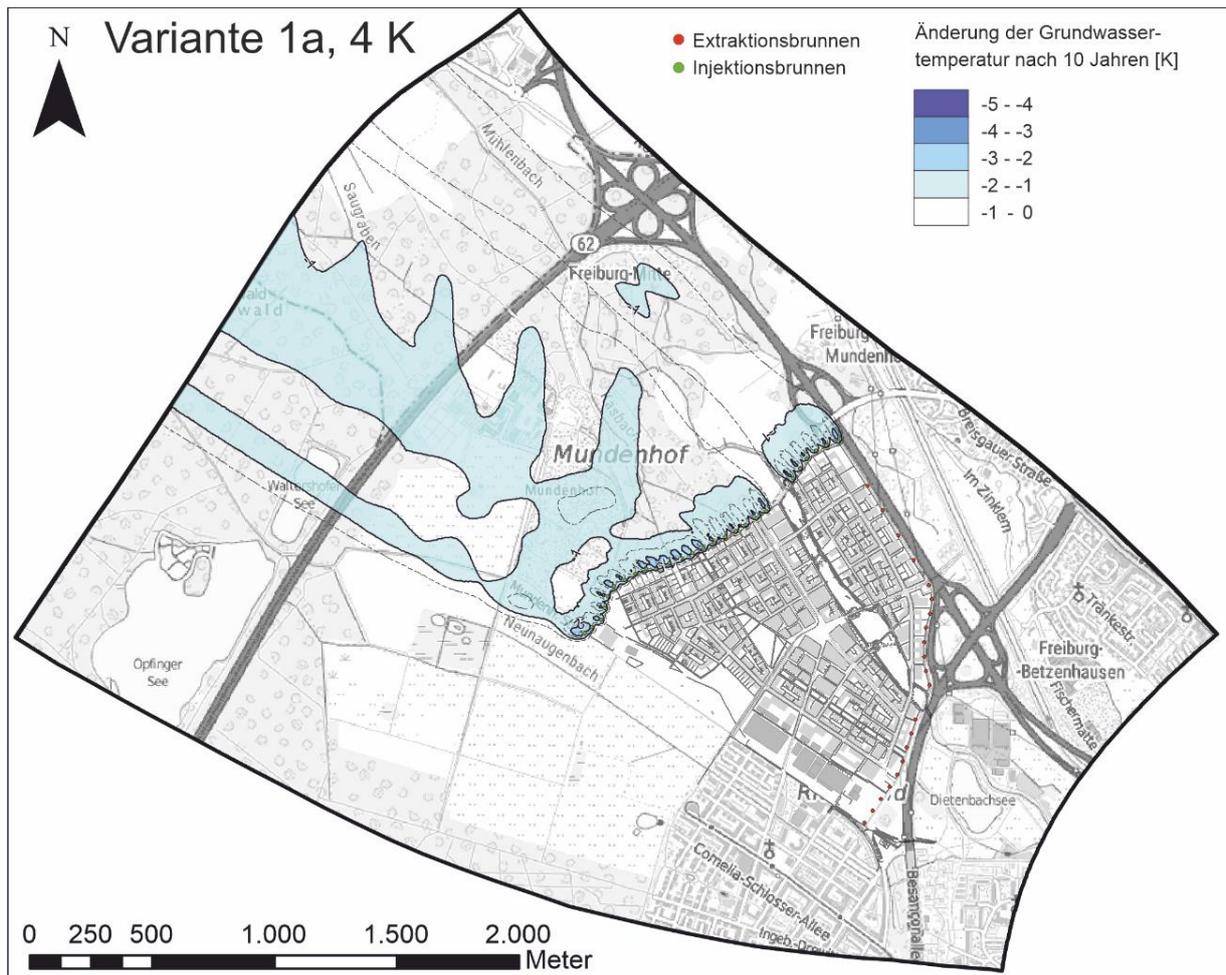


Abbildung 36: Variante 1a, 4K: Durch den Anlagenbetrieb erzeugte Temperaturfahnen nach einer Simulationsdauer von 10 Jahren.

### 6.2.2 Variante 2a, 4 K

Die maximal erwartbare Grundwasserspiegeländerung der Variante 1a findet sich in Abbildung 37. Die Injektionsbrunnen im Bereich des Parkplatzes zum Tiergehege erzeugen GW-Aufhöhungen von bis zu 1,46 m (Abbildung 38 und Abbildung 39). Dies ist 0,2 m über der 2a, 5 K Variante. Die Absenktrichter im Bereich des Bollerstaudenweges liegen hier bei maximal 1,76 m. Bei der Variante 2a, 5 K beträgt die maximale Absenkung bei 1,33 m. Die erzeugte Kältefahne ist vergleichbar mit der resultierenden Kältefahne aus Variante 1a, 4 K.

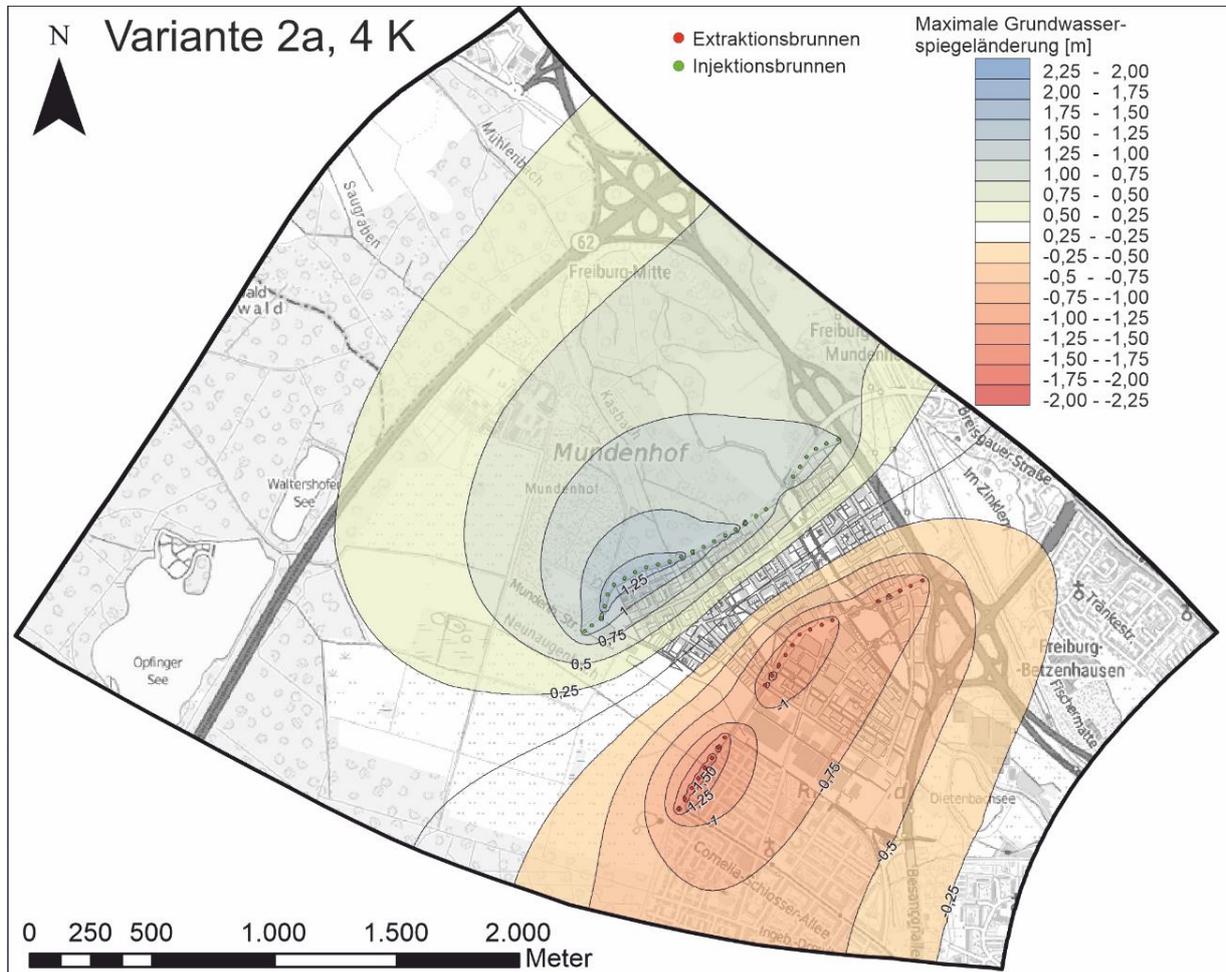


Abbildung 37: Variante 2a, 4 K: Durch den Anlagenbetrieb bedingte Grundwasserspiegeländerung zum Zeitpunkt der größten Entnahme und Injektionsraten (nach 3301 Tagen)

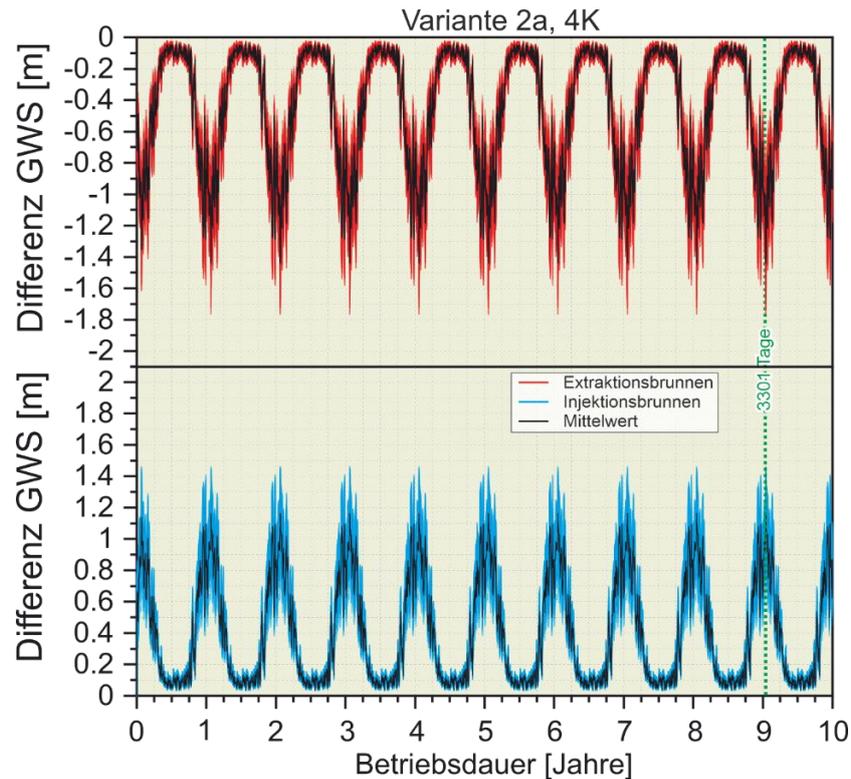


Abbildung 38: Variante 2a, 4 K: Zeitliche Entwicklung der Grundwasserhöhen an den Extraktionsbrunnen (rot) und Injektionsbrunnen (blau) für den Simulationszeitraum von 10 Jahren.

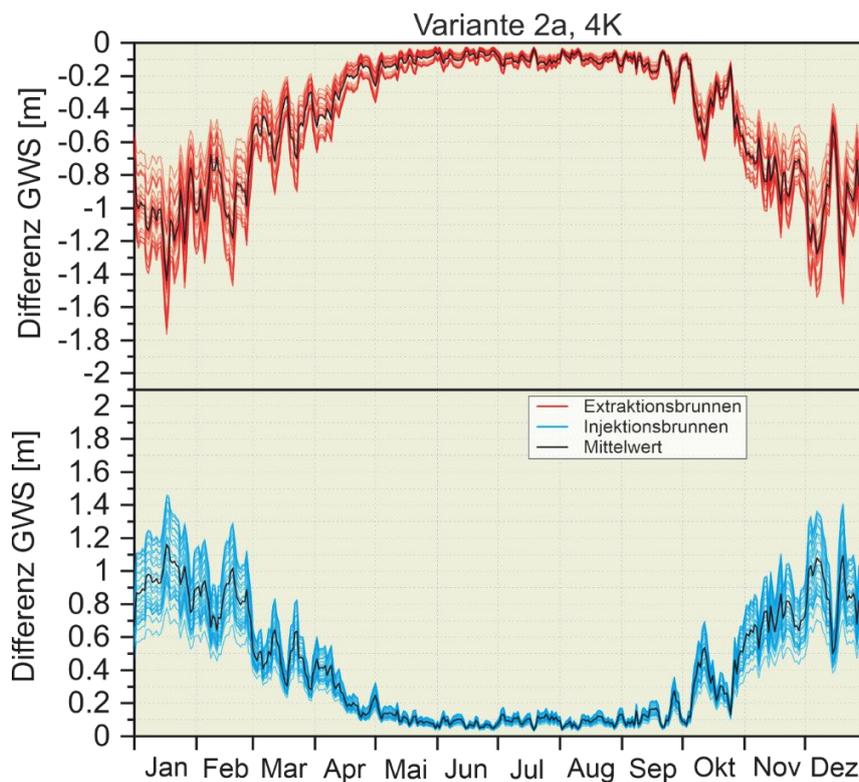


Abbildung 39: Variante 2a, 4 K: Zeitliche Entwicklung der Grundwasserhöhen an den Extraktionsbrunnen (rot) und Injektionsbrunnen (blau) innerhalb eines Kalenderjahres.

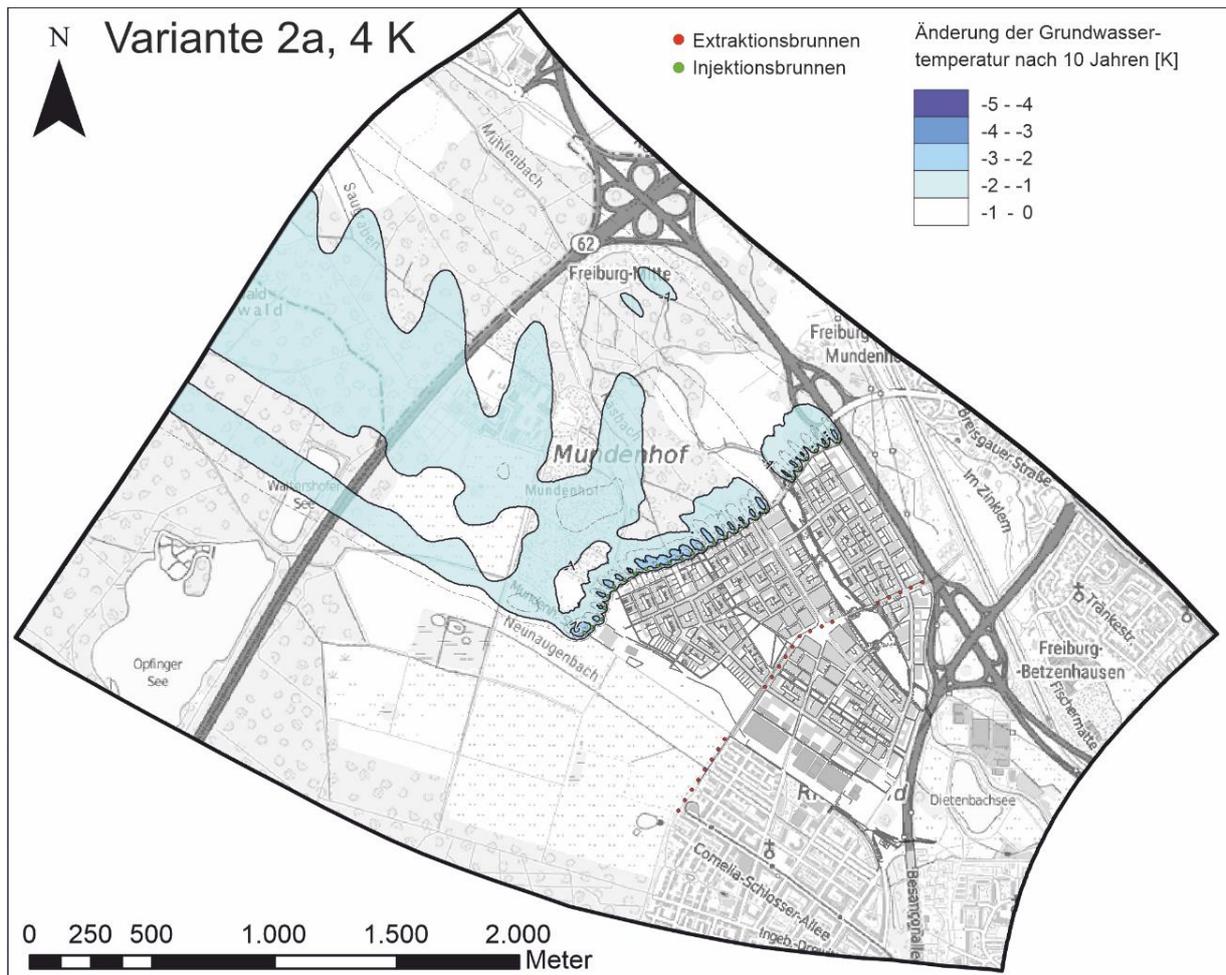


Abbildung 40: Variante 2a, 4 K: Durch den Anlagenbetrieb erzeugte Temperaturfahnen nach einer Simulationsdauer von 10 Jahren.

### 6.2.3 Variante 3a, 4K

In Abbildung 41 ist die durch den Anlagenbetrieb bedingte Grundwasserspiegeländerung zum Zeitpunkt der größten Entnahme- und Injektionsraten dargestellt. Die Injektionen erzeugen im Bereich des Parklatzes zum Tiergeheges GW-Aufhöhungen von bis zu 1,5 m (Bei Variante 3a, 5 K: 1,28 m). Eine Aufhöhung von über 1 m reicht bis in den Bauabschnitt 3 hinein. Die Absenktichter sind im Bereich der Carl-von Ossietzky-Str. mit 1,99 m am größten (Abbildung 42 und Abbildung 43). Bei der Variante 3a, 5 K betragen diese 1,44 m. Die erzeugte Kältefahne ist nahezu identisch mit der Variante 1a, 4 K und Variante 2a, 4 K.

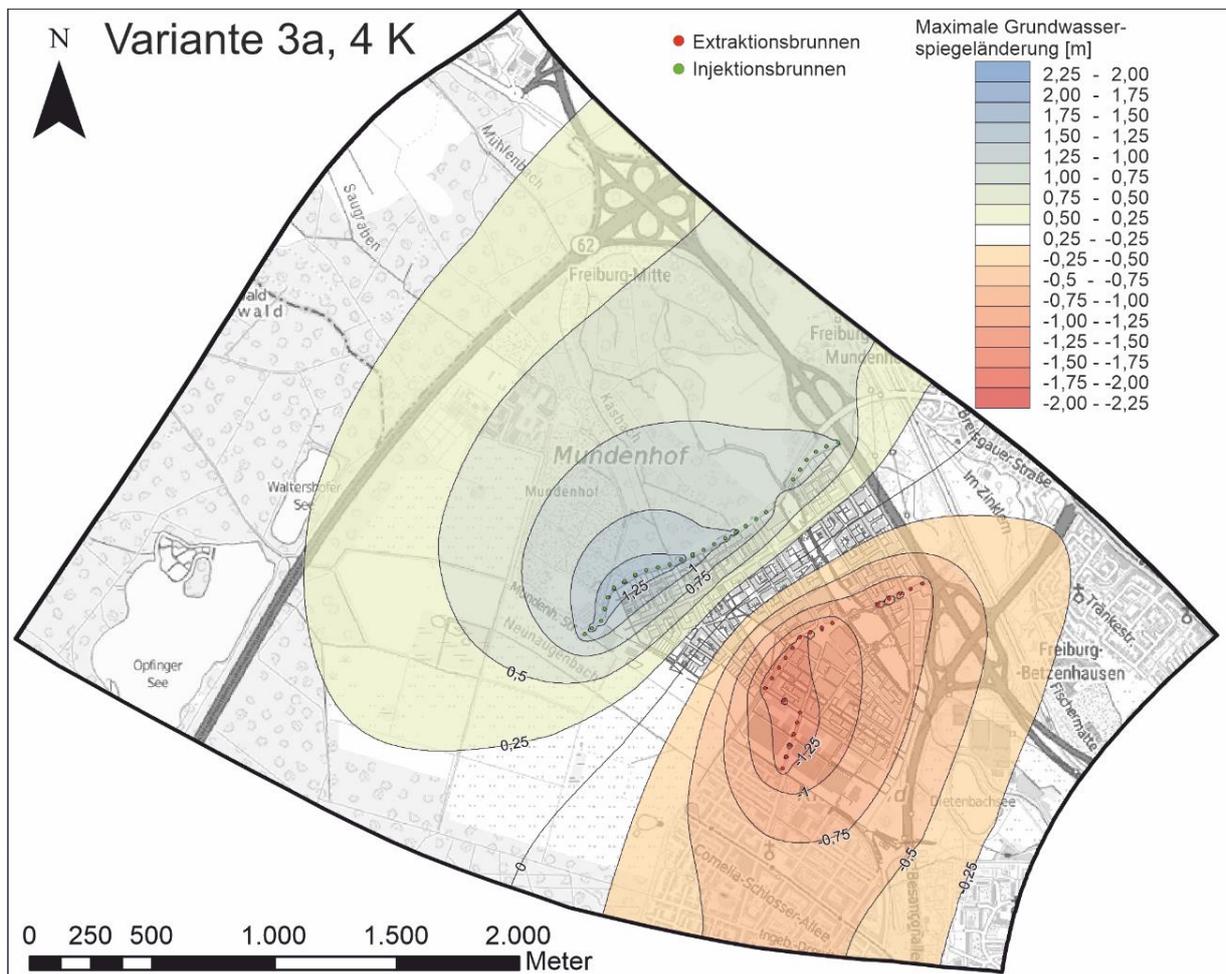


Abbildung 41: Variante 3a, 4 K: Durch den Anlagenbetrieb bedingte Grundwasserspiegeländerung zum Zeitpunkt der größten Entnahme und Injektionsraten (nach 3301 Tagen).

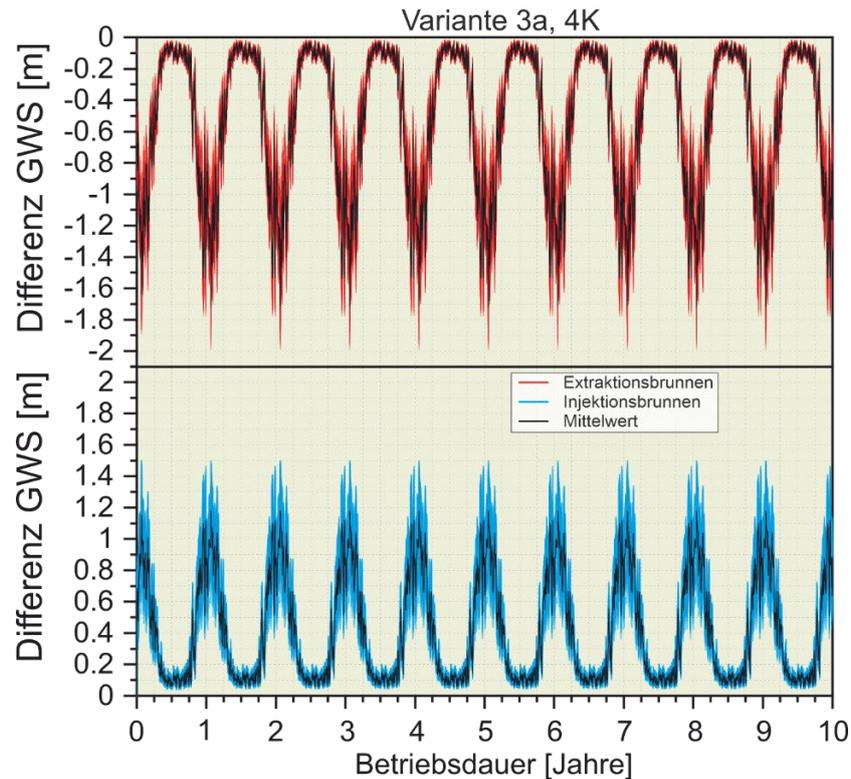


Abbildung 42: Variante 3a, 4 K: Zeitliche Entwicklung der Grundwasserhöhen an den Extraktionsbrunnen (rot) und Injektionsbrunnen (blau) für den Simulationszeitraum von 10 Jahren.

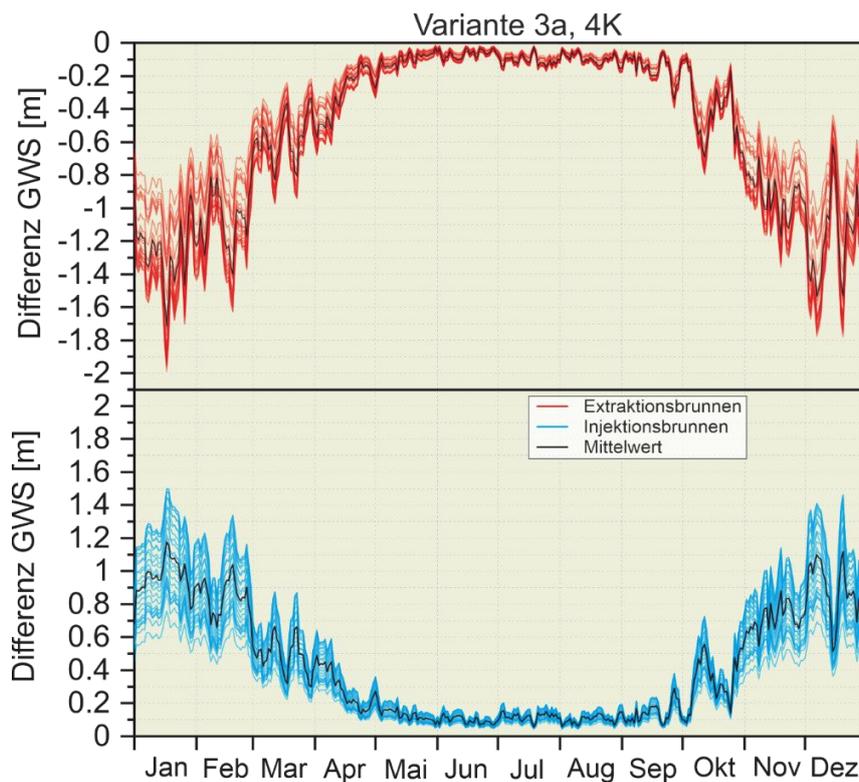


Abbildung 43: Variante 3a, 4 K: Zeitliche Entwicklung der Grundwasserhöhen an den Extraktionsbrunnen (rot) und Injektionsbrunnen (blau) innerhalb eines Kalenderjahres.

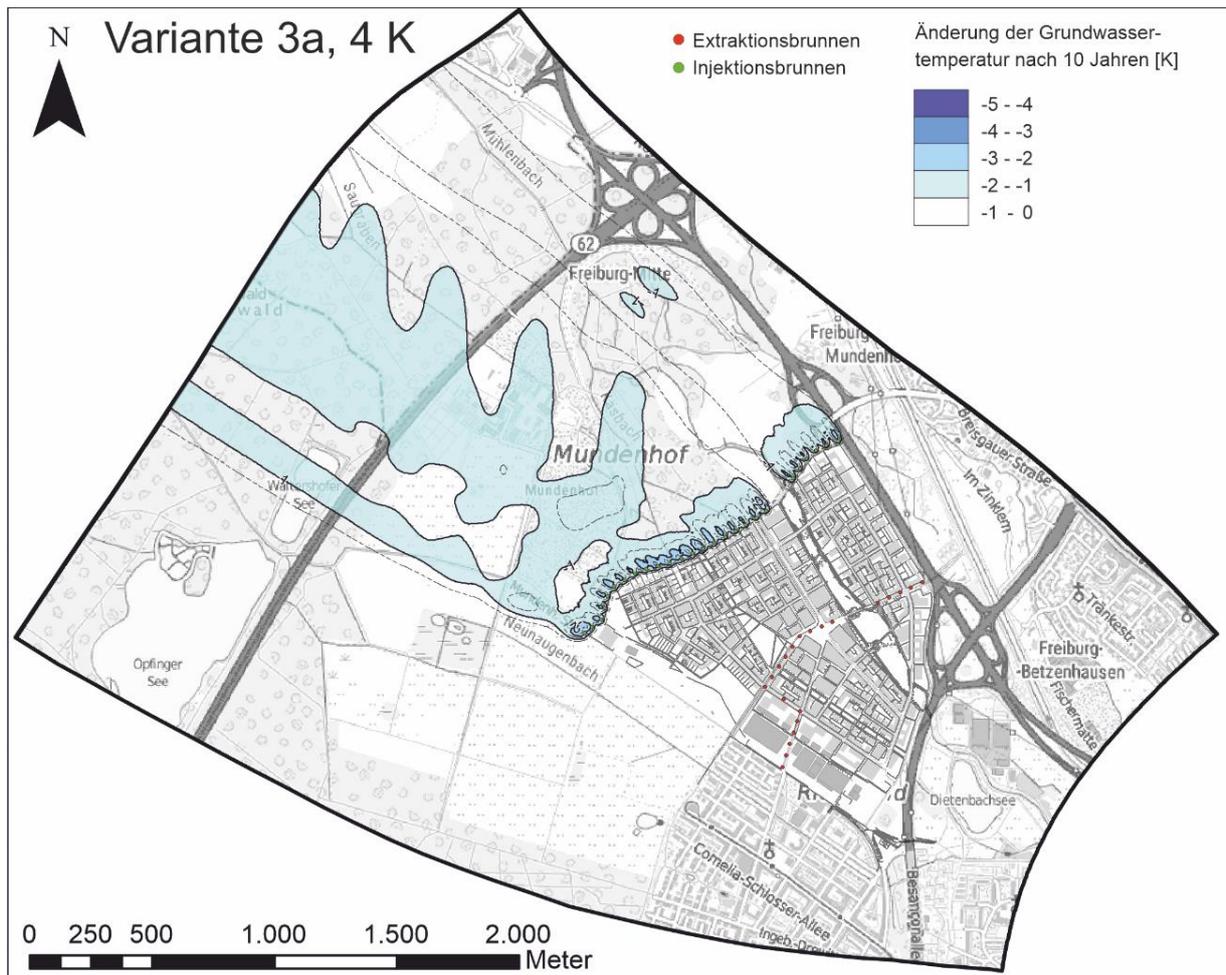


Abbildung 44: Variante 3a, 4 K: Durch den Anlagenbetrieb erzeugte Temperaturfahnen nach einer Simulationsdauer von 10 Jahren.

#### 6.2.4 Variante 1b, 4 K

Abbildung 45 zeigt die maximale Grundwasserspiegeländerung der Variante 1b mit 4 K. Die Absenkungen betragen in Nahfeld der Injektionsbrunnen ca. 3 cm. Innerhalb der Injektionsbrunnen steigt der GW-Spiegel auf maximal 3 cm an (Abbildung 46 und Abbildung 47). Die Injektionsbrunnen erzeugen lokale 1 K-Kältefahnen mit Ausdehnungen von wenigen zehner m in Grundwasserfließrichtung.

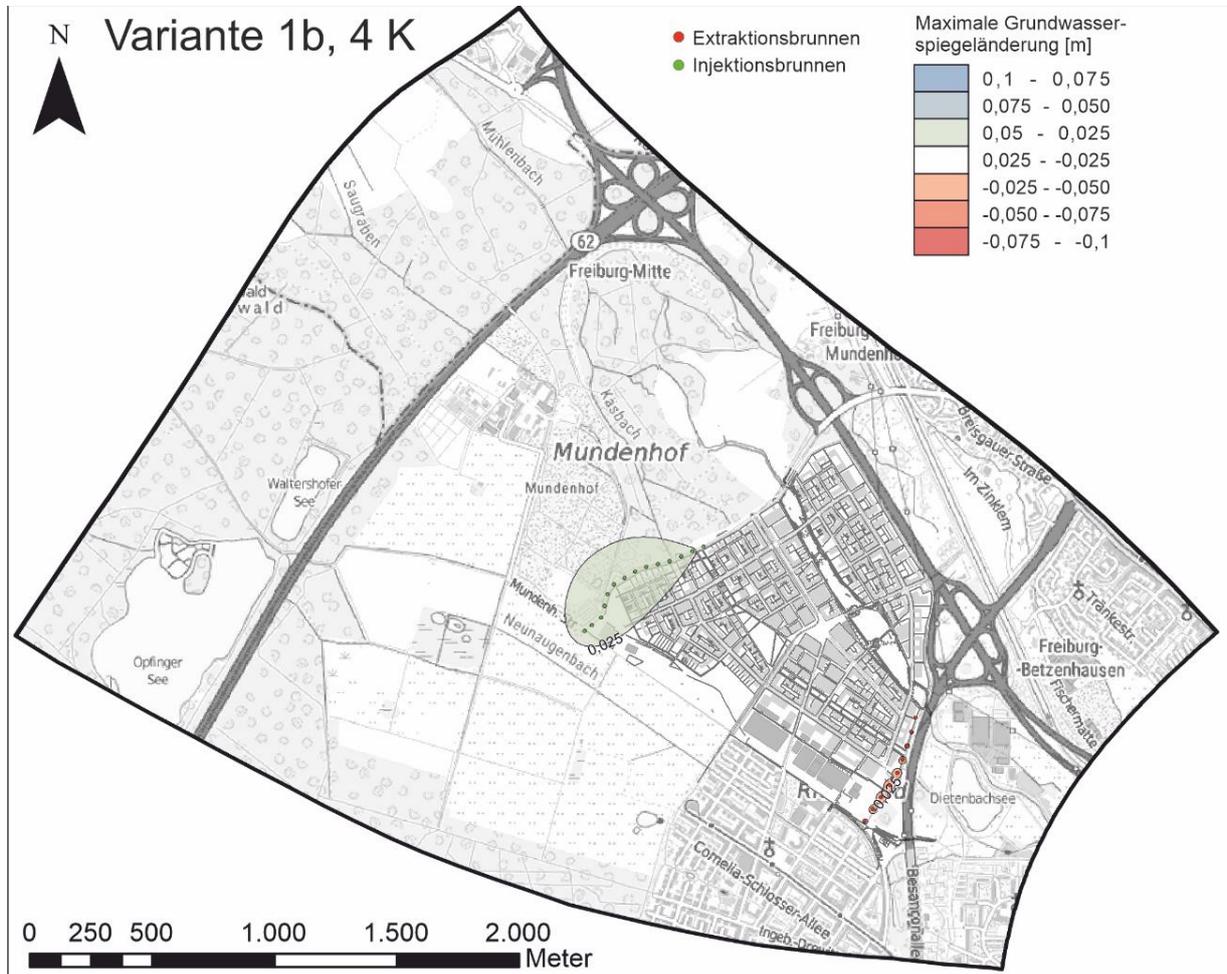


Abbildung 45: Variante 1b, 4 K: Durch den Anlagenbetrieb bedingte Grundwasserspiegeländerung zum Zeitpunkt der größten Entnahme und Injektionsraten (nach 3301 Tagen)

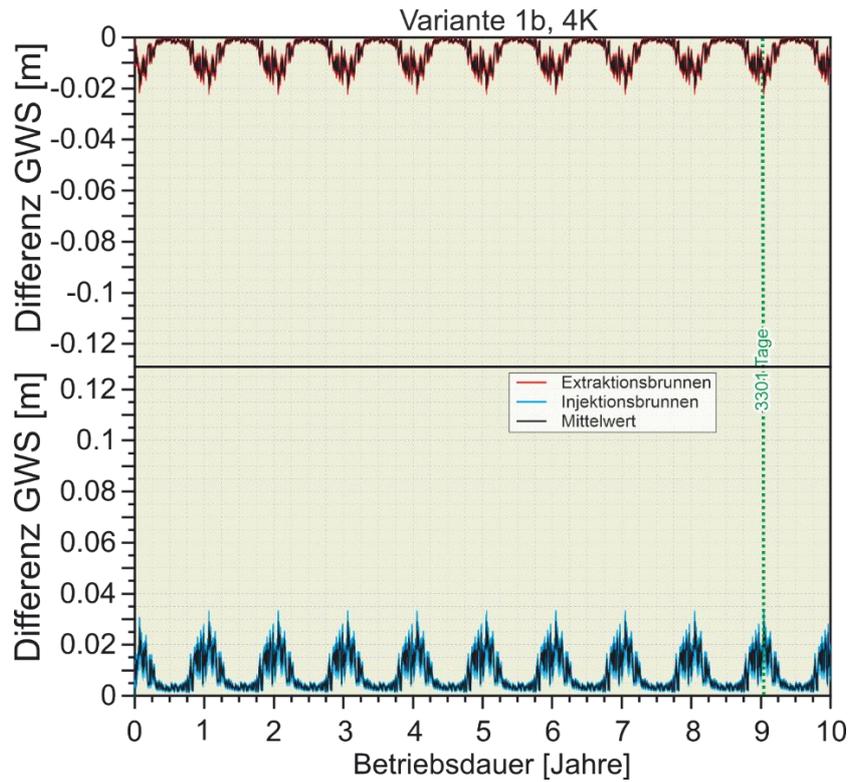


Abbildung 46: Variante 1b, 4 K: Zeitliche Entwicklung der Grundwasserhöhen an den Extraktionsbrunnen (rot) und Injektionsbrunnen (blau) für den Simulationszeitraum von 10 Jahren.

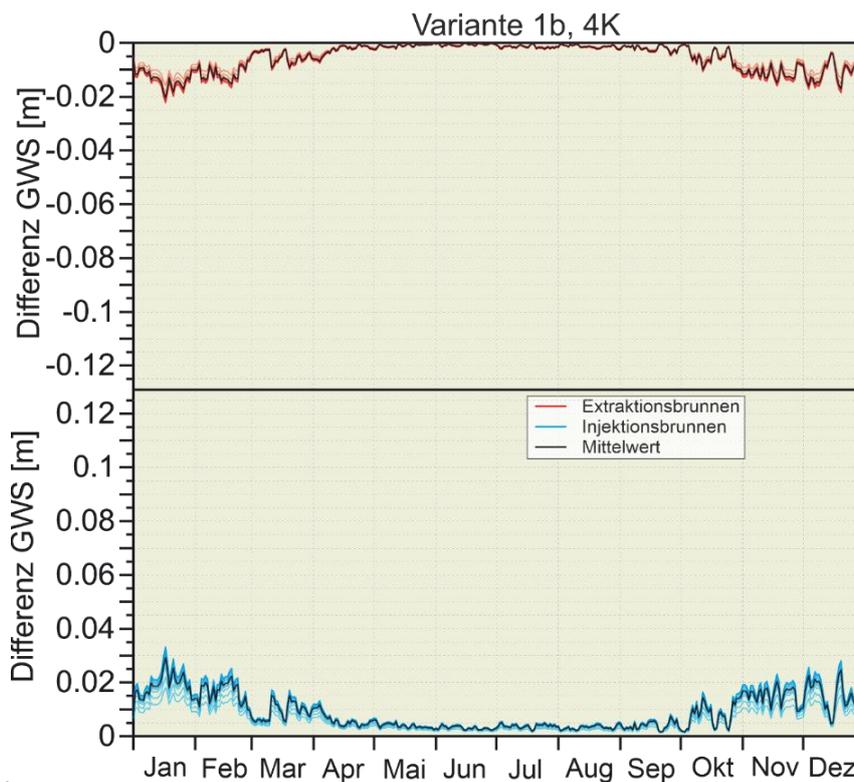


Abbildung 47: Variante 1b, 4 K: Zeitliche Entwicklung der Grundwasserhöhen an den Extraktionsbrunnen (rot) und Injektionsbrunnen (blau) innerhalb eines Kalenderjahres.

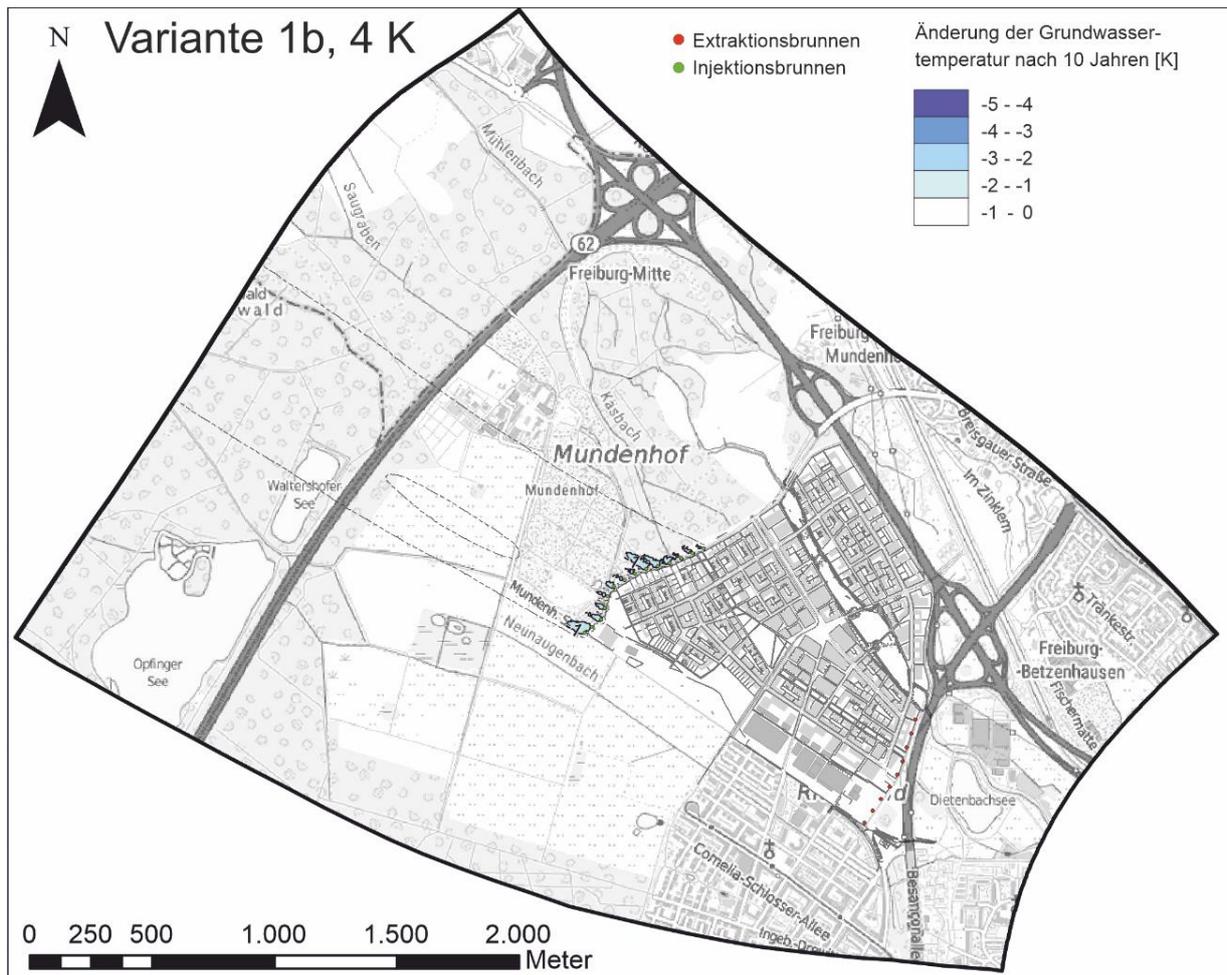


Abbildung 48: Variante 1b, 4 K: Durch den Anlagenbetrieb erzeugte Temperaturfahnen nach einer Simulationsdauer von 10 Jahren.

### 6.2.5 Variante 2b, 4K

Abbildung 49 zeigt die induzierte Grundwasserspiegeländerung der Variante 2b, 4 K. An den Extraktionsbrunnen stellen sich GW-Absenkungen von bis zu 12 cm im Januar ein, an den Injektionsbrunnen dagegen nur Aufhöhungen von bis zu 3 cm (Abbildung 50 und Abbildung 51). Dies zeigt den Einfluss der hydraulischen Durchlässigkeit auf die GW-Spiegeländerungen an den Brunnen. Diese nimmt bei Dietenbach von Süd nach Norden zu. Die entwickelten Kältefahnen sind begrenzt auf den Nahbereich der Brunnen und sind identisch mit denen in Variante 1b, 4 K.

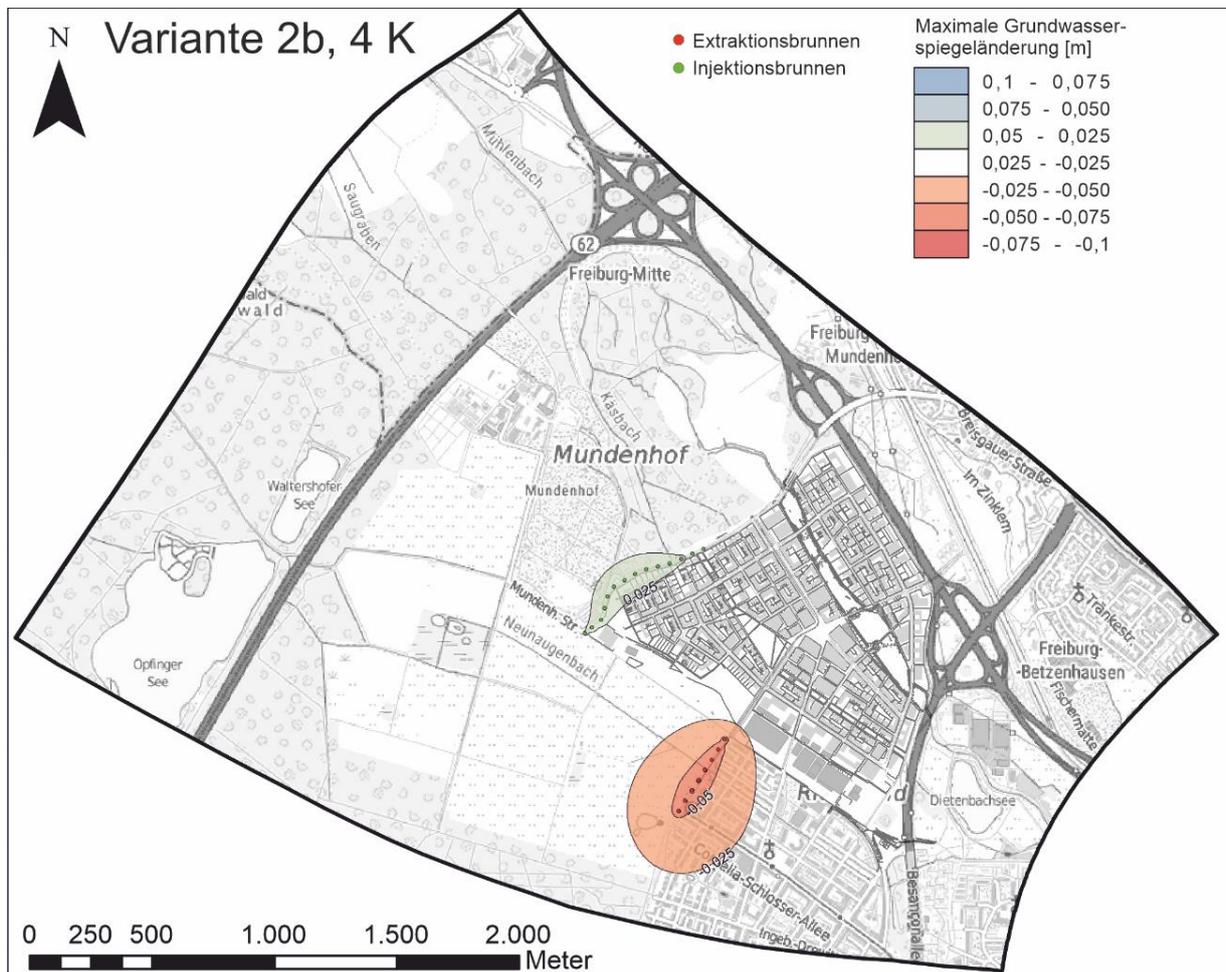


Abbildung 49: Variante 2b, 4 K: Durch den Anlagenbetrieb bedingte Grundwasserspiegeländerung zum Zeitpunkt der größten Entnahme und Injektionsraten (nach 3301 Tagen)

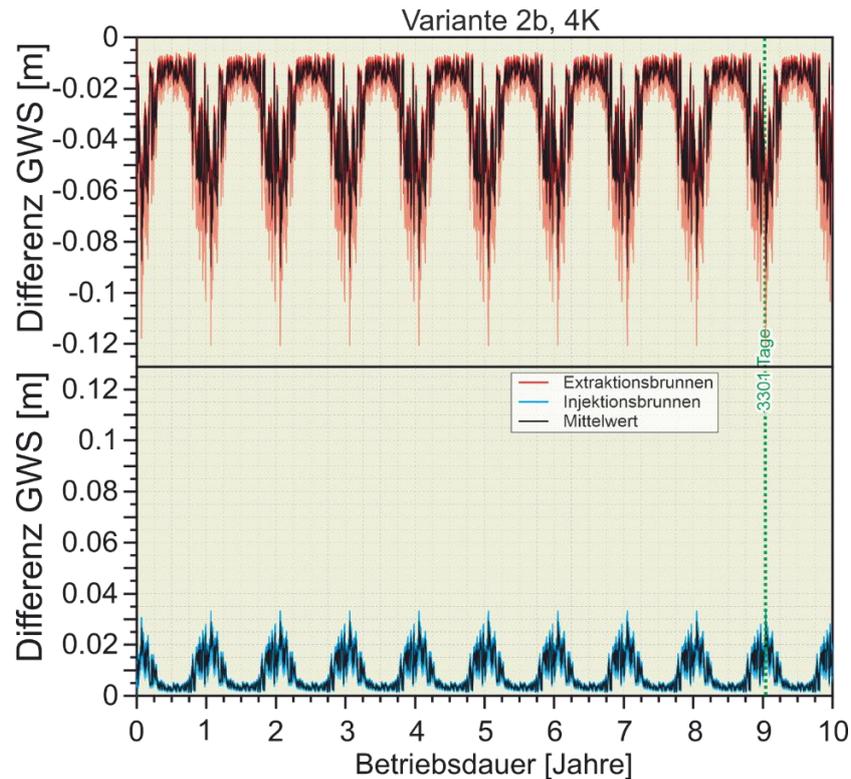


Abbildung 50: Variante 2b, 4K: Zeitliche Entwicklung der Grundwasserhöhen an den Extraktionsbrunnen (rot) und Injektionsbrunnen (blau) für den Simulationszeitraum von 10 Jahren.

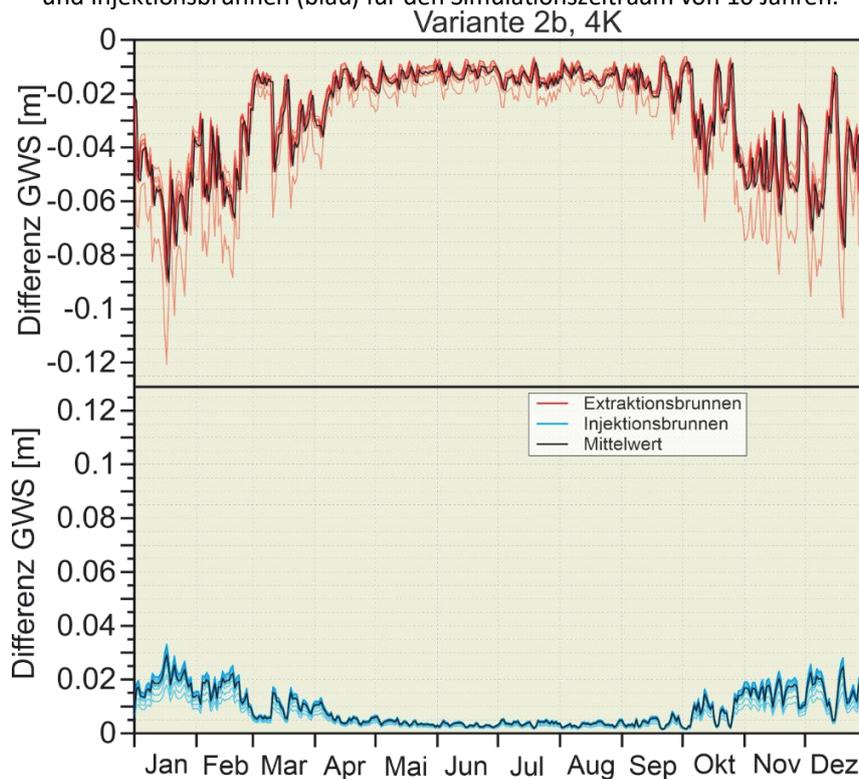


Abbildung 51: Variante 2b, 4K: Zeitliche Entwicklung der Grundwasserhöhen an den Extraktionsbrunnen (rot) und Injektionsbrunnen (blau) innerhalb eines Kalenderjahres.

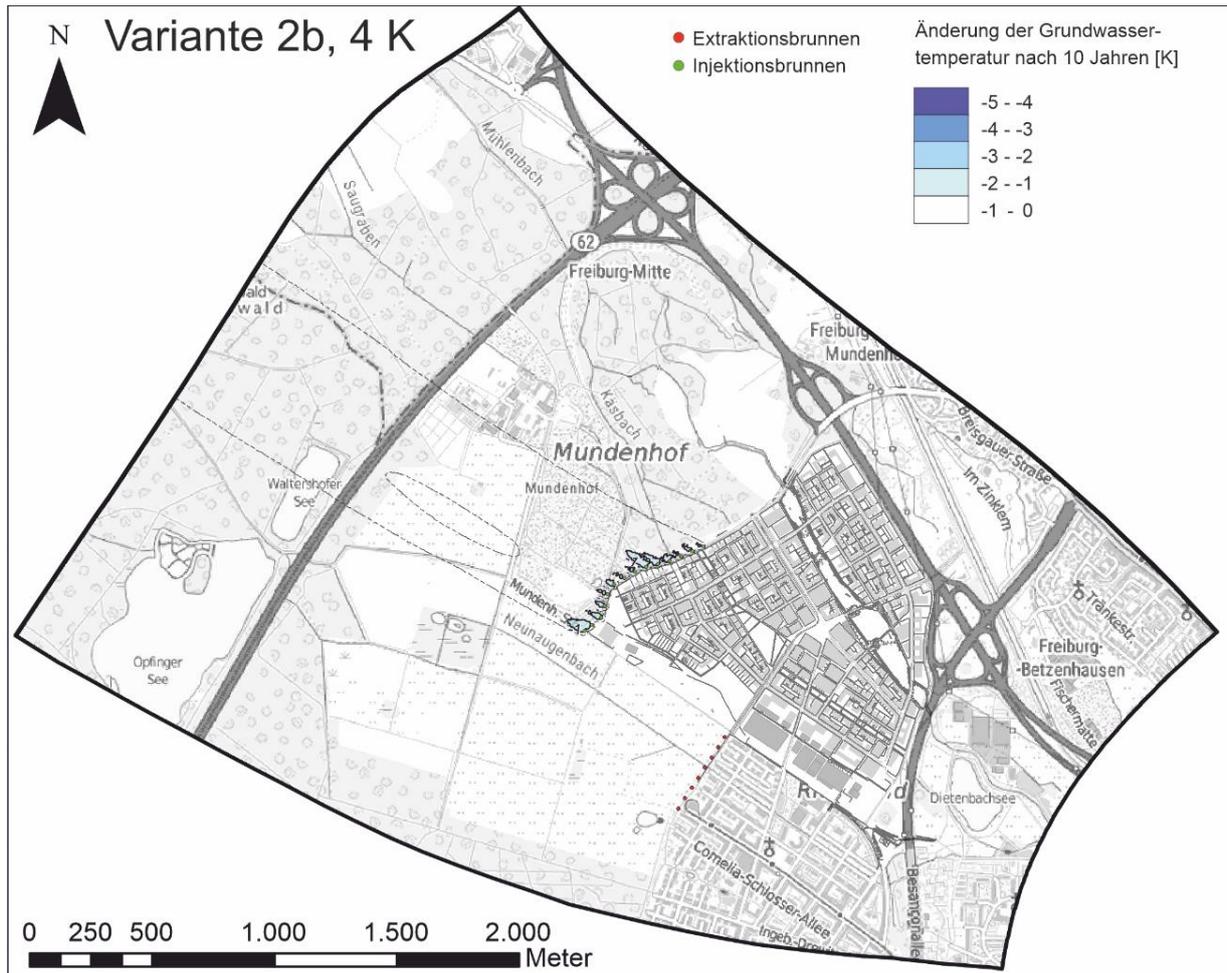


Abbildung 52: Variante 2b, 4 K: Durch den Anlagenbetrieb erzeugte Temperaturfahnen nach einer Simulationsdauer von 10 Jahren.

### 6.2.6 Variante 3b, 4 K

In Abbildung 53 ist die simulierte Grundwasseroberfläche nach 3.301 Tagen, zum Zeitpunkt der maximalen Entnahme- und Infiltrationsrate von 462 m<sup>3</sup>/h dargestellt. Die GW-absenkung beträgt bei den südlichen Extraktionsbrunnen in der Spitze 5 cm, die GW-Aufhöhungen der Schluckbrunnen unter 3 cm (Abbildung 54 und Abbildung 55). Die Entwicklung der Temperaturfahnen ist identisch mit den Varianten 1b, 4 K und 2b, 4 K (Abbildung 56).

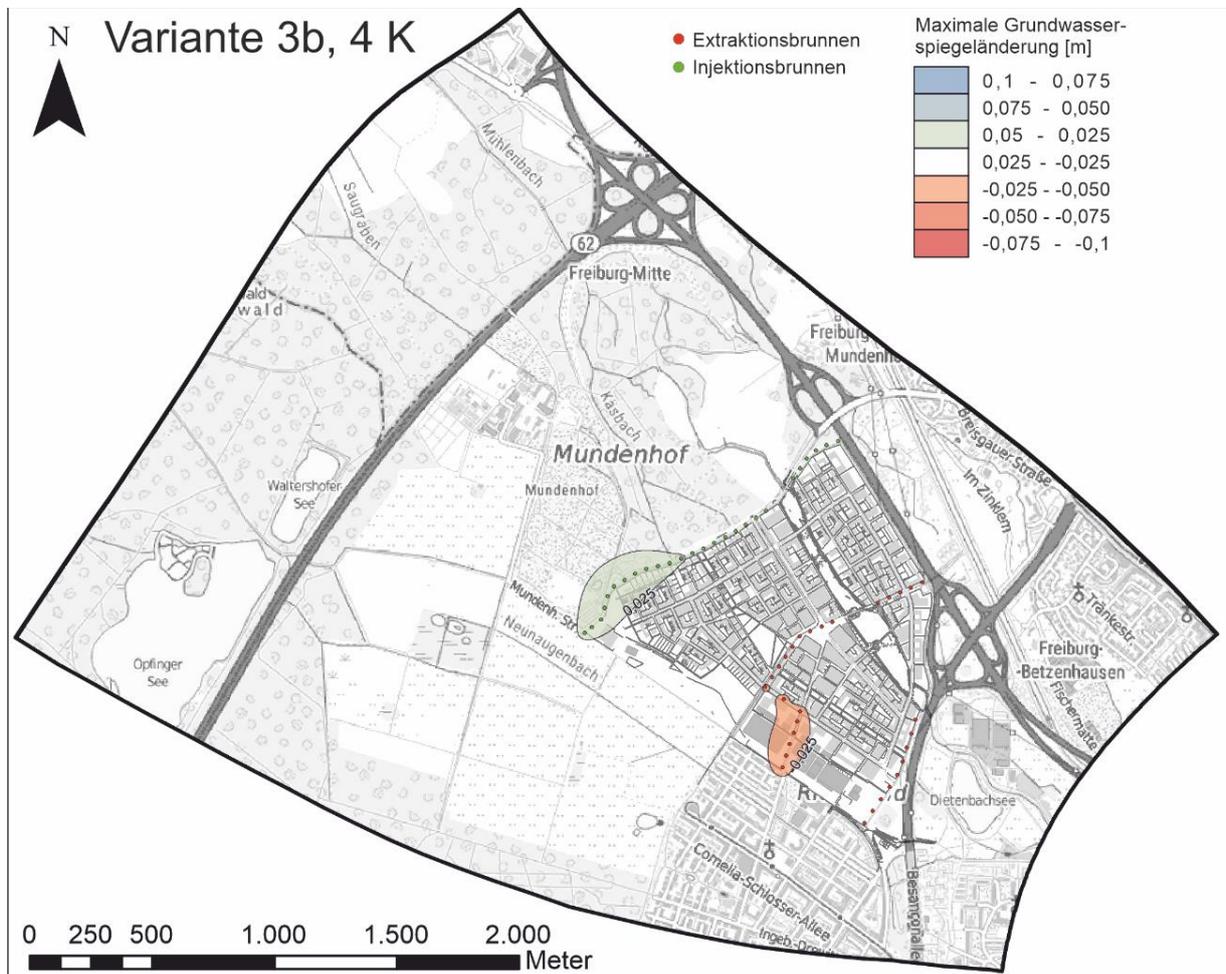


Abbildung 53: Variante 3b, 4 K: Durch den Anlagenbetrieb bedingte Grundwasserspiegeländerung zum Zeitpunkt der größten Entnahme und Injektionsraten (nach 3301 Tagen)

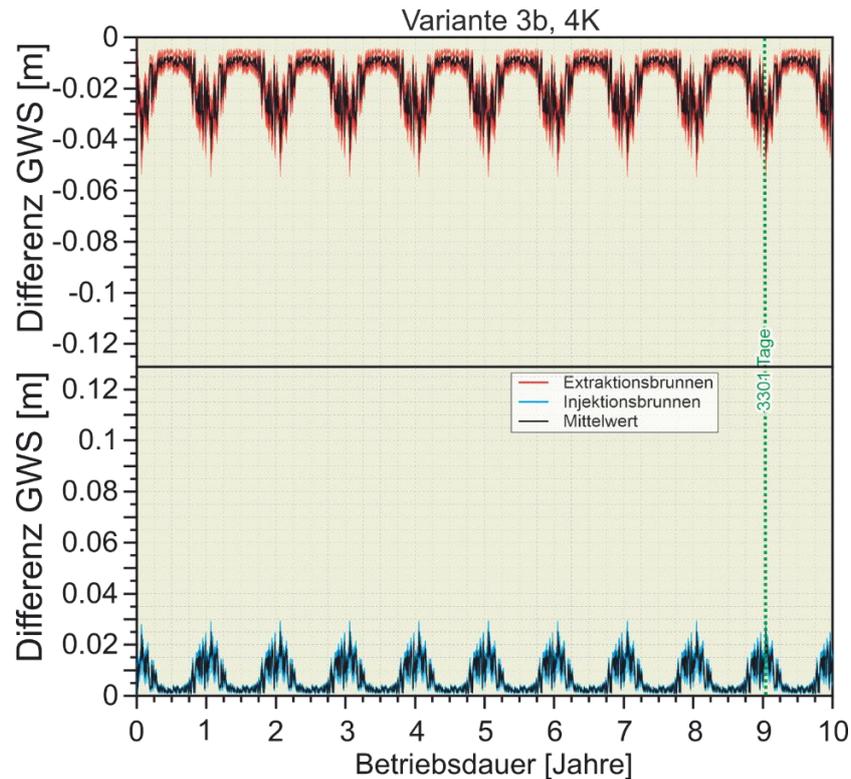


Abbildung 54: Variante 3b, 4 K: Zeitliche Entwicklung der Grundwasserhöhen an den Extraktionsbrunnen (rot) und Injektionsbrunnen (blau) für den Simulationszeitraum von 10 Jahren.

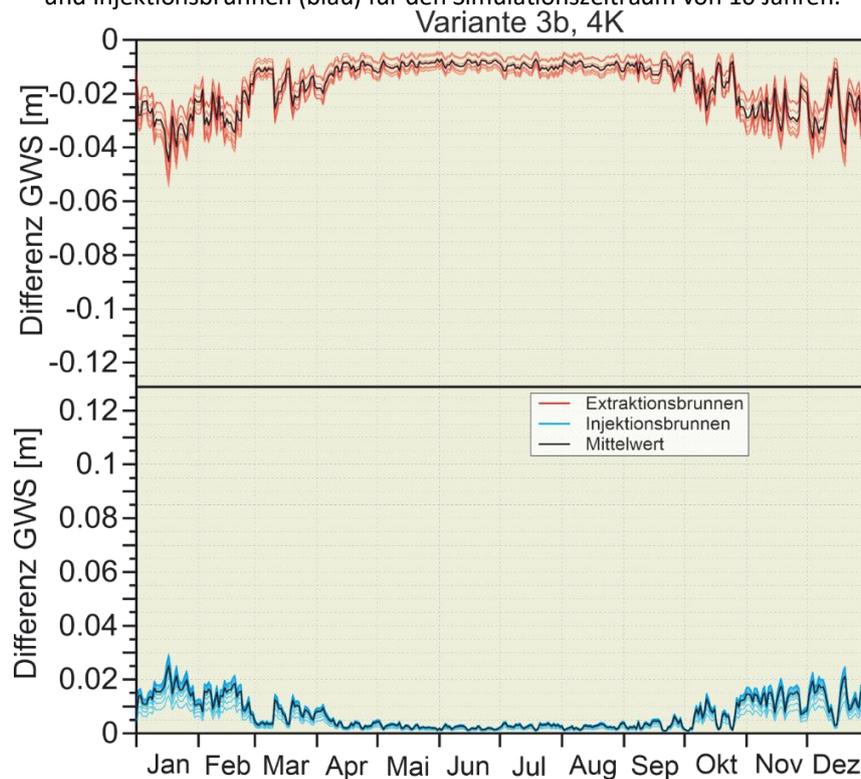


Abbildung 55: Variante 1b, 4 K: Zeitliche Entwicklung der Grundwasserhöhen an den Extraktionsbrunnen (rot) und Injektionsbrunnen (blau) innerhalb eines Kalenderjahres.

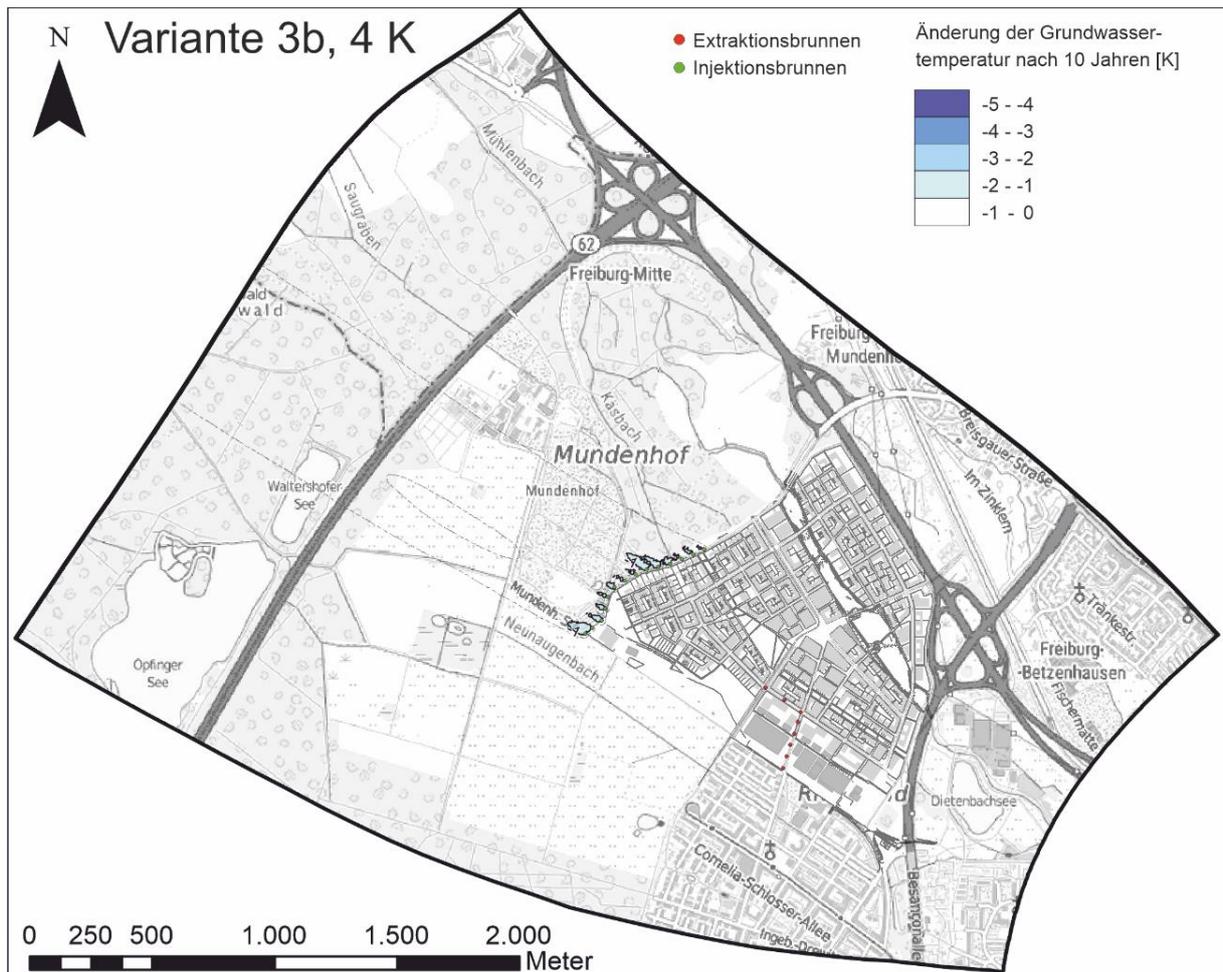


Abbildung 56: Variante 3b, 4 K: Durch den Anlagenbetrieb erzeugte Temperaturfahnen nach einer Simulationsdauer von 10 Jahren.

### 6.3 Zusatzvarianten mit 5 K-Temperaturspreizung

Die Ergebnisse der Varianten 1a, 2a, 3a zeigen in den Wintermonaten Grundwasserspiegelerhöhungen von mehreren Dezimetern im Bereich des Versickerungsbeckens im Schildkrötenkopf. Um eine Erhöhung des GW-Spiegels in diesem Bereich und damit Neuberechnungen der Entwässerungs- und Höhenplanung mit Anhebungen des Beckens zu vermeiden, wurden nachfolgende zusätzliche Varianten berechnet. Bei diesen Varianten wurden die Injektionsbrunnen im nahen Zustrom des Versickerungsbeckens im Modell entfernt (Varianten 2.1, 4, 5, 6) oder in Entnahmebrunnen umgewandelt (Variante 7). Die am Versickerungsbecken entfernten Brunnen wurde in den Varianten 4-5 mit Brunnen entlang des Bollerstaudenwegs bis zur Energiezentrale ersetzt. In Variante 6 befindenden sich die Ersatzschluckbrunnen zwischen ZMF-Gelände und Energiezentrale und in Variante 7 entlang des Bollerstaudenwegs bis hin zum ZMF-Gelände. Alle zusätzlichen Varianten wurden mit einer Temperaturspreizung von 5 K berechnet (Abbildung 57). Die Entnahme- und Injektionsraten wurde entsprechend der Fassungsvermögen auf die Brunnen verteilt. Die Ergebnisse werden in den nachfolgenden Abschnitt 6.3.1- 6.3.5 erläutert.



Abbildung 57: Überblick der Brunnenanordnungen der zu simulierenden Zusatzvarianten.

### 6.3.1 Variante 2.1a , 5 K

Die Variante 2.1a ist eine Untervariante der Variante 2a. Hierbei wurden 8 Injektionsbrunnen am westlichen Ende der Brunnengalerie, im Nahbereich des Versickerungsbeckens im Schildkrötenkopf, eliminiert. Die Injektionsraten wurden auf die übrigen Injektionsbrunnen umverteilt. Lage, Anzahl und Entnahmeraten der Extraktionsbrunnen sind identisch mit Variante 2.a, 5 K. Wie in Abbildung 4 ersichtlich ist, nimmt die hydraulische Durchlässigkeit und somit auch das Injektionsvermögen entlang dieser Schluckbrunnengalerie von Nordwesten nach Südosten ab. Eine Neulokation der Brunnen nach Süden im Verhältnis 1:1 führt somit zwangsläufig zu geringeren maximalen Injektionsraten bzw. deutlicheren GW-Aufhöhungen bei gleichbleibenden Raten. Abbildung 58 zeigt die zu erwartenden Grundwasserspiegeländerungen zum Zeitpunkt der Leistungsspitze. Die größte GW-Aufhöhung von 2,24 m ereignet sich zum Zeitpunkt der Leistungsspitze im Bereich zwischen Mundenhof-Parkplatz und Käserbach (Abbildung 59 und Abbildung 60). Die Aufhöhung liegt deutlich über dem MHW2019 Flurabstand, der an diesen Brunnen zwischen 1,14 m und 1,58 m liegt. Weiterhin reicht der Bereich mit kurzfristigen Aufhöhungen über 0,5 m mehrere 100 m weit in den späteren Bauabschnitt 3 hinein. Die durch die Entnahmebrunnen induzierten Absenkungen liegen zwischen wenigen cm in den Sommermonaten und 1,22 m während der Leistungsspitze. Durch die entfernten Brunnen im GW-Anstrom konnten die GW-Spiegeländerungen im Versickerungsbecken deutlich reduziert werden (Abbildung 61). Die Grundwasseroberfläche im Bereich des Versickerungsbeckens steigt im Januar auf maximal 13 cm, im Jahresmittel auf 3 cm an. Abbildung 62 zeigt die erzeugte Kältefahne nach einem Simulationslauf von 10 Jahren. Die Reduktion der Injektionsbrunnen führt zu einer konzentrierten Kältefahne im Abstrom der verbleibenden Brunnen. Diese erzeugt große Bereiche mit reduzierten Temperaturen über 2 K.

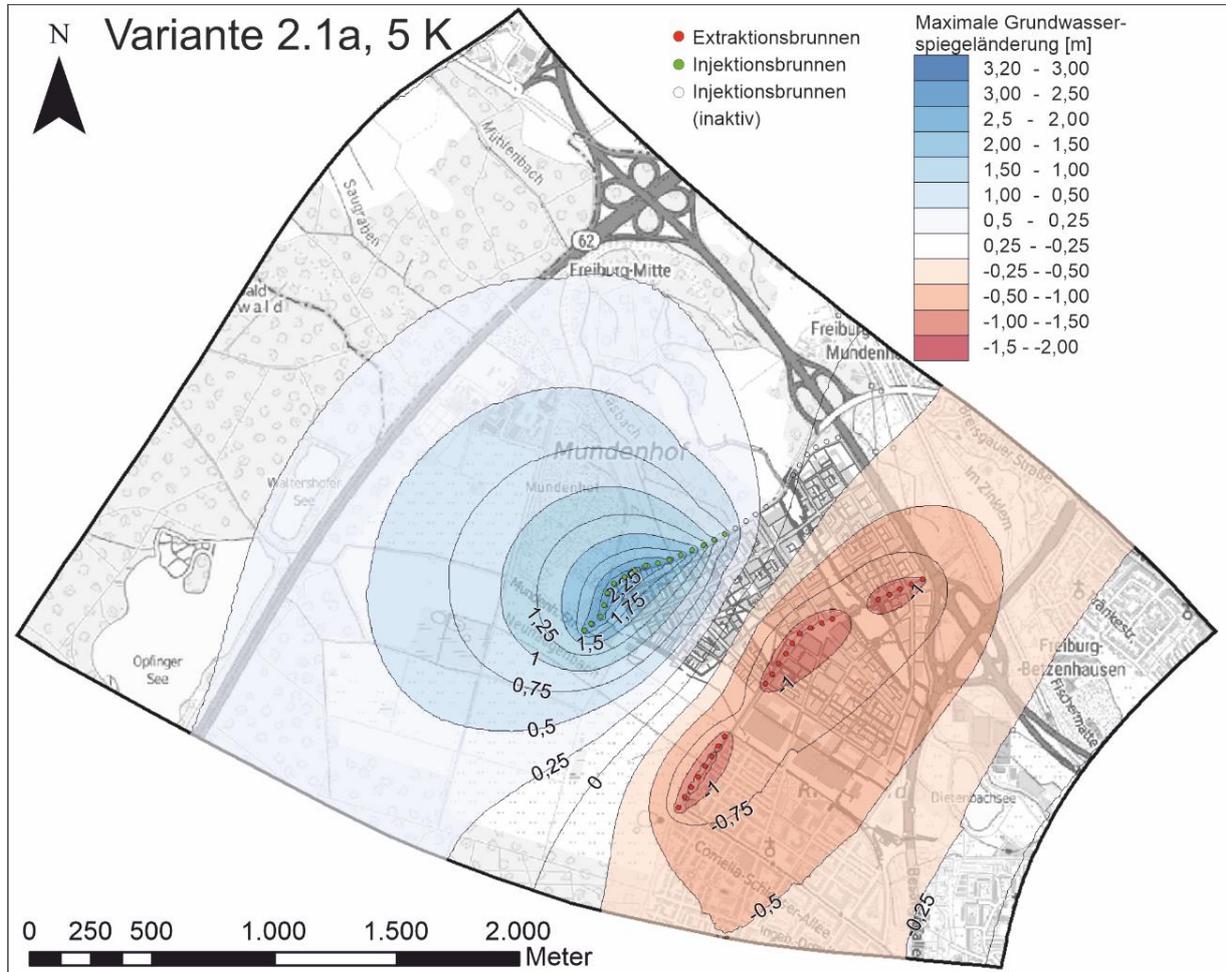


Abbildung 58: Variante 2.1 a, 5 K: Durch den Anlagenbetrieb bedingte Grundwasserspiegeländerung zum Zeitpunkt der größten Entnahme und Injektionsraten (nach 3301 Tagen)

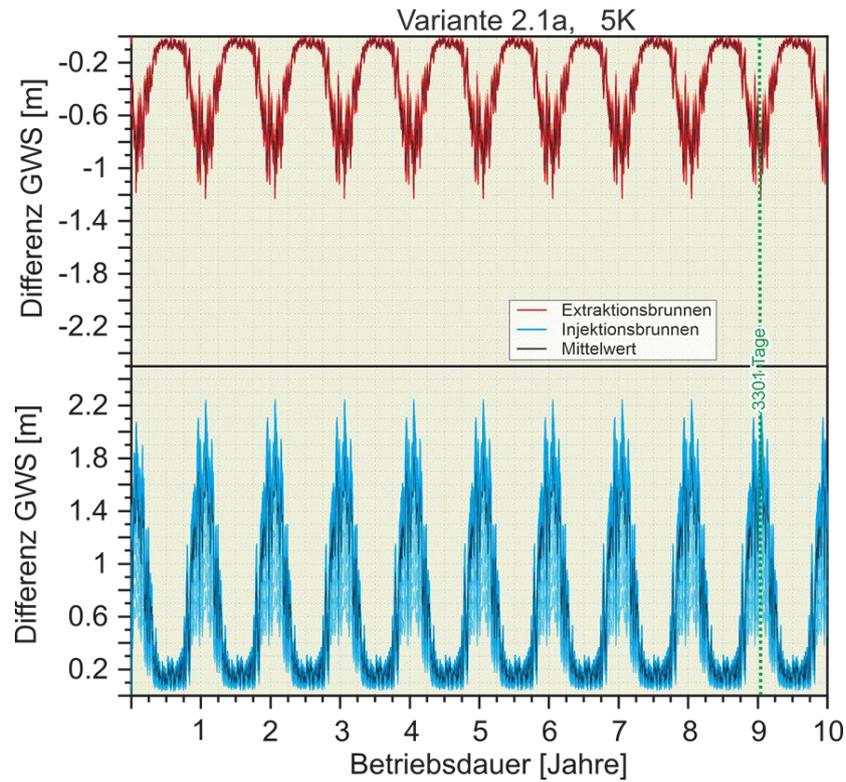


Abbildung 59: Variante 2.1a, 5 K: Zeitliche Entwicklung der Grundwasserhöhen an den Extraktionsbrunnen (rot) und Injektionsbrunnen (blau) für den Simulationszeitraum von 10 Jahren.

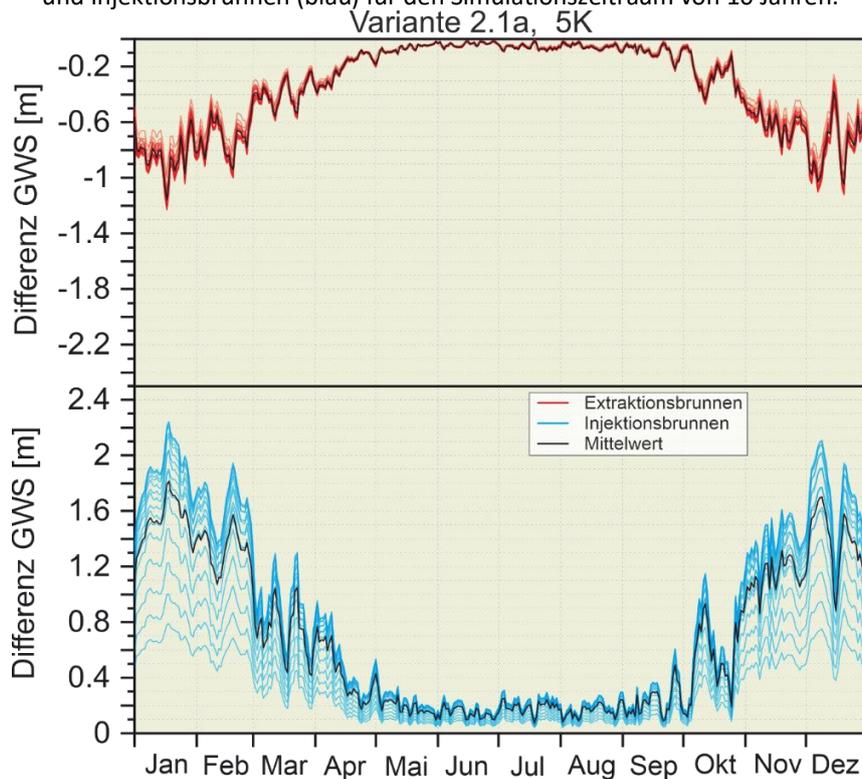


Abbildung 60: Variante 2.1a, 5 K: Zeitliche Entwicklung der Grundwasserhöhen an den Extraktionsbrunnen (rot) und Injektionsbrunnen (blau) innerhalb eines Kalenderjahres.

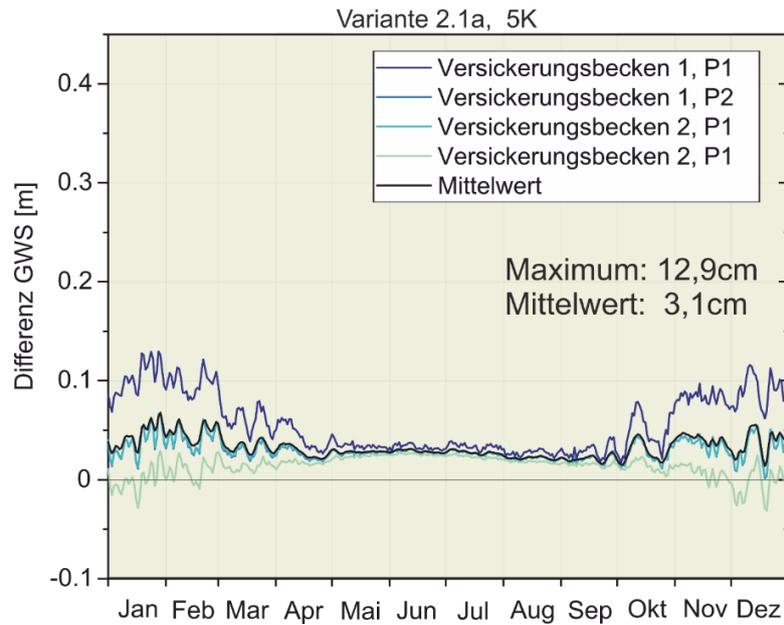


Abbildung 61: Grundwasserspiegeländerung an den vier Eckpunkten des Versickerungsbeckens im Schildkrötenkopf.

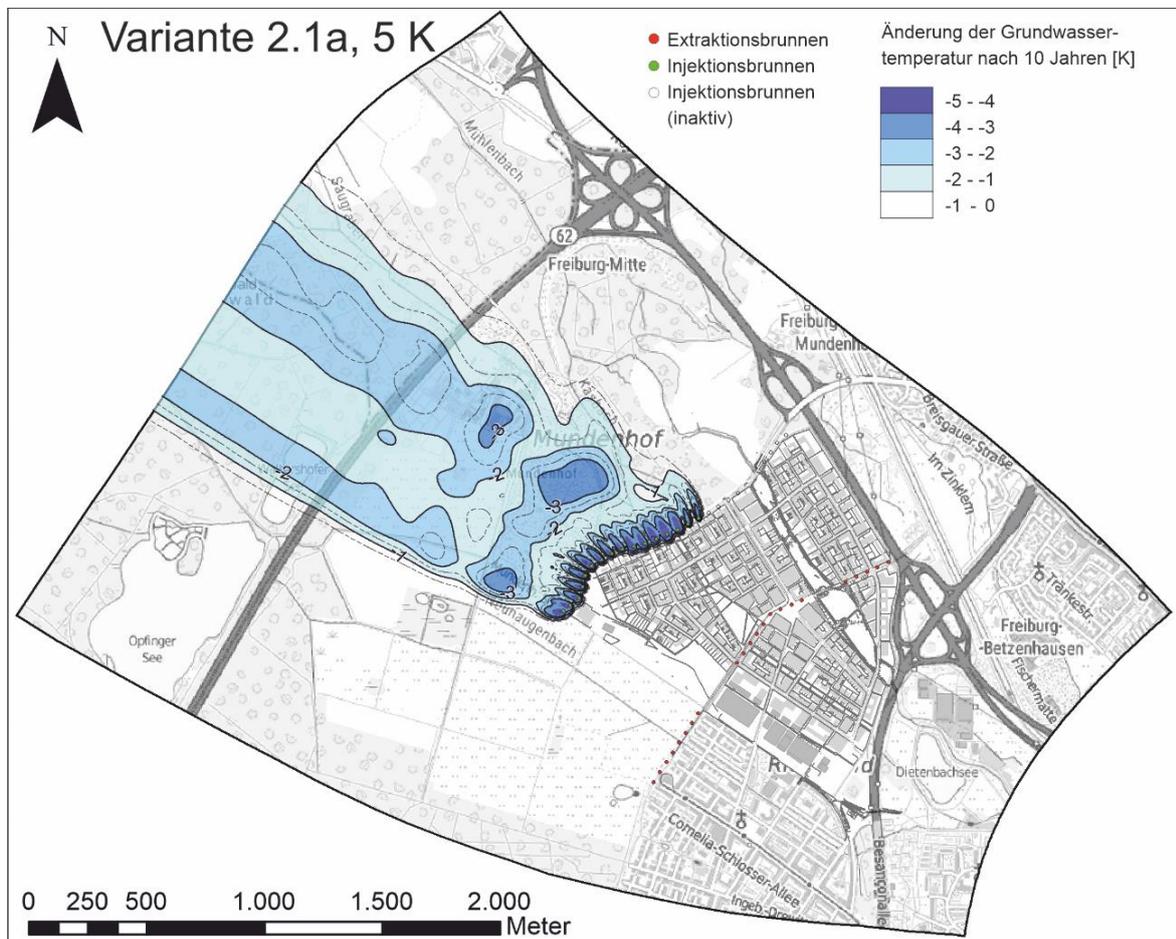


Abbildung 62: Variante 2.1a, 5K: Durch den Anlagenbetrieb erzeugte Temperaturfahnen nach einer Simulationsdauer von 10 Jahren.

### 6.3.2 Variante 4, 5 K

In Variante 4, 5 K wurden neun Brunnen im GW-Zustrom des Versickerungsbeckens im Schildkrötenkopf entfernt. In das Modell wurden 4 Ersatzbrunnen entlang der Mundenhofer Straße implementiert. Weiterhin wurden die 8 Entnahmebrunnen entlang des Bollerstaudenweges der Variante 2 in Injektionsbrunnen umgewandelt. Lage und Anzahl der Entnahmebrunnen sind zu Variante 3a identisch. Zusätzlich wurde eine Entnahmegalerie von 4 Brunnen entlang der B31a in das Modell implementiert. Abbildung 63 zeigt die zu erwartende Grundwasserspiegeländerung im Januar. Wie bei Variante 2.1a liegen die erzeugten GW-Aufhöhungen im Bereich des Parkplatzes Mundenhof teilweise über dem Flurabstand bei MHW. Die maximale Aufhöhung (Abbildung 64 und Abbildung 65) sind aufgrund der zusätzlichen Injektionsbrunnen zwar deutlich geringer als bei Variante 2.1a, die Entnahmegalerie entlang der Mundenhof Straße führt allerdings dazu, dass der Bereich mit lokalen Aufhöhungen ähnlich weit in den späteren Bauabschnitt 3 reicht. In das bestehende Baugebiet Rieselfeld ergeben sich aufgrund der Injektionsbrunnen im Bereich des Bollerstaudenweges ebenfalls Grundwasserspiegeländerungen zwischen 0,25 und 0,75 m in den Wintermonaten einstellen. Die größten GW-Spiegeländerungen werden innerhalb der Injektionsbrunnen am Parkplatz Mundenhof mit 1,7 m und innerhalb der Extraktionsbrunnen nahe Anschlussstelle B31a mit -1,14 m erreicht (Abbildung 64 und Abbildung 65). Durch die Anlagenanordnungen ergibt sich eine leichte Entlastung für das Versickerungsbecken im Schildkrötenkopf (Abbildung 66). Die GW-Entnahmen im Zustrom führen zu einer Absenkung der natürlichen Grundwasserspiegelhöhe im Bereich des Beckens von bis zu 30 cm in den Wintermonaten. In den Monaten Mai -Sept zeigt sich eine Erhöhung von maximal 4 cm. Im Jahresmittel bewirken die Anlagen eine mittlere Absenkung von 6 cm. Abbildung 67 zeigt die resultierende Temperaturfahne nach 10 Jahren. Da die Schluckbrunnen entlang der Mundenhofer Str. nahezu parallel zur Grundwasserfließrichtung angeordnet sind, kommt es zu einer Akkumulation der Kältefahnen. Die negative Temperaturdifferenz beträgt in deren Abstrom am Modellrand noch über 2 K.

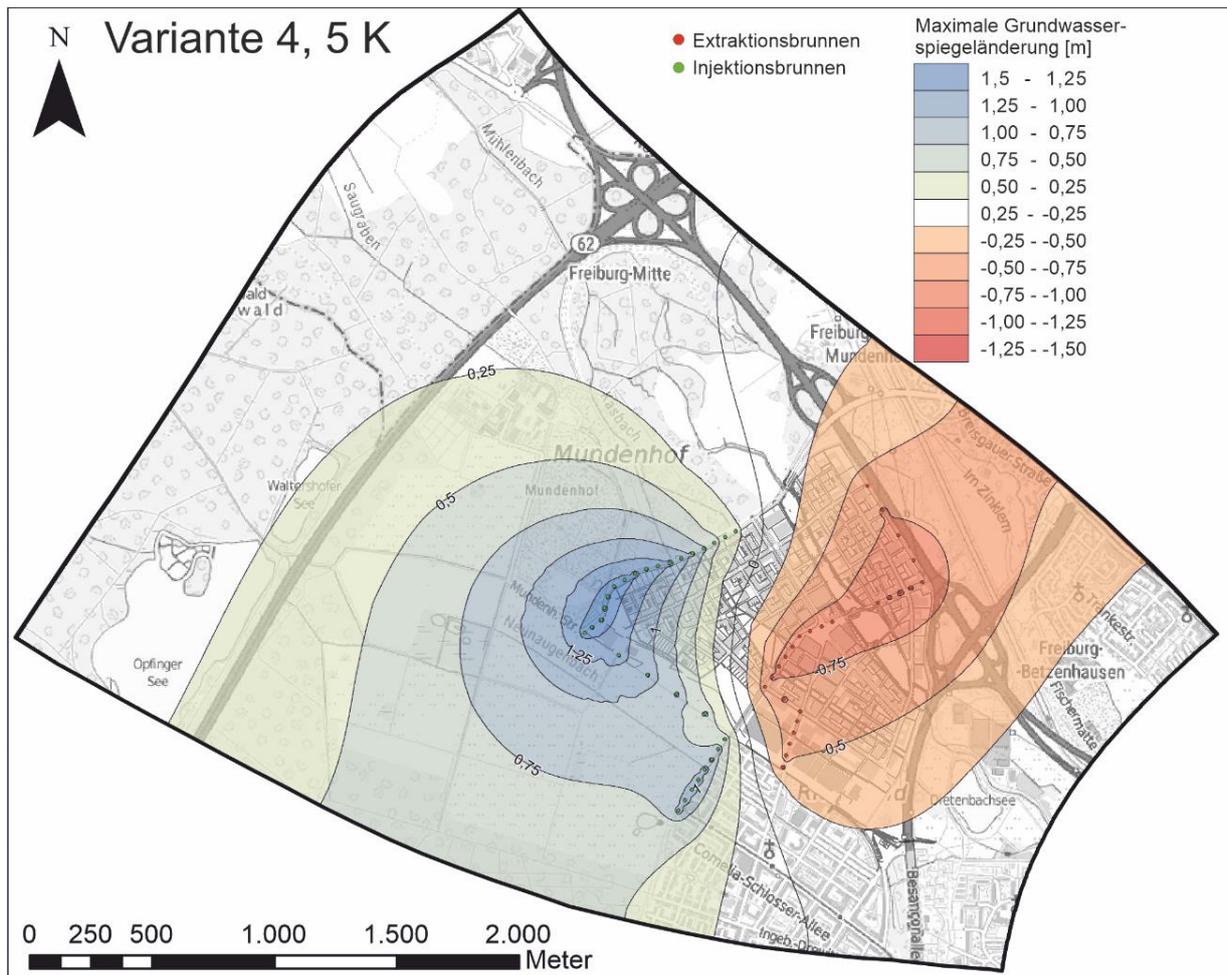


Abbildung 63: Variante 4, 5 K: Durch den Anlagenbetrieb bedingte Grundwasserspiegeländerung zum Zeitpunkt der größten Entnahme und Injektionsraten (nach 3301 Tagen)

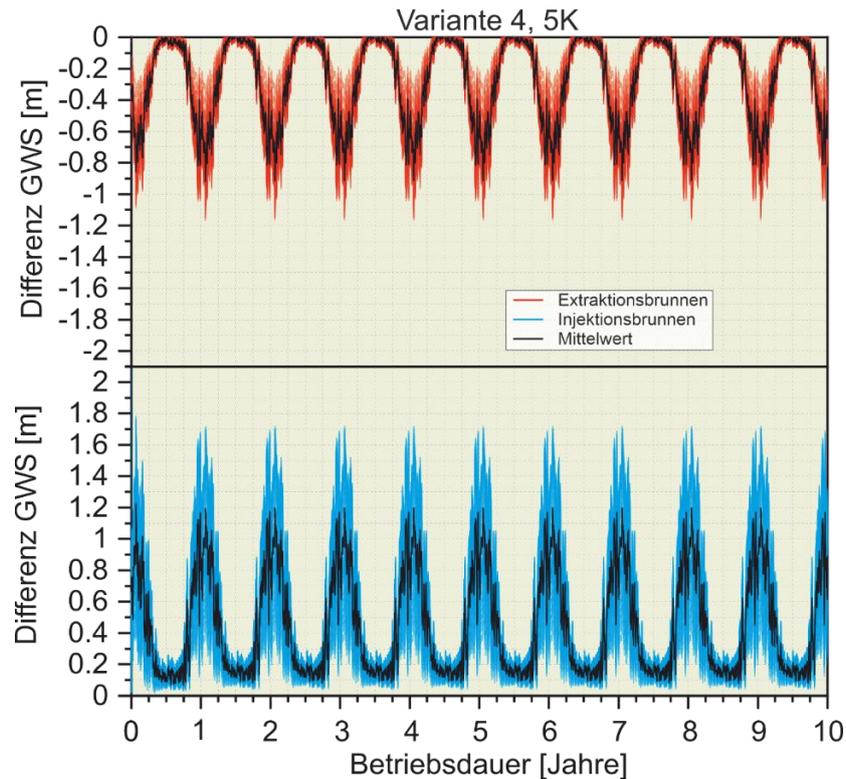


Abbildung 64: Variante 4, 5 K: Zeitliche Entwicklung der Grundwasserhöhen an den Extraktionsbrunnen (rot) und Injektionsbrunnen (blau) für den Simulationszeitraum von 10 Jahren.

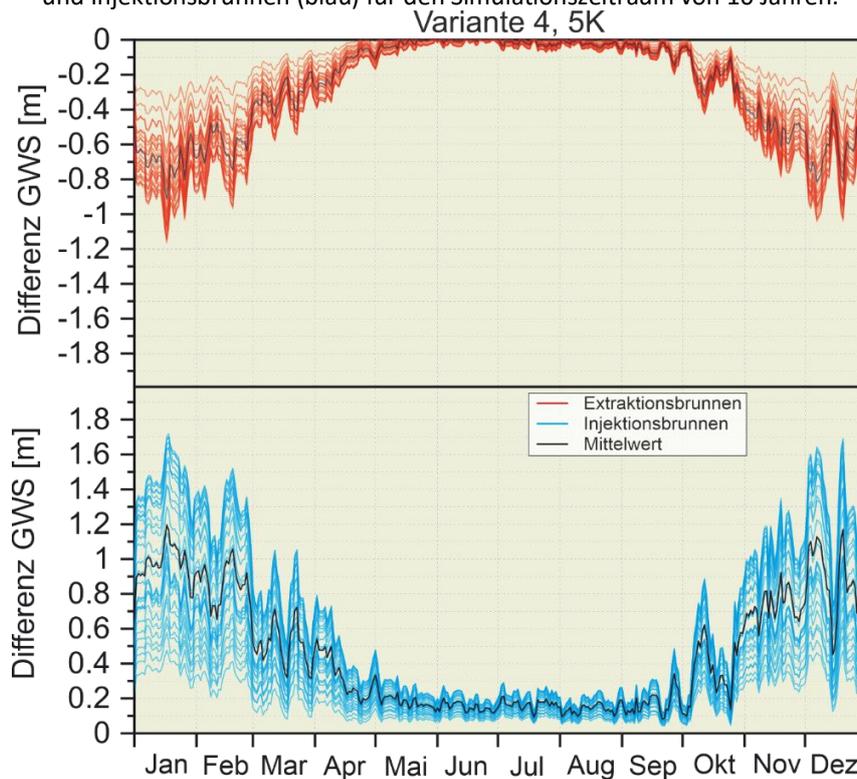


Abbildung 65: Variante 4, 5 K: Zeitliche Entwicklung der Grundwasserhöhen an den Extraktionsbrunnen (rot) und Injektionsbrunnen (blau) innerhalb eines Kalenderjahres.

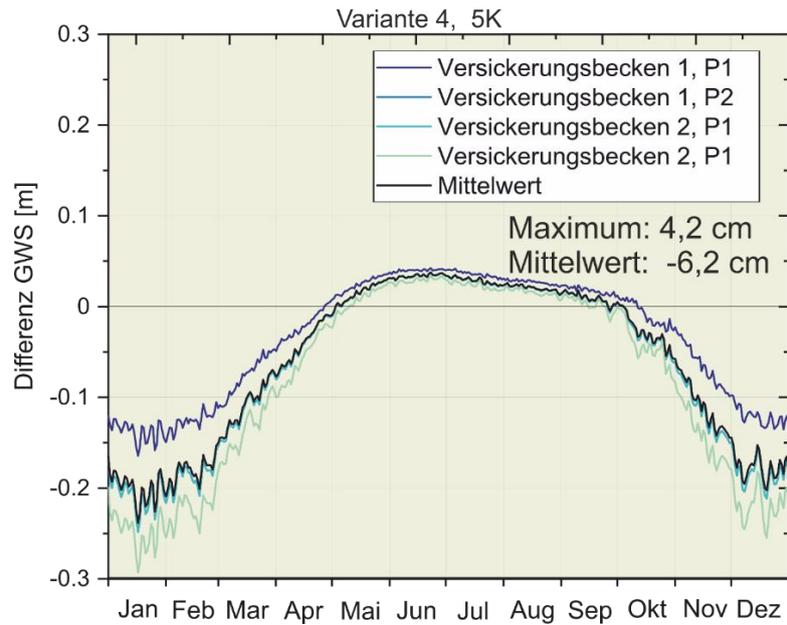


Abbildung 66: Variante 4, 5 K: Grundwasserspiegeländerung an den vier Eckpunkten des Versickerungsbeckens im Schildkrötenkopf.

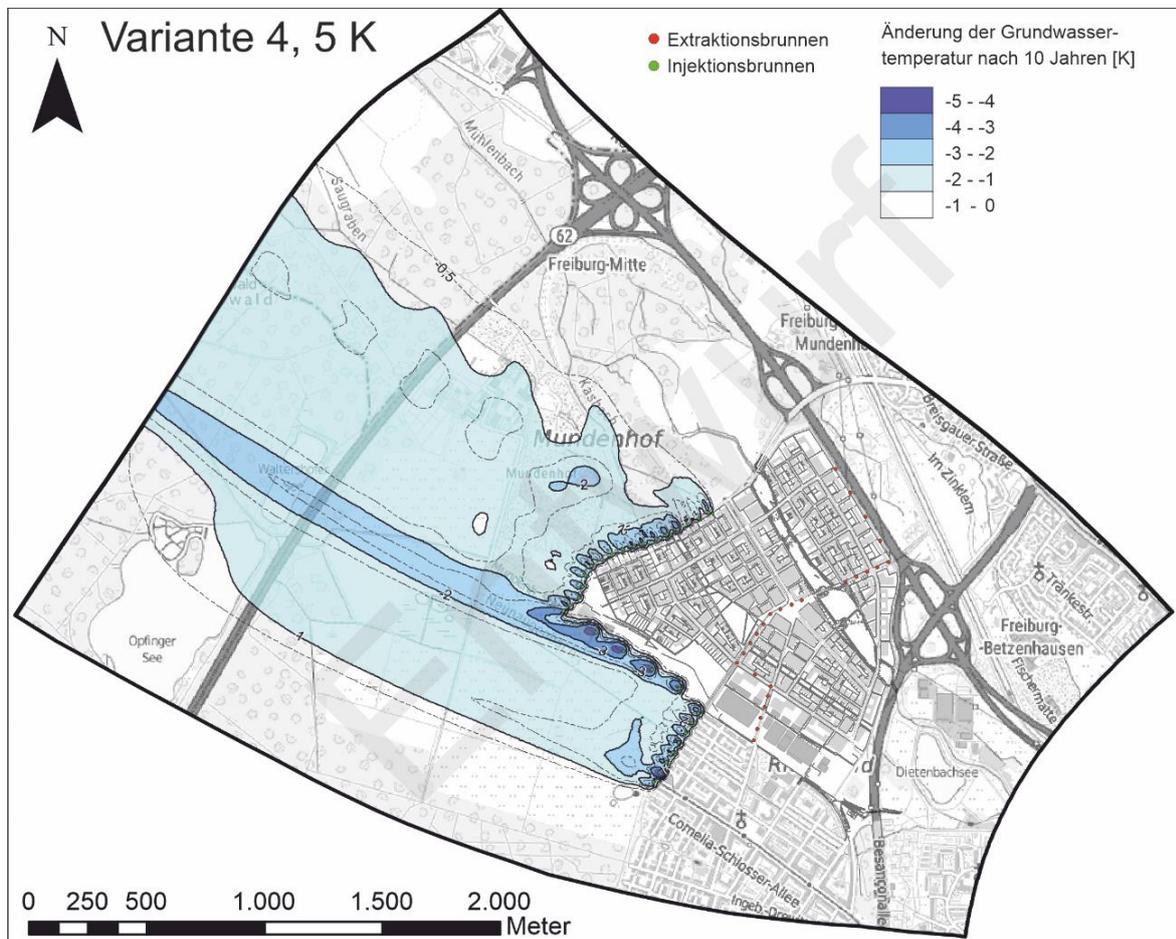


Abbildung 67: Variante 4, 5 K: Durch den Anlagenbetrieb erzeugte Temperaturfahnen nach einer Simulationsdauer von 10 Jahren.

### 6.3.3 Variante 5, 5 K

Lage und Raten der Injektionsbrunnen sind bei der Varianten 5 identisch zu Variante 4. Anstelle der Entnahmebrunnen der Carl-von-Ossietzky-Straße erfolgt ein Teil der GW-Entnahme an 9 Brunnen im Bereich der Besançonallee. Während der Entnahmespitze (Abbildung 68) kommt es bei dieser Varianten zu Aufhöhungen von bis zu 1,8 m im Bereich des Parkplatzes Mundenhof (Abbildung 69 und Abbildung 70). Wie bei den Varianten 2.1 und 4 liegt die maximale Aufhöhung im Bereich Parkplatz Mundenhof über dem dortigen Flurabstand des MHW 2019. Der Einflussbereich der Entnahmebrunnen mit Aufhöhungen über 0,5 m reicht bis in weite Teile des späteren Neubaugebiets Dietenbach und des Bestandgebiets Rieselfeld hinein. Durch die Entnahmebrunnen sind kurzzeitige Absenkungen von bis zu 0,98 m zu erwarten. Die Variante 5 führt zu einer mittleren Anhebung des Grundwasserspiegels im Bereich des Versickerungsbeckens im Schildkrötenkopf unter 2 cm und einer maximalen Anhebung von 8 cm in den Monaten Mai bis Juni (Abbildung 71). Die Entwicklung der Grundwassertemperaturen im Abstrom der Anlagen ist nahezu identisch zu Variante 4 (Abbildung 72).

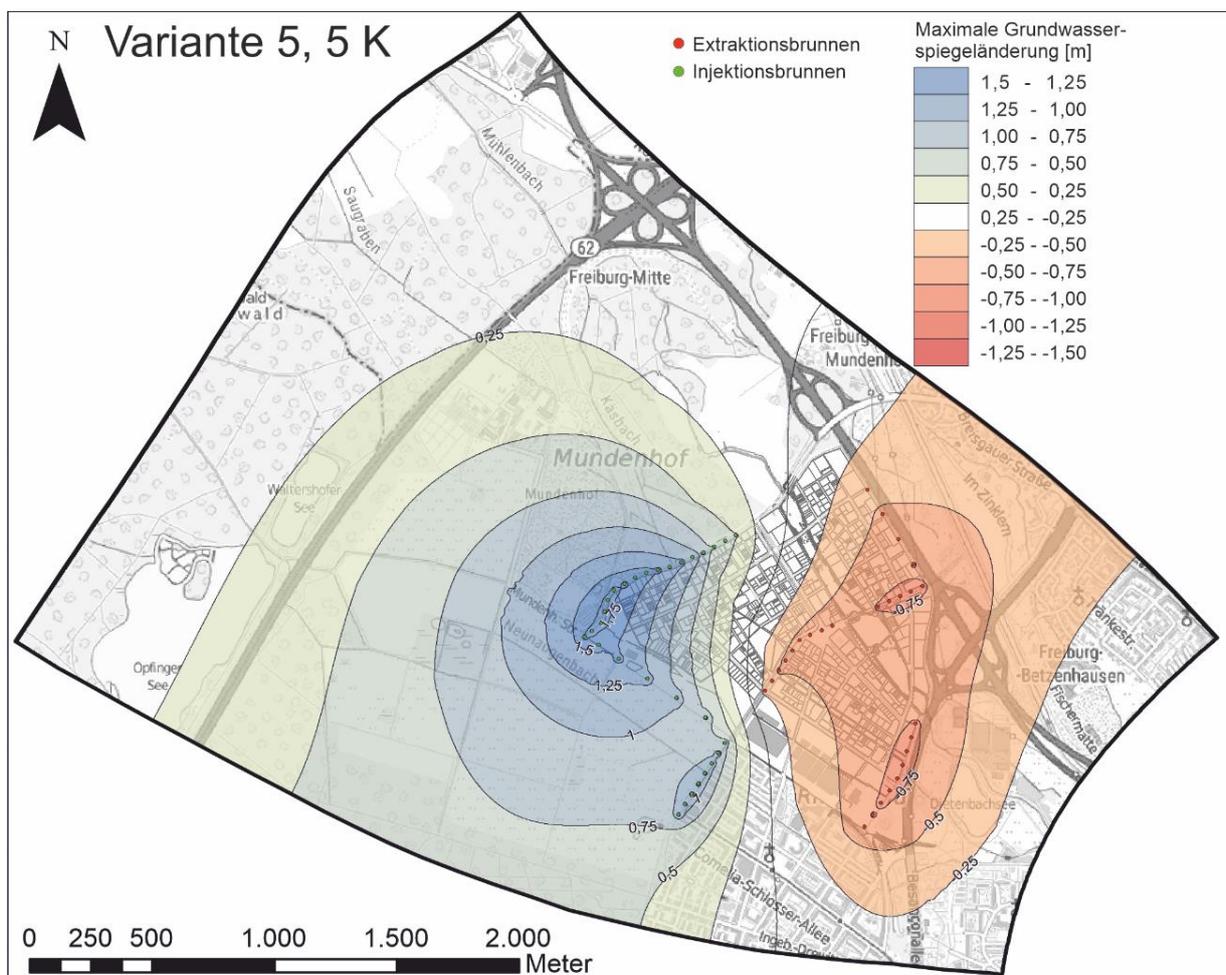


Abbildung 68: Variante 5, 5 K: Durch den Anlagenbetrieb bedingte Grundwasserspiegeländerung zum Zeitpunkt der größten Entnahme und Injektionsraten (nach 3301 Tagen).

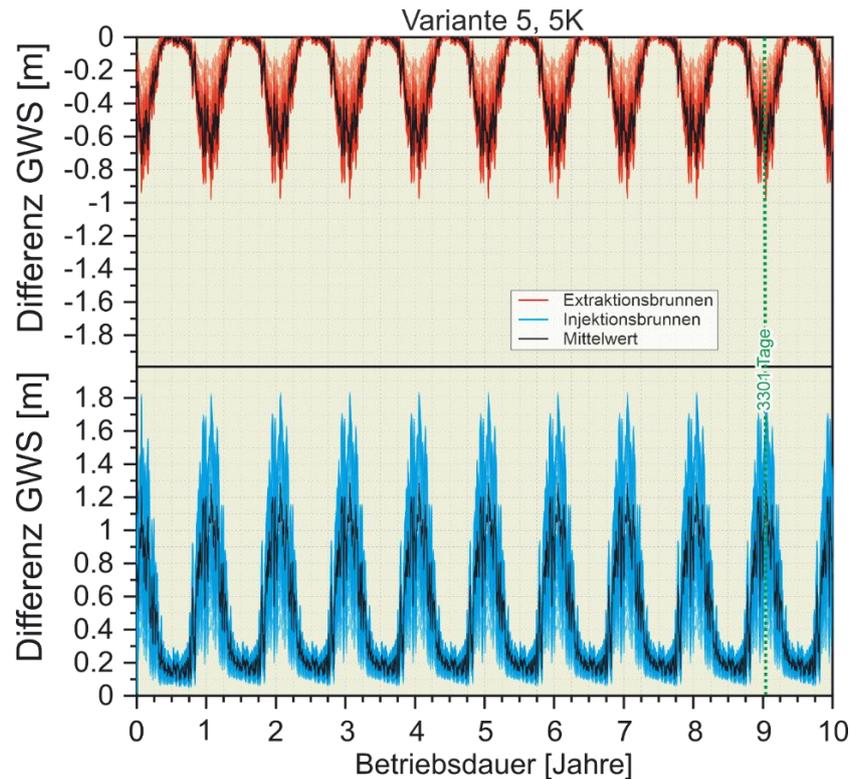


Abbildung 69: Variante 5, 5K: Zeitliche Entwicklung der Grundwasserhöhen an den Extraktionsbrunnen (rot) und Injektionsbrunnen (blau) für den Simulationszeitraum von 10 Jahren.

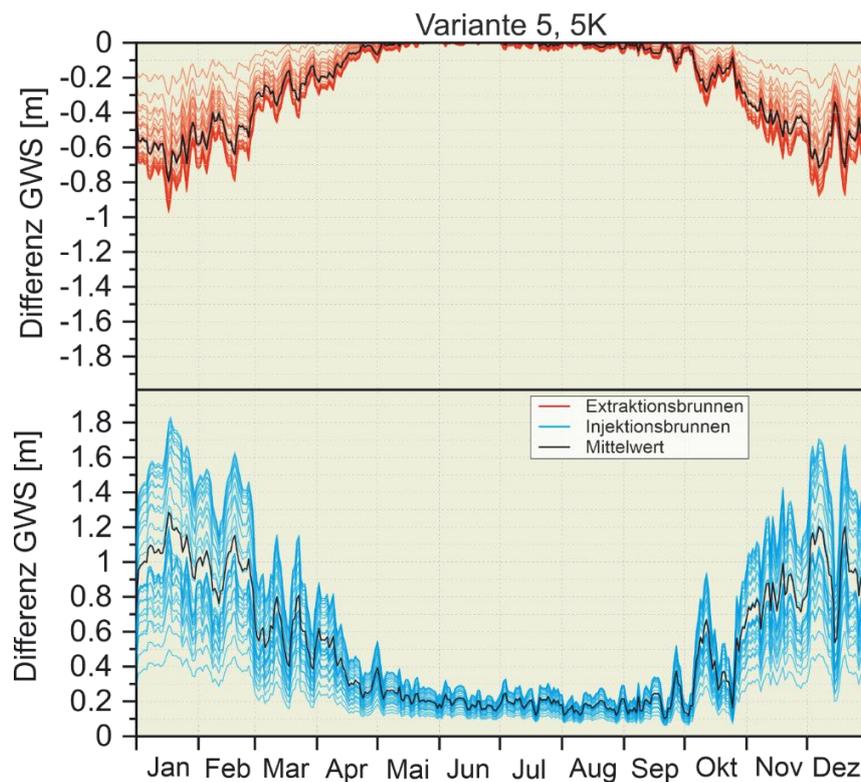


Abbildung 70: Variante 5, 5 K: Zeitliche Entwicklung der Grundwasserhöhen an den Extraktionsbrunnen (rot) und Injektionsbrunnen (blau) innerhalb eines Kalenderjahres.

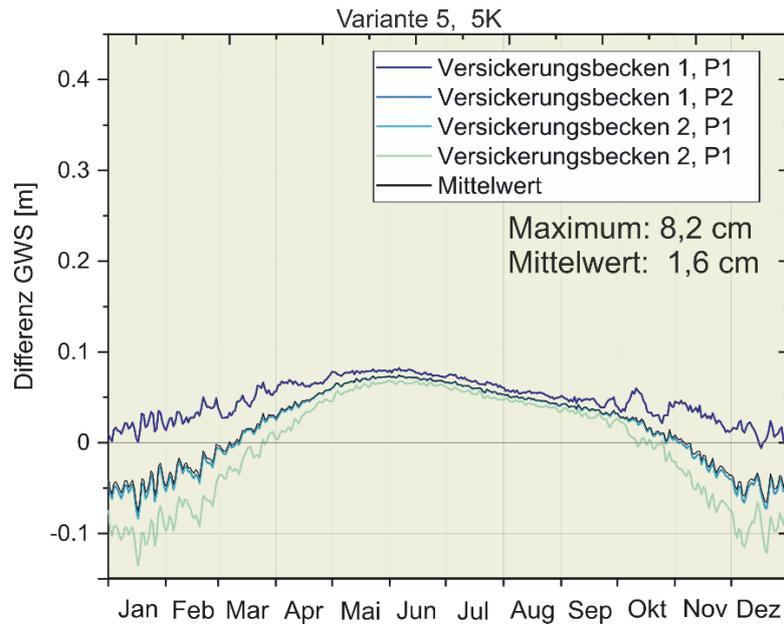


Abbildung 71: Variante 5, 5 K: Grundwasserspiegeländerung an den vier Eckpunkten des Versickerungsbeckens im Schildkrötenkopf.

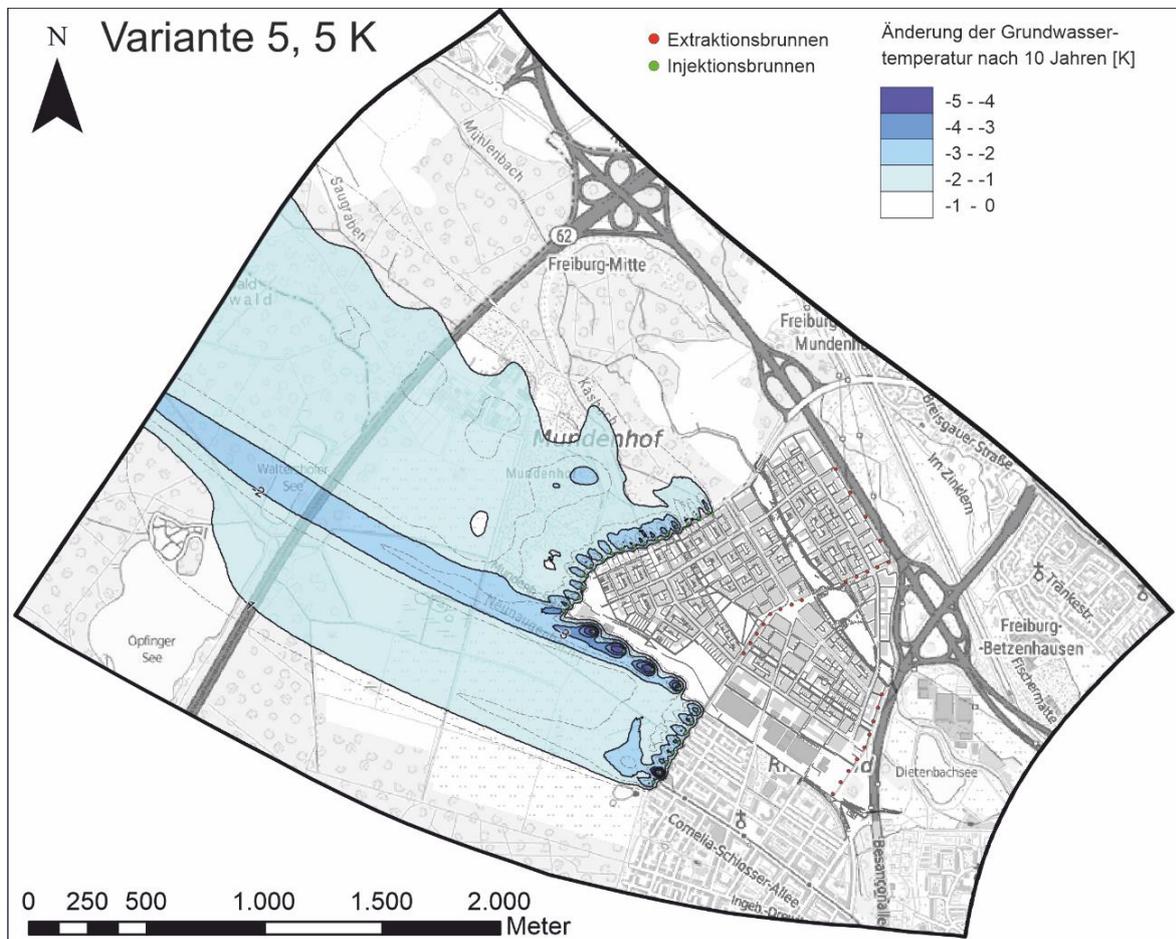


Abbildung 72: Variante 5, 5 K: Durch den Anlagenbetrieb erzeugte Temperaturfahnen nach einer Simulationsdauer von 10 Jahren.

#### 6.3.4 Variante 6, 5 K

Bei der Variante 6 wurden zusätzlich zu den Injektionsbrunnen entlang der Straße zum Tiergehege eine Galerie mit 11 Brunnen zwischen ZMF-Gelände und Energiezentrale in das Modell eingebaut. Die Brunnen liegen in 50 m Abstand zueinander. Die Entnahme erfolgt unverändert zu der Variante 4. Zum Zeitpunkt der maximalen Brunnenraten im Januar lassen sich in Abbildung 73 an den Brunnen im Bereich des ZMF-Geländes GW-Aufhöhungen von bis zu 2,5 m beobachten (Abbildung 74 und Abbildung 75). Gründe sind die hohe Anzahl der Injektionsbrunnen auf kleiner Fläche, die Anordnung parallel zu Fließrichtung und die vergleichsweise geringen hydraulischen Durchlässigkeiten in diesem Bereich (Abbildung 4). Die Flurabstände zum MHW19 liegen bei diesen Brunnen zwischen 1,84 und 7,31 m (Abbildung 2). Auch bei dieser Variante erstreckt sich die durch die Anlagen bedingte GW-Aufhöhung über 0,5 m bis weit in den 3. Bauabschnitt hin. Der Stadtteil Rieselfeld bleibt von GW-Aufhöhungen bei dieser Variante unberührt. Innerhalb der Extraktionsbrunnen kommt es zu Absenkungen von bis zu 1,32 m. Das Versickerungsbecken im Schildkrötenkopf wird durch diese Brunnenanordnung in den Monaten Oktober bis Mitte Mai deutlich entlastet. Im Januar fällt durch die Brunnen der dortige Grundwasserspiegel um 30 cm, im Jahresmittel um 9 cm. Lediglich von Mitte Mai bis Ende September zeigen sich leichte GW-Aufhöhungen in diesem Bereich unter 3 cm (Abbildung 76). Die dichte Brunnenanordnung im Bereich des ZMF-Geländes resultiert in einer stark komprimierten Kältefahne mit Temperaturreduzierungen von über 4 K am Modellabstromrand der Brunnen (Abbildung 77).

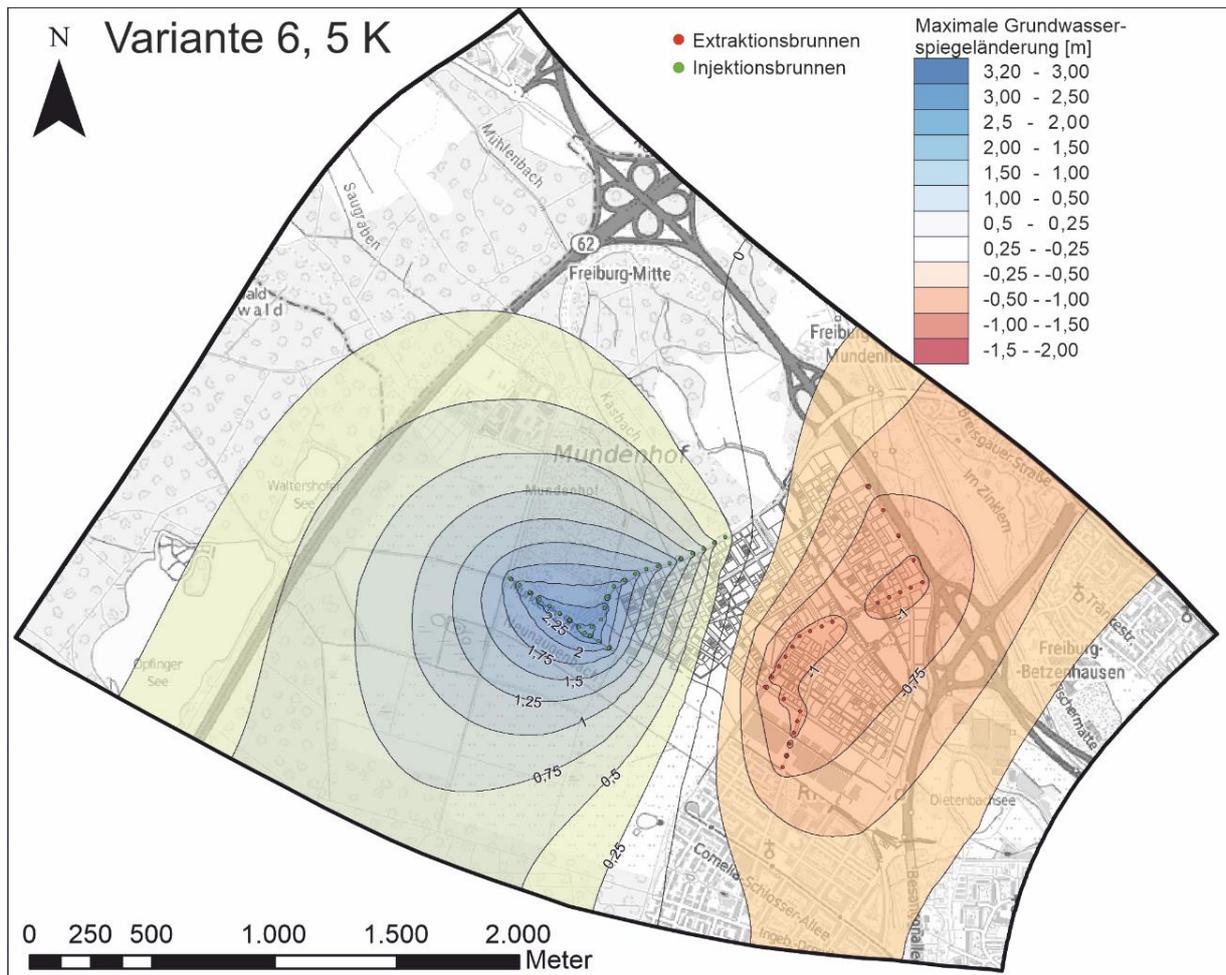


Abbildung 73: Variante 6, 5 K: Durch den Anlagenbetrieb bedingte Grundwasserspiegeländerung zum Zeitpunkt der größten Entnahme und Injektionsraten (nach 3301 Tagen)

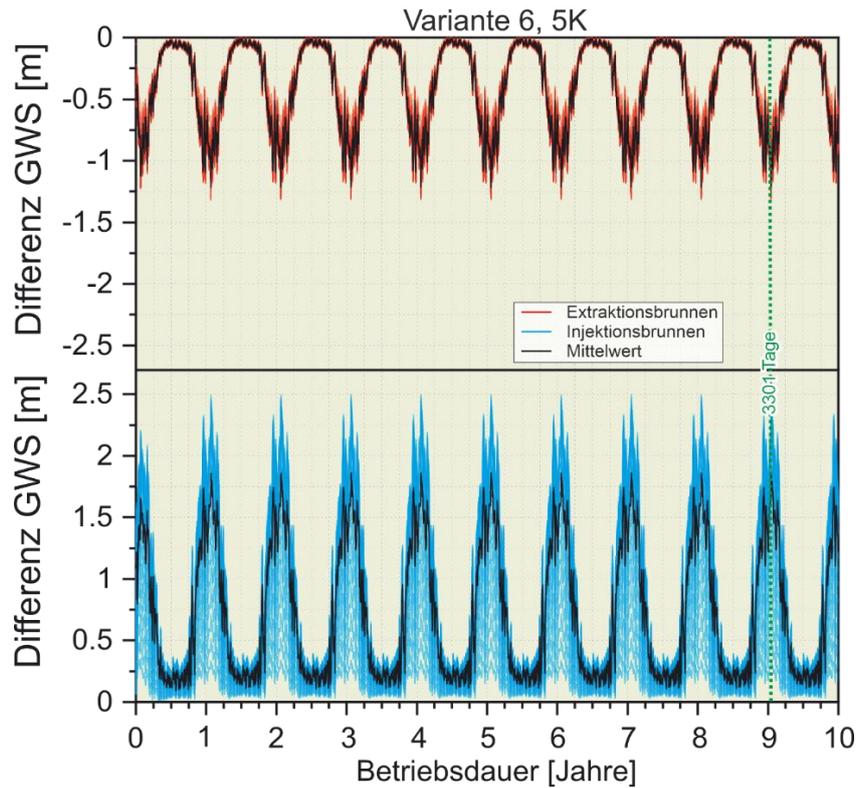


Abbildung 74: Variante 6, 5 K: Zeitliche Entwicklung der Grundwasserhöhen an den Extraktionsbrunnen (rot) und Injektionsbrunnen (blau) für den Simulationszeitraum von 10 Jahren.

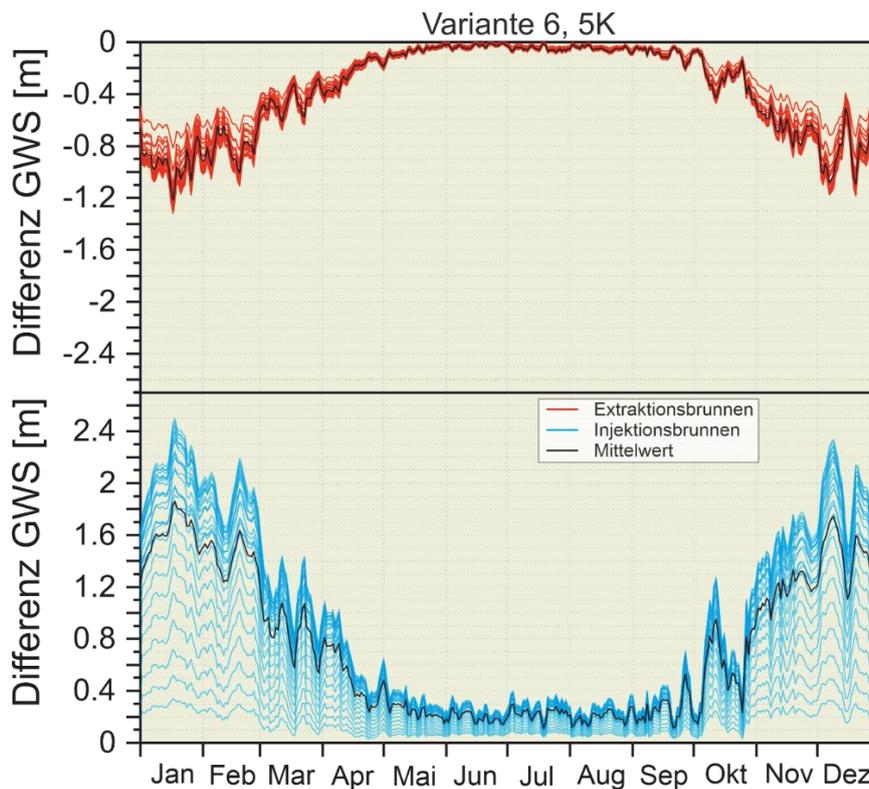


Abbildung 75: Variante 6, 5 K: Zeitliche Entwicklung der Grundwasserhöhen an den Extraktionsbrunnen (rot) und Injektionsbrunnen (blau) innerhalb eines Kalenderjahres.

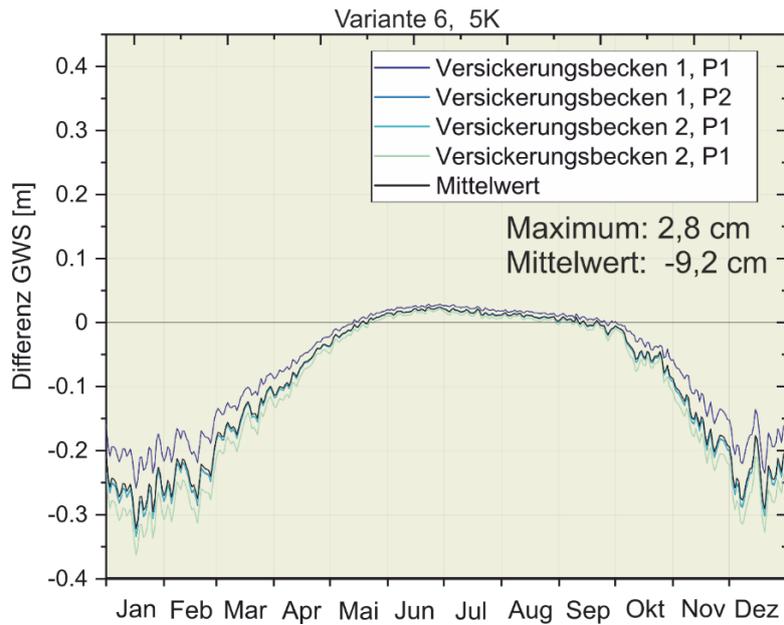


Abbildung 76: Variante 6, 5 K: Grundwasserspiegeländerung an den vier Eckpunkten des Versickerungsbeckens im Schildkrötenkopf.

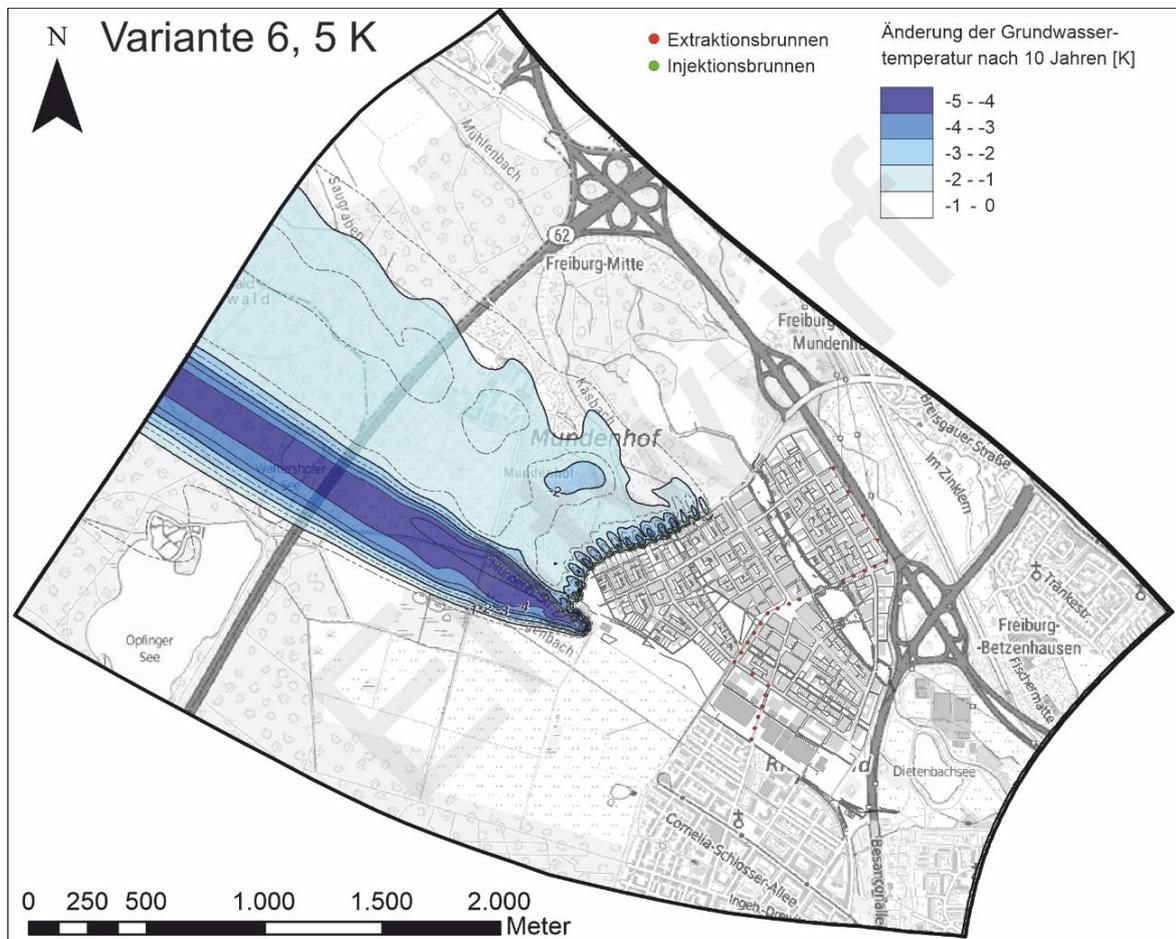


Abbildung 77: Variante 6, 5 K: Durch den Anlagenbetrieb erzeugte Temperaturfahnen nach einer Simulationsdauer von 10 Jahren.

### 6.3.5 Variante 7, 5 K

In der Variante 7, 5 K wurden, zusätzlich zu den Schluckbrunnen an der Straße zum Tiergehege (18 Injektionsbrunnen), weitere Injektionsgalerien entlang des Bollerstaudenweges (8 Injektionsbrunnen) und entlang der Mundenhofer Str., zwischen ZMF-Gelände und Kreuzung zum Bollerstaudenweg (7 Injektionsbrunnen) in das Modell eingebaut. Aufgrund der Ergebnisse der vorherigen Varianten wurden die Brunnen entlang der Mundenhofer Straße mit einem erweiterten Abstand zueinander von 140 m eingebaut. Die GW-Entnahme erfolgt an einer Galerie aus insgesamt 28 Extraktionsbrunnen. Die Galerie erstreckt sich von der Carl-von-Ossietzky-Straße, entlang der späteren S-Bahn Trasse und der B31 a und endet an der Straße zum Tiergehege, im nahen Zustrom zum Versickerungsbecken im Schildkrötenkopf. Die drei Entnahmebrunnen in der Straße zum Tiergehege sollen das Versickerungsbecken entlasten. Abbildung 78 zeigt die durch den Anlagenbetrieb maximal zu erwartenden Änderungen der GW-Spiegelhöhe. Auch bei dieser Variante stellen sich für die nordwestlichen Bereiche von Dietenbach GW-Aufhöhungen von teilweise über 1,25 m in den Wintermonaten ein. Am Westrand von Rieselfeld und im Naturschutzgebiet Rieselfeld liegen die Aufhöhungen zwischen 0,25 und 0,75 m. Abbildung 79 zeigt den Flurabstand zu dem Zeitpunkt der maximalen Grundwasserspiegeländerung und dem MHW19. Am westlichen Bereich der Straße zum Tiergehege stellen sich zu diesem Zeitpunkt negative Flurabstände ein (GW-Spiegel > GOK). Alle angrenzenden Entwässerungsgräben in diesem Bereich sind zu diesem Zeitpunkt wasserführend. In wie weit eine oberflächige Entwässerung über die erfolge würde, die zu einer Reduzierung der Grundwassererhöhung führt, kann an dieser Stelle nicht beurteilt werden. Die Flurabstände der Brunnen am Bollerstaudenweg liegen für den gleichen Zeitraum zwischen 2,14 m und 3,86 m. Die Abbildung 80 und Abbildung 81 zeigen die zeitliche Grundwasserspiegeländerung innerhalb der Entnahme- und Schluckbrunnen. Die maximale Grundwasserabsenkung innerhalb der Schluckbrunnen im Bereich des Parkplatzes zum Tiergehege beträgt 1,67 m, die maximale Absenkung liegt innerhalb eines Entnahmebrunnens Nahe der B31a. Die Brunnenanordnung führt zu einer deutlichen Entlastung des Versickerungsbeckens Schildkrötenkopf in den Monaten von September bis Juni. Durch die Entnahmebrunnen im Zustrom sinkt der Grundwasserspiegel im Bereich des Versickerungsbeckens um durchschnittlich 16 cm. In den Monaten Dezember -Februar liegt der Grundwasserspiegel bis zu 40 cm unter dem natürlichen Grundwasserspiegel. Abbildung 83 zeigt die durch die GWWP erzeugte Temperaturfahne nach einer Simulationsdauer von 10 Jahren. Im Abstrom der Mundenhofer Str. kommt es zur Akkumulation der Einzelfahnen der dort verorteten Brunnen. Dies erzeugt einen kühleren Bereich mit einer Temperaturerniedrigung über 2 Grad im Abstrom dieser Anlagen über die Modellgrenze hinaus.

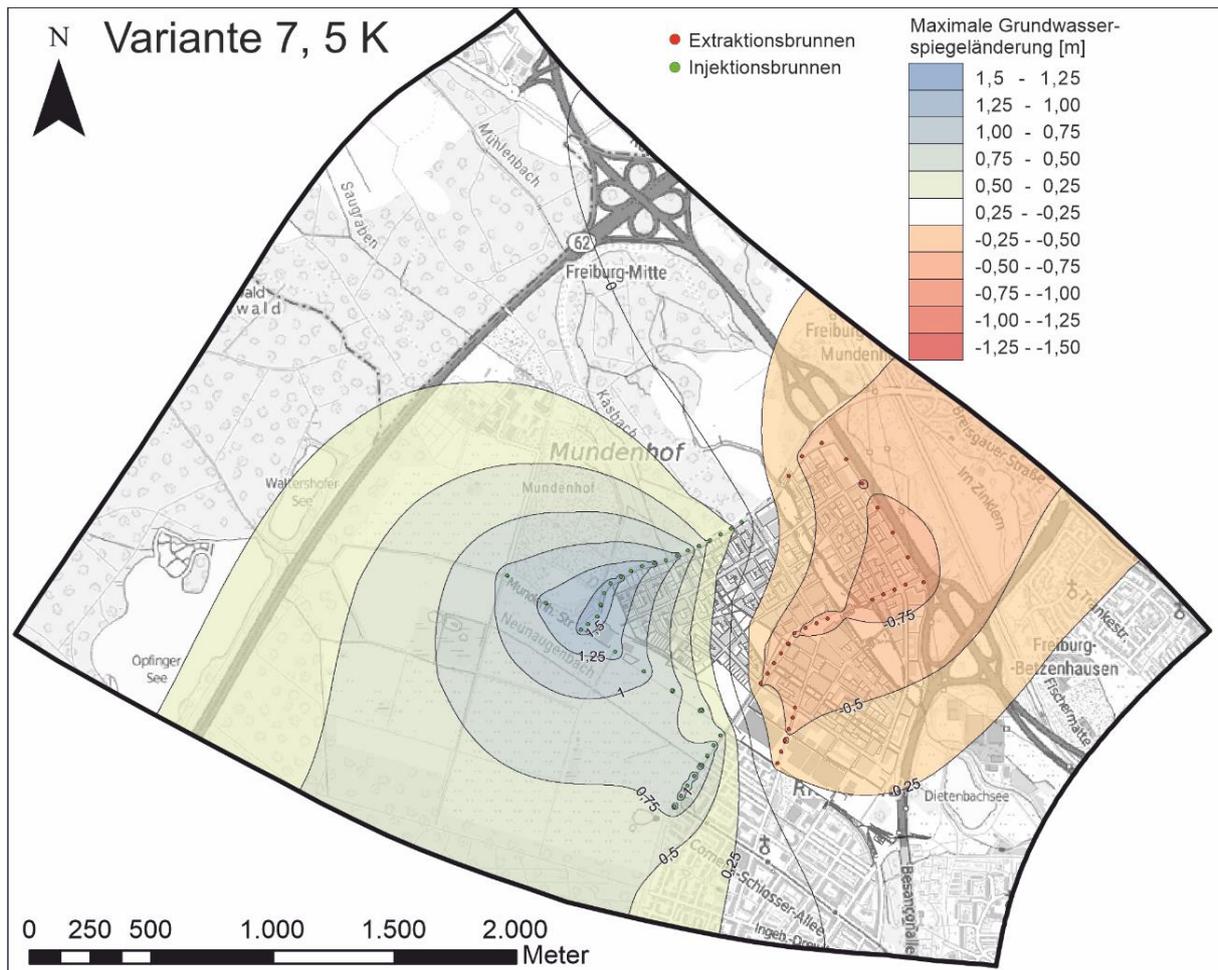


Abbildung 78: Variante 7, 5 K: Durch den Anlagenbetrieb bedingte Grundwasserspiegeländerung zum Zeitpunkt der größten Entnahme und Injektionsraten (nach 3301 Tagen)



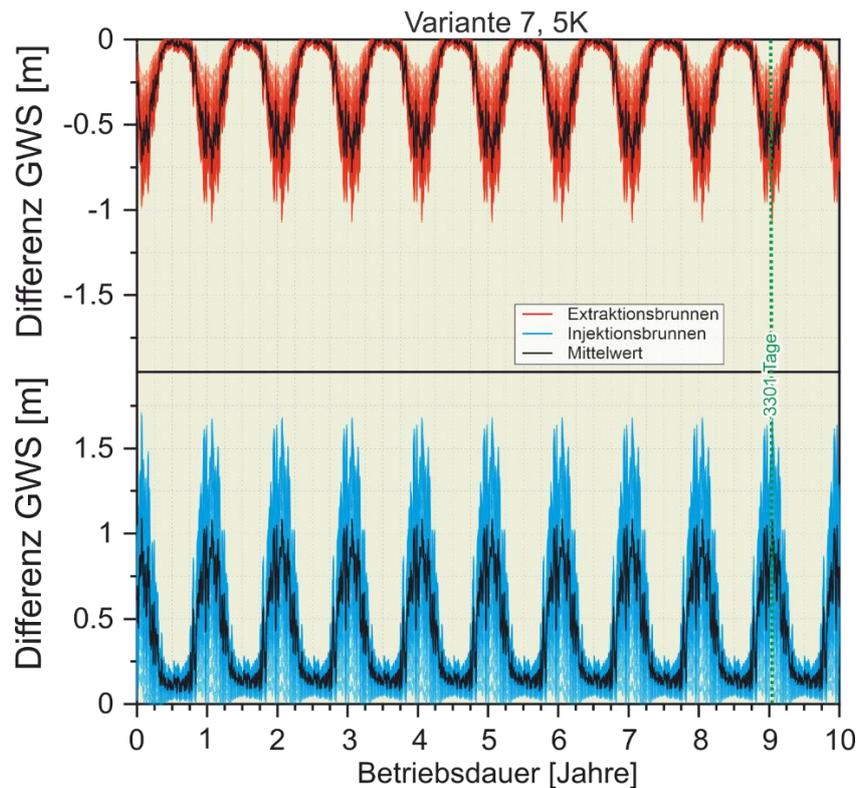


Abbildung 80: Variante 7, 5 K: Zeitliche Entwicklung der Grundwasserhöhen an den Extraktionsbrunnen (rot) und Injektionsbrunnen (blau) für den Simulationszeitraum von 10 Jahren.

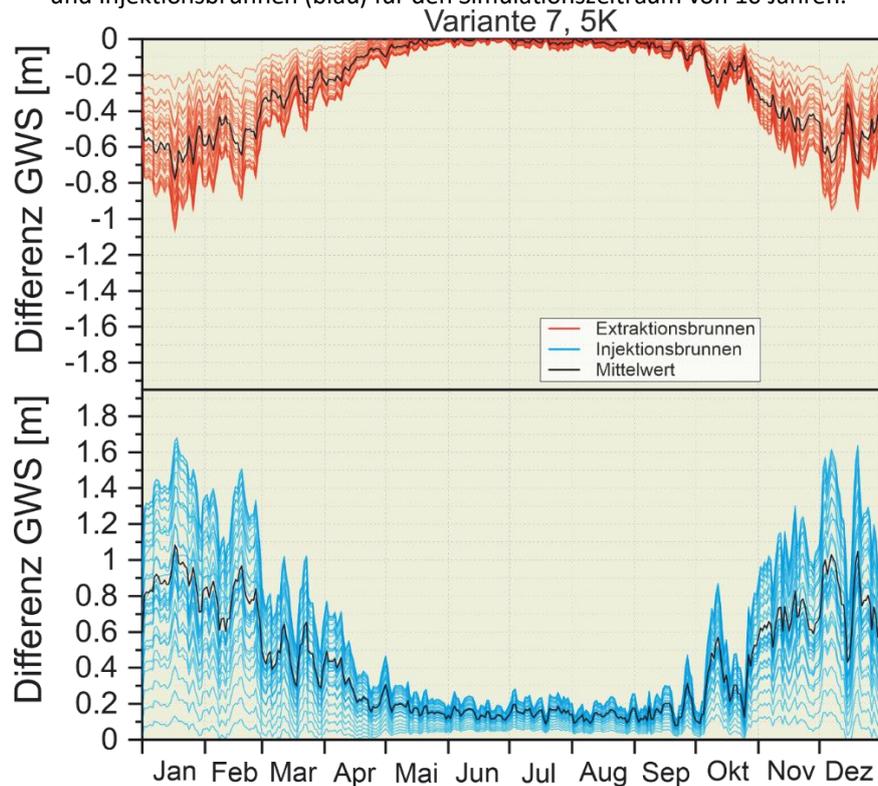


Abbildung 81: Variante 7, 5 K: Zeitliche Entwicklung der Grundwasserhöhen an den Extraktionsbrunnen (rot) und Injektionsbrunnen (blau) innerhalb eines Kalenderjahres.

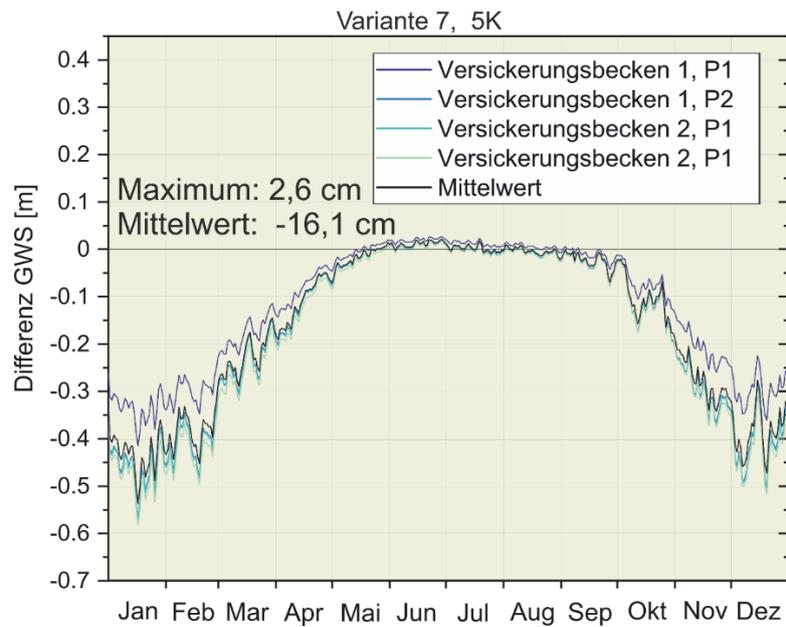


Abbildung 82: Variante 7, 5 K: Grundwasserspiegeländerung an den vier Eckpunkten des Versickerungsbeckens im Schildkrötenkopf.

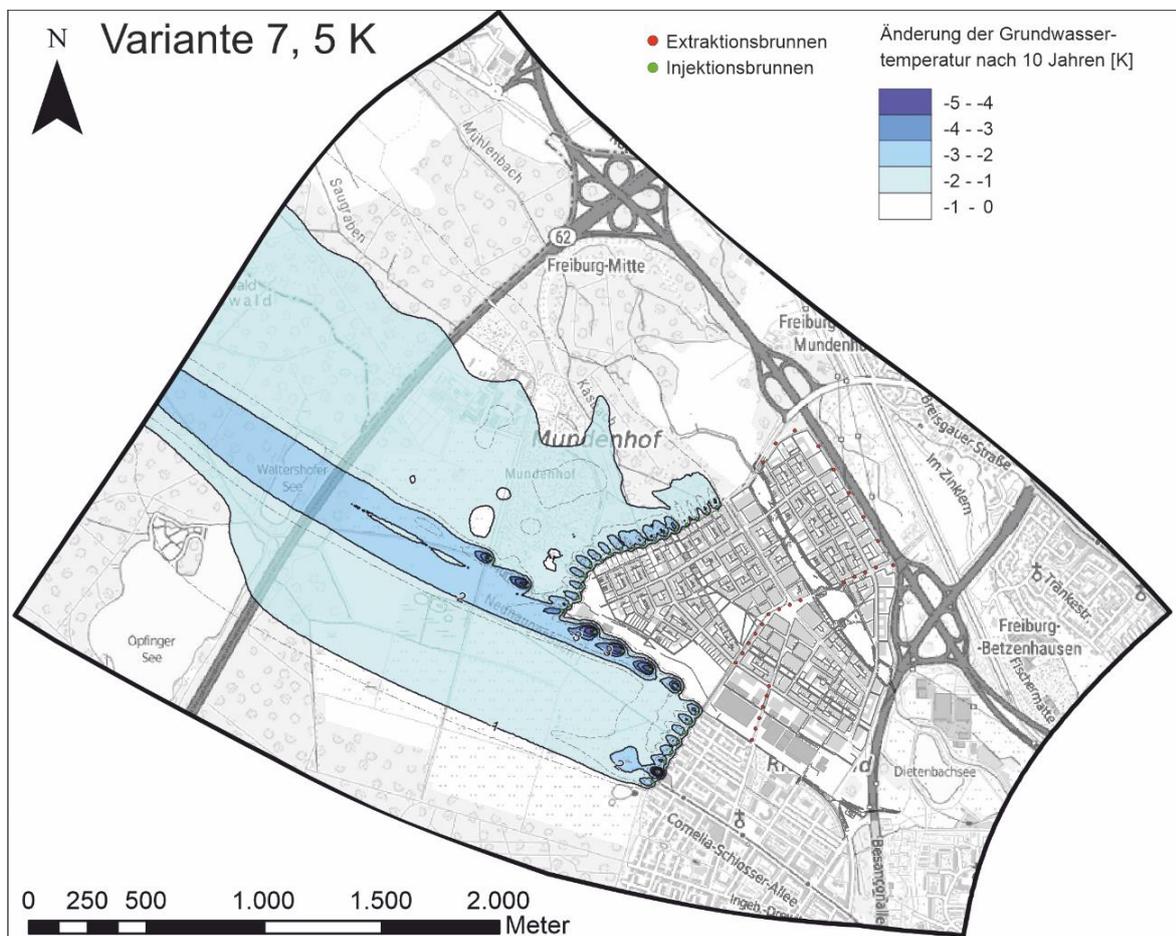


Abbildung 83: Variante 7, 5 K: Durch den Anlagenbetrieb erzeugte Temperaturfahnen nach einer Simulationsdauer von 10 Jahren.

6.4 Zusatzvarianten mit reduzierter Entnahmerate und 5K Temperaturspreizung  
Die nachfolgenden Variante 7.1, Varianten 7.2 und Variante 8 wurden mit einem reduzierten Lastprofil simuliert. Berücksichtigt wird hier eine Grundlastdeckung durch Abwasserwärmetauscher (nach vorrangiger Nutzung von Elektrolyse-Abwärme). Die thermische Entzugsleistung am Grundwasser reduziert sich damit um 2 MW, bei 5 K Spreizung. Die Entnahmerate zur Leistungsspitze reduziert sich somit von 1950 m<sup>3</sup>/h auf 1605 m<sup>3</sup>/h. Die Jahresentnahmemenge reduziert sich um 37%.

Die Anordnung der Entnahme- und Schluckbrunnen der Varianten 7.1 und 7.2 sind identisch zu Variante 7. In Variante 7.2 und Variante 8 ist der Filterdurchmesser der Brunnen von 800 mm auf 600 mm reduziert.

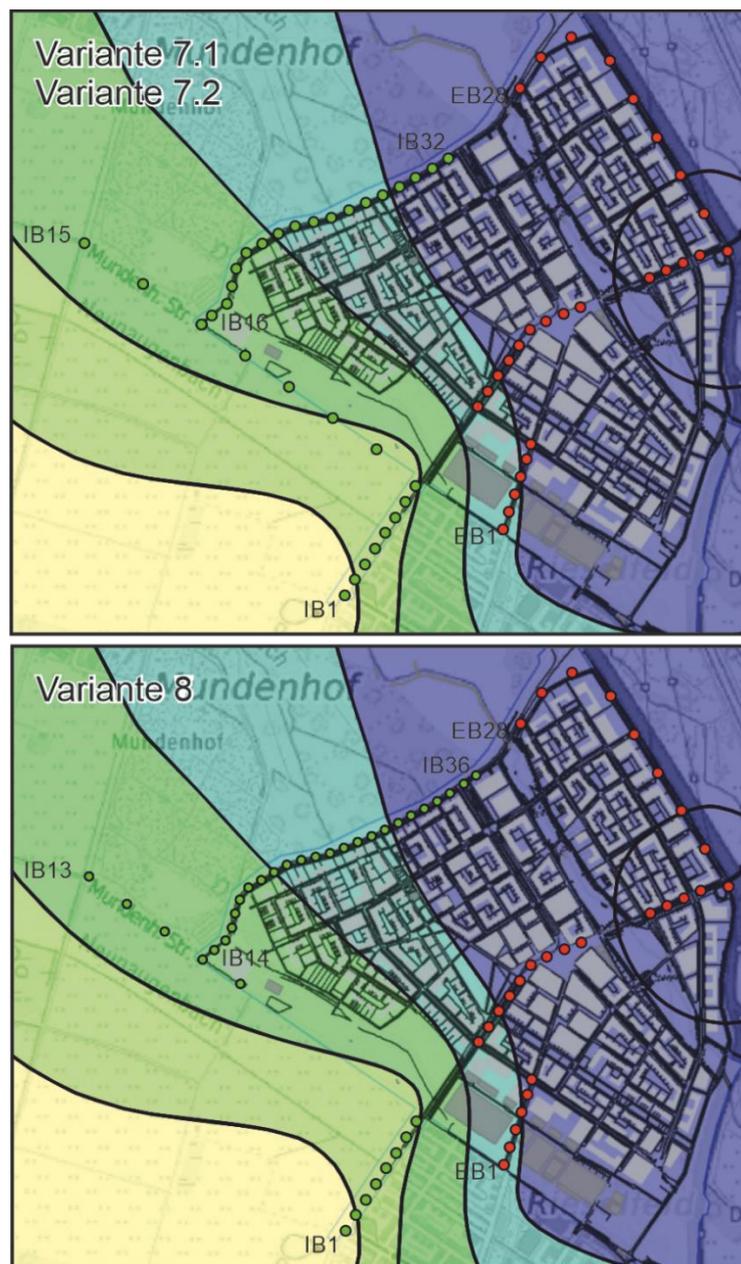


Abbildung 84: Überblick der Brunnenanordnungen der zu simulierenden Zusatzvarianten mit reduzierter Entnahmerate und 5 K Temperaturspreizung.

#### 6.4.1 Variante 7.1, 5 K

Variante 7.1 ist eine Untervariante von Variante 7. Anzahl, Lokation und Dimension der Brunnen sind identisch (Abschnitt **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Die Simulation erfolgte mit dem in 6.4 erläuterten reduzierten Lastprofil.

Abbildung 85 zeigt die durch den Anlagenbetrieb maximal zu erwartenden Änderungen der GW-Spiegelhöhe. Durch die reduzierten Raten konnte der Einfluss auf die GW-Spiegelschwankungen deutlich minimiert werden. Die GW-Aufhöhung im nordwestlichen Teil von Dietenbach verringert sich im Vergleich zu der Variante 7 um ca. 0,25 m auf nun 1 m. Auch der Einfluss der maximalen GW-Aufhöhungen auf den Westrand von Rieselfeld (durch die Injektionsbrunnen entlang des Bollerstaudenweges) sinkt von über 1,25 m auf unter 0,75 m. Im Bereich des Naturschutzgebietes Rieselfeld sind maximale Aufhöhungen zwischen 0,5 und 0,75 m zu erwarten. Abbildung 86 zeigt den Flurabstand zum Zeitpunkt der maximalen Grundwasserspiegeländerung und einem ungestörten Grundwasserstand basierend des MHW19. Wie bei Variante 7 stellen sich am westlichen Bereich der Straße zum Tiergehege negative Flurabstände ein (basierend auf der baulich unveränderten GOK). Die betroffene Fläche ist im Vergleich zu Variante 7 deutlich reduziert und meist beschränkt auf den Nahbereich der Entwässerungsgräben. In wie weit diese Gräben zu einer Reduzierung der Grundwassererhöhung führen, kann an dieser Stelle nicht beurteilt werden.

Die Flurabstände der Brunnen am Bollerstaudenweg betragen zum Zeitraum der maximalen GW-Spiegelschwankung zwischen 2,7 und 4,2 m. Innerhalb aller Entnahmebrunnen liegt die größte Absenkung bei 0,84 m, die größte Aufhöhung bei 1,49 m (Abbildung 87 und Abbildung 88). Auch bei Variante 7.1 wird das Versickerungsbecken am Schildkrötenkopf durch die oberstromigen Entnahmebrunnen im Jahresmittel um 10,2 cm entlastet. Lediglich in den Monaten Mai – September zeigen die Beobachtungspunkte an den vier Eckpunkten des Versickerungsbeckens minimale Aufhöhungen unter 3 cm an (Abbildung 89). Abbildung 90 zeigt die Ausbreitung der Kältefahnen nach einem Anlagenbetrieb von 10 Jahren. Bereiche mit einer Temperaturreduzierung unter 2 K sind nur lokal auf das Brunnennahfeld begrenzt. Die maximale Temperaturniedrigung am Modellrand beträgt etwas über 1,5 K.

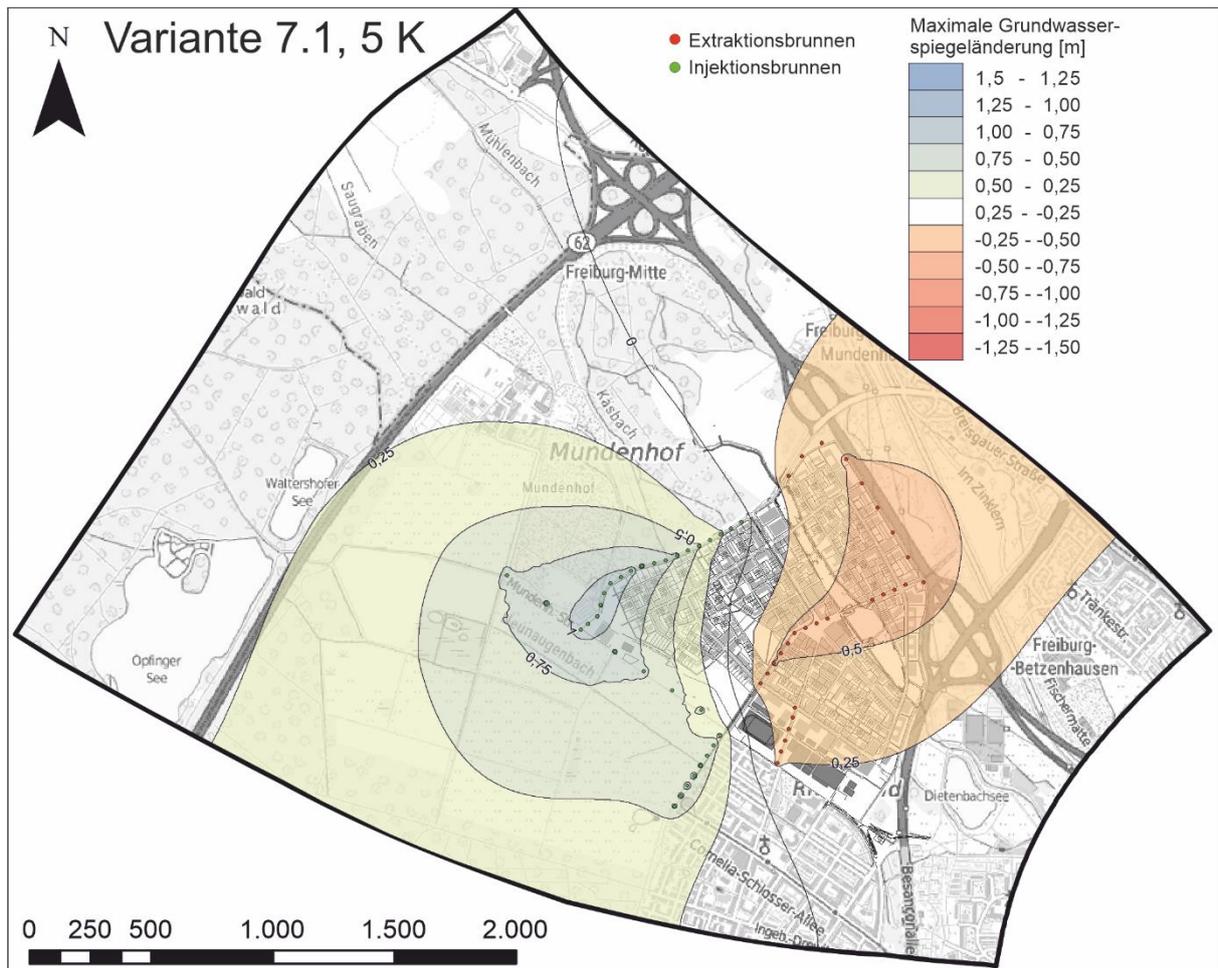


Abbildung 85: Variante 7.1, 5 K: Durch den Anlagenbetrieb bedingte Grundwasserspiegeländerung zum Zeitpunkt der größten Entnahme und Injektionsraten (nach 3301 Tagen).

## Variante 7.1

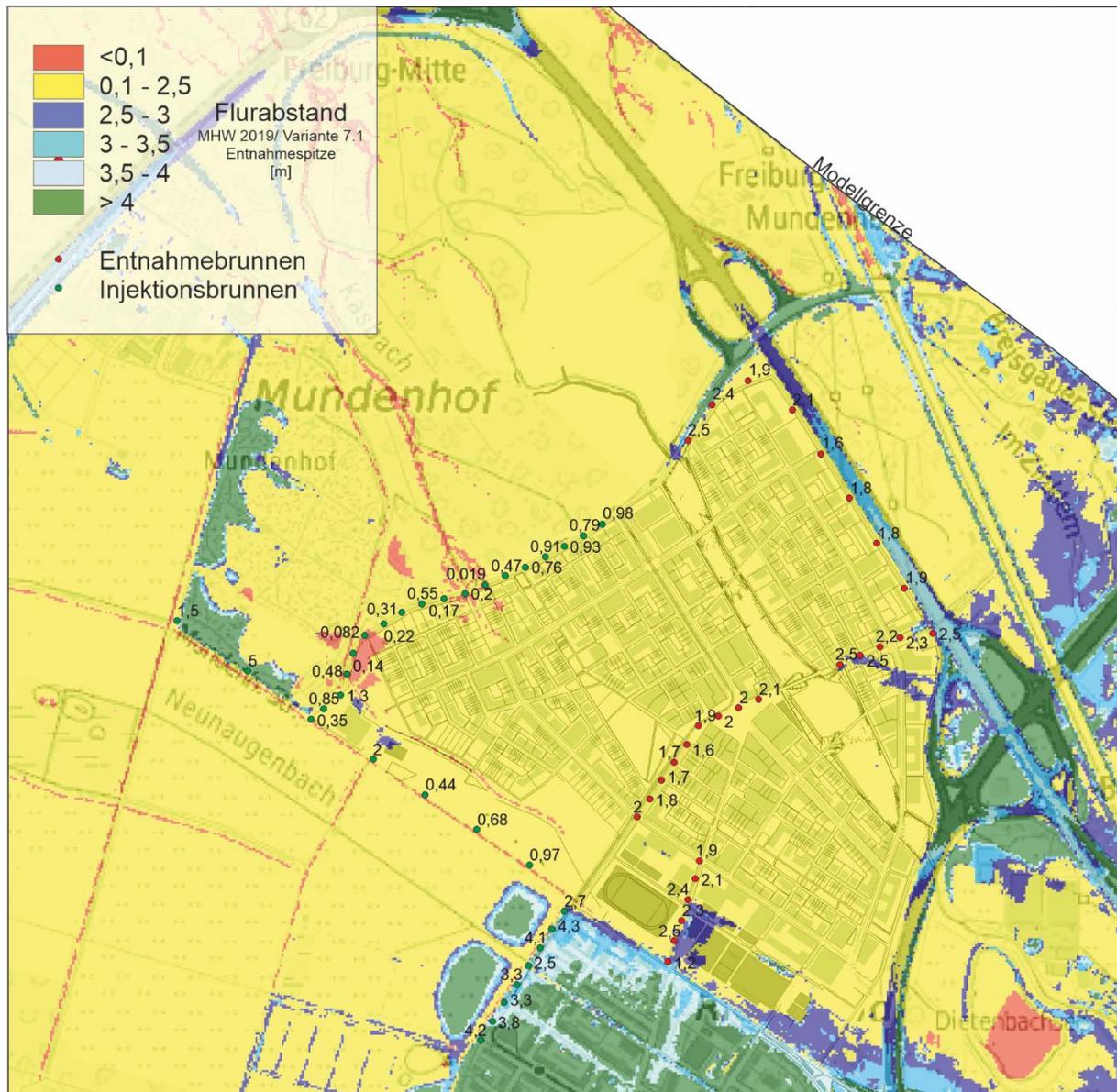


Abbildung 86: Variante 7.1, 5 K: Flurabstand, basierend auf der GW-Spiegeländerung zum Zeitpunkt der Entnahmespitze und MHW 2019.

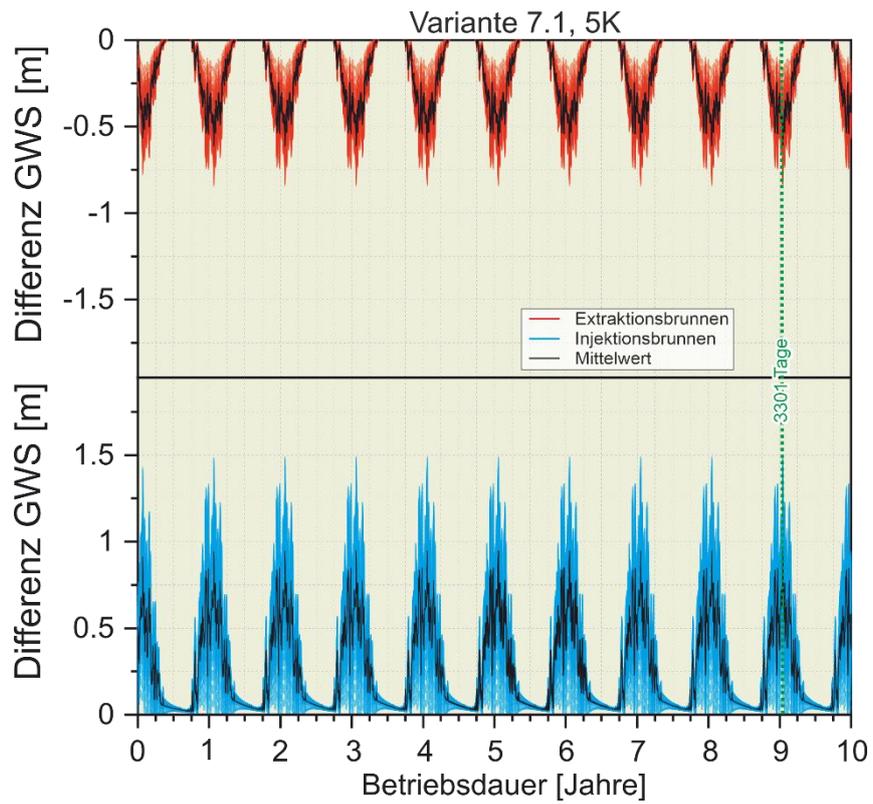


Abbildung 87: Variante 7.1, 5 K: Zeitliche Entwicklung der Grundwasserhöhen an den Extraktionsbrunnen (rot) und Injektionsbrunnen (blau) für den Simulationszeitraum von 10 Jahren.

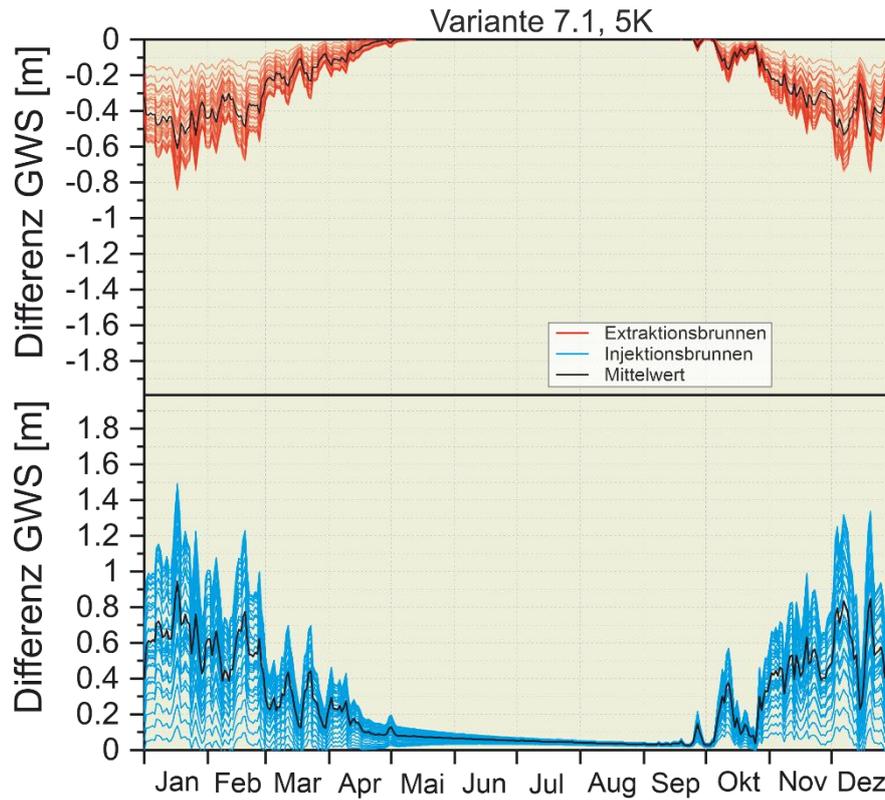


Abbildung 88: Variante 7.1, 5 K: Zeitliche Entwicklung der Grundwasserhöhen an den Extraktionsbrunnen (rot) und Injektionsbrunnen (blau) innerhalb eines Kalenderjahres.

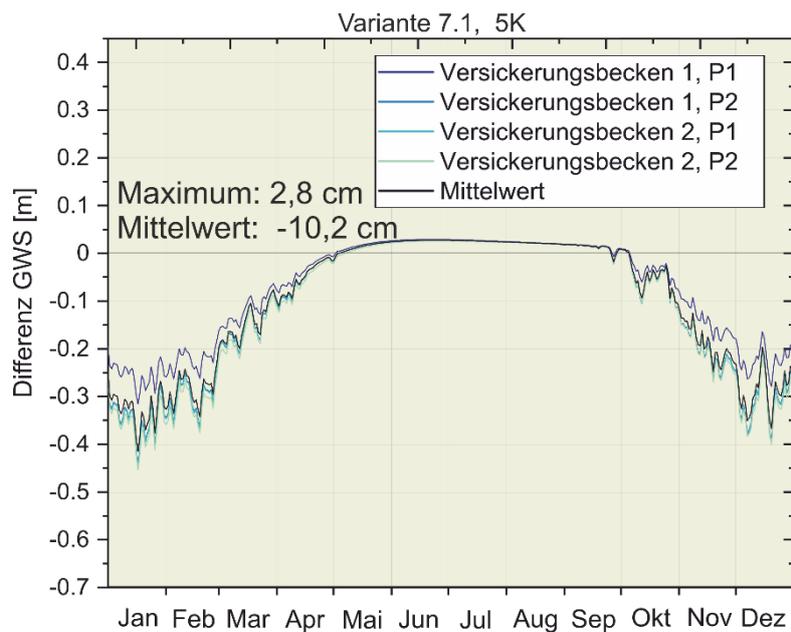


Abbildung 89: Variante 7.1, 5K: Grundwasserspiegeländerung an den vier Eckpunkten des Versickerungsbeckens im Schildkrötenkopf.

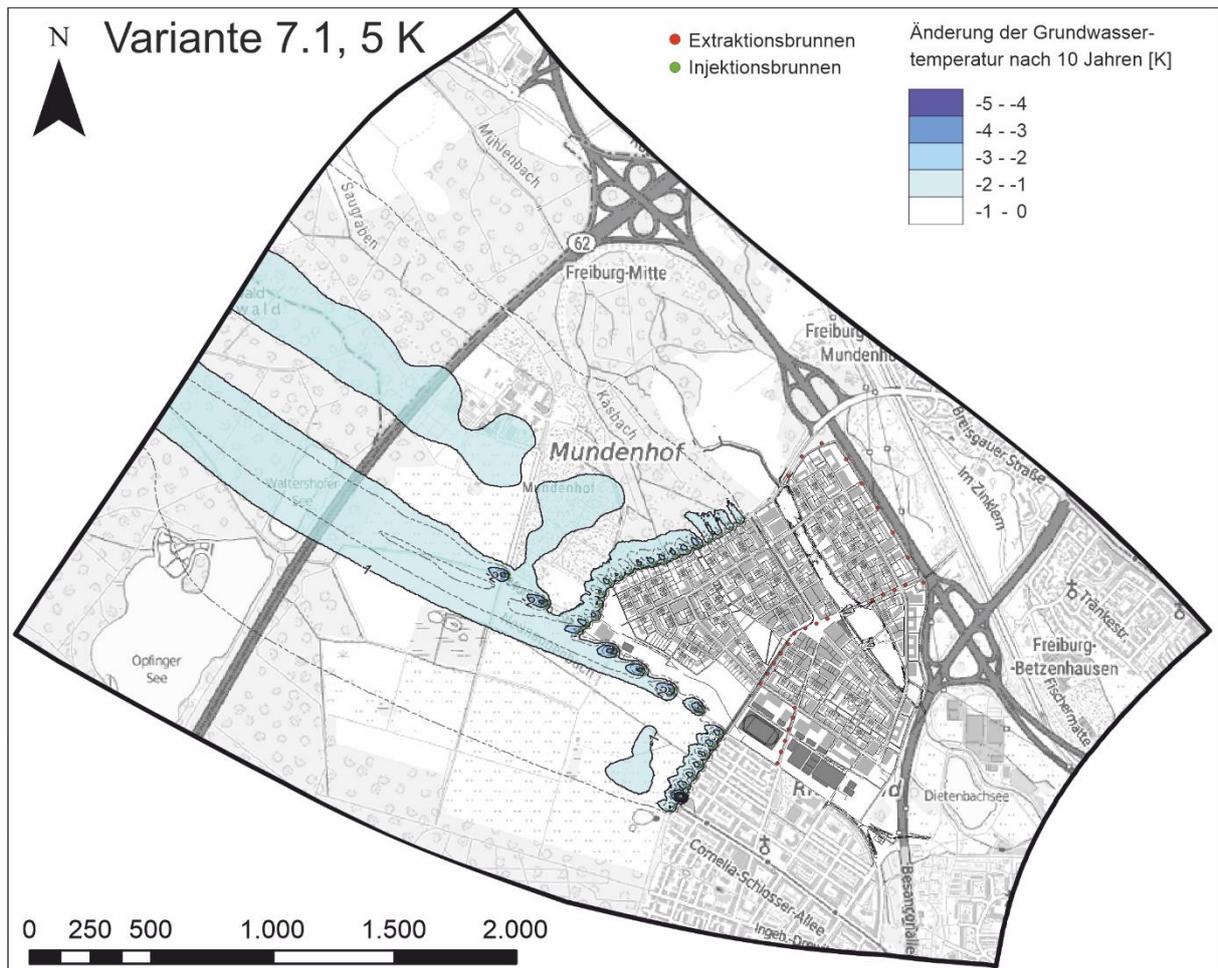


Abbildung 90: Variante 7.1, 5 K: Durch den Anlagenbetrieb erzeugte Temperaturfahnen nach einer Simulationsdauer von 10 Jahren.

#### 6.4.2 Variante 7.2, 5 K

Variante 7.2 ist hinsichtlich Anzahl und Lage der Brunnen sowie deren Förderraten identisch zu Variante 7.1. Reduziert wurde der Filterdurchmesser von 800 mm auf 600 mm. Die Simulationsergebnisse (Abbildung 91 - Abbildung 95) sind unverändert zu Variante 7.1. Im Modell zeigt die Reduzierung keine negativen Auswirkungen. Einzig die resultierenden Temperaturfahnen (Abbildung 96) zeigen leichte lokale Unterschiede. So zeigen die Brunnen entlang der Mundenhofer Straße längere 2 K Temperaturfelder von wenigen Zehner m. Insgesamt sind die Ergebnisse der Temperaturfahnen bzw. deren Auswirkungen allerdings vergleichbar. Die maximale Temperaturerniedrigung am Modellrand beträgt etwas über 1,5 K.

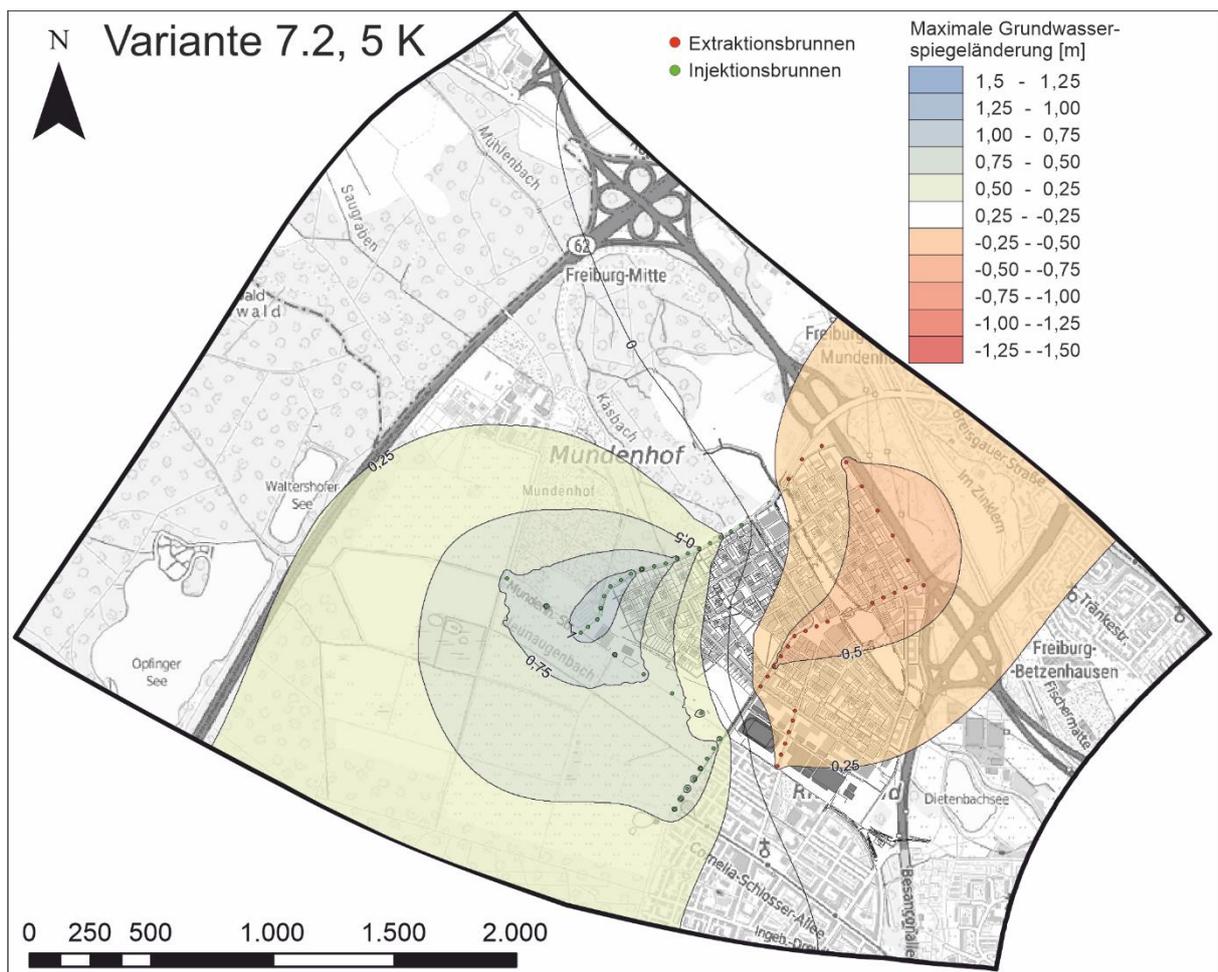


Abbildung 91: Variante 7.2, 5 K: Durch den Anlagenbetrieb bedingte Grundwasserspiegeländerung zum Zeitpunkt der größten Entnahme und Injektionsraten (nach 3301 Tagen)

## Variante 7.2

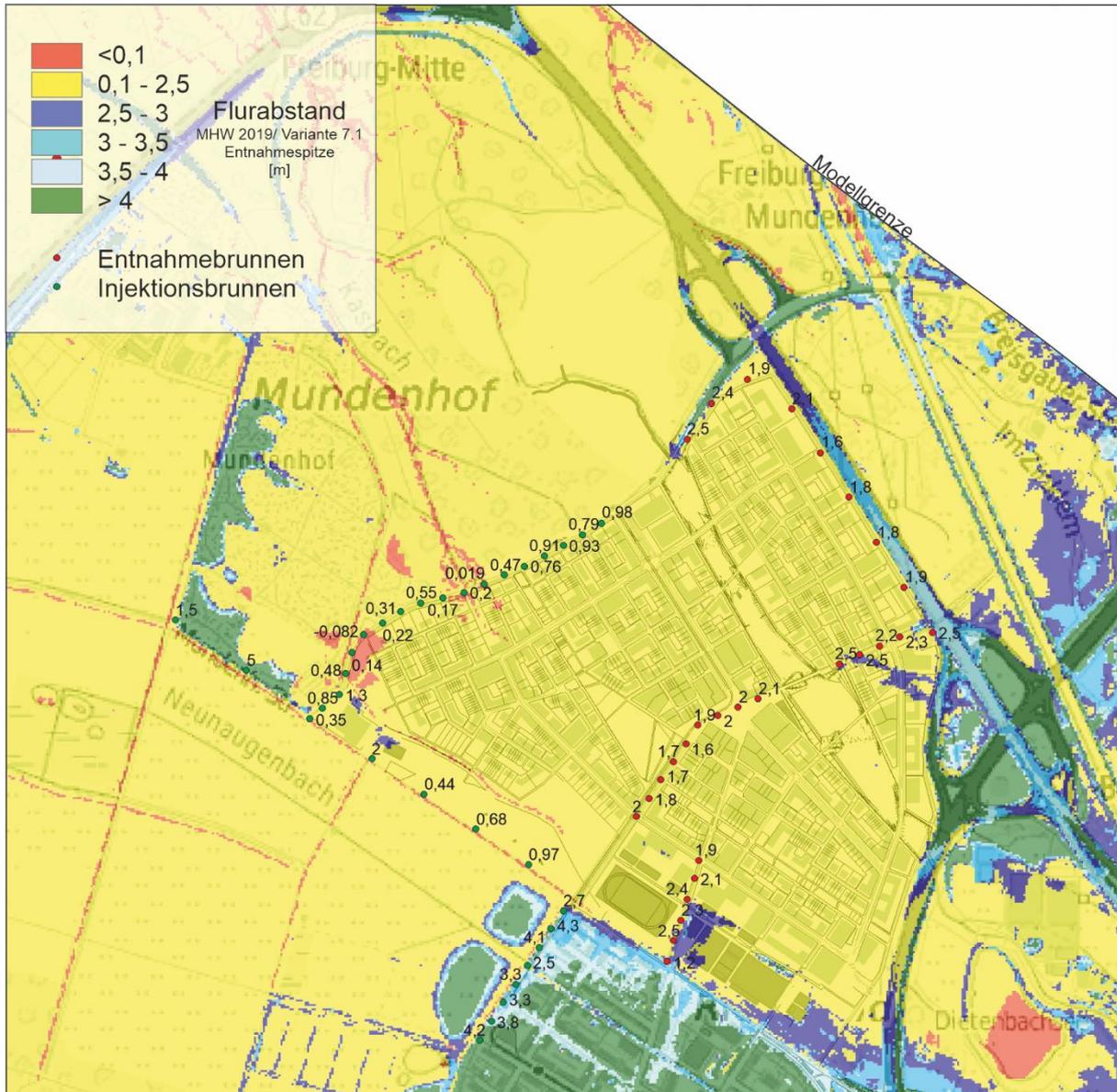


Abbildung 92: Variante 7.2, 5 K: Flurabstand, basierend auf der GW-Spiegeländerung zum Zeitpunkt der Entnahmespitze und MHW 2019.

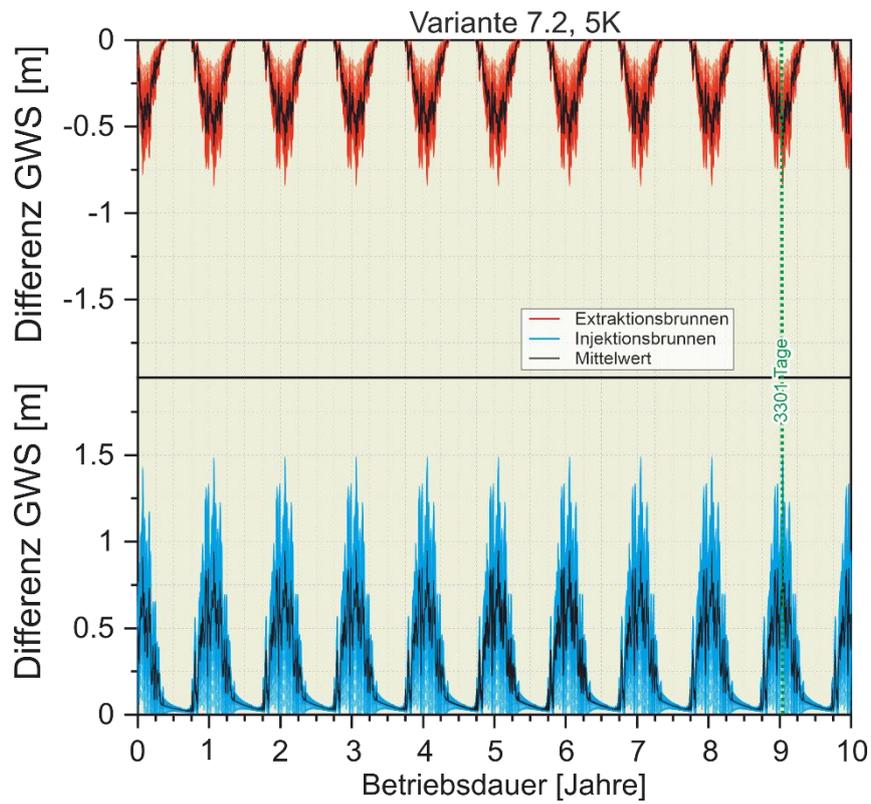


Abbildung 93: Variante 7.2, 5 K: Zeitliche Entwicklung der Grundwasserhöhen an den Extraktionsbrunnen (rot) und Injektionsbrunnen (blau) für den Simulationszeitraum von 10 Jahren.

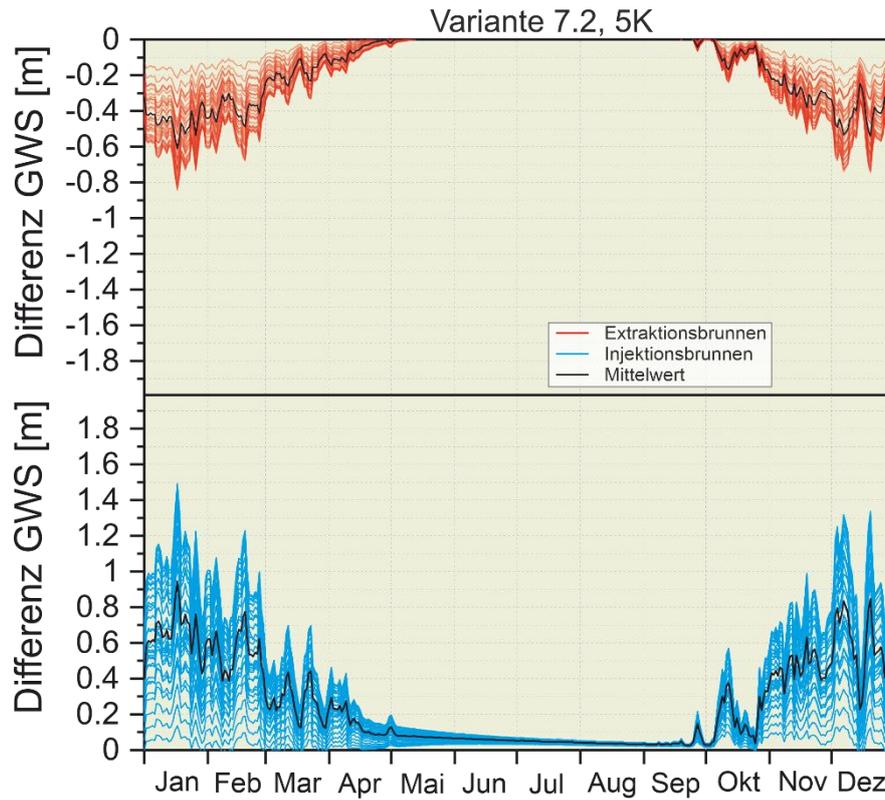


Abbildung 94: Variante 7.2, 5 K: Zeitliche Entwicklung der Grundwasserhöhen an den Extraktionsbrunnen (rot) und Injektionsbrunnen (blau) innerhalb eines Kalenderjahres.

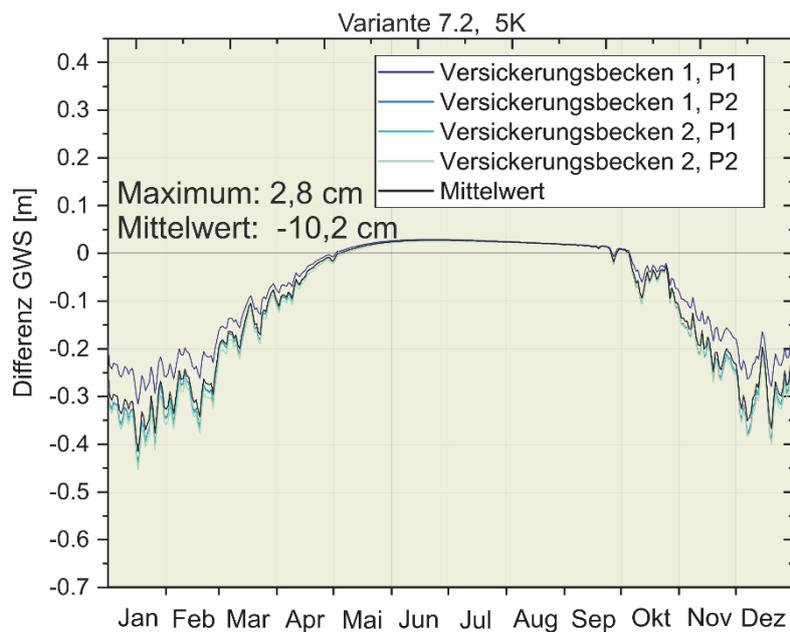


Abbildung 95: Variante 7.2, 5 K: Grundwasserspiegeländerung an den vier Eckpunkten des Versickerungsbeckens im Schildkrötenkopf.

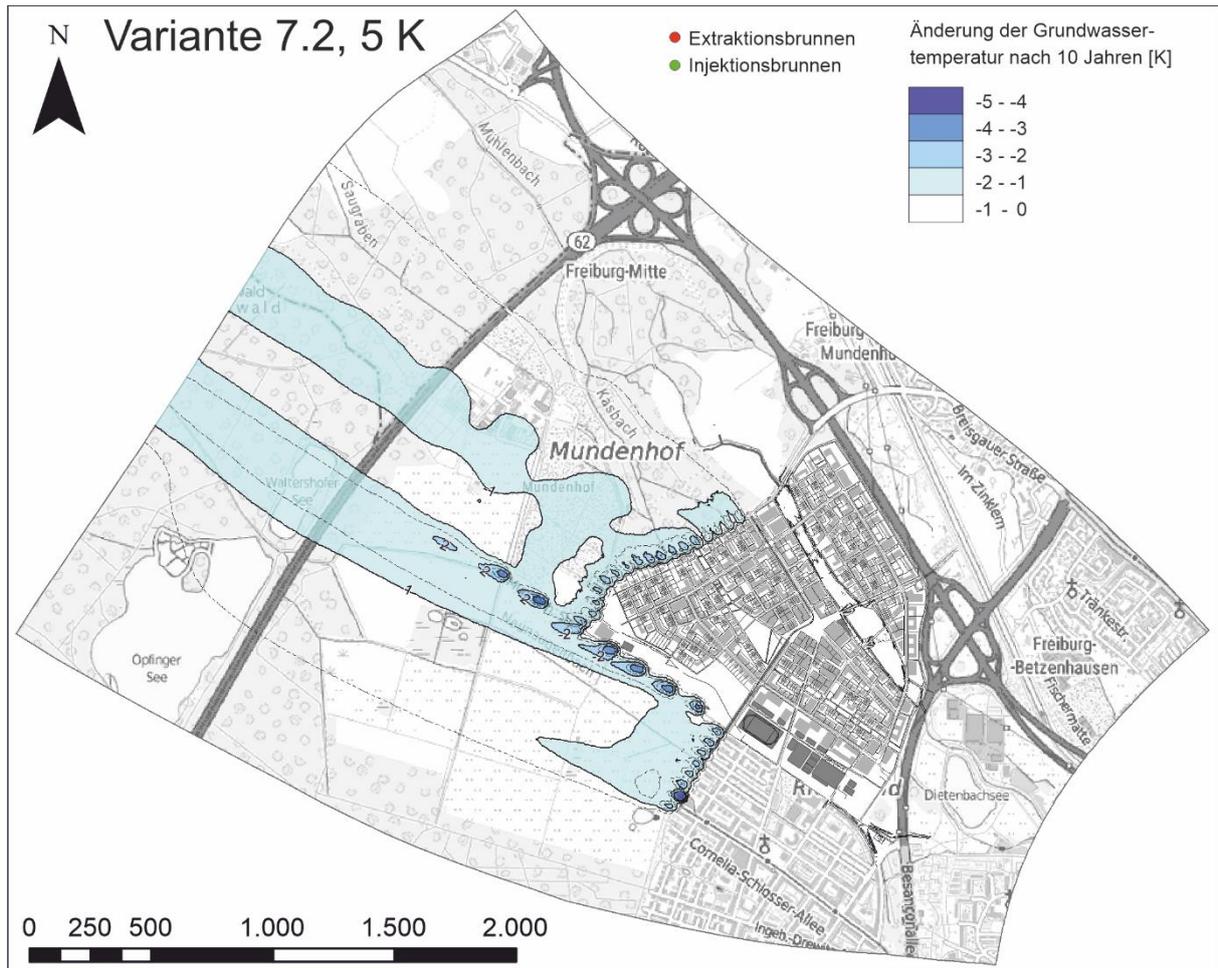


Abbildung 96: Variante 7.2, 5 K: Durch den Anlagenbetrieb erzeugte Temperaturfahnen nach einer Simulationsdauer von 10 Jahren.

#### 6.4.3 Variante 8, 5 K

Lage, Förderrate und Dimension der Entnahmekbrunnen bei Variante 8 ist unverändert zu Variante 7. Die Entnahmegalerie aus 28 Brunnen erstreckt sich von der Verlängerung Carl-von-Ossietsky-Straße, entlang des S-Bahn Trassen und der B31 a und endet an der Straße zum Tiergehege. Die Injektion erfolgt an 8 Brunnen entlang des Bollerstaudenweges, 5 Brunnen entlang der Mundenhofer Str. (zwischen ZMF-Gelände und Energiezentrale) und 23 Brunnen entlang der Str. zum Tiergehege. Um die entfernten Brunnen zwischen Energiezentrale und Bollerstaudenweg (s. V7, V7.1-V7.2) zu kompensieren, wurden die Galerie entlang der Straße zum Tiergehege verdichtet, d.h. der Brunnenabstand von 50 m auf 40 m reduziert. Dadurch ergibt sich eine Infiltration an insgesamt 36 Injektionsbrunnen. Der Filterdurchmesser der Brunnen beträgt 600 mm.

Abbildung 97 zeigt die durch den Anlagenbetrieb maximal zu erwartende Grundwasserspiegeländerung zum Zeitpunkt der Förderspitze. Am Westrand des Stadtteils Rieselfeld sind maximale Aufhöhungen von 0,25 m zu erwarten. Der Grundwasserspiegel im nordwestlichen Teil des späteren Baugebiets Dietenbach steigt zur gleichen Zeit um maximal 1 m an. Innerhalb der Injektionsbrunnen werden maximale Aufhöhungen von 1,35 m und innerhalb der Entnahmekbrunnen Absenkungen von 0,8 m im Model erzeugt (Abbildung 99 und Abbildung 100). Bei einem Grundwasserstand entsprechend dem MHW2019, würden sich bei dieser Variante geringe bis hin zu negative Flurabstände im südwestlichen Bereich der Straße zum Tiergehege einstellen (Abbildung 101). Alle Gräben in diesem Bereich sind zu diesem Zeitpunkt wasserführend. Den Einfluss dieser Gräben auf die Entwässerung sollte demnach nachfolgend untersucht werden.

Durch den Anlagenbetrieb lässt sich eine mittlere Entlastung des Versickerungsbeckens am Schildkrötenkopf von 5,6 cm beobachten. In den Monaten Mai – September kommt es zu einer leichten Erhöhung. Diese liegt maximal knapp über 2 cm. Abbildung 102 zeigt die durch die GWWP erzeugten Temperaturfahnen nach einer Simulationsdauer von 10 Jahren. Temperaturfelder mit einer Erniedrigung von über 2 K entstehen nur lokal im Abstrom von maximal 250 m. Im Abstrom der Mundenhofer Straße kommt es zur Akkumulation der Einzelfahnen der dort verorteten Brunnen. Dies erzeugt einen kühleren Bereich mit einer Temperaturerniedrigung über 1,5 K im Abstrom dieser Anlagen.

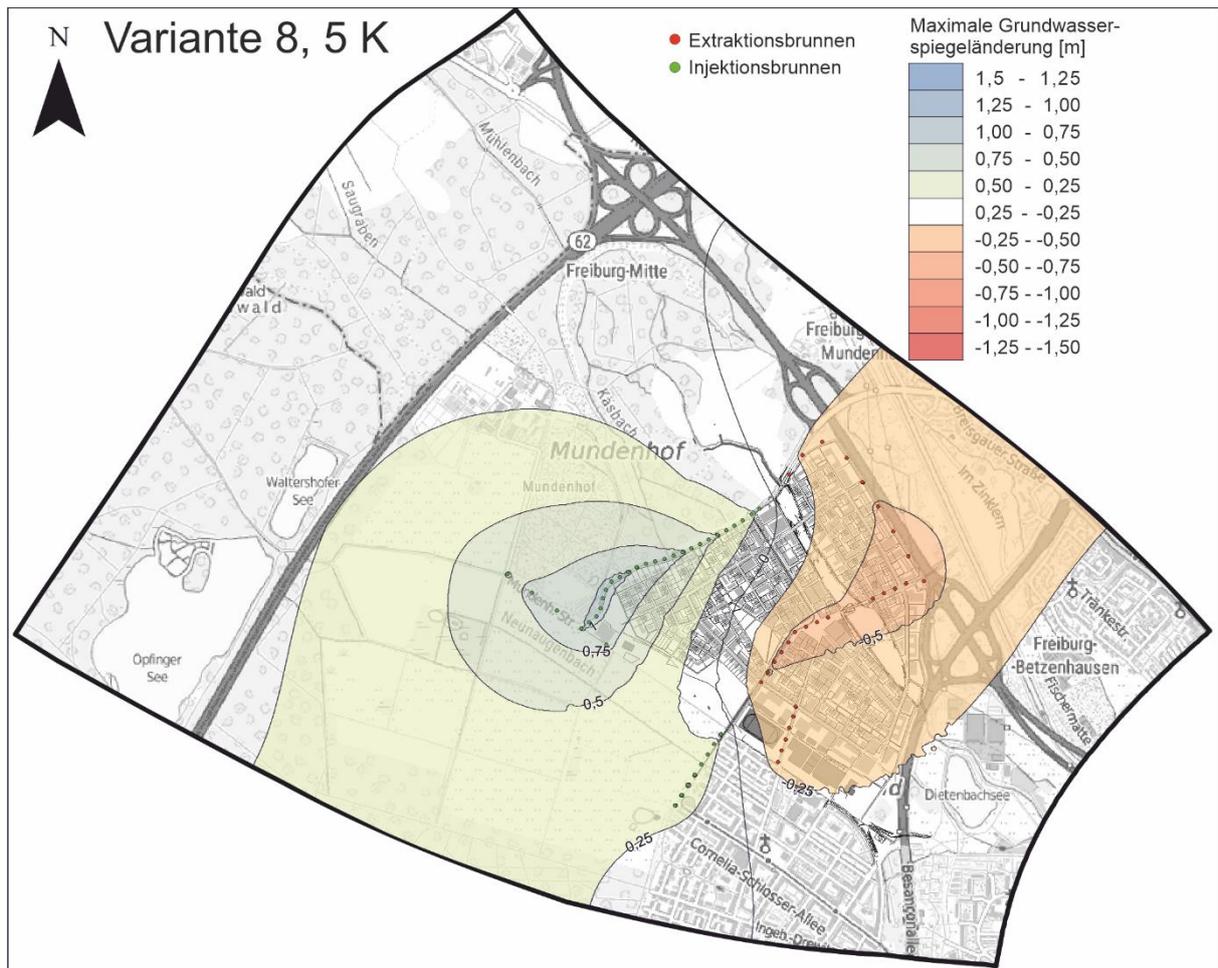


Abbildung 97: Variante 8, 5 K: Durch den Anlagenbetrieb bedingte Grundwasserspiegeländerung zum Zeitpunkt der größten Entnahme und Injektionsraten (nach 3301 Tagen).

## Variante 8

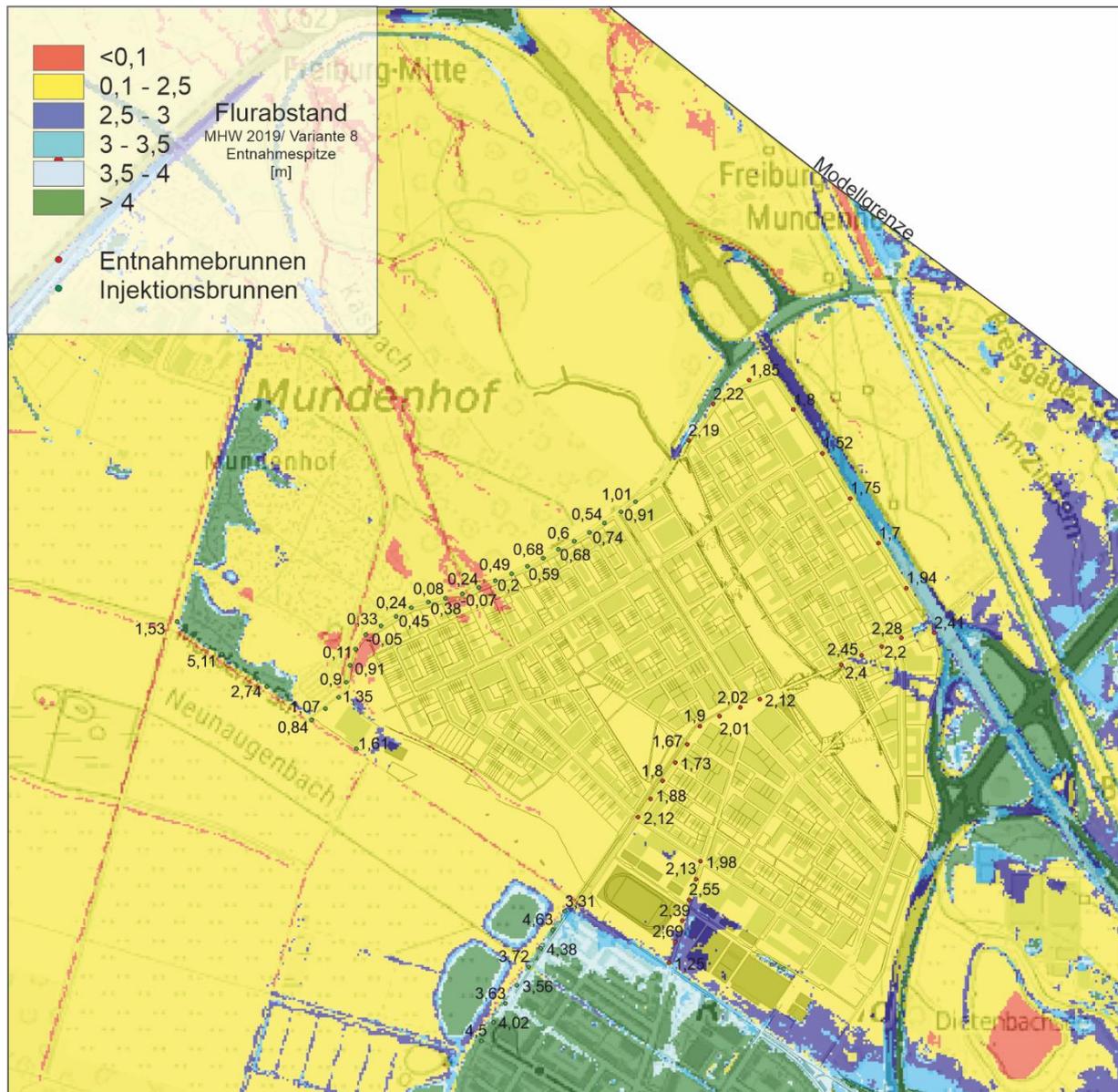


Abbildung 98: Variante 8, 5 K: Flurabstand, basierend auf der GW-Spiegeländerung zum Zeitpunkt der Entnahmespitze und MHW 2019.

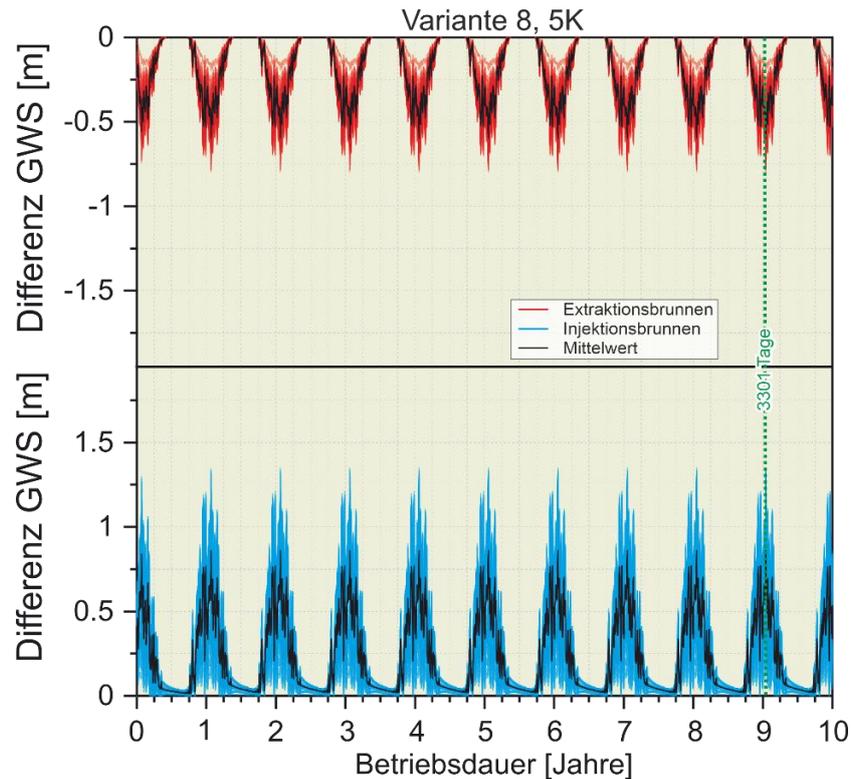


Abbildung 99: Variante 8, 5 K: Zeitliche Entwicklung der Grundwasserhöhen an den Extraktionsbrunnen (rot) und Injektionsbrunnen (blau) für den Simulationszeitraum von 10 Jahren.

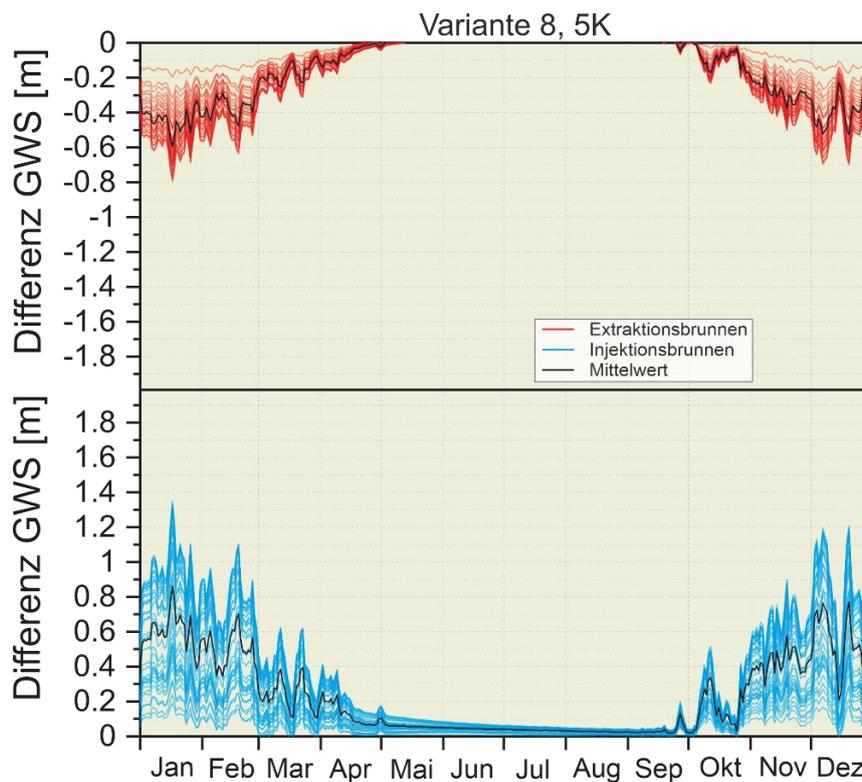


Abbildung 100: Variante 8, 5 K: Zeitliche Entwicklung der Grundwasserhöhen an den Extraktionsbrunnen (rot) und Injektionsbrunnen (blau) innerhalb eines Kalenderjahres.

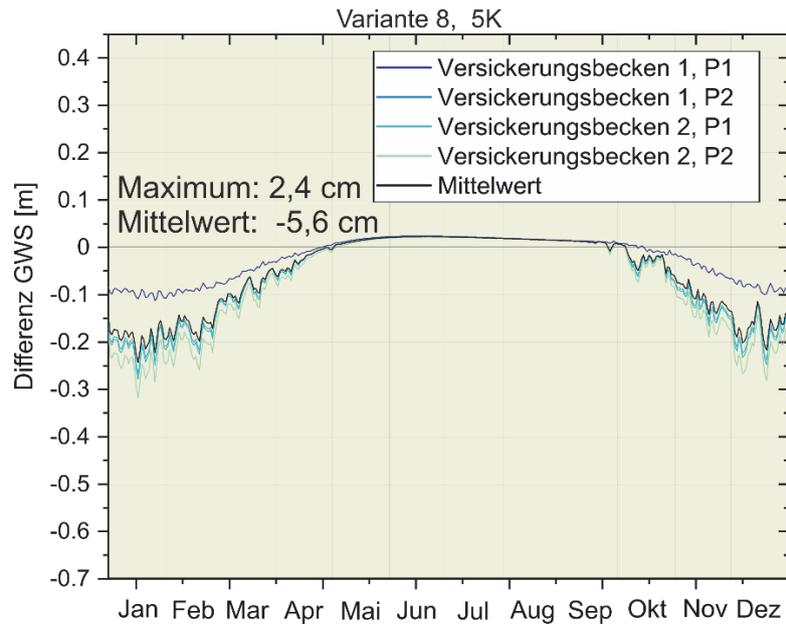


Abbildung 101: Variante 8, 5 K: Grundwasserspiegeländerung an den vier Eckpunkten des Versickerungsbeckens im Schildkrötenkopf.

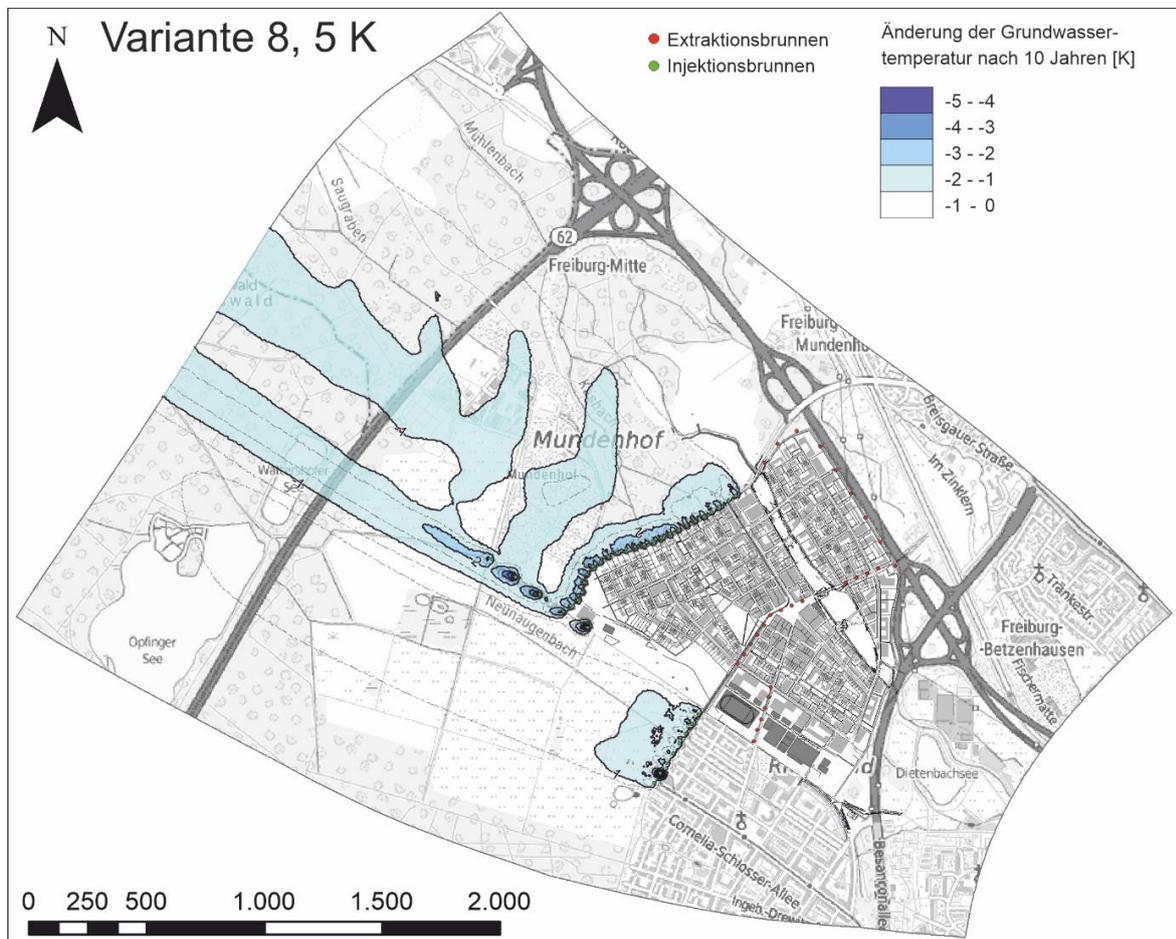


Abbildung 102: Variante 8, 5 K: Durch den Anlagenbetrieb erzeugte Temperaturfahnen nach einer Simulationsdauer von 10 Jahren.

## 7 Fazit und Empfehlungen

Im Rahmen dieses Berichtes wurde das Strömungs- und Stofftransportmodell mit von EGS-plan vorgegebenen Entnahmeraten zur Deckung der Wärmeversorgung des Energiekonzepts Dietenbach Neuberechnet. Um die Auswirkung von GWWP im Bereich südwestlich der Mundenhofer Straße zu simulieren, wurde das vorliegende Strömungs- und Wärmetransportmodell (Stand: 23.12.2020) in südlicher und in nordwestlicher Richtung erweitert. Eine Implementierung der Brunnengalerien erfolgte zunächst in 3 Varianten:

Variante 1: Entnahmegalerie entlang der Besançonallee

Variante 2: Entnahmegalerie entlang des Bollerstaudenweges

Variante 3: Entnahmegalerie entlang der Carl-von-Ossietzky-Straße

Die drei Szenarien wurden weiterhin mit reduzierter Anzahl an Brunnen zur isolierten Deckung des Bauabschnittes 1 simuliert (Varianten 1b, 2b, 3c). Weiterhin wurde diese Szenarien mit jeweils einer Temperaturspreizung von 5 K und 4 K berechnet.

Für die Wärmeversorgung des Bauabschnittes 1 (Variante 1b, 2b, 3b) ist die Anordnung der Injektionsgalerie an der Straße zum Tiergehege zwischen Käserbach und Mundenhofer Straße ausreichend. Sowohl bei den 5 K- wie auch 4 K-Varianten entstehen durch die Injektions- und Entnahmebrunnen nur sehr lokale Grundwasserspiegeländerungen von wenigen cm. Die natürliche saisonale Grundwasserschwankung für Dietenbach liegt im Vergleich bei ca. einem Meter. Die durch die Entnahmespitzen auftretenden maximalen Grundwasserspiegeländerungen ereignen sich in den Wintermonaten Dezember bis Februar. Mit hohen natürlichen Grundwasserspiegeln ist vor allem in den Monaten März bis Juni zu rechnen (Abbildung 1). Es entstehen durch die Injektionsbrunnen keine GW-Spiegeländerungen im Zustrombereich des Versickerungsbeckens im Schildkrötenkopf.

Eine Wärmeversorgung des gesamten Stadtteils Dietenbach unter der Vorgabe keiner Erhöhung des Grundwasserspiegels durch die Grundwasserwärmenutzung im Bereich der beiden Versickerungsbeckens ist bei den Varianten 1a, 2a und 3a nicht umsetzbar. Bei allen drei Varianten kommt es zu GW-Aufhöhung im Bereich des Versickerungsbeckens von mehreren Dezimetern.

Daher erfolgte die Berechnung von insgesamt fünf Zusatzvarianten bei den die Injektionsbrunnen im Zustrom des Beckens eliminiert (Variante 2.1) oder durch Brunnen an anderen Lokationen ersetzt wurden (Variante 4, 5, 6, 7). Bei allen Zusatzvarianten konnte der Einfluss auf das Versickerungsbecken deutlich minimiert werden. In den Varianten 4, 6 und 7 wird das Versickerungsbecken durch den Anlagenbetrieb insbesondere in den Winter und Frühlingsmonaten um mehrere Dezimeter deutlich entlastet. Innerhalb dieser Zusatzvarianten zeigt die Variante 7 die geringsten Einflüsse auf die Grundwassertemperatur und die Grundwasserhöhe. Durch die Injektionsbrunnen kommt es allerdings zu Grundwasserspiegeländerungen in den Wintermonaten im Bereich des zukünftigen Baugebietes Dietenbach von über 1,25 m und im Bereich des bestehenden Baugebietes Rieselfeld von bis zu 0,75 m.

Daher wurden weitere drei Varianten mit einem reduzierten Lastprofil simuliert (Variante 7.1, 2.2 und 8) simuliert. Berücksichtigt wird hier eine Grundlastdeckung durch Abwasserwärmetauscher mit einer thermischen Entzugsleistung von 2 MW. Die Entnahmerate zur Leistungsspitze reduziert sich somit von 1950 m<sup>3</sup>/h auf 1605 m<sup>3</sup>/h. Die Jahresentnahmemenge vermindert sich um 37%. Der Einfluss auf das Grundwasser wird dadurch bei allen Varianten deutlich gesenkt. Dennoch sind am Westrand des Baugebiets Rieselfeld Aufhöhungen des Grundwasserspiegels in den Wintermonaten von bis zu 0,5 m

und im Baugebiet Dietenbach von bis zu 1 m zu erwarten. Dies sollte bei der weiteren Planung des Stadtteiles berücksichtigt werden.

An den Injektionsbrunnen im Bereich des Mundenhofer Parkplatzes zeigen sich unter Verwendung der induzierten GW-Spiegeländerung des Modells und des MHW2019 negative Flurabstände (Grundwasser > GOK). In wie weit eine Entwässerung durch die dortigen Bäche und Gräben erfolgen kann, konnte mit der bestehenden Datenlage nicht modelliert werden. Dies sollte vor einer möglichen Realisierung untersucht werden.

Im Falle einer Realisierung empfehlen wir eine weiterführende hydrogeologische Fachbegleitung, die über den Rahmen dieser Modellierung hinausgeht.

Für Rückfragen stehen wir Ihnen gerne zur Verfügung.

Karlsruhe, den 12. Mai 2021

*Mit freundlichen Grüßen*



M.Sc. Marc Ohmer

Projektbearbeiter



Dr. Tanja Liesch

Technische Leiterin



Dr. Kathrin Menberg

Projektleiterin



Prof. Dr. Philipp Blum

Projektverantwortlicher