

Bericht Simulation Bewirtschaftung Brunnen

Stand August 2026

Auftraggeber:

Flughafen Zürich
8058 Zürich-Flughafen
vertreten durch:
Andreas Eckert



Autoren:

Adriaan Visser
Andreas Ebert
Christian Häring
Geo Explorers AG

Liestal, 25.08.2026

Inhalt

1	Zusammenfassung	3
2	Einleitung	3
3	Fragestellung / Abgrenzung	4
3.1	Modellaufbau: Eckwerte und Randbedingungen.....	5
3.2	Szenarien	8
3.3	Resultate	8
3.4	Diskussion aus Abschlussbericht Erkundung.....	11
4	Fazit	12

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1	Ausschnitt aus der Datengrundlage.....	4
Abb. 2	Modellaufsicht und Ausdehnung. Farbe entspricht der Felsoberkante.....	6
Abb. 3	Durchlässigkeitsbeiwerte im Modellquerschnitt	6
Abb. 4	Für die Simulation verwendetes Lastprofil der Phase EZM 1	7
Abb. 5	Grundwasserabsenkung und -aufstau in den aktiven Brunnen	9
Abb. 6	Maximale Ausdehnung der Wärmefahne	10
Abb. 7	Temperaturverlauf über 10 Jahre	11

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Energiemengen und max. Volumenströme für den Konzessionsantrag und für die simulierten Maximalvariante	4
Tabelle 2	Gesteinsparameter in den unterschiedlichen geologischen Einheiten	5

1 Zusammenfassung

Der vorliegende Bericht dokumentiert die aktualisierte numerische Simulation zur Bewirtschaftung des Aquifers bzw. Grundwasserspeichers im Rahmen des ATEs-Systems unter dem Flughafen Zürich. Gegenüber den früheren Berechnungen – beschrieben im Abschlussbericht der Erkundung von 2025 – wurden die verschobenen Brunnenstandorte sowie das höhere Bewirtschaftungsziel gemäss Phase EZM 1 berücksichtigt. Die Simulation basiert auf den bestehenden hydrogeologischen Grundlagen, den Ergebnissen der Pump- und Tracerversuche sowie einem maximalen Lastprofil mit einer ausgeglichenen Wärme- und Kältebilanz von je 19.5 GWh/a. Der Konzessionsantrag beläuft sich auf diese Entnahme- und Einspeiseenergie.

Die neue Simulation bestätigt, dass die vorgesehene Energiemenge der Phase EZM 1 von 19.5 GWh pro Jahr in den Aquifer eingelagert und wieder entnommen werden kann. Entsprechend kann die tiefere Energiemenge der beantragten Phase erst recht eingespeichert bzw. entnommen werden. Nach rund acht Betriebsjahren stellt sich ein quasithermischer Gleichgewichtszustand im Untergrund ein. Der anfängliche energetische Verlust von rund 7 % ist darauf zurückzuführen, dass neben dem Grundwasser auch das umgebende Gesteinsvolumen erwärmt bzw. abgekühlt wird. Entscheidend für einen stabilen Betrieb ist eine über mehrere Jahre ausgeglichene Bilanz zwischen Wärmeentzug und Wärmeeintrag.

Aufgrund des sehr geringen bzw. kaum vorhandenen hydraulischen Gefälles bilden sich im Betrieb keine ausgeprägten thermischen Fahnen, sondern überwiegend Wärme- und Kälteinseln um die Brunnen. Thermische Kurzschlüsse zwischen den Brunnen werden in der Simulation nicht festgestellt. Die 3 K-Regel wird auch unter den geänderten Randbedingungen eingehalten. Lokal unterschiedliche Ausbreitungen von Wärme und Kälte können aufgrund der heterogenen Kieskörper im Aquifer nicht vollständig ausgeschlossen werden; sie können jedoch durch eine gezielte Bewirtschaftung einzelner Brunnen gesteuert und kompensiert werden.

Die berechneten Pegeländerungen liegen in der Grössenordnung der Pumpversuche und bestätigen die grundsätzliche Plausibilität des Modells. Gleichzeitig zeigen die Simulationen, dass der Aquifer gross genug ist und gegenüber Standortanpassungen vergleichsweise robust reagiert, sofern die Grundwasserbilanz sowie die thermische Jahresbilanz ausgeglichen bleiben. Für die spätere Umsetzung bleibt wesentlich, dass die Brunnen auch bei Spitzenlasten die erforderlichen Förder- und Rückgaberraten liefern bzw. aufnehmen können. Insgesamt bestätigen die neuen Simulationen die technische Machbarkeit der vorgesehenen Bewirtschaftung gemäss EZM 1 und bilden eine belastbare Grundlage für die weitere Standort- und Betriebsoptimierung.

2 Einleitung

Im Rahmen der Anpassungen der Brunnenstandorte für das PGG2 wurden die Simulationen von Ende 2025 / Anfang 2026 erneut durchgeführt. Simuliert wurde nach der Finite-Elemente-Methode mit der Software FEFLOW (Finite Element subsurface FLOW system). Die Untergrundparameter wurden vom alten Modell übernommen (siehe Abschlussbericht zur Erkundung von 2025). Für die Bewirtschaftung der Brunnen dienen Daten vom Flughafen Zürich, welche mit dem Excel «Simulation Rinne Ausbau EZM erste Etappe (4 WP).xlsx» (siehe screenshot in Abb. 1) zugestellt wurden. Aus diesem wurden basierend auf den Energiewerten und der Temperaturspreizung Pumpraten ermittelt. Gemäss der Zielsetzung, Modellauflösung und Trägheit im Untergrund und wurde mit Wochenmitteln simuliert.

Die im Bericht vorgestellte Simulationsvariante zeigt die Maximalvariante EZM 1, mit welcher geprüft wurde, was im Maximum mit dem geplanten Brunnensystem an Energie bezogen werden kann, resp. eingelagert werden kann.

Tabelle 1 Energiemengen und max. Volumenströme für den Konzessionsantrag bzw. die simulierte Maximalvariante

	Simulierte Maximal-Variante EZM 1
Kälte	12'800 kW / 19.5 GWh
Wärme	10'500 kW / 19.5 GWh
Max. Volumenstrom	18'300 l/min

Gemittelt aus Daten E-Axiom					Wochenwerte			Zeitreihen für Modellierung, Werte pro Brunnen!				
Week [-]	Anergie Orig	Anergie Verschoben [MWh]	dT Heizen	dT Kuehlen	Leistung [kW]	Pumpmenge	Pumpmenge Total [l/min]	DOY [-]	Pumprate He DOY [-]	Pumprate Ka DOY [-]	dT [K]	
1	446.742	446.742	463.832812	13	8	2760.90959	51.1034258	3066.20555	0	1471.77866	0	-13
2	670.009	670.009	695.641239	13	8	4140.72166	76.643242	4598.59452	7	2207.32537	7	-13
3	1119.32	1119.32	1162.14133	13	8	6917.50793	128.040539	7682.43235	14	3687.56753	14	-13
4	1261.92	1261.92	1310.19672	13	8	7798.78998	144.352747	8661.16485	21	4157.35913	21	-13
5	990.915	990.915	1028.824	13.8571	8	6123.95237	106.340974	6380.45845	28	3062.62006	28	-13.8571
6	1185.25	1185.25	1230.59359	14.5	8	7324.96183	121.5566	7293.39601	35	3500.83008	35	-14.5
7	846.989	846.989	879.391885	14.5	8	5234.47551	86.8653054	5211.91832	42	2501.7208	42	-14.5
8	505.361	505.361	524.694373	14.5	8	3123.18079	51.8268986	3109.72192	49	1492.66652	49	-14.5
9	1089.6	1089.6	1131.28435	15.3571	8	6733.8354	105.510205	6330.61228	56	3038.69389	56	-15.3571
10	734.737	734.737	762.84551	16	8	4540.74708	68.2886474	4097.31885	63	1966.71305	63	-16
11	488.597	488.597	507.28904	16	8	3019.57762	45.411662	2724.69972	70	1307.85586	70	-16
12	271.95	271.95	282.353871	16	8	1680.67781	25.2758438	1516.55063	77	727.944302	77	-16
13	438.507	438.507	455.282769	15.9286	8	2710.01648	40.9388376	2456.33025	84	1179.03852	84	-15.9286
14	606.083	606.083	629.26965	15.5	8	3745.65268	58.1482953	3488.89772	91	1674.67091	91	-15.5
15	417.677	417.677	433.655885	15.5	8	2581.28503	40.0724085	2404.34451	98	1154.08536	98	-15.5
16	369.002	369.002	383.118747	15.5	8	2280.46873	35.4024734	2124.1484	105	1019.59123	105	-15.5
17	134.609	134.609	139.758677	15.5	8	831.896868	12.9145412	774.872473	112	371.938787	112	-15.5
18	-149.336	76.2837	79.2020519	15	11.4286	471.440785	7.56270349	453.762209	119	217.805861	119	-15
19	-107.488	-149.336	-149.336	8	12	888.904762	17.8244102	1069.46461	126	-513.343013	126	12
20	76.2837	-107.488	-107.488	8	12	639.809524	12.8295267	769.771603	133	-369.490369	133	12
21	-473.659	-473.659	-473.659	8	12	2819.39881	56.5348764	3392.09258	140	-1628.20444	140	12
22	-742.069	-742.069	-742.069	8	12.6429	4417.07738	84.067762	5044.06572	147	-2421.15154	147	12.6429
23	-892.738	-892.738	-892.738	8	13.5	5313.91667	94.715739	5682.94434	154	-2727.81328	154	13.5
24	-970.278	-970.278	-970.278	8	13.5	5775.46429	102.942406	6176.54437	161	-2964.7413	161	13.5
25	-1175.8	-1175.8	-1175.8	8	13.5	6998.80952	124.747424	7484.84545	168	-3592.72581	168	13.5
26	-1025.49	-1025.49	-1025.49	8	13.7143	6104.10714	107.100053	6426.00315	175	-3084.48151	175	13.7143
27	-987.834	-987.834	-987.834	8	15	5879.96429	94.3245214	5659.47128	182	-2716.54622	182	15
28	-1350.64	-1350.64	-1350.64	8	15	8039.52381	128.96749	7738.0494	189	-3714.26371	189	15
29	-1130.84	-1130.84	-1130.84	8	15	6731.19048	107.979622	6478.77731	196	-3109.81311	196	15
30	-863.539	-863.539	-863.539	8	15	5140.1131	82.4560634	4947.3638	203	-2374.73462	203	15
31	-810.468	-810.468	-810.468	8	16.0714	4824.21429	72.229409	4333.76454	210	-2080.20698	210	16.0714
32	-783.554	-783.554	-783.554	8	16.5	4664.0119	68.0169083	4081.0145	217	-1958.88696	217	16.5
33	-1392.8	-1392.8	-1392.8	8	16.5	8290.47619	120.902899	7254.17392	224	-3482.00348	224	16.5
34	-1577.07	-1577.07	-1577.07	8	16.5	9387.32143	136.898574	8213.91446	231	-3942.67894	231	16.5
35	-578.62	-578.62	-578.62	8	16.9286	3444.16667	48.9558164	2937.34898	238	-1409.92751	238	16.9286
36	-1121.66	-1121.66	-1121.66	8	18	6676.54762	89.2525487	5355.15292	245	-2570.4734	245	18
37	-1051.11	-1051.11	-1051.11	8	18	6256.60714	83.6387555	5018.32533	252	-2408.79616	252	18
38	-742.271	-742.271	-742.271	8	18	4418.27976	59.0638684	3543.8321	259	-1701.03941	259	18
39	-508.909	-508.909	-508.909	8	18	3029.22024	40.4948249	2429.6895	266	-1166.25096	266	18
40	-443.701	-443.701	-443.701	8	15.5	2641.07738	41.0006374	2460.03825	273	-1180.81836	273	15.5
41	-574.893	-574.893	-574.893	8	15.5	3421.98214	53.1235662	3187.41397	280	-1529.95871	280	15.5
42	126.594	126.594	131.437051	16.5	15.5	782.363398	11.4094776	684.568658	287	-328.592956	287	-16.5
43	121.249	121.249	125.88757	16.5	15.5	749.330771	10.9277513	655.665081	294	-314.719239	294	-16.5

Abb. 1 Ausschnitt aus der Datengrundlage

(Excel «Simulation Rinne Ausbau EZM erste Etappe (4 WP).xlsx»)

3 Fragestellung / Abgrenzung

Mit den Simulationen werden langfristige Veränderungen im Aquifer hinsichtlich Druckverhältnissen, Strömungspfaden und Temperaturverteilung in Abhängigkeit von der künstlichen Einspeisung und Entnahme von Wärme / Kälte abgebildet. Es werden keine kurzfristigen und kleinräumigen Änderungen simuliert. Die wichtigsten Fragen sind:

- Wie verändert sich die Untergrundtemperatur auf Grund der Nutzung?
- Wie weit breiten sich die Wärme- und Kältefahnen bzw. -inseln aus?
- Fließt Wärme bzw. Kälte ab?
- Wie weit müssen Brunnenstandorte auseinander liegen?
- Sind thermische Kurzschlüsse zu befürchten?
- Wird die noch geltende 3 K-Regelung eingehalten (erlaubte Änderung der Aquifertemperatur in 100 m Entfernung um max. 3 °C)?

3.1 Modellaufbau: Eckwerte und Randbedingungen

Das Modellgebiet ist ein 1200 m × 600 m Rechteck ausgerichtet parallel zur Rinnenmitte nach Nordwest mit einem Azimut von 300° (Abb. 2). Das Modell erstreckt sich über die vertikalen Koten von 85 bis 220 m ü.M. Die Geologie wurde vereinfacht eingebaut. Erste Sensitivitätssimulationen im 2025 haben gezeigt, dass die Resultate nicht gross variieren, wenn mit einem «Pfannkuchen-Modell» (also lokale variierenden Schichtpaketen) oder einer homogenen Rinnenfüllung simuliert wird. Es sei angemerkt, dass u.a. die Ausdehnung der verschiedenen Schichten / Kieskörper unbekannt ist, dass diese Lagen sicher horizontal nicht korrelieren, da sie in jeder bisherigen Bohrung in unterschiedlicher Tiefe und Mächtigkeit vorkamen und dass im Pumpbetrieb ohne Rückgabe der Gesamtaquifer in der basalen Rinnenfüllung gesamthaft messbar reagiert und somit aufzeigt, dass ein grosser verbundener Aquifer unterhalb der Stillsedimente vorliegt.

Die basale Rinnenfüllung ist im Modell homogen aufgebaut, da die Sondierbohrungen alle unterschiedlichen Schichten mit variierenden Mächtigkeiten und Tiefenlagen ausweisen, deren horizontales Ausmass unbekannt ist (siehe auch vorgängige Anmerkung), dafür aber die mittlere Transmissivität der Brunnen sehr ähnlich ist. Im Pumpversuch in der P6-1 wurde u.a. eine Transmissivität von $4.1 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ und eine Mächtigkeit von 74 m ermittelt, was zu einem durchschnittlichen Durchlässigkeitsbeiwert von $5.54 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ führt (siehe Schlussbericht zur Erkundung 2025). Die Rinnenfüllung ist eingebettet in die Obere Meeresmolasse (OMM). Eine 10m mächtige Verwitterungsschicht trennt die Rinne von der OMM. Die physikalischen Eigenschaften der unterschiedlichen geologischen Schichten sind in Tabelle 2 aufgelistet.

Tabelle 2 Gesteinsparameter in den unterschiedlichen geologischen Einheiten

Einheit	Geologie	Porosität [-]	k [m/s]	Speicher- koeffizient [1/m]	Wärmeka- pazität [MJ/m³K]	Wärmeleit- fähigkeit [W/mK]
Aquifer	Sandiger Kies	0.18	5.54×10^{-5}	9.86×10^{-6}	2.3	1.7
Aquitard	Ton	0.18	1.0×10^{-9}	1.3×10^{-6}	2.3	1.7
Verwitterte OMM	Sand-/Tonstein Wechsel	0.1	1.0×10^{-8}	1.3×10^{-6}	2.1	2.5
OMM	Sand-/Tonstein Wechsel	0.1	1.0×10^{-9}	1.3×10^{-6}	2.1	2.7

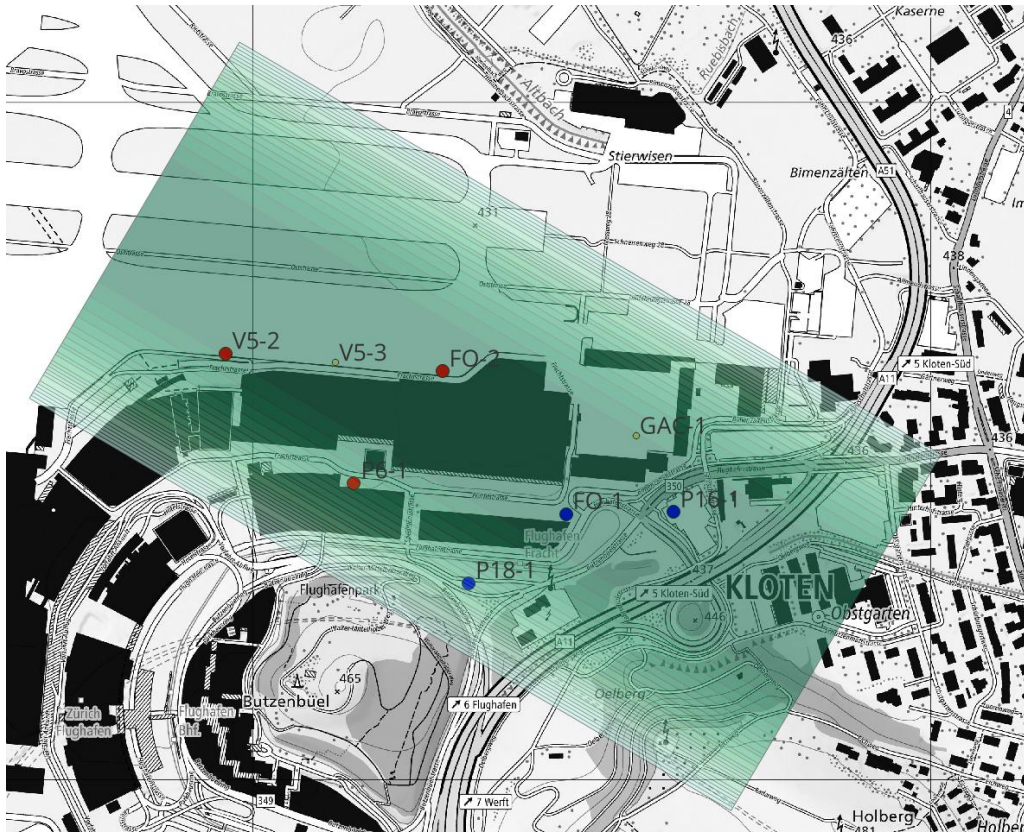


Abb. 2 Modellaufsicht und Ausdehnung. Farbe entspricht der Felsoberkante

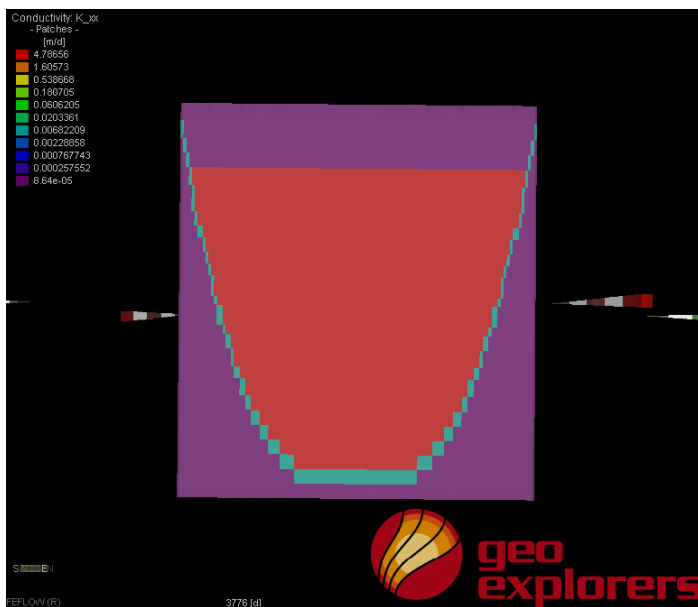


Abb. 3 Durchlässigkeitsbeiwerte im Modellquerschnitt

Top violette Lage = überlagernde Stillwassersedimente mit 10^{-9} m/s, rote Füllung = basale Rinnenfüllung bzw. nutzbarer Aquifer mit 5×10^{-5} m/s, blau = verwittrte OMM, violett randlich = OMM

Es wird vermutet, dass das anfänglich in den ersten Sondierbohrungen gemessene hydraulische Gefälle durch den Pumpbetrieb in der OMM-Bohrung in Bassersdorf verursacht wurde. Nach Ausbau der Pumpe in Bassersdorf war zwischen den unterschiedlichen Brunnen auf dem Flughafengelände praktisch kein hydraulisches Gefälle mehr messbar. Der Ausgangspegel im Modell wurde daher bei 400 m ü.M.; in der Rinne seitlich (SO und NW) fixiert ohne hydraulisches Gefälle. Die Ausgangstemperatur beträgt im ganzen Modell 20 °C und wurde an sämtlichen Modellrändern fixiert.

Die gerechneten Modelle weisen eine ausgeglichene entzogene bzw. eingespeicherte Energiemenge von 19.5 GWh (EZM 1) auf. Die aktuelle Planung ist darauf ausgelegt, dass dafür insgesamt 6-8 Brunnen reichen. Die vorgängig durchgeführten Grundwasser-Simulationen für das erstellte Brunnenpaar decken mit den beiden erstellten Brunnen P6-1 und P18-1 eine Energiemenge von rund 6.4 GWh ab, welche jährlich ein- und ausgelagert werden kann.

Das Lastprofil wurde von E-Axiom GmbH als Stundenwerte aus den vom Flughafen Zürich erhaltenen Daten für das Jahr 2023 zur Verfügung gestellt (Abb. 4). Diese wurden zu Wochenwerten aufsummiert. Die ersten Simulationen haben gezeigt, dass eine ausgeglichene Bilanz zwingend ist, was im tatsächlichen Betrieb auch berücksichtigt werden wird. Dafür wurde die Heizenergie proportional erhöht, so dass der Jahreswert genau der Jahresenergie für den Kühlbedarf entspricht und das Lastprofil somit ausgeglichen ist. Ausgehend von den vorgegebenen Temperaturspreizungen zwischen 12 und 18 K wurden die Förder- bzw. Rückgaberraten im Brunnen berechnet, um die benötigte Energiemenge von 19.5 GWh pro Saison für den Kühl- und Heizbetrieb zu erreichen. Die Förderrate wurde auf Wochen gemittelt, wobei Heiz- und Kühlbedarf energetisch verrechnet wurden. Es wird somit pro ganze Woche mit dem Wochenmittel kontinuierlich gepumpt; Spitzenlasten sind somit im Wochenmittel erhalten. Der Einfluss von Spitzenlasten auf das System wurde in den vorgängigen Simulationen für mehrere Tage simuliert, welche grob den Erkenntnissen aus den Pumpversuchen entsprechen. Grundsätzlich sind für die Spitzenlasten die Ergebnisse der Pumpversuche massgebend und nicht die Simulation, welche die langfristige Entwicklung im Aquifer abbildet. Im Heizbetrieb wird aus dem warmen Brunnen-Cluster (P6-1, V5-2, FO-2) in das kalte Brunnen-Cluster (P18-1, FO-1, P16-1) gepumpt und im Kühlbetrieb umgekehrt.

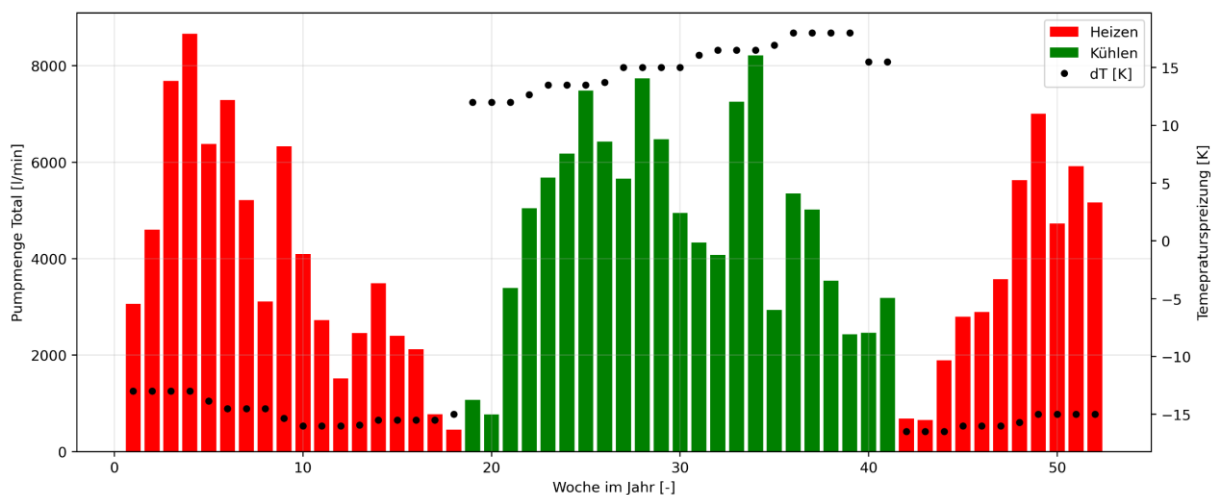


Abb. 4 Für die Simulation verwendetes Lastprofil der Phase EZM 1

Das Lastprofil entspricht der Phase EZM 1 (Heizen / Kühlen je total 19.5 GWh/a, Quelle: E-Axiom/FZAG). Die schwarzen Punkte beschreiben die Temperaturspreizung auf der rechten Achse, die Balken die Pumprate im Heizbetrieb (rot) und Kühlbetrieb (grün). Die Pumpmenge wird im Modell gleichmässig auf je 3 warme und 3 kalte Brunnen verteilt.

3.2 Szenarien

Die Modelle wurden anhand der Daten aus den Pumpversuchen geeicht. Ein früherer Bericht belegt zudem den Entscheid, eine einheitliche Rinnenfüllung zu bevorzugen. Die räumliche Verteilung der durchlässigen Sichten ist erstens unbekannt und zweitens hat sich ergeben, dass die durchschnittliche Ausdehnung der Temperaturfahne kaum von der Verteilung abhängt. Dies weil die durchlässigen und undurchlässigen Schichten so fein geschichtet sind, dass es sich um einen voluminösen Plattentauscher handelt. Um den Aufbau des Modells zu beschleunigen und die Rechenzeit beherrschbar kurz zu halten, wurde entschieden, die Rinne mit einheitlichem Material zu füllen.

3.3 Resultate

Bei den Resultaten sind vor allen die Parameter Transmissivität und thermische Ausbreitung von Bedeutung. Mit der Prüfung der Transmissivität soll sichergestellt werden, dass die simulierte Absenkung in den Pumpbrunnen mit der in der Realität, während der Pumpversuche gemessenen Absenkungen übereinstimmt. Damit kann das Modell plausibilisiert werden. Anhand der thermischen Ausbreitung soll aufgezeigt werden, ob während einer Saison ein thermischer Kurzschluss vorliegt und ob die 3 K-Regel eingehalten werden kann.

Transmissivität

Die in der Bohrung P1 mittels Pumpversuchen bestimmte Transmissivität passt mit den in der Simulationen berechneten Absenkungen gut überein. Gemäss der gemessenen Brunnenleistung in P6-1 und P18-1 (Abb. 47) wird bei einer Förderrate von 3'200 l/min (Maximum im Heizbetrieb) eine Absenkung, resp. Aufstau von 16-18 m erwartet, bei 3'900 l/min (Maximum Kühlbetrieb) rund 19-21 m. Dies stimmt mit den simulierten Wochenwerten in der Abb. 5 überein. Die Absenkung, bez. der Aufstau, ist in den Brunnen sehr ähnlich, was aufgrund gleich verteilter Fördermenge passt. Nur den P18-1 weist wesentlich mehr Absenkung/Aufstau aus, da der aufgrund seiner seitlichen Lage in dem Rinnen weniger Mächtigkeit zur Verfügung hat.

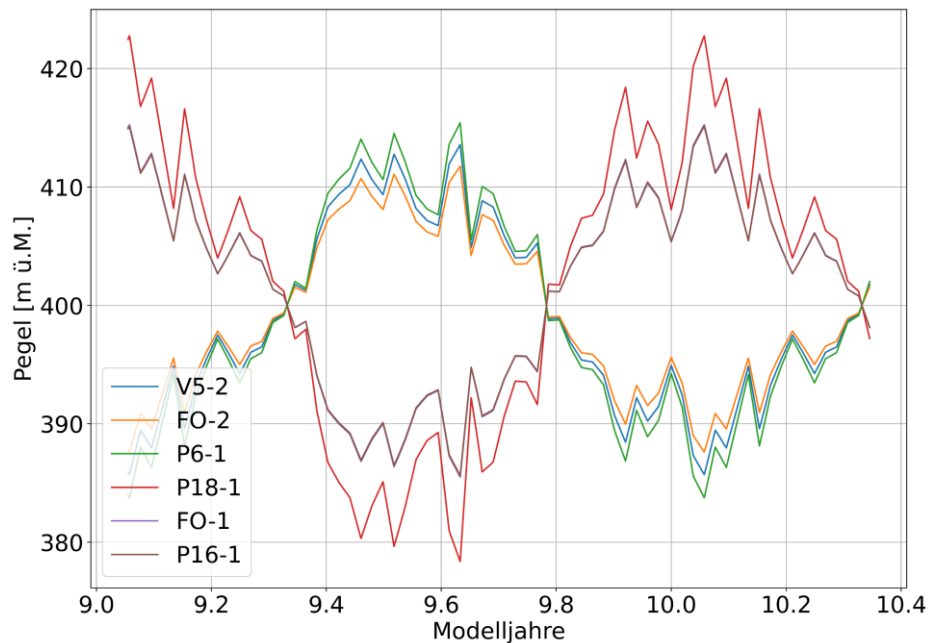


Abb. 5 Grundwasserabsenkung und -aufstau in den aktiven Brunnen

Dargestellt ist die simulierte Pegeländerung in den Brunnen im Heiz- und Kühlbetrieb für den Fall EZM 1. Dargestellt ist Modelljahr 9/10. Die anderen Jahre weisen aufgrund gleicher Pumprate ein gleiches Profil aus.

Thermische Ausbreitung

Die thermische Ausbreitung ist in der Abb. 6 ersichtlich. Aufgrund des nicht vorhandenen hydraulischen Gefälles breiten sich keine thermischen Fahnen sondern Inseln radial um die Brunnen aus; aufgrund der Zirkulation mit einer gewissen Fliesstendenz zum anderen Brunnen hin. Ein signifikanter thermischer Kurzschluss ist gemäss Simulation nicht vorhanden und entspricht den Erkenntnissen aus dem Tracertest und Pumpversuchen. Die Brunnen haben grob einen Abstand von 200 m zueinander. Die thermischen Änderungen werden in jedem Brunnen für die Höhe von 161m ü.M., vertikal mittig in der Rinne, ausgelesen und nachfolgend abgebildet, ebenso für theoretische Beobachtungsbrunnen mittig im warmen Cluster, mittig im kalten Cluster und mittig zwischen P6-1 und P18-1 (siehe Fähnchen auf Abb. 6).

Die thermischen Verluste der saisonalen Speicherung sind beim Aufladungsprozess gering, weil kaum ein hydraulisches Gefälle vorliegt. Um die Brunnen bilden sich konzentrische Wärme-, resp. Kälteinseln, welche kaum abströmen (Abb. 6). Thermische Kurzschlüsse sind nicht vorhanden bzw. kaum messbar (Abb. 6).

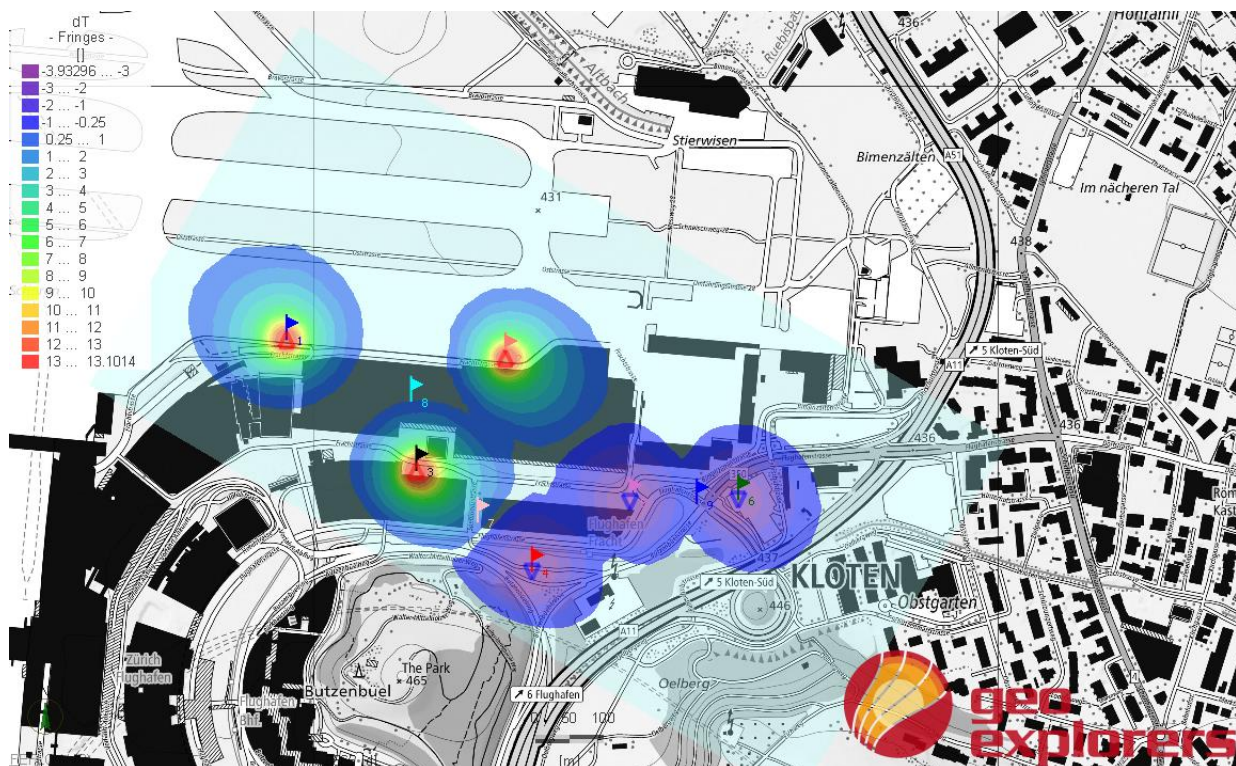


Abb. 6 Maximale Ausdehnung der Wärmefahne

Ausdehnung am Ende der Kühlperiode für Phase EZM 1, nachdem Wärme in die drei nördlichen Brunnen eingelagert wurde. Ein thermischer Kurzschluss zwischen den warmen und kalten Brunnen findet nicht statt. Die 3K-Regel wird eingehalten.

In Abb. 7 sind die Abweichungen der Aquifertemperatur von der Ursprungstemperatur von 20°C im Kühl- und Heizbetrieb während 10 Jahren in den drei warmen, drei kalten und den drei Beobachtungsbrunnen dargestellt.

Die Aquifertemperaturen um die genutzten Brunnen zeigen, dass sie sich nach rund 8 Jahren eingependelt haben. Die thermischen Verluste sind ab diesem Zeitpunkt gering, aber auch das Gesteinsvolumen hat bezüglich der Temperatur ein neues Gleichgewicht erreicht. Ein stabiles Gleichgewicht kann somit erreicht werden. Gleiches gilt auch in 100 m Entfernung (grüne Kurve in Abb. 7). Während zu Beginn des Betriebs aufgrund der Pufferwirkung des Gesteins, sowie aufgrund der thermischen Verluste nach aussen hin die Amplitude zwischen Heiz- und Kühlbetrieb noch gering ist, wird sie mit den Betriebsjahren kontinuierlich grösser und erreicht ebenfalls nach rund 8 Jahren den Gleichgewichtszustand. Nach 10 Jahre liegt die Temperatur in der Mitte vom kalten Cluster bei 18.4 °C und im warmen Cluster bei 20.2 °C. Zwischen den Clustern bewegt sich die Temperatur mit der Jahresschwankung zwischen 18.4 °C und 20.8 °C. Die 3 K in 100 m-Regel wird somit eingehalten.

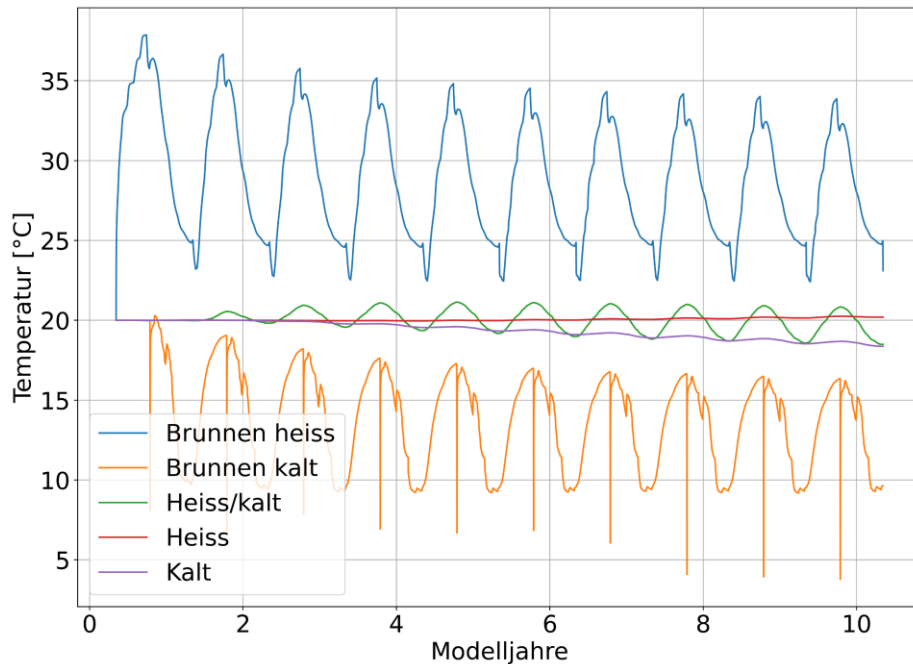


Abb. 7 Temperaturverlauf über 10 Jahre

Temperatur auf 161 m ü.M. in den warmen Brunnen (blau), kalten Brunnen (orange), zwischen P6-1 und P18-1 (grün), mittig im warmen Brunnencluster (rot) und kalten Brunnencluster (violett). Spikes stammen von numerischen Artefakten auf Grund der Gridgrösse und haben keine Bedeutung.

3.4 Diskussion aus Abschlussbericht Erkundung

Es wurde eine Vielzahl von Simulationen durchgeführt, um die Sensibilität verschiedener Parameter zu testen (siehe auch vorgängige Berichte). Die wichtigsten Parameter bei einem Grundwassermodell sind dabei das hydraulische Gefälle, die Transmissivität, die Porosität und die Pumprate, resp. die Temperaturspreizung und die Mächtigkeit der durchlässigen Schichten.

Das **hydraulische Gefälle** ist äusserst gering. Ohne Pumpbetrieb in Bassersdorf ist es praktisch Null, während des Pumpbetriebs in Bassersdorf sehr gering. Deshalb gibt es in beiden Fällen nur Wärme- und Kälteinseln und keine thermischen Fahnen.

Unterschiedliche **Transmissivitäten** hatten einen gewissen Einfluss, aber nur einen geringen. Eine Verdoppelung oder eine Halbierung hatte einen relativ geringen Effekt auf die thermische Ausbreitung. Es wurde schliesslich die Transmissivität von $4.1 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ verwendet, welche beim Pumpversuch in der P1 berechnet wurde und als durchschnittliche Transmissivität im heterogenen Grundwasserleiter verstanden wird. Diese Transmissivität bildet auch die effektiv gemessene Absenkung in den Pumpbrunnen am besten ab.

Die effektive **Porosität** hat keinen signifikanten Einfluss auf die Ausbreitung der thermischen Fahnen, weil auch das Gestein als Wärmepuffer dient und nicht nur das Grundwasser.

Die **Temperaturspreizung** am Brunnenkopf wurde bei einigen Simulationen um zusätzlich 4 K erhöht, was die Pumprate reduzierte. Der Energieeintrag, resp. -entzug blieb hingegen derselbe. Die Annahme, dass eine höhere Temperaturspreizung die Wärme-, resp. die Kälteinseln um die Brunnen konzentrierter halten, wurde nicht bestätigt. Auf die Aquifertemperaturen in 100 m Entfernung hatte eine Änderung der Temperaturspreizung nur einen geringen Einfluss.

Die Mächtigkeit der **durchlässigen Schichten** hatte den grössten Einfluss, weshalb in den vorhergehenden Berichten die Bandbreite dieses Parameters aufgezeigt wurde. Die Energie wird entweder auf ein kleines oder grosses Volumen verteilt / eingespeichert und entsprechend hat dies einen Einfluss auf die Temperaturänderung in diesen und angrenzenden Schichten. Gleichzeitig ist dies der Parameter, welcher auf Grund der Inhomogenität der basalen Rinnenfüllung am schwierigsten zu bestimmen bzw. im Modell abzubilden ist. Auch ein Grund, warum mit einer gemittelten homogenen Rinnenfüllung simuliert wurde (siehe auch oben).

Die gesetzlichen Vorgaben können eingehalten werden, wobei es aufgrund der Aquiferheterogenität eine gewisse Modellungenauigkeit gibt. Aus diesem Grund wurden bereits in vorgängigen Simulationen Best- und Worstcase-Simulationen durchgeführt, welche zwar die Modellgenauigkeit nicht verbessern, aber abschätzen lassen, in welcher Bandbreite sich die Aquifertemperaturen während der Nutzung bewegen (siehe Abschlussbericht Erkundung). Im **Best-Case Modell** kann die 3K-Regel im Heizbetrieb und im Kühlbetrieb sicher eingehalten werden. Im **Worstcase-Modell** wird in einzelnen durchlässigen Schichten die 3K-Regel geringfügig nur temporär am Ende der jeweiligen Saison überschritten, wohlgerneht für die dem Modell zu Grunde gelegte Bewirtschaftung, welche aber im Betrieb jederzeit so eingestellt werden kann, dass in jedem Fall die 3K-Regel eingehalten werden kann. Im Durchschnitt wird die 3 K über den Aquifer eingehalten. Aufgrund der Heterogenität im Aquifer, welche nur bedingt im Modell abgebildet werden kann, liegen die Schwankungen innerhalb der Modellgenauigkeit, da nicht klar ist, ob die durchlässigen Schichten um die Bohrungen überhaupt eine Reichweite von 100 m haben und nicht dazwischen eine hydraulische Barriere liegt. Die angetroffenen lithologischen Variationen zwischen allen Bohrungen bestätigen, dass nicht davon auszugehen ist, dass wie im Modell abgebildet, sehr durchlässige Schichten so weit reichen, sondern immer Reste bzw. Inseln von durchlässigen Kiesen vorliegen (= Reste von amalgamierten und anastomisierenden ursprünglichen Rinnenfüllungen, welche immer wieder teilweise erodiert wurden), wie dies auch mit dem Tracertest bestätigt wurde. Entsprechend kann daraus geschlossen werden, dass die geringe Überschreitung in wenigen Schichten in der Realität nicht vorkommen wird.

4 Fazit

Mit der **Simulation zum Abschlussbericht Erkundung von 2025** wurde bereits folgendes Fazit gezogen: Die betrieblichen Rahmenbedingungen können gemäss Simulation gut eingehalten werden. Selbst mit der erstellten Dublette P6-1 und P18-1 könnte rund ein Viertel des beabsichtigten maximalen Endausbaubedarfs abgedeckt werden. Im Betrieb sind keine thermischen Kurzschlüsse zu erwarten. Die Brunnenleistung wird nicht vollständig ausgereizt, d.h. es besteht noch eine Reserve hinsichtlich der zulässigen Grundwasserabsenkung bzw. des Aufstaus in den Brunnen, welche künftig beim Zubau weiterer Brunnen voraussichtlich benötigt wird. Die 3 K-Regel wird im Mittel über die gesamte Aquifermächtigkeit in jeder Simulation eingehalten. Einzelne Aquiferlagen können je nach Szenario aber zu einer geringen, kurzfristigen Überschreitung führen.

Mit der **neuen vorliegenden Simulation** mit verschobenen Brunnenstandorten und höherem Bewirtschaftungsziel gemäss EZM 1 wurde ebenfalls bestätigt, dass es möglich ist, eine Energiemenge von 19.5 GWh einzulagern und wieder zu entnehmen. Es stellt sich nach rund 8 Jahren ein quasithermischer Gleichgewichtszustand im Untergrund ein. Wie die Temperaturentwicklung über die ersten Betriebsjahre zeigt, liegt der anfängliche Verlust bei rund 7 %, da nicht nur das Grundwasser, sondern auch das Gesteinsvolumen erwärmt bzw. abgekühlt wird. Entscheidend ist dabei eine über mehrere Jahre betrachtet ausgeglichene Bilanz.

Wie bereits die ersten Simulationen gezeigt haben, bilden sich aufgrund des geringen bzw. kaum vorhandenen Grundwassergefälles keine thermischen Fahren sondern Wärme- und Kälteinseln. Auch die neue Simulation mit maximalen Energiewerten zeigt, dass die Brunnen ausreichend weit auseinanderliegen und keine thermischen Kurzschlüsse simuliert wurden. Dabei ist jedoch zu beachten, dass aufgrund der bisherigen Erkenntnisse, z.B. aus Tracerversuchen und der Korrelation von Kieslagen zwischen den Bohrungen, ein grosser, inhomogener kiesiger Körper unter den Stillwassersedimenten erwartet werden darf. In diesem sind die Kieslagen nicht durchgehend horizontal zwischen den Bohrungen verbunden. Unbekannt bleibt jedoch, wie gross die einzelnen Kieskörper tatsächlich sind und ob sich lokal Unterschiede bei der Ausbreitung von Wärme und Kälte bemerkbar machen. Falls dies der Fall ist, kann dem mit einer gezielten Bewirtschaftung der einzelnen Brunnen entgegengewirkt werden.

Die neue Simulation bestätigt, dass die 3 K-Regel auch unter den geänderten Randbedingungen eingehalten wird.

Die Pegeländerungen bei maximalen Pumpraten von ca. 2'900 l/min entsprechen den Werten aus den Pumpversuchen (ca. 20 m Absenkung bei 4'000 l/min). Dabei ist zu beachten, dass es sich um konstante Wochenmittel handelt. Während Spitzenlasten werden die Pumpraten kurzfristig höher sein. Wie die Pumpversuche gezeigt haben (siehe Abschlussbericht Erkundung 2025), sind Pumpraten von 5'000 l/min möglich. Aufgrund der Nähe zum Rinnenrand zeigt der Brunnen P18-1 die grössten Pegeländerungen mit maximal 21 m Aufstau bzw. Absenkung bei maximalen Pumpraten (konstantes Wochenmittel von ca. 2'900 l/min).

Die geringen Unterschiede in der Ausbreitung von Wärme und Kälte zwischen den verschiedenen Simulationen zeigen zudem, dass das Modell robust ist und der Aquifer so gross ist, dass er auf Anpassungen und Veränderungen nur wenig sensibel reagiert. Dies gilt jedoch nur, wenn sowohl die Grundwasserbilanz als auch die Bilanz zwischen Wärmeentzug und Wärmeeintrag ausgeglichen sind.

Die funktionierende Bewirtschaftung wird massgeblich davon abhängen, wie viel Wasser die Brunnen bei Spitzenlasten aufnehmen und liefern können. Simuliert wurde mit einer Temperaturspreizung von 11 bis 18 K, je nach Monat. Würde diese reduziert, wäre eine höhere Förder- bzw. Rückgaberate erforderlich. Dies müsste dann mit Pumpversuchen nachgewiesen werden. Aufgrund der Platzverhältnisse sind aber zusätzliche Brunnen im Gebiet der bestehenden Brunnencluster nur schwer zu realisieren; zudem würde dies die Wirtschaftlichkeit belasten.