

THERMISCHE GRUNDWASSERNUTZUNG IN BADEN

BIDIREKTIONALER BETRIEB DER GRUNDWASSERBRUNNEN IN BADEN NORD

Mit dem Ausbau der Fernwärme und Fernkälte wird das Grundwasser in Baden neben der Trinkwasserversorgung intensiv genutzt. Eine Besonderheit des Nutzungskonzeptes der Energiezentrale Baden Nord liegt im bidirektionalen Betrieb der Grundwasserförderung. Ein hydrogeologisches Modell prognostiziert den Einfluss der Nutzung auf das Grundwasser. Dieses Modell wird während der Betriebsphase über ein umfassendes Grundwasser-Monitoring validiert und langfristig in den automatisierten Betrieb integriert.

Hans Rudolf Pfister, Jäckli Geologie AG
Monika Mörsch, Regionalwerke AG Baden

RÉSUMÉ

THERMISCHE GRUNDWASSERNUTZUNG IN BADEN: BIDIREKTIONALER BETRIEB DER GRUNDWASSERBRUNNEN IN BADEN NORD

Das Grundwasser in Baden wird bereits für Trinkwasser und für thermische Anwendungen genutzt. Die lokalen Trinkwasserbrunnen verzeichnen aufgrund der Interaktion des Grundwassers mit der Limmat und anthropogener Einflüsse einen Anstieg der Grundwassertemperaturen von 0,5 K über die letzten 10 Jahre. Im Zusammenhang mit dem Ausbau der Fernwärme und -kälte nutzen die Regionalwerke AG Baden das Grundwasser nun auch als thermische Quelle. Die Energiezentrale Baden Nord nutzt dabei vier Grundwasserbrunnen im bidirektionalen Betrieb, um den Aquifer als thermischen Speicher zu aktivieren. Dabei werden dem Grundwasser jährlich rund 8 GWh zu Heizzwecken entzogen und rund 1,2 GWh aus Kühlung wieder zugeführt. Da die Trinkwassernutzung höchste Priorität hat, wurde in einem hydrogeologischen Modell aufgezeigt, dass die Grundwassertemperaturen durch Abwärmeeintrag lediglich kurzfristig und lokal erhöht werden, aber in den Trinkwasserfassungen um rund 1,5 K abgekühlt werden. Die thermische Nutzung wirkt damit der Entwicklung der Grundwassererwärmung entgegen. Während des Betriebs wird über ein Grundwasser-Monitoring die Auswirkung auf das Grundwasser überwacht, mit dem Modell abgeglichen und langfristig in den automatisierten Betrieb integriert.

EINLEITUNG

Die Regionalwerke AG Baden (RWB) hat 2004 im Stadtgebiet Baden Nord das Kesselhaus der ABB mit einem Fernwärmenetz übernommen. Im Rahmen des aktuellen Netzausbaus wird zusätzlich ein Fernkältenetz installiert. Bislang wurde die benötigte Wärmeenergie über Abwärme der Kehrlichtverbrennung Turgi sowie mittels Gas bereitgestellt. In den letzten drei Jahren wurden in der Stadt nun Grundwasserbrunnen abgeteuft und die Energiezentralen ausgebaut, um eine Grundlast über die thermische Nutzung des Grundwassers bereitzustellen. Dabei ergibt sich die Chance, über Wärmepumpen Wärme und Kälte simultan zu produzieren und den Kunden zur Verfügung zu stellen.

HYDROGEOLOGISCHE AUSGANGSLAGE

Aufgrund der geografischen Besonderheiten, der Thermalquellen sowie der industriellen Geschichte Badens ist das hydrogeologische Umfeld komplex [1]. Auf dem ABB-Areal rund um die Energiezentrale «Baden Nord» befinden sich mehrere sanierungsbedürftige, belastete Standorte, von denen durch die geplante Nutzung keine Schadstoffe mobilisiert werden dürfen.

Kontakt: M. Mörsch, monika.moersch@regionalwerke.ch

(© AdobeStock)

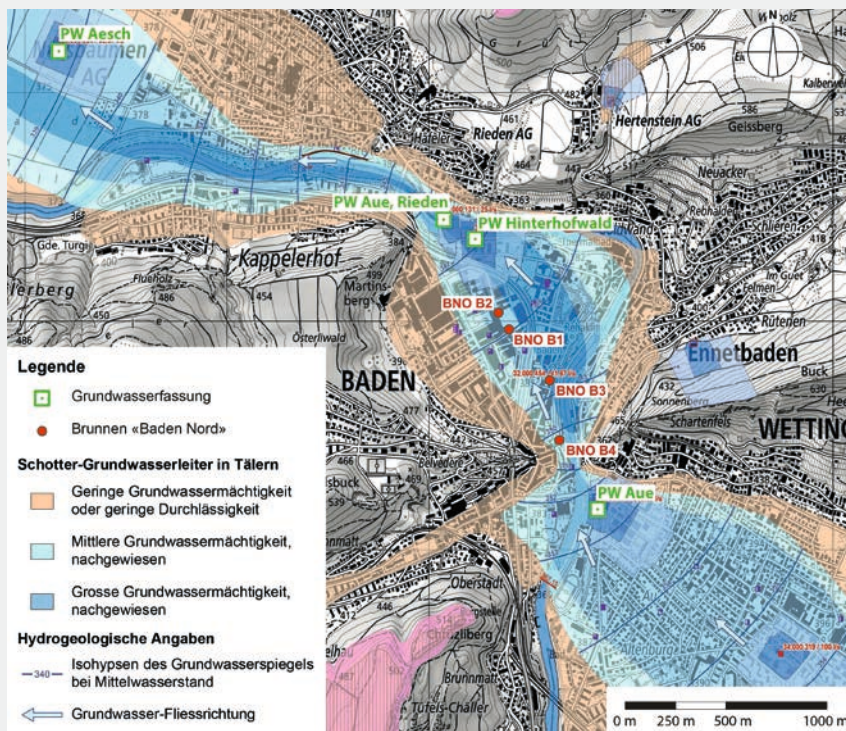


Fig. 1 Grundwasserkarte [2] mit Brunnenstandorten und Pumpwerken.

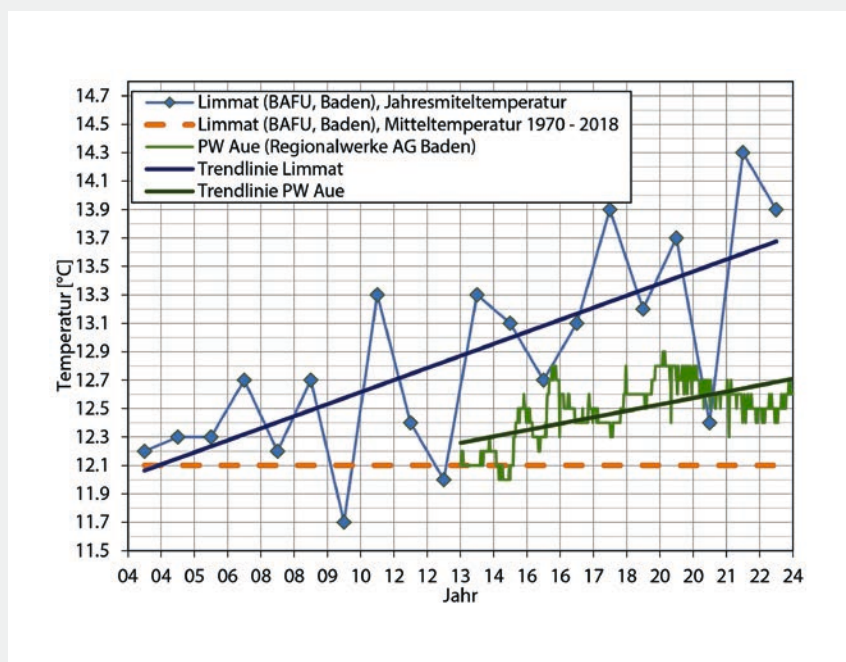


Fig. 2 Temperaturverlauf Limmat und Grundwasser.

Die neuen Grundwasserbrunnen liegen teilweise im Thermenschutzgebiet, was Zusatzabklärungen erfordert, um eine Beeinflussung des Thermalwassers auszuschliessen. Im Raum Baden bestehen einige Pumpwerke zur öffentlichen Wasserversorgung, die bei der Grundwassernutzung Priorität haben und weder in quantitativer noch qualitativer Hinsicht beeinträchtigt werden dürfen. Zudem sind bestehende thermische Grundwassernutzungen zu berücksichtigen.

Der Limmattal-Grundwasserstrom ist zwar sehr ergiebig, weist im Raum Baden aber aufgrund der Lage im Jura-Durchbruch durch die Lägern (Klus) eine sehr uneinheitliche Breite auf. Sowohl im Süden zwischen der Ruine Stein und dem Landvogteischloss als auch im Norden im Raum Kappelerhof ist der Grundwasserstrom zu schmalen Rinnen reduziert [2]. Zwischen den Engstellen verbreitert sich der Grundwasserleiter beckenartig (Fig. 1).

Die Limmat durchläuft das gesamte Projektgebiet und beeinflusst streckenweise das Grundwasser deutlich durch In- und Exfiltration. In den letzten 20 Jahren ist die Wassertemperatur der Limmat um rund 1,5 °C gestiegen. Seit 2013 war die Jahresmitteltemperatur konstant höher als die Langzeitmitteltemperatur von 1970 bis 2018 [3].

Diese Temperaturerhöhung der Limmat spiegelt sich aufgrund der Interaktion mit dem Grundwasser und anderer anthropogener Faktoren signifikant in der Grundwassertemperatur wider, wie beispielsweise am Pumpwerk Aue (Fig. 2, grüne Linie).

KONZEPT DER WÄRME- UND KÄLTENUTZUNG

Wie erwähnt, nutzt der bereits heute bestehende Wärmeverbund Baden Nord neu neben KVA-Abwärme (Projekt Sibano) und Gas auch Grundwasser als Energiequellen. Zusätzlich wird neben Fernwärme auch Fernkälte produziert und angeboten. Figur 3 zeigt das Konzept der Energiebereitstellung in einem vereinfachten Single-Line-Schema [4].

Das Konzept basiert auf der Erzeugung einer Grundlast an Wärme mittels einer Grundwasserwärmepumpe. Hierzu wird im Stadtgebiet über zwei Brunnen Grundwasser entzogen, zur Energiezentrale gepumpt und über zwei weitere Brunnen wieder in den Grundwasserleiter infiltriert. Die Wärmepumpe erzeugt simultan Wärme und Kälte und bewirtschaftet mit den anderen Erzeugern jeweils einen Kälte- und einen Wärmespeicher, die als hydraulische Weiche zu den nachgeschalteten Netzen fungieren.

Im Sommer kann die Wärmepumpe kältegeführt gefahren werden. Dabei wird die anfallende überschüssige Wärme primär über Freecooling an das Grundwasser abgegeben. Reicht die Kälteleistung nicht aus, wird der zusätzliche Kältebedarf über Kompressionskältemaschinen bereitgestellt, die die überschüssige Wärme ebenfalls an das Grundwasser oder zu Spitzenlastzeiten über Rückkühler an die Umgebungsluft abgeben.

LEISTUNGSKENNZAHLEN

Für den Vollausbau sind die in der Box aufgeführten Leistungskennzahlen geplant und Energiebezüge aus dem Grundwasser respektive Energieeinträge prognostiziert. Die Berechnungen beruhen auf

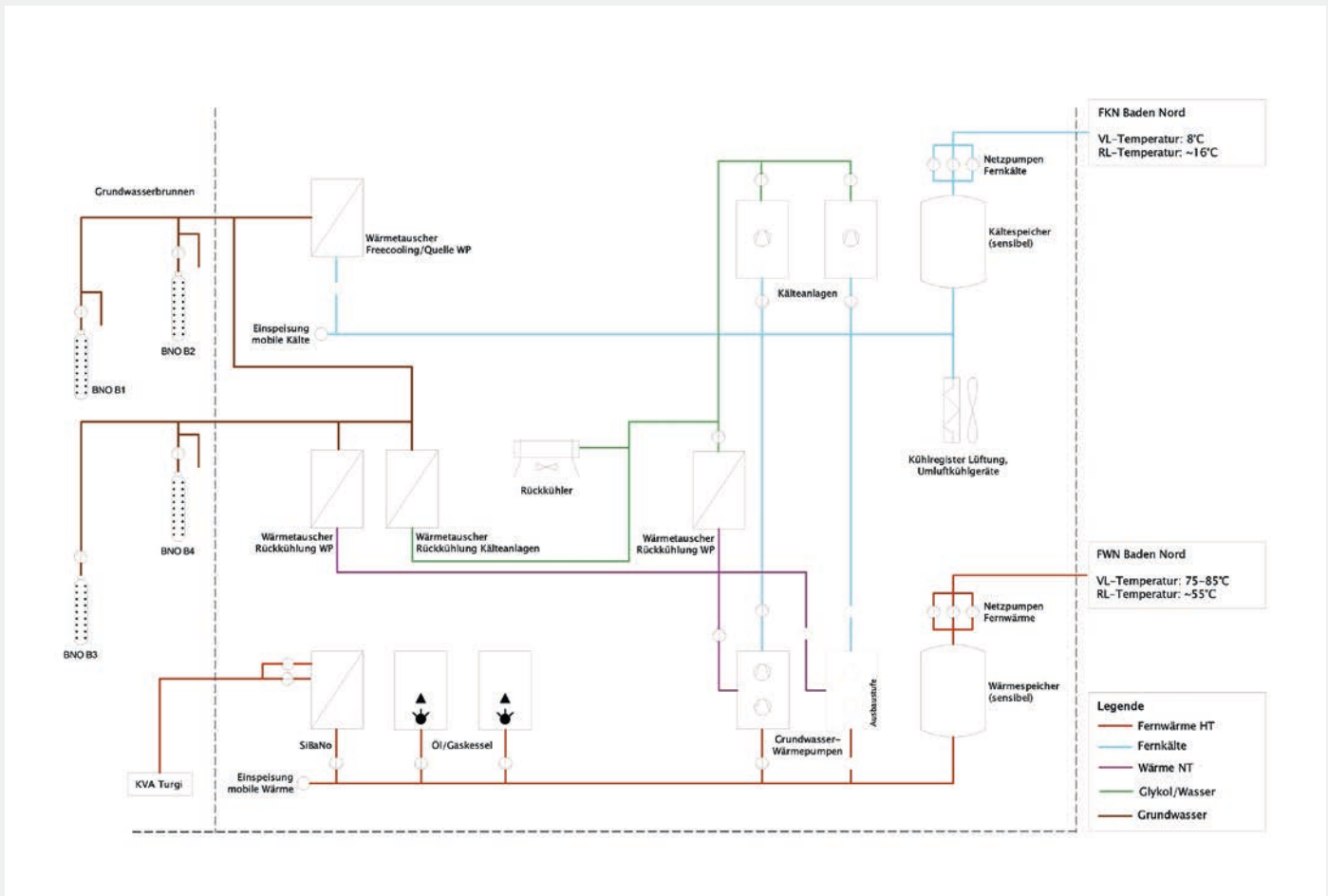


Fig. 3 Single-Line-Schema des Energiekonzepts Baden Nord [4].

	Umsatz Grundwasser				Mittlere Temperaturveränderung	Mittlere thermische Leistung *	Energieentzug / -eintrag *
	l/s	l/min	m³/Tag	m³/Monat			
Jan	120	7200	10363	321264	-2,98	-1502,7	-1118028
Feb	120	7200	10356	290016	-2,97	-1495,4	-1005108
Mrz	120	7200	10248	317700	-2,81	-1399,9	-1041490
Apr	115	6900	9936	298086	-2,59	-1250,4	-900291
Mai	108	6520	9386	290969	-1,45	-660,7	-491541
Jun	103	6135	8835	265035	0,03	11,4	8228
Jul	96	5735	8258	255996	2,38	955,1	710593
Aug	94	5640	8121	251751	1,67	658,0	489538
Sep	100	5996	8634	259022	-0,93	-390,9	-281471
Okt	115	6845	9857	305576	-2,53	-1210,5	-900594
Nov	120	7200	10309	309263	-2,90	-1452,7	-1045952
Dez	120	7200	10360	321108	-2,95	-1487,8	-1106744
Jahresmittel	111	6636	9555	290483	-1,66	-769	
Jahressumme Heizen				2713008			-7891219
Jahressumme Kühlen				772783			1208360
Jahressumme / Bilanz				3485791			-6682859

*Negativ: Abkühlung resp. Energieentzug, Positiv: Erwärmung resp. Energieeintrag

Tab. 1 Saisonaler Grundwasser- und Energieumsatz im Endausbau (Monatsmittel, gerundet).

einer Simulation mit realen Klimadaten mit einer Auflösung von 7,5 Minuten:

- max. Grundwasser-Volumenstrom:
120 l/s = 7200 l/min
- max. Entzugsleistung aus dem Grundwasser (Heizfall): 1680 kW
- Abkühlung des Grundwassers, grösstes Monatsmittel (Heizfall):
-2,98 K
- max. Eintragsleistung ins Grundwasser (Kühlfall): 6550 kW
- Erwärmung des Grundwassers, grösstes Monatsmittel (Kühlfall):
+2,38 K

EINFLUSS AUFS GRUNDWASSER

Als Grundlage für die Beurteilung des Einflusses der geplanten Wärme- und Kältenutzung auf das Grundwasser wurden die zeitlich hochaufgelösten Daten in Monatsmittelwerte umgerechnet und in ein numerisches Grundwassermodell implementiert. Die *Tab. 1* enthält alle wesentlichen Daten (Grundwasserumsatz, Temperaturveränderung, mittlere thermische Leistung, Energieentzug/-eintrag). Ausserdem wurden Jahresmittelwerte und -summen gebildet. Aus der Tabelle wird ersichtlich, dass in der Jahressumme rund 8 MWh Wärme aus dem Grundwasser entzogen, aber im Gegensatz dazu nur rund 1,2 MWh aus dem

	Periode	Grundwasserentnahme	Grundwasserrückgabe
Winterbetrieb	ca. Anfang September bis Ende April	BNO B3: 60 l/s BNO B4: 60 l/s	BNO B1: 60 l/s BNO B2: 60 l/s
Sommerbetrieb	ca. Anfang April bis Ende August	BNO B1: 60 l/s BNO B2: 60 l/s	BNO B4: 120 l/s

Tab. 2 Bidirektionale Bewirtschaftung des Grundwassers.

Kältenetz wieder in das Grundwasser eingetragen werden.

BIDIREKTIONALER BETRIEB

Die grundwasserseitigen Anlagenteile sind so gebaut, dass ein bidirektionaler Betrieb möglich ist. Damit sind die Funktion der Grundwasserbrunnen als Entnahme- und Schluckbrunnen und auch die Förderrichtung des Grundwassers je nach Bedarf und Betriebszustand umkehrbar. Im Heizbetrieb wird das Grundwasser aus den Brunnen BNO B3 und BNO B4 entnommen und in die Brunnen BNO B1 und BNO B2 zurückgegeben (*Fig. 1*). Die Fliessrichtung entspricht dabei der natürlichen Grundwasserfliessrichtung. In der kurzen Sommerbetriehsphase ist vorgesehen, das Grundwasser, anders als im Winterbetrieb, entgegen der natürlichen Grundwasserfliessrichtung zu pumpen, dabei werden die Brunnen BNO B1 und BNO B2 zu Entnahmebrunnen und der Brunnen BNO B4 wird zum Rückgabebrunnen (*Tab. 2*). Damit werden bewusst eine vorübergehende hydraulische Rezirkulation und ein thermischer Kurzschluss erzeugt.

Mit dem bidirektionalen Betrieb werden folgende Ziele verfolgt:

VERBESSERTER WIRKUNGSGRAD

Es wird angestrebt, einen Teil der im Winterbetrieb ins Grundwasser eingetragenen Kälte für den Kühlbedarf im Sommer wieder nutzen zu können, um den Wirkungsgrad der Anlage dank eines grösseren Freecooling-Anteils zu verbessern.

VERLAGERUNG DER WÄRMEFAHNE

Durch die Verlagerung der Rückversickerung von erwärmtem Wasser in den Brunnen BNO B4, der südlich der dann als Entnahmebrunnen dienenden Brunnen BNO B1 und BNO B2 liegt, wird die Wärmefahne weg verlagert von den Trinkwasserpumpwerken Hinterhofwald und Aue, Rieden.

GESCHLOSSENER KREISLAUF

Im Heizbetrieb wird durch die Förderung des Grundwassers in gewisser Weise die natürliche Fliessbewegung des Grundwassers verstärkt und beschleunigt. Im umgekehrten Betrieb findet dagegen eine Förderung talaufwärts entgegen der natürlichen Fliessbewegung statt. Damit

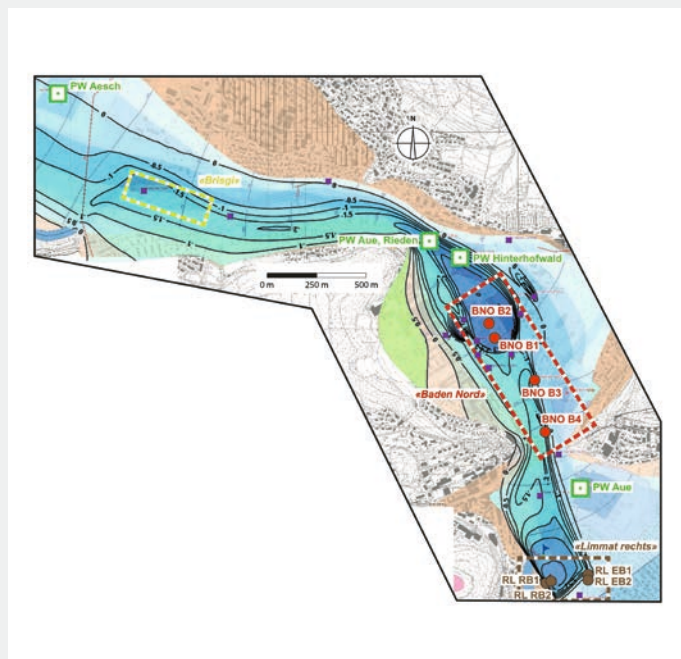


Fig. 4a Darstellung der Temperaturdifferenzen nach 15 simulierten Betriebsjahren, Ende der Heizperiode, März.

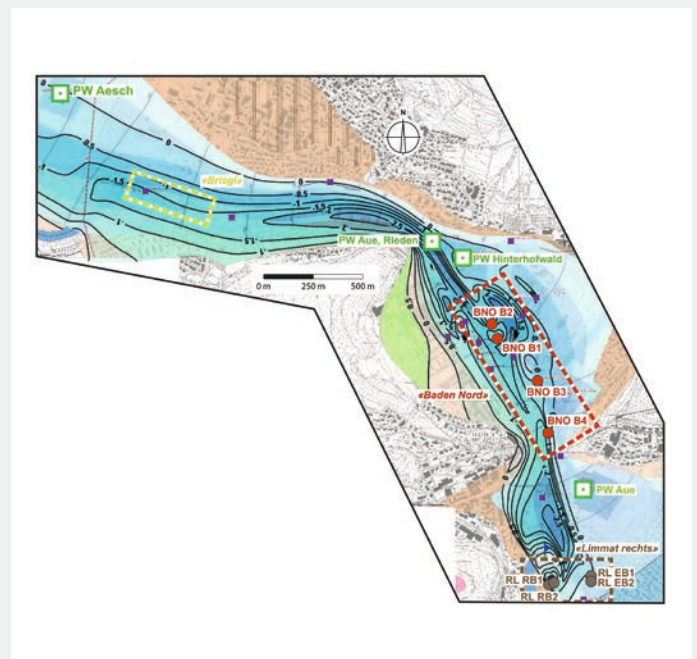


Fig. 4b Darstellung der Temperaturdifferenzen nach 15 simulierten Betriebsjahren, Ende der Kühlperiode, September.

wird vorübergehend eine Art geschlossener Kreislauf gebildet und ein Teil des Grundwassers vom Wärme- und Kälteverbund mehrmals genutzt.

SIMULATION MIT GRUNDWASSER-MODELL

Zur Prognostizierung des thermischen Einflusses der geplanten Grundwassernutzung wurde ein numerisches Fliessmodell des Limmattal-Grundwasserstroms zwischen Wettingen und Turgi erstellt. Die Modellbreite variiert in Abhängigkeit der örtlichen Hydrogeologie zwischen 150 und 750 Metern. Dabei wird der Verengung des Grundwasserleiters im Bereich der Klus im Gebiet von Baden Rechnung getragen. Die Simulation berücksichtigt insbesondere umgebende Trinkwasserfassungen, bestehende thermische Grundwassernutzungen sowie den bidirektionalen Betrieb der Energiezentrale Baden Nord. Der Sommerbetrieb mit umgekehrter Betriebsrichtung wird von Anfang April bis Ende August vorgegeben

Die *Figuren 4a* und *4b* zeigen die Temperaturdifferenzen des Grundwassers gegenüber der konstanten Ausgangstemperatur mit Isothermen (Äquidistanz 0,5 °C) nach 15 simulierten Betriebsjahren am Ende der Heizperiode im März sowie am Ende der Kühlperiode im September.

Die Nutzung des Grundwassers zu Trinkwasserzwecken hat Vorrang vor der thermischen Nutzung. Die Simulationen sagen eine grossräumige Abkühlung des Grundwassers um ca. 1,5K durch die thermische Grundwassernutzung voraus. Dem Grundwasser wird insgesamt sechsmal mehr Wärme entzogen, als über den Sommer eingetragen wird. Dabei wird über die Bidirektionalität ein Teil der Wärme im Sommer im Aquifer gespeichert, der im Winter wieder zum Heizen entzogen wird, ohne die Trinkwasserpumpwerke

zu beeinflussen. Eine unerwünschte Erwärmung des Grundwassers tritt demnach nur lokal und kurzzeitig auf.

Ein weiterer Effekt der Grundwassernutzung ist, dass die absolute Abkühlung des Grundwassers der beobachteten Erwärmung des Grundwassers entgegenwirkt. Dies wirkt sich positiv auf die Trinkwasserversorgung aus und unterstützt, die rechtlich festgelegten und maximal erlaubten Temperaturveränderungen im Grundwasser einzuhalten.

Der Umfang der Grundwassernutzung in Baden Nord wurde von Projektbeginn an so abgeschätzt, dass nach heutigem Kenntnisstand keine Übernutzung des Grundwassers resultiert. Bei der Projektgrösse und den komplexen Rahmenbedingungen können nicht alle Auswirkungen des späteren Betriebs genau prognostiziert werden. Für die möglichen Auswirkungen gilt aber, dass sie reversibel sind.

GRUNDWASSER-MONITORING-KONZEPT

In den ersten Jahren wird die Anlage mit 50% der Endausbauleistung betrieben, d.h., aktuell ist lediglich eine von zwei Grundwasserwärmepumpen in der Energiezentrale Baden Nord realisiert. Parallel zum Betrieb der Anlage werden im Rahmen eines umfangreichen Grundwasser-Monitorings Daten erhoben, die in den Betrieb und den geplanten zweiten Ausbauschritt einfließen werden. Das Grundwasser-Monitoring verfolgt die folgenden Ziele:

- Überwachung der Grundwasserqualität an ausgewählten Messstellen, um zum einen die bestehenden schadstoffbelasteten Standorte zu überwachen und zum anderen die Einflüsse von Thermalquellen zu detektieren.
- Aufzeichnung von Grundwassertemperaturen an Messstellen über das Stadtgebiet verteilt.

- Messung und Bewertung des Einflusses der thermischen Grundwassernutzung auf die Grundwasserressourcen und die benachbarten Wasserfassungen.
- Management und Optimierung des Betriebs der Brunnen und Interaktion mit benachbarten thermischen Nutzungen unter der Prämisse, den Einfluss auf das Grundwasser zu minimieren.

Sollte sich im Monitoring zeigen, dass Grenzwerte überschritten werden, wird der Betrieb optimiert oder im ungünstigsten Fall zurückgefahren, sodass erwartungsgemäss auch die festgestellten, unerwünschten Auswirkungen wieder abklingen.

AUSBLICK

Entwickeln sich die Auswirkungen auf das Grundwassersystem wie erwartet, kann nach gesicherten Betriebserfahrungen die zweite Ausbaustufe mit der zusätzlichen Grundwasserwärmepumpe in Baden Nord umgesetzt werden. Ziel ist es, das hydrogeologische Modell anhand der Messwerte zu verifizieren und zu kalibrieren. Dies ist die Grundlage für eine langfristige Integration des Modells in einen *Digital Twin*, um das Gesamtsystem automatisiert betreiben zu können.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Jäckli Geologie AG (8.11.2021): *Wärme- und Kälteverbund Baden Nord, Baden / AG - Nutzung des Grundwassers zu thermischen Zwecken, technischer Bericht*
- [2] Kanton Aargau: *Grundwasserkarte*, <https://www.ag.ch/de/verwaltung/bvu/umwelt-natur-landschaft/umwelt/grundwasser/grundwasserdaten>
- [3] Bundesamt für Umwelt BAFU: *Hydrologische Daten und Vorhersagen: Station Limmatpromenade, Baden, 1970 bis 2018*
- [4] Alera Energies AG (18.01.2024): *Energiekonzept Energiezentrale Baden Nord, Single-Line-Schema*