



Abb. 1 Vision des „Bonner Bogens“;
Ansicht vom Rhein aus (Computergrafik)

Grundwassergekoppelte Wärmepumpeanlage am Bonner Bogen

Heizen und Kühlen ■ Jährlich werden in Deutschland ca. 40.000 erdgekoppelte Wärmepumpen installiert, mit steigender Tendenz. Jedoch sind nur selten so große grundwassergekoppelte Anlagen dabei, wie am Standort Bonn Rheinwerk. Dort sollen im Endausbau über 100.000 m² Nutzfläche mit oberflächennaher Geothermie beheizt und gekühlt werden. Über insgesamt zehn Brunnen wird Grundwasser aus den Rheinterrassen entnommen, thermisch genutzt und wieder in den Aquifer zurückgeleitet. Bis zu 600 l/s können in Zeiten des Spitzenbedarfs dem Untergrund an Kühlung entnommen werden. Durch eine durchdachte Brunnenwechselschaltung, kombiniert mit einer Campusstruktur der Gebäude, durch die häufig gleichzeitig Kühl- und Heizbedarf gegeben ist, wird die Energiequelle Geothermie optimal genutzt. Damit können hervorragende Arbeitszahlen erwartet werden. Die im September 2009 in Betrieb gegangene Anlage kann als Musteranlage für große, grundwassergekoppelte Wärmepumpen gelten.

Schon seit mehr als fünf Jahren wird das erste Gebäude des „Bonner Bogens“, damals noch als „BonnVisio“ bezeichnet, mit einer monovalent betriebenen, grundwassergekoppelten Wärmepumpe beheizt und gekühlt (BT F in Abb. 2). Dazu werden jährlich 275.000 m³ Grundwasser über zwei Brunnen gefördert und über zwei Reinfiltrationbrunnen dem Untergrund wieder zugeführt. Die Fließrichtung des Grundwassers im Gebäudestrang wurde dabei nicht in jahreszeitlichem Wechsel geführt. Vielmehr wurde diese Anlage so berechnet, dass die thermische Front des jeweiligen jahreszeitlichen Be-

triebs in etwa mit dem Wechsel zum nächsten Frühjahr bzw. Herbst die Förderbrunnen erreicht.

Die Wirtschaftlichkeit dieser Anlage überzeugte den Investor so stark, dass er 2006 beschloss, die geplanten Flächen des Fünf-Sterne-Hotels (BT D in Abb. 2), Kongresszentrums, der Büros und der hochwertigen Wohnbebauung mit Kindertagesstätte ebenfalls mittels Geothermie zu beheizen und zu kühlen.

Übersicht über die Bauwerke

In Abbildung 2 sind die Baufelder und die Gebäude dargestellt. Davon sind

im Oktober 2009 Bauteil (BT) C, D, E, und F fertiggestellt. BT F enthält die erste Grundwasseranlage aus dem Jahr 2004, BT E ist nicht an die Geothermieanlage angeschlossen. BT A-D sollen durch die nun fertiggestellte neue Anlage versorgt werden. Das gesamte Ensemble wird inzwischen als „Bonner Bogen“ bezeichnet, die Gebäude haben jedoch auch eigene Namen. Aus Gründen der Eindeutigkeit werden in diesem Artikel durchgängig die Bezeichnungen gemäß Abbildung 2 verwendet. In Tabelle 1 sind die entsprechenden Nutzflächen aufgelistet; daraus ergeben sich rund 60.000 m² an



geothermisch beheizter und gekühlter Nutzfläche, von denen knapp 40.000 m² seit November 2009 in Betrieb sind.

Geothermieanlage für BT A-D

Die Anlage für die Teilfelder BT A-D (vgl. Abbildung 2) besteht aus zwei Gruppen von je drei Brunnen, die je nach Bedarf als Förder- oder Schluckbrunnen betrieben werden können. Die Technikzentrale dazu befindet sich im Untergeschoss des Hotels (BT D). Nähere Angaben zu Technikzentrale im aktuellen Ausbaustand sowie zur Betriebsweise der Brunnen gibt Tabelle 2; Abbildung 3 zeigt die Grundwasser-Wärmetauscher und die Wärmepumpe.

Über das Geothermiesystem sollen fast 100 Prozent des Kältebedarfs gedeckt werden. Der Einsatz einer Kältemaschine ist nur für kurze Zeiträume im Hochsommer notwendig. Im Winter liegt der Deckungsgrad zwischen 60 bis 80 Prozent, sodass zwei Gaskessel für die Spitzenlastabdeckung bei sehr kalten Außentemperaturen weiterhin notwendig sind. Gegenüber einer konventionellen Energieversorgung können so jährlich rund 1.700 MWh an Primärenergieaufwand sowie die Emission von 400 Tonnen CO₂ vermieden werden. Diese Einsparung resultiert zum einen aus der hohen Energieeffizienz der Geothermieanlage, zum anderen aber auch aus einer Optimierung der Gebäudetechnik sowie der Raumsteuerung (Tab. 2).

Genehmigung zur Nutzung der geothermischen Energie

Im Jahr 2003 legte das zuständige Bergamt Arnsberg das Bergrecht so aus, dass im Fall der Anlage „BonnVisio“ (BT F) eine bergrechtliche Bewilligung zur Nutzung des bergfreien Rohstoffes Erdwärme gefordert wurde, da der thermische Einfluss der Anlage im Untergrund über die Grundstücksgrenzen hinausgeht. Das Bewilligungsfeld wurde erteilt, ebenso ein benachbartes Feld

für das Polizeipräsidium Bonn im darauf folgenden Jahr. Für die Versorgung der weiteren Bebauung „Bonner Bogen“ wurden 2006 entsprechend weitere Bewilligungen beantragt (vgl. Abb. 6). Im Jahr 2007 änderte sich jedoch die Interpretation des Bergrechtes in Nordrhein-Westfalen dahingehend, dass für Anlagen, die die Wärme auf dem gleichen Grundstück nutzen, auf dem die Anlage errichtet wird, grundsätzlich der § 4 des Bundesberggesetzes greift,

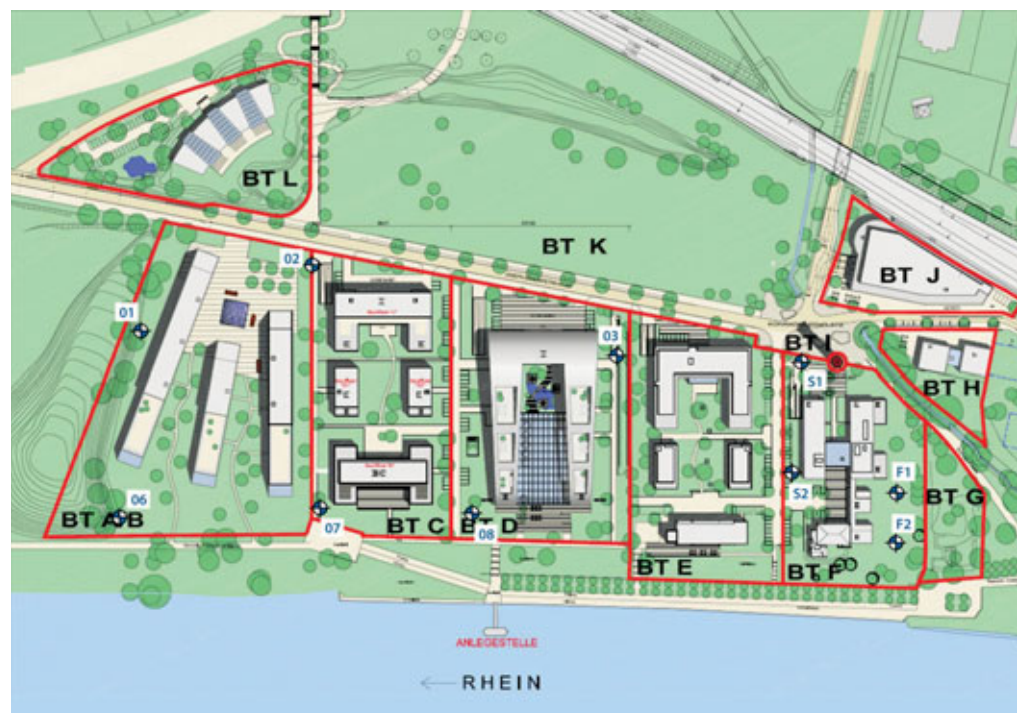
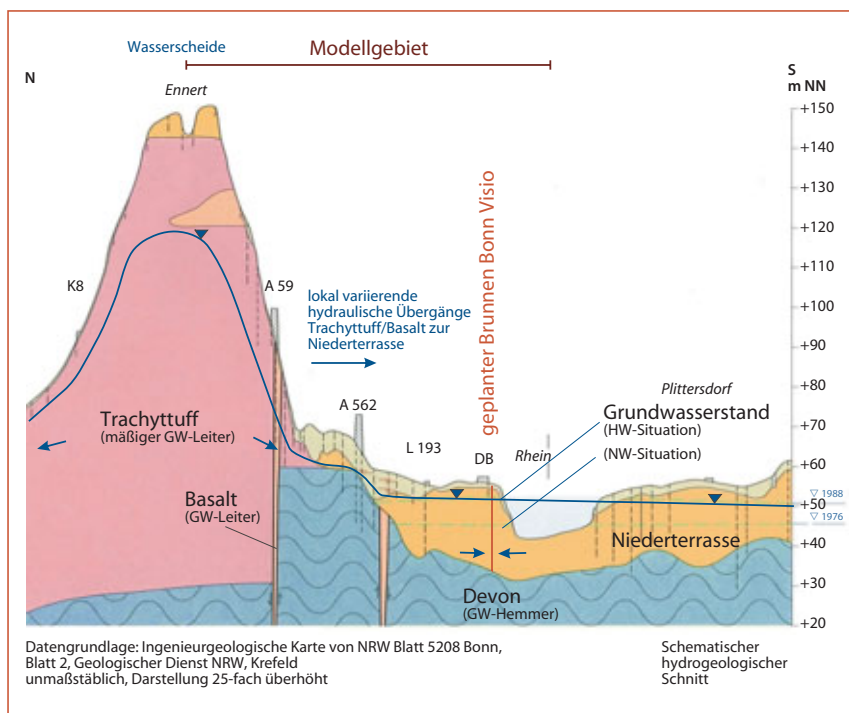


Abb. 2 Übersicht über die Baufelder (im Oktober 2009 fertiggestellt: BT C, D, E, und F), mit Einzeichnung der Brunnen (1-3 und 6-7 im Neubau, BT A-D, sowie F1-F2 und S1-S2 bei BT F); BT F enthält die erste Grundwasseranlage aus dem Jahr 2004, BT E ist nicht an die Geothermieanlage angeschlossen.



△ **Abb. 3** Grundwasser-Wärmetauscher (links) und Wärmepumpe (rechts) in der Technikzentrale im Untergeschoss BT D

◁ **Abb. 4** Hydrogeologisches Nord-Süd-Profil am Standort Bonner Bogen, schräg zum Rheinverlauf, 25-fach überhöht



wonach diese Anlagen auf der rechtlichen Basis einer wasserrechtlichen Erlaubnis betrieben werden können.

In der ersten Planungsphase für die Erweiterung wurde dann ein Verbundsystem aller Bauwerke geplant, wozu auch das bestehende Gebäude BT F zählte, sodass die hierfür vorhandene bergrechtliche Genehmigung zurückgegeben und die Gesamtanlage nach dem Wasserrecht genehmigt wurde. Im Zuge der Errichtung der Anlage stellte sich jedoch heraus, dass aus technischen Gründen keine Verbindung zwischen der Neubebauung (BT A-D) und dem Bestand (BT F) möglich war. Somit wurden die Anlagen für BT F und für die Neubebauung genehmigungsrechtlich wieder getrennt und beide separat wasserrechtlich genehmigt. In sehr guter und enger Zusammenarbeit mit den Behörden der Stadt Bonn ließen sich hier die genehmigungstechnischen Probleme immer mit gutem Resultat lösen.

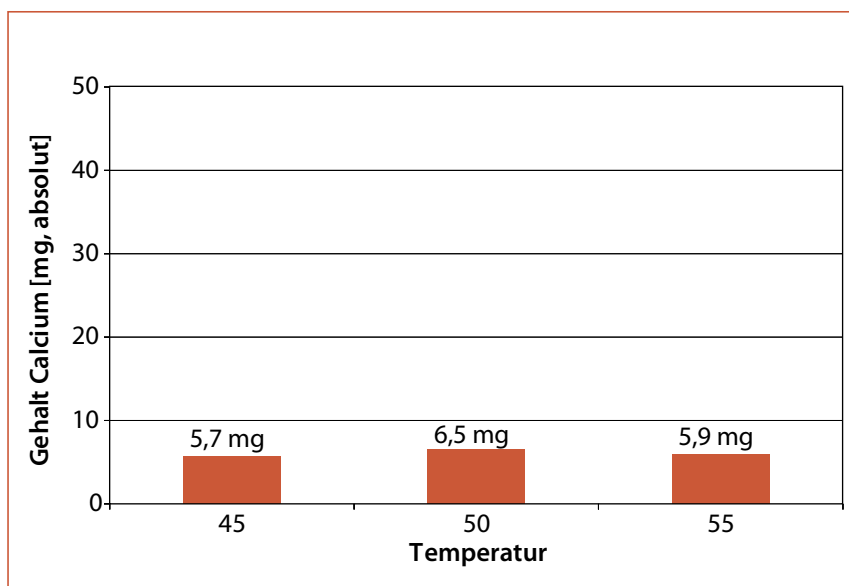


Abb. 5 Analyse der Calciummengen aus dem Scalingtest bei steigender Temperatur

Da sich die Hydrogeologie jedoch nicht an die Genehmigungsgrenzen hält, mussten immer wieder neue Simulationen aufzeigen, wie sich die Anlagen wechselseitig beeinflussen. Bestimmte Temperaturgrenzen müssen in den einzelnen Anlagen eingehalten werden,

sowohl aus Genehmigungsgründen wie auch aus energetischen Gründen. Weiterhin durfte das weiter bestehende bergrechtliche Bewilligungsfeld des Polizeipräsidiums aus rechtlichen Gründen nicht angetastet werden. Die Aufgaben des Planungsteams UBeG GbR, verstärkt durch das Büro BGU GbR aus Bielefeld, wurden dadurch immer komplizierter und eine Vielzahl von Simulationsläufen mussten ausgeführt werden, um eine optimale Konfiguration an Förder- und Schluckbrunnen zu erreichen.

Hydrogeologische Betrachtung

Unter einer max. 2,6 Meter mächtigen Auffüllung wurden bis in eine Tiefe von ca. 20 Meter unter Gelände die Schotter der Rhein-Niederterrasse angetroffen: ein sandiger bis stark sandiger Kies, bereichsweise mit wenigen Meter mächtigen Sandlagen. Die Schotter bilden den Hauptgrundwasserleiter des Untersuchungsgebietes und damit den geothermisch genutzten Horizont. Unterhalb des Schotters folgen die verfestigten

devonischen Ton- und Schluffsteine (Abb. 5).

Mit Pumpversuchen wurde bereits 2003 zur Planung für BT F eine hohe Gebirgsdurchlässigkeit der Rhein-Niederterrassenschotter ermittelt, mit k_F -Werten von ca. 1×10^{-2} m/s bis 3×10^{-2} m/s). Der Durchlässigkeitsbetrag liegt an allen Brunnenpositionen etwa in der gleichen Größenordnung. Die Temperatur des Grundwassers wurde während der Pumpversuche mehrfach bestimmt und liegt im Mittel bei 11,5 bis 12,2 °C. Auch an den weiteren, im Jahr 2008 erstellten Brunnen 1-3 und 6-8 wurde im September/Oktober 2008 ein kombinierter Gruppenpump- und -schluckversuch durchgeführt, um die Leistungsfähigkeit (Förder- und Aufnahmevermögen) der Brunnen zu bestimmen. Mit dem Pumpversuch wurde in guter Übereinstimmung eine Gebirgsdurchlässigkeit (k_F -Wert) von 3×10^{-2} m/s ermittelt, was die Ergebnisse aus 2003 bestätigt. Die Strömungssituation in der Niederterrasse wird vorrangig durch

den Rhein geprägt. So lehnt sich der Grundwasserstand auf dem Projektareal im Wesentlichen an den Rheinpegel an. Für den Standort ist mit einer Wasserstandsschwankung von 44,5 m NN bis 53,5 m NN zu rechnen, bei einem mittleren Niveau 46,8 m NN.

Ein im Jahr 2003 ausgeführter Scaling-Test zeigte, dass im späteren Anlagenbetrieb nicht mit temperaturbedingten Ausfällungen zu rechnen ist. Dieses Verfahren war im Rahmen eines internationalen Forschungsprojektes (Sanner, 1999, [3]) gemeinsam durch die Universitäten Stuttgart, Lüneburg und Gießen entwickelt worden; nähere Einzelheiten sind bei Knoche (2005, [1]) zu finden. Es wurde eine vorhandene Grundwasser-Messstelle als Förderbohrung benutzt. Das Wasser hatte eine Fördertemperatur von rund 13 °C und wurde in drei Versuchen auf 45 °C, 50 °C und 55 °C erwärmt. Sowohl die visuelle Inspektion des Versuchswärmetauschers vor Ort als auch die Analyse der jeweiligen Reinigungslösungen gaben keinen Hin- ▶

30 Jahre underground

Dr. Schmitz GeoConsulting

Umwelt
Boden
Baugrund
Erdwärme

Robert-Perthel-Str. 10 D-50739 Köln Tel. 0221-1705 08 07
www.dr-schmitz-koeln.de info@dr-schmitz-koeln.de

Erfahrung und Kompetenz in Erdwärme



- Geologische Beratung
- Geothermische Machbarkeitsstudien
- Geothermal-Response-Test
- Temperaturmessungen
- Auslegungsberechnungen und Anlagenplanung
- Geothermische Simulationen (FEM)
- Wasser- und bergrechtliche Beantragungen
- Bauüberwachung
- Monitoring



Geothermal-Response-Testgeräte



UBeG Dr. E. Mands & M. Sauer GbR

Zum Boden 6 - 35580 Wetzlar - Tel.: 06441/2129-10
Email: UBeG@UBeG.de - www: UBeG.de - Fax: 06441/2129-11

weis auf die Gefahr einer Belagsbildung. **Abbildung 5** zeigt die Calciummengen in der Reinigungslösung; ein Anstieg bei steigender Temperatur ist nicht zu erkennen, das System befindet sich also noch deutlich unterhalb der kritischen Temperatur. Die Calciummengen sind als sehr gering einzustufen und können im Vergleich zu Messungen an anderen Standorten als vernachlässigbar angesehen werden.

Hydrogeologisch-geothermische Simulationen

Zur Berechnung der Brunnenabstände bei der ersten Anlage (BT F) war, wegen des relativ kleinen Gebietes bei einfacher Hydrogeologie (Terrassenschotter), 2003 das Programm CONFLOW der Universität Lund, Schweden, herangezogen worden (Probert et al., 1994, [2]). Dieses Programm simuliert lediglich die Bewegung der thermischen Front in einer Steady-State-Betrachtung, jeweils für eine Heiz- bzw. Kühlperiode, die dann für mehrere Jahre wiederholt werden können. Die Berechnungen erfolgten zuerst mit entsprechend der Geologie geschätzten und dann, nach Erstellung der Brunnen, noch einmal mit aus Pumpversuchen erhaltenen Werten. Sie dienen auch der Abgrenzung des unterirdischen thermischen Einflussbereichs, welcher für die bergrechtliche Bewilligung bekannt sein musste. Die für die Funktionalität der geplanten Energiezentrale für den Gesamtkomplex „Bonner Bogen“ benötigte größere Grundwassermenge kann aufgrund des hohen Energiebedarfes der Neubauten nur über mehrere Förder- und Reinfiltrationsbrunnen realisiert werden. Daher wurde zwischen Juni 2006 und Februar 2007 ein dreidimensionales Grundwasserströmungs- und Wärmetransportmodell zur Einschätzung der Größe der geothermischen Anlage entwickelt und der Anlagenbetrieb mithilfe des auf der Finite-Elemente-Methode (FEM) basierenden Programms „Spring“ numerisch simuliert. Die dem Modell zugrundeliegenden Formationsparameter stützen sich auf Literaturquellen (vgl. **Abb. 4**), auf die bereits durchgeführten hydrogeologischen Geländearbeiten und auf Kenntnisse vom Bau der bereits bestehenden Anlage BT F. In der Berechnung wurden sowohl die konduktiven als auch die konvektiven Wärmetransportprozesse im Untergrund berücksichtigt.

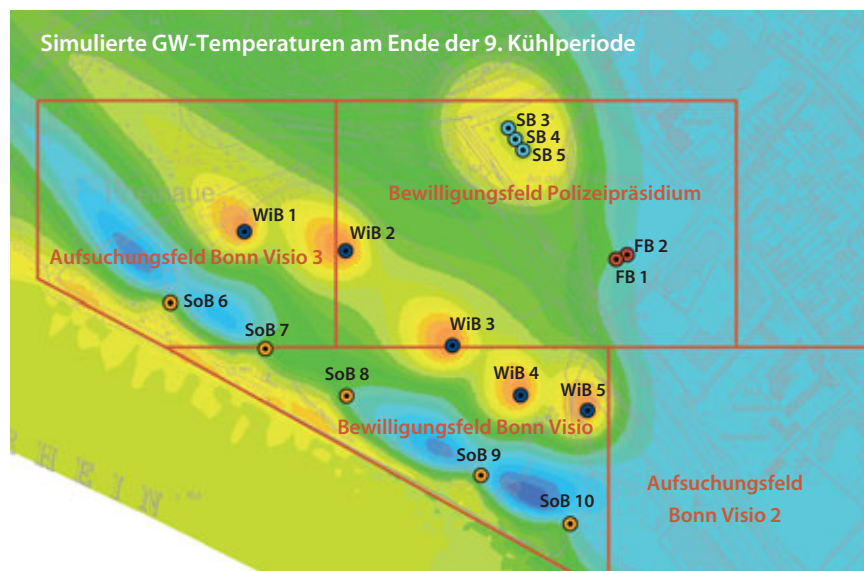
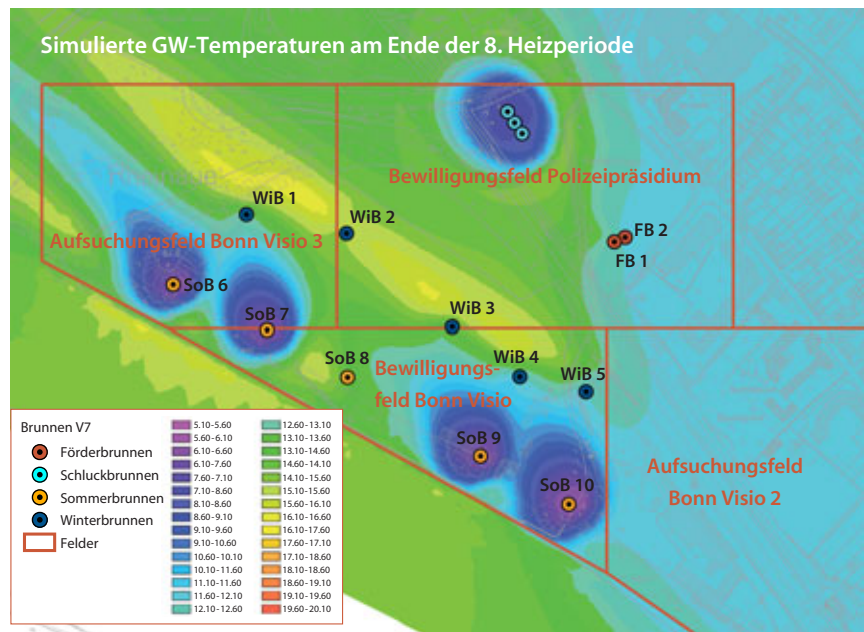


Abb. 6 Temperaturentwicklung im Untergrund am Ende der achten Heizperiode (oben) und der neunten Kühlperiode (unten), zehnter Simulationslauf

Bauteil	Name, Beschreibung	Nutzfläche	Zustand
A-B	Büro Campus Rheinwerk 3	20.247 m ²	geplant
C	Büro Campus Rheinwerk 2	14.600 m ²	fertiggestellt
D	Fünf-Sterne-Hotel „Kameha Grand“ mit 254 Zimmern/Suiten	17.800 m ²	Einweihung November 2009
E	Büroneubau Rheinwerk & Rohmühle	13.100 m ² keine Geothermie	fertiggestellt
F	Büroneubau & Direktorenvilla	7.400 m ²	fertiggestellt

Tabelle 1 Bauwerke und Nutzfläche (nach Angaben von BonnVisio)

Nach Einrichtung des Modellnetzes mit einer entsprechenden Verfeinerung im engeren Untersuchungsgebiet wurde das Modell zunächst auf einen mittleren Rheingegell (Median) von rd.

46,5 m NN kalibriert. Die k_f -Werte wurden wie folgt angesetzt:

- Quartäre Deckschichten nördlich des Niederterrassenrandes 5×10^{-6} m/s
- Rhein-Niederterrasse 1×10^{-2} m/s

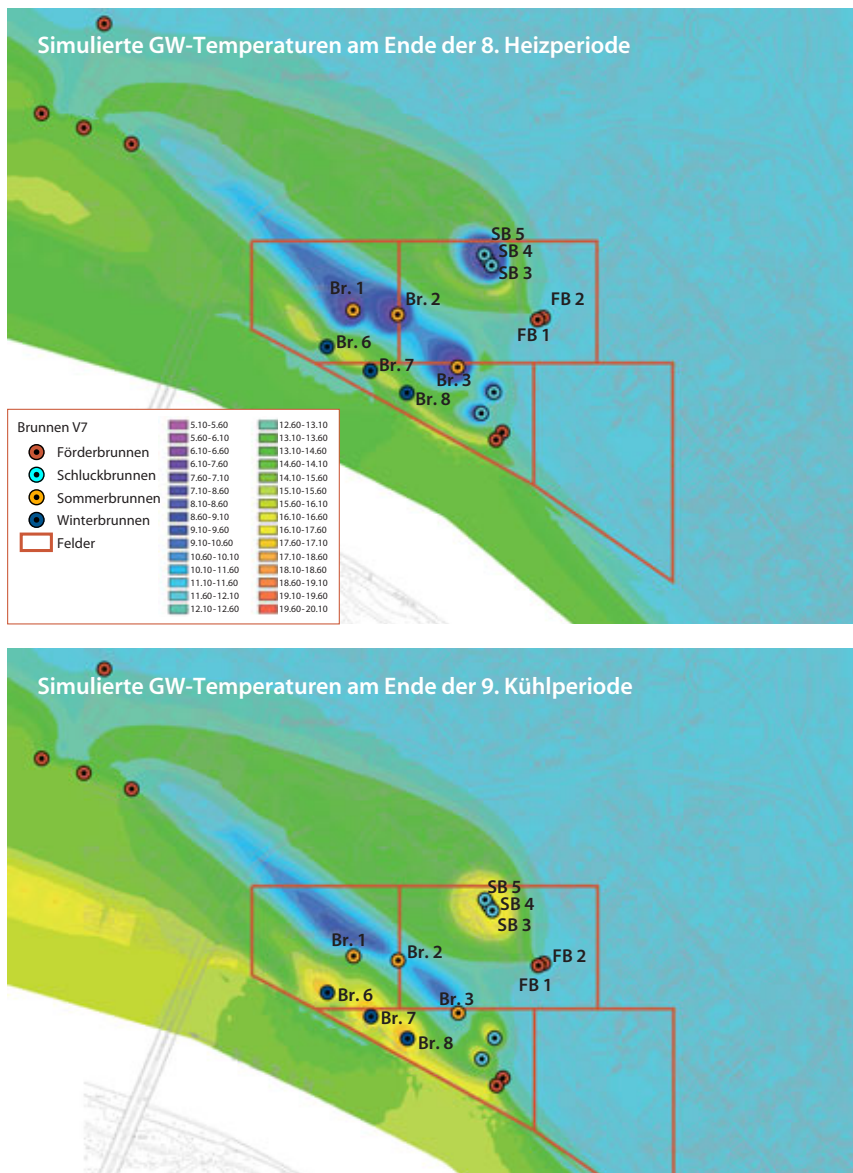


Abb. 7 Temperaturentwicklung im Untergrund am Ende der achten Heizperiode (oben) und der neunten Kühlperiode (unten), vierzehnter Simulationslauf

Wärmepumpe	919 KW Wärmeleistung 625 KW Kälteleistung
2 Gas-Brennwertkessel für Spitzenlast	1,0 MW und 1,9 MW
Schluck- und Saugbrunnen	derzeit insgesamt 6 Brunnen, Betrieb als 3 Brunnenpaare, Pendelbetrieb zwischen Sommer- und Winternutzung
Brunnentiefe	bis zu ca. 28 m tief
Fördermengen	50-60 l/s bzw. 180-216 m ³ /h
Kühlfall (Sommerbetrieb)	Grundwasserentnahme aus dem „Sommerbrunnen“ mit 6-10 °C
Heizfall (Winterbetrieb)	Temperaturanpassung über Wärmetauscher auf 16-19 °C Grundwasserentnahme aus dem „Winterbrunnen“ mit 14-18 °C Temperaturanpassung über Wärmepumpe auf ca. 35 °C

Tabelle 2 Energiezentrale und Betriebsweise der Anlage BT A-D (nach Angaben von BonnVisio)

- Trachyt-Tuff/Basalt 3×10^{-6} m/s

Die Devon-Oberfläche bildet die Basisfläche des Grundwassermodells. Als Grundlage für die Bemessung der jahreszeitlichen Änderung der Rheinwassertemperatur wurden die Temperaturganglinien der Pegel in Köln und Koblenz für das Jahr 1996 herangezogen.

Die Fortentwicklung der Planung der Gebäude während der Zeit der Modellerstellung brachte mit sich, dass sich die erwarteten Heiz- und Kühllasten änderten. Damit änderten sich auch die durch die Geothermieanlage zu erbringenden Leistungen. Weiterhin war mit wechselnden maximal zulässigen Jahresfördermengen und mit unterschiedlichen Angaben zur Nutzung im Feld „Polizeipräsidium“ zu rechnen, sodass letztlich in der Untersuchungsperiode bis Februar 2007 insgesamt elf längere Simulationsläufe (meist mit zehn Jahren berechneter Betriebsdauer) durchgeführt wurden. In allen Läufen war eine Gesamtversorgung aller Bauteile des „Bonner Bogen“ mit Zuschaltung auch von BT F, der Bau von zwei Gruppen von je fünf Brunnen (mit teilweise Einbezug von Brunnen bei BT F) und die Berücksichtigung der Anlage für das Polizeipräsidium vorausgesetzt. **Abbildung 6** zeigt das Ergebnis der Simulationsvariante 10 für das Ende der achten Heiz- und der neunten Kühlperiode.

Nachdem klar war, dass die Variante mit einer Gesamtversorgung an den obertägigen Möglichkeiten zur Verbindung von BT F mit der neuen Anlage scheitern muss, wurden neue Simulationen notwendig. Diese mussten nun folgende Anlagenteile berücksichtigen:

- die bestehende Anlage BT F mit 2 + 2 Brunnen,
- die bestehende Anlage Polizeipräsidium mit 2 + 3 Brunnen,
- eine weitere bestehende Anlage zur reinen Kühlung mit Grundwasser nordwestlich der Autobahn mit vier Brunnen,
- die geplante Anlage BT A-D mit 3 + 3 Brunnen.

Das Ergebnis des nunmehr 14. Simulationslaufes mit vergrößertem Modell-



△ **Abb. 8** Bohrarbeiten am Brunnen 1, September 2008

▷ **Abb. 9** Brunnen 8 (Deckel vorne links) mit dem fast fertiggestellten 5-Sterne-Hotel Kameha Grand im Hintergrund; Zustand Oktober 2009.



gebiet ist in **Abbildung 7** dargestellt. Diese (vorerst?) letzte Simulation wurde im Herbst 2008 nach dem Bau der Brunnen und mit den Ergebnissen der entsprechenden Pumpversuche durchgeführt und kann damit den sicheren Betrieb bestätigen.

Bau der Brunnen

Die Simulationen hatten grundsätzlich gezeigt, dass eine geothermische Grundwassernutzung auch für die neuen Bauabschnitte (BT A-D) umweltgerecht und technisch sicher möglich ist. Anschließend wurden die Brunnenstandorte und die Anlagenbetriebsweise mithilfe der Simulationen weiter optimiert. Nach Vorlage der genehmigungsrechtlichen Voraussetzungen konnte im Sommer 2008 mit dem Bau der insgesamt sechs neuen Brunnen mit großem Durchmesser begonnen werden. Die Brunnen sind 22-28 Meter tief, haben einen Bohrdurchmesser von 1.200 mm und einen lichten Innendurchmesser von 800 mm. Sie sind mit je einem Steig- und Fallrohr und mit einer Unterwasser-Motorpumpe ausgerüstet, um sowohl als Förder- wie auch als Schluckbrunnen dienen zu können. Der verkieste Ringraum zwischen der Bohrlochwand und dem Brunnenausbaumaterial wurde mit einer 2"-Peilfiltergarnitur ausgestattet.

Für die Herstellung der Brunnen kamen Greifer und Rohrdrehgeräte zum Einsatz (**Abb. 8**). Die Bauart und Her-

stellung der Brunnen ist für geothermische Grundwassernutzung eher ungewöhnlich, bei der relativ geringen Tiefe und der hohen Durchlässigkeit des Terrassenschotter-Aquifers jedoch sehr zweckmäßig und kostengünstig.

Fazit

Mit der geothermischen Grundwassernutzung für das Areal „Bonner Bogen“ wurde, unter hydrogeologisch recht günstigen Randbedingungen, eine außerordentlich wirtschaftliche Heizung und Kühlung realisiert, die zudem noch eine beachtliche Reduktion an CO₂-Emissionen ermöglicht. Planung und Bau der Anlage setzten jedoch ein umfangreiches geologisches, hydrogeologisches und hydrochemisches Untersuchungsprogramm sowie entsprechende numerische Simulationen voraus, damit die optimale Anlagenkonfiguration gefunden und ein nach-

haltiger Betrieb auch in Zusammenarbeit mit benachbarten Anlagen nachgewiesen werden konnte.

Literatur

- [1] Knoche, G. (2005): Untersuchungen zur Kalkabscheidung aus Grundwasser von Aquiferwärmespeichern mit einem mobilen Testgerät. Dissertation Univ. Stuttgart
[2] Probert, T., Claesson, J., Hellström, G. (1994): Thermohydraulic modelling of aquifer storage systems. - Proc. 6th Conf. Thermal Energy Storage CALORSTOCK '94, S. 57-64, HUT, Helsinki
[3] Sanner, B. (ed.) (1999): High Temperature Underground Thermal Energy Storage, State-of-the-art and Prospects. - Giessener Geologische Schriften 67, 158 S., Gießen

Abbildungen: Abb. 1, 3: BonnVisio – Bonner Bogen
Abb. 2: UBeG auf Basis BonnVisio – Bonner Bogen
Abb. 4 - 7: BGU
Abb. 5: UBeG, nach Daten ISWA, Univ. Stuttgart
Abb. 8, 9: UBeG

Autoren:

Dr. Erich Mands
Dr. Burkhard Sanner
Dipl.-Geol. Marc Sauer
Dipl.-Geol. Edgar Grundmann
UBeG Dr. E. Mands & M. Sauer GbR
Reinbergstr. 2
35580 Wetzlar
Tel.: 06441 212-910
Fax: 06441 212-911

E-Mail: UBeG@UBeG.de
Internet: www.ubeg.de

Dr. Dirk Brehm
BGU Büro für Geohydrologie
und Umweltinformationssysteme
Dr. Brehm & Grünz GbR
Technologiezentrum Bielefeld – A209-A211
Meisenstr. 96
33607 Bielefeld
Tel.: 0521 2997-250
Fax: 0521 2997-253

E-Mail: info@bgu-geoservice.de
Internet: www.bgu-geoservice.de

