



Originally published as:

Kranz, S., Bartels, J., Gehrke, D., Hoffmann, F., Wolfgramm, M. (2008): Wärme- und Kältespeicherung in Aquiferen. - bbr - Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau, 59, 7/8, 34-43.

Wärme- und Kältespeicherung in Aquiferen

Die Versorgung der Parlamentsbauten im Berliner Spreebogen mit Strom, Wärme und Kälte erfolgt mit einem in seiner Art einzigartigen Energieverbund. In ihm werden Wärme und Kälte aus der Kraft-Wärme-Kopplung und aus der Umwelt auch zu Zeiten bereitgehalten, in denen diese Energiequellen nicht auf direktem Wege zur Verfügung stehen. Dazu wurden saisonale Wärme- und Kältespeicher in Grundwasserleitern (Aquiferspeicher) unmittelbar am Reichstagsgebäude errichtet und seit mehreren Jahren erfolgreich betrieben.

Einleitung

Aquiferspeicher werden aufgrund ihrer potentiell großen Speicherkapazität und der relativ trägen Betriebsweise vorwiegend als saisonale Energiespeicher verwendet. Der Nutzen eines saisonalen Energiespeichers besteht darin, die zeitliche Diskrepanz von Energienachfrage und Energieangebot auszugleichen und somit eine Einsparung an Primärenergie und Treibhausgasemissionen zu ermöglichen. Zusätzlich besteht die Möglichkeit Leistungsspitzen in der Energiebereitstellung zu verringern. Typische Einsatzmöglichkeiten sind die Speicherung von thermischer Energie aus der gekoppelten Erzeugung von Wärme und Elektrizität bei einer Fahrweise die vorrangig den Bedarf an elektrischer Energie bedient, die Speicherung von thermischer Solarenergie sowie von Abwärme aus industriellen Prozessen. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, die saisonal schwankenden Umgebungstemperaturen für die Bereitstellung von Wärme und Kälte zu nutzen.

Das Versorgungssystem der Berliner Parlamentsbauten enthält Komponenten zur Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung sowie zwei Aquiferspeicher, einen Kältespeicher und einen Wärmespeicher (Abb. 1, Abb. 2). Der Kältespeicher besteht aus zwei Brunnengruppen von je 5 etwa 60 m tiefen Brunnen und ermöglicht die Nutzung der niedrigen Umgebungstemperaturen der kalten Jahreszeit zur Gebäudekühlung in den Sommermonaten. Der Wärmespeicher besteht aus zwei 320 m tiefen Bohrungen und führt zu einer Vergrößerung des Anteils der Kraft-Wärme-Kopplung an der Gesamtenergiebereitstellung. Zusätzlich besteht die Möglichkeit den Wärmespeicher sowie den Kältespeicher als Wärmequelle für die installierten Absorptionswärmepumpen zu nutzen. 1999 gingen die beiden Aquiferspeicher am Berliner Spreebogen erstmals in Betrieb. Der Aquiferwärmespeicher wurde bis zum Herbst 2002 ausschließlich beladen und erfuhr im Winter 2002/2003 die erste Ausspeicherung. Der Kältespeicher wurde bis 2002 ausschließlich im Kühlbetrieb mit der natürlichen Grundwassertemperatur von 11 °C gefahren und erfuhr im Winter 2002/2003 die erste Auskühlung durch Einlagerung von Umgebungskälte. Bisher konnten beide Speicher vier vollständige Speicherzyklen (Be- und Entladen) erfolgreich durchlaufen.

Da vom Speicher- und Anlagenbetrieb der zurückliegenden Jahre von der Bundestagsverwaltung als Betreiber umfangreiche Messdaten und Betriebsinformationen verfügbar gemacht worden sind, ist eine energetische Analyse und Bewertung des gesamten Energiesystems einschließlich der Kälte- und Wärmespeicher möglich.



Abb. 1: Bohrarbeiten an der Wärme-speicherbohrung „Am Reichstag 1/96“ (Quelle: Geothermie Neubrandenburg GmbH)

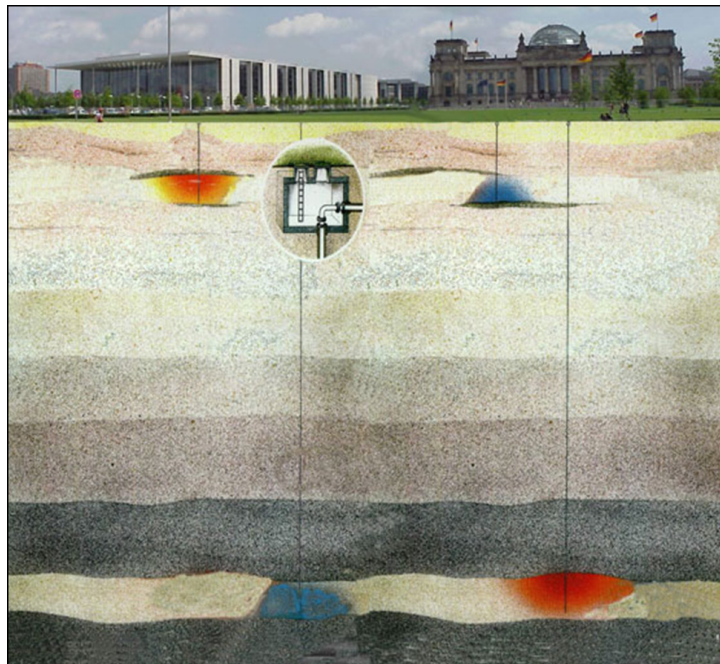


Abb. 2: Prinzip und Anordnung der Aquiferwärme- und -kältespeicher im Untergrund des Berliner Spreebogens (Quelle: Geothermie Neubrandenburg GmbH)

Mit Hilfe von Simulationsrechnungen werden die Einflüsse von bestimmten Betriebsparametern, wie z.B. der Einspeichertemperatur, auf den Speicherbetrieb unter energetischen Gesichtspunkten untersucht. Der Schwerpunkt liegt bei der Untersuchung der Wechselwirkungen des obertägigen Versorgungssystems mit den Speichern im Untergrund. Die vorgestellten Arbeiten erfolgen im Rahmen des Forschungsprojekts „Thermische Untergrundspeicher in Energiesystemen: Optimierung der Einbindung der Aquiferspeicher in die Wärme- und Kälteversorgung der Parlamentsbauten im Berliner Spreebogen“. Das Projekt wird vom Helmholtz-Zentrum Potsdam - Deutsches GeoForschungsZentrum (GFZ) im Verbund mit dem Institut für Energietechnik der Technischen Universität Berlin und in Zusammenarbeit mit der Bundestagsverwaltung, der Geothermie Neubrandenburg GmbH und dem Institut für Umweltchemie der Universität Lüneburg durchgeführt.

Anlagenbeschreibung

In das Energieversorgungssystem sind vier Gebäudekomplexe integriert: das Reichstagsgebäude, das Jakob-Kaiser-Haus, das Paul-Löbe-Haus und das Marie-Elisabeth-Lüders-Haus. In Abb. 3 sind der Aufbau und die wichtigsten Energieflüsse vereinfacht aufgezeigt.

Die wesentlichen obertage installierten Bestandteile des Versorgungssystems sind 2 Blockheizkraftwerke (BHKW) mit einer elektrischen Gesamtleistung von 3,2 MW_{el}, drei Absorptionskältemaschinen die auch als Wärmepumpe betrieben werden können, sechs Kompressionskältemaschinen, vier Heizkessel und ein Dampferzeuger.

Die thermische Energie für die Beheizung der Gebäude sowie die Warmwasserversorgung wird auf zwei Temperaturniveaus bereitgestellt, Hochtemperaturwärme (HT-Wärme) mit einem Temperaturniveau von 110/65 °C sowie Niedertemperaturwärme (NT-Wärme) mit einem Temperaturniveau von 45/30 °C.

Ein Hochtemperaturverbund ermöglicht je nach Bedarfs- bzw. Überschusssituation den Austausch von 110/65 °C Wärme zwischen den einzelnen Gebäuden. Kälte wird ebenfalls auf zwei Temperaturniveaus bereitgestellt (HT-Kälte: 14 °C / 19 °C bzw. 16 °C / 19 °C und NT-Kälte: 6 °C/12 °C).

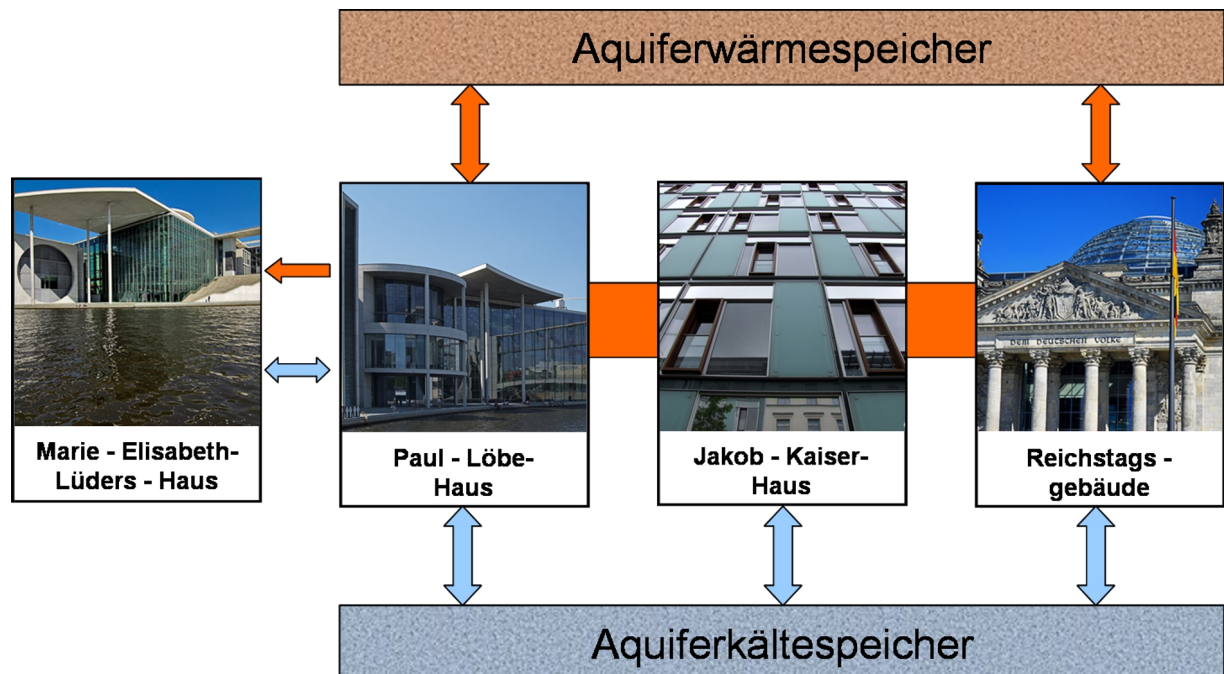


Abb. 3: Schematische Abbildung des Energieversorgungssystems der Berliner Parlamentsbauten mit den übergeordneten Energieflüssen (rot Wärme, blau Kälte)

Die BHKW werden stromgeführt betrieben, wodurch zum Ausgleich von sommerlichen Wärmeüberschüssen und winterlichen Wärmedefiziten Bedarf für einen saisonalen Wärmespeicher besteht.

Der Wärmespeicher ist durch eine Dublette erschlossen und befindet sich in einer Tiefe von ca. 300 m. Die maximale Zirkulationsrate beträgt 100 m³/h. Die Beladung (Sommerbetrieb) erfolgt mit maximal 70 °C. Hierzu wird dem Aquifer über die „kalte“ Bohrung Grundwasser entnommen, obertage mittels Wärmeübertrager erwärmt und über die „warme“ Bohrung, der eigentlichen Speicherbohrung, dem Aquifer wieder zugeführt (Abb. 4). In den letzten drei Einspeicherphasen wurde die Einspeichertemperatur betriebsbedingt auf 55 - 60 °C gesenkt. Im Winterbetrieb (Abb. 5) wird die Fließrichtung umgekehrt und dem Aquifer über die „warme Bohrung“ das in den Sommermonaten erwärmte Grundwasser wieder entnommen. Obertage wird die im Grundwasser enthaltene thermische Energie in das Heiznetz eingekoppelt. Bei Bedarf kann eine weitere Auskühlung mit Wärmepumpen erfolgen.

Für den Kältespeicher ist ein Aquifer in einer Tiefe von ca. 50 m durch zwei Brunnenfelder mit jeweils 5 Brunnen auf der warmen und der kalten Seite erschlossen worden. Die installierten Brunnen ermöglichen eine Zirkulationsrate von bis zu 300 m³/h. Das Funktionsprinzip entspricht dem des Wärmespeichers. Die kalte Seite des Speichers wird im Winter auf ca. 5 °C abgekühlt (Regenerierung) in dem die Wärme in direkter Luftkühlung (Trockenkühler) an die Umgebung abgeführt wird. Der Kältespeicher kann außerdem im Winter als Wärmequelle für die Absorptionswärmepumpen dienen. Im Sommer versorgt der Kältespeicher vorrangig die HT-Kältenetze, wobei das Grundwasser auf ca. 18°C in Ausnahmefällen bis max. 28°C erwärmt wird. Je nach erreichter Temperatur am Ende der Regenerationsphase ist zu Beginn es Sommers eine zeitweilige Versorgung der NT-

Kältenetze möglich, was zu einem verringerten Einsatz der Kältemaschinen führt (Kabus et. al., 2000; Lützke).

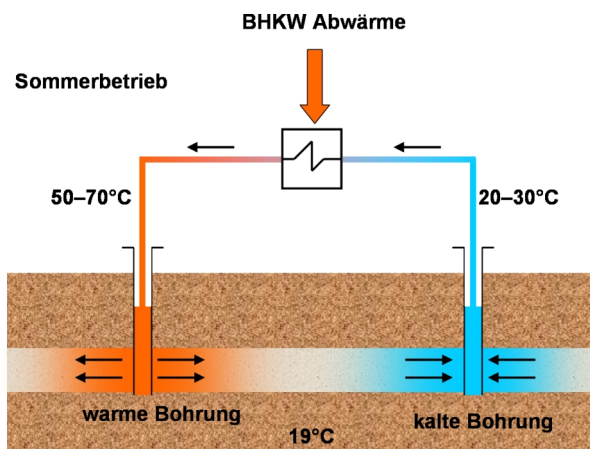


Abb. 4: Vereinfachte Darstellung der Funktionsweise des Aquiferwärmespeichers: Einspeicherbetrieb

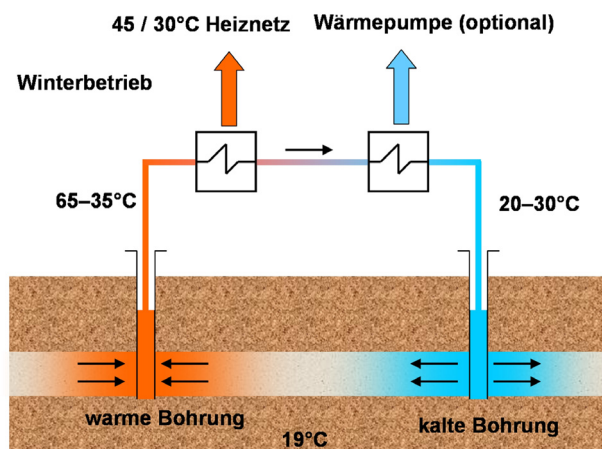


Abb. 5: Vereinfachte Darstellung der Funktionsweise des Aquiferwärmespeichers: Ausspeicherbetrieb

Errichtung der Speicherbrunnen

Für die Planung und den Bau von Aquiferspeichern sind, neben der Energieüberschuss- und Energiebedarfssituation, die hydrogeologischen Bedingungen am Standort entscheidend. Auf folgende Faktoren ist dabei besonders zu achten:

- ausreichende hydraulische Leitfähigkeit des Grundwasserleiters, die, projektabhängig, die Förderung und die Injektion von Wasser in einer Größenordnung von 10 bis 100 m³/h über jeweils einen Brunnen ermöglicht
- geringdurchlässige Abdeckung des Aquifers, zumindest im Bereich der Wärmeblase zur Vermeidung des konvektiven Aufstiegs des heißen Wassers
- homogene Aquiferstruktur
- geringe Grundwasserfließgeschwindigkeit, Kenntnis der Strömungsparameter
- Ausschluss wasser- und gesteinschemischer Prozesse, die bei der geplanten Nutzung eine Beeinträchtigung der Fließeigenschaften bewirken können
- Vermeidung möglicher Konflikte mit einer wasserwirtschaftlichen Nutzung

Weiterhin gilt für die Standortauswahl dass die Entfernung der beiden Bohrungen bzw. Bohrungsfelder so gewählt werden muss, dass keine thermische Beeinflussung des kalten und warmen Aquiferbereichs stattfindet. Das kann in der Planungsphase durch Errichtung von Testbrunnen zur Parameterbestimmung und numerische Simulation der Wärmeausbreitung im Untergrund während des zukünftigen Speicherbetriebes sichergestellt werden. Besonders wichtig ist die Bestimmung der Grundwasserfließgeschwindigkeit, da eine zu starke Abdrift des erwärmten oder abgekühlten Grundwasserkörpers eine saisonale Speicherung verhindern würde.

Der Wärmespeicher befindet sich in einem gespannten Aquifer aus Sandsteinen des Hettang und Untersinemur (Unterer Jura) in einer Tiefe von 285-315 m. Der dunkelgraue mittelsandige Feinsandstein hat Porositäten größer als 30%. Dieser Sandstein mit einem Quarzanteil von über 90% ist aufgrund seiner Bindemittel- und Zementarmut nur sehr schwach verfestigt.

Der Kältespeicher am Reichstag nutzt einen quartären Grundwasserleiter, der zum Liegenden mit dem obersten miozänen Grundwasserleiter verbunden ist. Bei dem Aquifer handelt es sich um einen feinsandigen Mittelsand mit geringen tonig-schluffigen Anteilen, welche für Ablagerungen eines „Urstromtals“ typisch sind. Bedeckt werden die Speichersande durch einen Geschiebemergel, der im Nordfeld durchgehend ausgebildet ist.

Die Erschließung des unterirdischen Wärmespeichers erfolgte durch das Abteufen der beiden Bohrungen „Am Reichstag 1/96“ und „Am Reichstag 2/98“ bis 320 m unter Gelände und die Komplettierung als Wärmespeicherbohrungen in den Sandsteinen der Formation Untersinemur/Hettang (Bohrungsabstand ca. 300 m). Die Bohr- und Komplettierungsarbeiten wurden von Geothermie Neubrandenburg GmbH (GTN) geplant und 1996 und 1998 von der E+M Bohr GmbH Hof ausgeführt.

Beide Bohrungen wurden für einen wechselseitigen Speicherbetrieb (Ein- und Ausspeichern) konzipiert, so dass in jeder Bohrung sowohl gefördert als auch injiziert werden kann. Dazu wurde eine spezielle Parallelinstallation von Pumpen- und Injektionsstrang in jede Bohrung eingebaut (Abb. 6, Abb. 7). Die Dimensionierung erfolgte für Förder- und Injektionsraten von 100 m³/h. Der Speicherausbau wurde durch eine Filterkomplettierung mit Gravel-Pack, die optimal auf den Sandsteinspeicher abgestimmt wurde, realisiert.



Abb. 6: Parallelinstallation von Pumpen- und Injektionsstrang in einer Wärmespeicherbohrung am Reichstagsgebäude (Quelle: Geothermie Neubrandenburg GmbH)



Abb. 7: Einzug der parallelen Pumpen- und Injektionsstränge (Quelle: Geothermie Neubrandenburg GmbH)

Beide Wärmespeicherbohrungen haben folgenden Aufbau:

- Verrohrung 16“ (vollständig zementiert)
- Wickeldrahtfilter 6 5/8“ (Schlitzweite 0,5 mm)
- Gravel-Pack (Körnung 0,7 – 1,2 mm)
- Pumpen- und Injektionsstrang 5 1/2“
- Tiefpumpe KC 15000 (Fabrikat Centrilift)

Da der unterirdische Wärmespeicher im Salzwasserbereich des Präupels liegt, orientierten sich die Komplettierungs- und Testarbeiten an den Anforderungen tiefer Geothermiebohrungen Nordostdeutschlands. Nach dem Speicheraufschluss erfolgte ein Reinigungslift und nach der Filterkomplettierung ein Leistungstest zum Nachweis der Leistungsparameter beider Wärmespeicherbohrungen.

Auf Grund der hohen Korrosivität des mineralisierten Schichtwassers, das als Wärmeträgermedium dient, wurde ein kompletter Korrosionsschutz in die Bohrungen integriert:

- Innenbeschichtung der 16“-Verrohrung (Vetco TK 216)
- Wickeldrahtfilter aus Edelstahl (1.4404 bzw. AISI 316L)
- Pumpen- und Injektionsstrang aus GFK (glasfaserverstärktem Kunststoff)
- Tiefpumpe mit Monelbeschichtung
- Brunnenkopf aus Edelstahl (1.4571)
- Inertierungsanlage für den Betrieb (Stickstoffbeaufschlagung des Ringraumes oberhalb des dynamischen Wasserspiegels)

Die Erschließung des unterirdischen Kältespeichers im Grundwasserbereich ca. 60 m unter Gelände erfolgte durch das Errichten von 10 Speicherbohrungen, die in 2 Bohrfeldern im Abstand von ca. 300 m im Regierungsviertel angeordnet sind. Das Bohrfeld Süd befindet sich direkt an der Westseite des Reichstages und bildet mit 5 Bohrungen die „kalte Seite“ des Kältespeichers, während 5 weitere Bohrungen im Bohrfeld Nord im Spreebogenpark die „warme Seite“ bilden. In diesem Bereich wurde im Untergrund eine Geschiebemergelscholle lokalisiert, welche die Abdeckung der warmen Speicherseite gewährleistet.



Abb. 8: Bohrarbeiten zum Kältespeicher im Bohrfeld Nord im Berliner Spreebogen (Quelle: Geothermie Neubrandenburg GmbH)

Der Aufbau der Kältespeicherbohrungen gleicht konzeptionell denen des Wärmespeichers. Da auch hier Förderung und Injektion in jeder Bohrung möglich sein müssen, wurden

ebenfalls Parallelinstallationen von Pumpen- und Injektionsstrang eingebaut. Die Dimensionierung erfolgte für 60 m³/h pro Bohrung, so dass insgesamt 300 m³/h für die Kältespeicherung zur Verfügung stehen.

Die Kältespeicherbohrungen haben folgenden Aufbau:

- Ausbauverrohrung DN 400
- Ringraumabdichtung mit Tonmehl-Zement-Suspension (Troptogel)
- Wickeldrahtfilter DN 400 (Schlitzweite 0,5 mm)
- Verkiesen (1 - 2 mm)
- Pumpen- und Injektionsstrang DN 100
- Brunnenkopf DN 600
- Link-Seal-Dichtung zwischen Verrohrung und Brunnenkopf
- Unterwassermotorpumpe SP 60-7 (Fabrikat Grundfos)

Folgende Korrosionsschutzmaßnahmen kamen für die Kältespeicherbohrungen im Süßwasserbereich zur Anwendung:

- PVC-hart (Verrohrung)
- Wickeldrahtfilter aus Edelstahl (1.4301)
- Pumpen- und Injektionsstrang aus Stahl hagulitbeschichtet
- Unterwassermotorpumpe aus Edelstahl (1.4301)
- Brunnenkopf aus Edelstahl (1.4301)
- Inertierungsanlage für den Betrieb (Stickstoffbeaufschlagung des Ringraumes oberhalb des dynamischen Wasserspiegels)

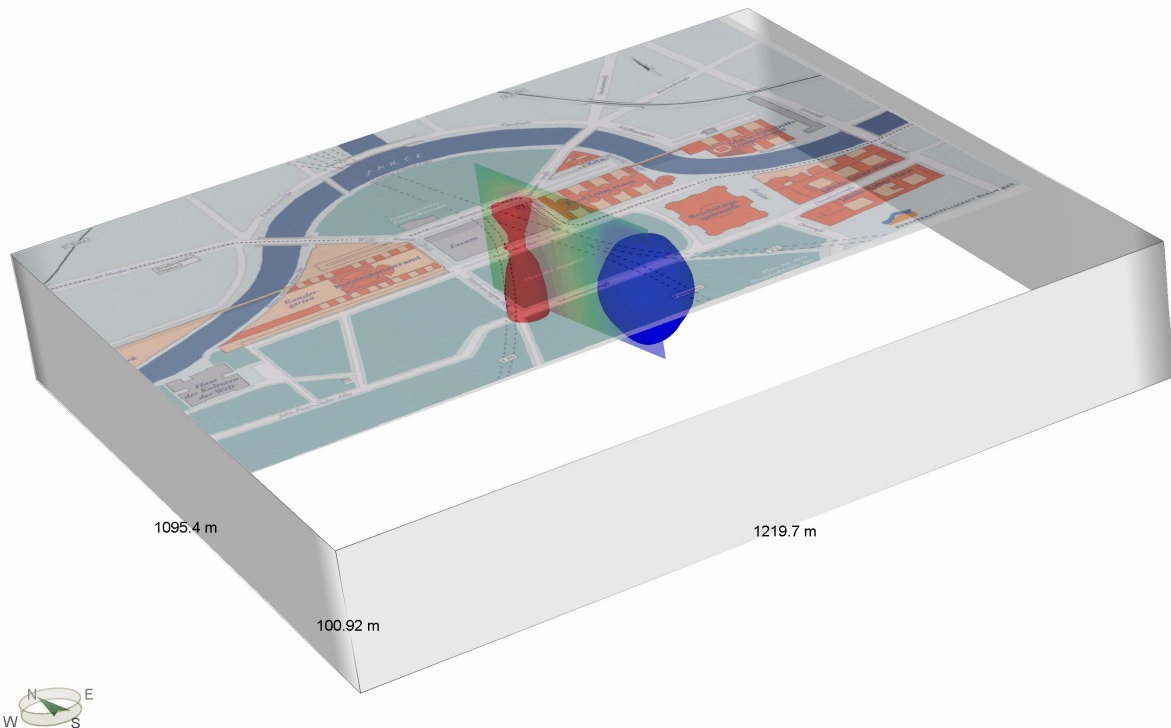
Alle Bohrungen des Wärme- und Kältespeichers wurden in Bohrkellern Unterflur angeordnet (Kellersohle 3,0 m unter Gelände), wobei die Einstiegs- und Montageöffnungen jeweils in die Oberflächengestaltung des Platzes der Republik bzw. des Spreebogenparks integriert wurden.

Umweltauswirkungen und Genehmigung

Hinsichtlich der Genehmigung von Aquiferspeicherung findet in Tiefen bis 100 m das Wasserhaushaltsgesetz (WHG) einschließlich seiner Verordnungen und entsprechende wasserrechtliche Bestimmungen der Länder Anwendung. Die Regelungen des Bundesberggesetzes (BBergG) sind nur bei Bohrungen mit Teufen größer als 100 m anzuwenden.

Der Wärmespeicherbetrieb beeinflusst den Untergrund im Umfeld der Speicherbohrungen hydraulisch und thermisch. Durch die in der Natur der Technologie liegende ausgeglichene Bilanz der geförderten und reinjizierten jährlichen Grundwassermenge sind die hydraulischen Auswirkungen der Brunnendubletten begrenzt. Ist darüber hinaus die jährliche Bilanz der ein- und ausgespeicherten Wärmemengen ausgeglichen, so bleiben auch die thermischen Auswirkungen lokal. Dieser Ausgleich und der Nachweis der zu erwartenden Auswirkungen ist zumeist Voraussetzung für die Genehmigungsfähigkeit im wasserrechtlichen Verfahren. Darüber hinaus kann ein Monitoring des Speicherbetriebs, das Spiegel- und Temperaturmessungen in geeigneten Pegelbohrungen beinhaltet zur Auflage gemacht werden. Der Nachweis der Größe des saisonal schwankenden beeinflussten Bereiches kann über die numerische Simulation von Grundwasserhydraulik und Wärmetransport im Untergrund erfolgen. Numerische Modelle für geeignete Simulatoren konnten erfolgreich an den Ausspeichertemperaturen und Pegelmessungen verschiedenartiger saisonaler Aquiferspeicher verifiziert werden. Damit ist auch die Prognosefähigkeit solcher Modelle z.B. für die Bewertung von Änderungen im obertägigen Betrieb gezeigt.

Ein Beispiel ist die in Abb. 9 dargestellte simulierte Ausdehnung der erwärmten und abgekühlten Zonen im Untergrund um die Speicherbohrungen des Kältespeichers am Reichstag. Dargestellt ist die Situation am Ende der Kälteeinspeicherung mit maximaler Ausdehnung der abgekühlten Zone.



FEFLOW (R)

Abb. 9: Ausdehnung der über 14 °C erwärmten (rot) und unter 8 °C abgekühlten Zone (blau) im Untergrund des Kältespeichers der Berliner Parlamentsbauten im Spreebogen am Ende der Kälteeinspeicherung im März 2006; Simulationsresultat des numerischen Modells (Quelle: Geothermie Neubrandenburg GmbH)

Energetische Betrachtung des Wärmespeicherbetriebs

Wie groß der Nutzen eines saisonalen Aquiferspeichers ist, hängt von mehreren Faktoren ab. Neben den geologischen Eigenschaften (z.B. Aquifermächtigkeit, Porenraumbeschaffenheit, Wärmeleitfähigkeit) und der Betriebssicherheit beeinflusst die Art und Weise des Betriebs stark den Nutzen. So bestimmen z.B. die unterschiedlichen Temperaturniveaus zwischen Energiespeicherung und Energienachfrage inwieweit eine direkte Nutzung möglich ist oder Hilfsenergie (z.B. der Einsatz einer Wärmepumpe) benötigt wird.

Von besonderer Bedeutung ist die jeweilige Energieüberschuss- bzw. Energienachfragesituation. Sie bestimmt, wie viel Energie zur Speicherung zur Verfügung steht bzw. dem Speicher entnommen werden kann. Dies ist insbesondere beim Einsatz von Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen bedeutend. Letztendlich bestimmen alle diese Faktoren den Wirkungsgrad bzw. Rückgewinnungsgrad, η , eines Aquiferspeichers, der definiert ist, als das Verhältnis von genutzter zu aufgewendeter Energiemenge.

Der Nutzen des Wärmespeichers besteht aus der ausgespeicherten thermischen Energie Q_{aus} und der Aufwand aus der eingespeicherten thermischen Energie Q_{ein} . In Abb. 10 sind für den Wärmespeicher die Ein- und Ausspeicherenergiemengen sowie die in der jeweiligen

Speicherperiode erzielten Rückgewinnungsgrade für die bisherigen vier vollständigen Speicherperioden dargestellt.

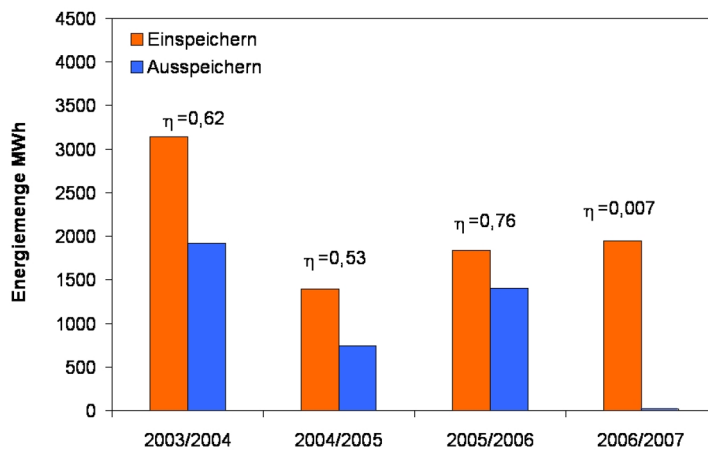


Abb. 10: Saisonale Energiebilanz und Rückgewinnungsgrade für den Wärmespeicherbetrieb seit 2003

Sowohl bei den Energiemengen als auch bei den Rückgewinnungsgraden zeigen sich Unterschiede zwischen den einzelnen Speicherperioden. In der Speicherperiode 2003/2004 wurden, im Vergleich zu den drei Folgeperioden, wesentlich höhere Energiemengen ein- und ausgespeichert. Die geringeren Energiemengen ab der Periode 2004/2005 sind auf eine verringerte Einspeichertemperatur, was auch eine Senkung der Ausspeichertemperatur bewirkte, zurückzuführen. Zusätzlich waren die während der Einspeicherung umgewälzten Volumina geringer. Die Absenkung der Einspeichertemperatur sowie der umgewälzten Volumina wurde vom Betreiber vorgenommen, um eine Anpassung an die, im Vergleich zur Planung, veränderte NT-Wärmebedarfs- bzw. HT-Wärmeüberschussituation zu erreichen. Generell wurde die Menge der ausgespeicherten Energie durch die Energiebedarfssituation der zu versorgenden Gebäude bestimmt und nicht durch das Speichervermögen des Speichers.

Bei der letzten Speicherperiode 2006/2007 fällt auf, dass zwar ca. 2000 MWh thermische Energie in den Sommermonaten eingespeichert wurden, aber nahezu keine Ausspeicherung erfolgte. Der Grund hierfür war eine geänderte Betriebsstrategie aufgrund von Umbau- bzw. Instandhaltungsmaßnahmen an der Obertage- bzw. Untertage-Technik.

Um das Verbesserungspotential für den Rückgewinnungsgrad des Wärmespeichers unabhängig von der speziellen Energiebedarfssituation der jeweiligen Saison aufdecken zu können und Einflussparameter auf den Rückgewinnungsgrad zu identifizieren, wurde eine modellbasierte Parametervariation bei in jedem Zyklus identischer Ein- und Ausspeicherwassermenge durchgeführt. Die untersuchten Parameter beschreiben die Betriebsweise des Speichers. Die Betriebsweise ist charakterisiert durch die Temperaturen und Volumenströme an der Schnittstelle zwischen Speicher und obertage installierter Anlagentechnik (Abb. 11).

Die untersuchten Parameter sind:

T_w - Injektionstemperatur an der warmen Bohrung während der Einspeicherung

T_k - Injektionstemperatur an der kalten Bohrung während der Ausspeicherung

V_{ein} , V_{aus} - umgewälzte Volumina während des Ein- und Ausspeicherns pro Speicherperiode, wobei für V_{ein} und V_{aus} gleiche Werte angenommen werden

Q_{ein} - eingespeicherte thermische Energie

Der Simulationszeitraum umfasst 10 Speicherperioden (10 Jahre), wobei der betrachtete Rückgewinnungsgrad den Durchschnittswert über den gesamten Simulationszeitraum darstellt. Das verwendete Speichermodell TRNAST (Hellström et. al. 1986, Schmidt, 2005) wurde zuvor mit Hilfe von Messwerten sowie Simulationsergebnissen eines detaillierten Speichermodells für den Simulator FEFLOW kalibriert und validiert (Köhler et. al., 2006).

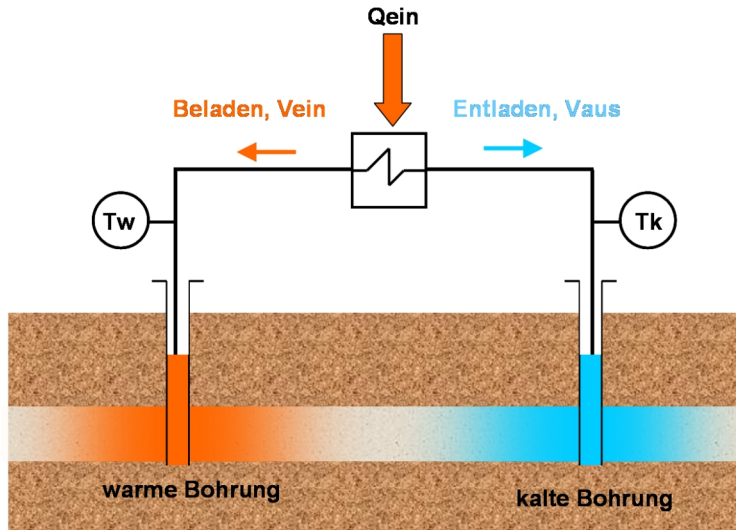


Abb. 11: Vereinfachte Darstellung des Speicherkreislaufs mit Schnittstellenparametern

In Abb. 12 sind die Ergebnisse für den Einfluss der Injektionstemperatur an der warmen Bohrung T_w in Abhängigkeit von der eingespeicherten Energiemenge Q_{ein} dargestellt. Demnach ist ein Ansteigen des Rückgewinnungsgrads mit steigender Temperatur an der warmen Bohrung sowie mit zunehmender eingespeicherter Energiemenge zu verzeichnen. Weiterhin ist zu erkennen, dass der temperaturbedingte Anstieg des Rückgewinnungsgrads mit zunehmender Injektionstemperatur an der warmen Bohrung abnimmt. Für den Betrieb des Wärmespeichers bedeutet dies, dass mit möglichst hoher Temperatur eingespeichert werden sollte. Es werden so Rückgewinnungsgrade bis etwa 0,7 erreicht. Die derzeitige Obergrenze für diese Temperatur liegt jedoch bei 70 °C und resultiert aus geochemischen Restriktionen.

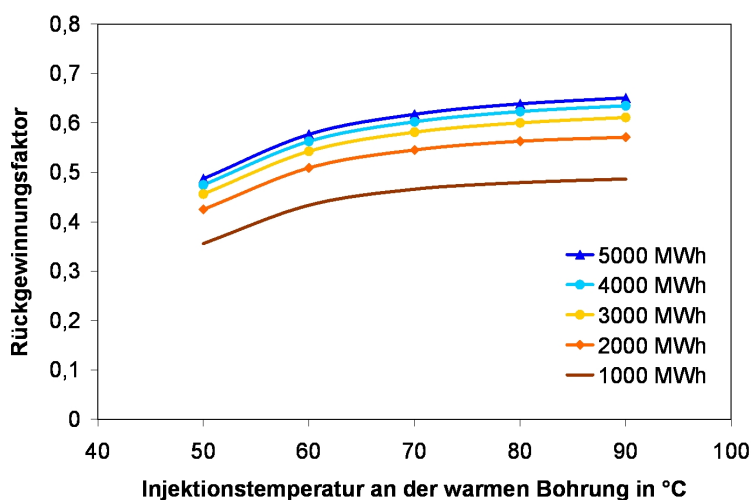


Abb. 12: Rückgewinnungsgrad (Durchschnittswert für 10 Betriebsjahre) in Abhängigkeit von der Injektionstemperatur an der warmen Bohrung für Einspeicherenergiemengen zwischen 1000 MWh und 5000 MWh; Die Injektionstemperatur an der kalten Bohrung beträgt wie beobachtet T_k : 35°C infolge der Auskühlung des Speicherfluids nach der Ausspeicherung

Energetische Betrachtung des Kältespeicherbetriebs

Beim Kältespeicher besteht der Nutzen aus der Bereitstellung von Kälte (Kälteentnahme). Die Kältenutzung geschieht durch das Einbringen von thermischer Energie (Abwärme aus den Gebäuden) in den zuvor ausgekühlten Speicher. Der Aufwand besteht in der Auskühlung (Kälteeintrag) des Speichers im Winter. Hierbei wird dem Speicher thermische Energie entnommen.

Der Kältespeicher konnte in der Speicherperiode 2005/2006 erstmals in dem Umfang, wie in der Planung vorgesehen, zur Kühlung der Gebäude genutzt werden. In den ersten beiden Betriebsjahren des Speichers (2000-2002) waren noch keine Rückkühlanlagen auf den Gebäuden installiert und der Speicher wurde ausschließlich erwärmt. Die notwendige Auskühlung des Speichers wurde dann in den beiden Folgeperioden (2003/2004 und 2004/2005) verstärkt durchgeführt, sodass dem Speicher dort wesentlich größere thermische Energiemengen entzogen als in den Belade(Nutz-)phasen eingetragen wurden. Dementsprechend wurden in diesen Speicherperioden verhältnismäßig geringe Rückgewinnungsgrade von 0,60 sowie 0,58 erreicht (Abb. 13).

Die Auswirkungen eines verhältnismäßig warmen Winters können an der Speicherperiode 2006/2007 beobachtet werden. In den Wintermonaten 2006/2007 konnte wegen der hohen Umgebungstemperaturen eine für den Kühlbedarf im Sommer nur unzureichende Auskühlung des Kältespeichers durchgeführt werden. So erfolgte im anschließenden Sommer bedarfsgesteuert ein wesentlich höher „Kälteaustrag“ als zuvor eingetragen werden konnte. Dies ist nur möglich, weil sich die natürliche Aquifertemperatur des Kältespeichers mit 11 °C unterhalb der Temperatur der HT-Kältenetze (14 °C / 19 °C bzw. 16 °C / 19 °C) befindet. Um wieder eine ausgeglichene Speicherbilanz zu erreichen, ist dann in den zukünftigen Speicherperioden eine intensivere Auskühlung des Speichers notwendig.

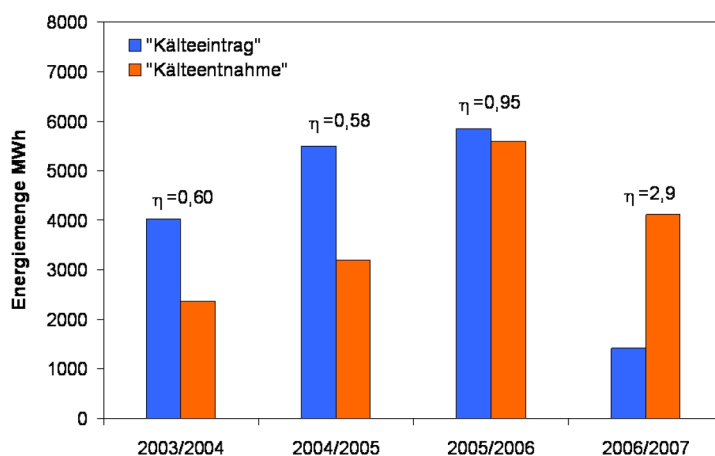


Abb. 13: Saisonale Energiebilanz und Rückgewinnungsgrade für den Kältespeicherbetrieb seit 2003

Geochemisches Monitoring des Speicherbetriebs

Die thermische Beeinflussung des Grundwassers bei einer Nutzung als Wärmeträgerfluid eines Aquiferspeichers kann potentiell einige chemische und mikrobiologische Veränderungen hervorrufen, die Einfluß auf die Betriebssicherheit und die Lebensdauer der Speicheranlagen haben könnten.

Bis heute wird darum der Speicherbetrieb im Rahmen von Forschungsprojekten von einem kontinuierlichen Monitoring der chemischen und mikrobiologischen Fluidparameter begleitet (Würdemann et. al., 2006).

Für das Monitoring sind bisher regelmäßige Einzelprobenahmen notwendig.

Um eine kontinuierliche Überwachung zu ermöglichen wird darüber hinaus im Rahmen des aktuellen Forschungsprojektes ein Verockerungssensor entwickelt, der sich z. Zt. in der Voruntersuchungsphase befindet (Linares und Opel., 2007).

Das saline Fluid des Wärmespeichers (Total Dissolved Solid =29 g/L) ist ein typisches Natrium-Chlorid-Wasser mit einem pH-Wert von 7,3. An wichtigen Nebenbestandteilen sind Sulfat (260 mg/l) und Hydrogencarbonat (300 mg/l) enthalten. Als Spurenelemente sind besonders gelöstes Eisen (ca. 1mg/l) und SiO₂ (7-11 mg/l) hervorzuheben. Der DOC-Gehalt (Dissolved Organic Carbon) liegt bei 3.5 mg/L. Nachhaltige Änderungen im Chemismus des Tiefenwassers konnten nicht nachgewiesen werden. Mineralneubildungen beschränken sich auf Calcit/Aragonit, Schwermetallsulfide und sekundäres Eisenhydroxid.

Die Grundwässer des vom Kältespeicher genutzten Aquifers sind relativ mineralstoffarme Wässer (Total Dissolved Solid=700 mg/L). Bei den Kationen sind vor allem Calcium (ca. 35 meq-%) und untergeordnet Natrium und Magnesium (10 bzw. 5 meq-%) vertreten. Eisen wurde bis zu einer Konzentration von 2 mg/L nachgewiesen. Zu gleichen Anteilen (um 20 meq-%) liegen Sulfat und Hydrogencarbonat vor. Im Grundwasser sind bis 18 mg/L CO₂ gelöst. Chlorid spielt mit 5 meq-% eine untergeordnete Rolle. Der DOC-Gehalt schwankt um 5 mg/L (min. 2,7 mg/L, max. 8,5 mg/L) und ist überwiegend auf natürliche Huminstoffe zurückzuführen. Nachhaltige Änderungen der chemischen Parameter im Verlaufe des Speicherbetriebes von 2000 bis heute sind nicht zu beobachten.

Vielmehr stellte sich im Laufe des Betriebes die Brunnenalteration als auffälligste chemische Auswirkung heraus, Die Alteration, die sich vor allem in der Ausfällung von Eisensulfiden und Karbonaten im Filterbereich der Bohrung zeigt, ist für eine merkliche Leistungsreduzierung der Brunnen verantwortlich. Ein mechanisch-chemisches Regenerierungsverfahren führte jeweils zur Wiederherstellung der Brunnenleistung.

Zusammenfassung der bisherigen Ergebnisse

Die Auswertung des Betriebs beider Aquiferspeicher für die letzten vier Speicherperioden zeigt, dass große Unterschiede bezüglich der ein- und ausgespeicherten Energiemengen sowie im erreichten Rückgewinnungsgrad bestehen. Diese Unterschiede sind im Wesentlichen auf die Betriebsweise der Speicher, d.h. auf die Schnittstellenparameter zwischen den Speichern und der Obertagetechnologie zurückzuführen. Mit Hilfe einer modellbasierten Parametervariation wurde eine qualitative Beschreibung des Einflusses der Injektionstemperaturen sowie der eingespeicherten Energiemengen für den Wärmespeicher vorgenommen. Eine Erhöhung der Injektionstemperatur an der warmen Bohrung sowie größere eingespeicherte Energiemengen führen zu einem höheren Rückgewinnungsgrad.

Die numerischen Simulationsmodelle sind sehr gut in der Lage, auf Basis der obertägigen Betriebsdaten die räumliche Verteilung von Druck und Temperatur im Untergrund zu bestimmen. Die bisherigen Messwerte aus dem chemischen Monitoring des wärmebeladenen Grundwassers aus beiden genutzten Aquiferen zeigen nur geringe Schwankungen in der Zusammensetzung und lassen keine Gefährdung des Betriebes erkennen.

Geplante Forschung und Entwicklung

Im Rahmen des aktuellen Forschungs- und Entwicklungsvorhabens sind weiterführende Arbeiten geplant. So ist in die energetische Bewertung der Speicher der Aufwand für den Betrieb der Speicher einzubeziehen. Das ist für den Wärmespeicher im Wesentlichen der Energiebedarf der Förderpumpen. Beim Kältespeicher ist es der Aufwand für den Betrieb der Rückkühlanlagen sowie der Aufwand für die Brunnenpumpen. In diesem Zusammenhang müssen geeignete Methoden für die Abschätzung formuliert werden, da die hierfür notwendigen Größen nicht gemessen wurden.

Letztendlich ist eine Kopplung des Modells der Obertageanlagentechnik, der Speichermodelle und konkreter Bedarfssituationen der Gebäude für Strom, Wärme und Kälte

durchzuführen. Die Abbildung des gesamten Systemverhaltens wird einerseits ermöglichen konkrete Vorschläge für die verbesserte Einbindung der Aquiferspeicher in das Energieversorgungssystem der Berliner Parlamentsbauten zu erarbeiten und andererseits Methoden für die Einbindung von Aquiferspeichern in ähnlich strukturierte Versorgungssysteme zu entwickeln.

Dank

Dieses Forschungsprojekt wird finanziell gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie unter dem Förderkennzeichen BMWi 0329809C. Wir danken für diese Unterstützung.

Literatur

Hellström, G., Bennet, J., and Claesson, J., (1986), Heat Storage in the Ground - AQUIFER THERMAL ENERGY STORAGE - Single well model. Lund, Department of Mathematical Physics, University of Lund, p. 105.

Kabus, F., Seibt, P., (2000), Aquifer Thermal Energy Storage for the Berlin Reichstag Building – New Seat of the German Parliament. In: Proceedings World Geothermal Congress 2000, Kyushu - Tohoku, Japan, 28. Mai – 10. Juni, 2000. pp. 3611-3615.

Köhler, S., Kranz, S., Huenges E., Albers J., Berkyürek, C., Ziegler, F., Bartels, J., Wolfgramm, M., Seibt, A., Kabus, F., Opel, O., Ruck, W., (2006), Wärme- und Kälteversorgung der Parlamentsbauten im Berliner Spreebogen mit Aquiferspeicher. Statusseminar „Thermische Energiespeicher“, Freiburg, 2./3. November, 2006

Lützke, B. Energieversorgung für das Parlaments- und Regierungsviertel im Spreebogen Berlin. Bundesbaugesellschaft Berlin mbH, www.bundesbaugesellschaft.de

Opel, O., (2007) Saisonale Wärmespeicherung im Aquifer – Ergebnisse aus dem geochemischen Monitoring der Aquiferwärme- und -kältespeicher am deutschen Reichstagskomplex in Berlin, Posterbeitrag

Linares, J. A. N., Opel, O., (2007) Berechnung von Eisengehalten und Verockerungspotential von Schluckbrunnen mithilfe von Temperatur, Redoxpotential-, pH-Wert, Leitfähigkeits- und Sauerstoffsättigungsdaten, Tagungsband Geothermiekongress 2007, Bochum, 29.-31.10. 2007

Schmidt, T., (2005) Aquifer Thermal Energy Storage – TRNAST Two Well Model for TRNSYS, Manual 2005, Solites - Steinbeis Research Institute for Solar and Sustainable Thermal Energy Systems, Stuttgart

Würdemann, H., Vieth A., Miethling-Graff, R., Seibt A., Wolfgramm, M., (2006) Mikrobiologie geothermisch genutzter Aquifere: Untersuchung zum Einfluss auf die Betriebssicherheit. Tagungsband 9. Geothermische Fachtagung, Karlsruhe, 15.-17.11.2006 S. 141-147

Autoren

Stefan Kranz

Helmholtz-Zentrum Potsdam - Deutsches GeoForschungsZentrum (GFZ)
Sektion 5.2 Geothermie
Telegrafenberg
D-14473 Potsdam
Tel. 0331-2881565
E-Mail: kranz@gfz-potsdam.de
Internet: <http://www.gfz-potsdam.de>

Dr. Jörn Bartels, Doreen Gehrke, Frank Hoffmann, Dr. Markus Wolfgramm

Geothermie Neubrandenburg GmbH
Seestraße 7A
D-17033 Neubrandenburg
Tel. 0395-367740
E-Mail: gtn@gtn-online.de
Internet: <http://www.gtn-online.de>