

Abschlussbericht

GeoSpeicher.bw

von

Prof. Dr. Philipp Blum und Dr. Paul Fleuchaus
Karlsruher Institut für Technologie (KIT),
Institut für Angewandte Geowissenschaften (AGW)

Prof. Dr.-Ing. Roland Koenigsdorff und Meinhard Ryba
Hochschule Biberach (HBC)
Institut für Gebäude- und Energiesysteme (IGE)

Dr. Roman Zorn und Simon Schüppler
European Institute for Energy Research (EIFER)

Dr. Jürgen Braun und Giulia Giannelli
Universität Stuttgart
Versuchseinrichtung zur Grundwasser- und Altlastensanierung (VEGAS)

Prof. Dr.-Ing. Christian Moormann, Dr.-Ing. Patrik Buhmann und Matin Liaghi
Universität Stuttgart
Institut für Geotechnik (IGS)

Prof. Dr. Margot Isenbeck-Schröter und Dr. Simon Ritter
Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg
Institut für Geowissenschaften

Prof. Dr. Thomas Breyer-Mayländer und Prof. Dr. Detlev Doherr,
Hochschule Offenburg

Förderkennzeichen: L7516014 - 16019
Förderzeitraum: 19.09.2016 - 31.04.2020

Die Arbeiten des Programms Lebensgrundlage Umwelt und ihre
Sicherung werden mit Mitteln des Landes Baden-Württemberg gefördert.

Januar 2021



Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT

Inhalt

Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Angewandte Geowissenschaften (AGW)	2
Motivation	2
Ziele.....	3
Ergebnisse	3
Aquiferspeicher am KIT Campus Nord	3
Fazit.....	8
Literatur.....	9
Hochschule Biberach (HBC), Institut für Gebäude- und Energiesysteme (IGE)	11
Demovorhaben Biberach an der Riß	11
Die Kalte Nahwärme Hochvogelstraße in Biberach.....	11
Erkundung	13
Konzept für die Betriebsüberwachung	14
Modellierung und thermisches Monitoring des Sondenfelds	19
Aufbereitung der gemessenen Leistungs- und Energiedaten	20
Ergebnisse der Berechnungen mit EED	20
Modellgestützte Auswertung der thermischen Reaktion des Sondenfelds.....	22
Modellierungen und Simulationen der Hydraulik des Kalten Nahwärmenetzes Biberach	25
Ergebnisse - Modellvergleich.....	26
Ergebnisse – Betriebsvarianten und Bewertung mittels Kennzahlen	26
Fazit und Ausblicke zur Kalten Nahwärme Hochvogelstraße Biberach	28
Weitere Demovorhaben.....	29
Hans-Rehn-Stift.....	29
Bonner Bogen.....	30
Tiefe Geothermie Bad Waldsee.....	35
Literatur	36
Veröffentlichungen.....	36
Transfer	36
Europäisches Institut für Energieforschung (EiFER)	37
Einleitung	37
Ergebnisse der Standortuntersuchungen.....	38
Grundwasserhöhen	38
Pumpversuch	38
Temperaturmessungen.....	40
Wärmetauscher-Lösung.....	41

Thermisch-hydraulisches Modell	42
Schlussfolgerung und Ausblick.....	46
Literatur	47
Universität Stuttgart, Versuchseinrichtung zur Grundwasser- und Altlastensanierung (VEGAS)	49
Einführung und Ziele.....	49
Forschungsergebnisse.....	50
Kopplung mit biologischer Sanierung.....	50
Kopplung mit Pump and Treat	54
Literatur	55
Institut für Geotechnik der Universität Stuttgart (IGS).....	57
Hans-Rehn-Stift.....	57
Erste Phase	57
Zweite Phase	60
Dritte Phase	62
Rosensteintunnel	63
Installation der Temperaturlanzen.....	64
Installation von Datenloggern	65
Aquadrom Hockenheim	66
Grundlagen	66
Numerische Simulationen	67
Thermische Auswirkungen des Schwimmbeckens auf den Untergrund	69
Veröffentlichungen.....	71
Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg Institut für Geowissenschaften.....	72
Einleitung	72
Hydrogeologische und hydrogeochemische Untersuchungen am Standort Aquadrom Hockenheim	73
Bestimmung der Grundwasserfließrichtung.....	73
Hydrogeochemie der Grundwässer am Standort.....	74
Grundwassertemperaturen.....	79
Charakterisierung von Aquifermaterial für den Einbau in Säulenexperimente.....	80
Säulenversuche	81
Schlussfolgerungen der Geochemischen Untersuchungen für die Planung und Umsetzung eines ATES-Systems am Standort Aquadrom in Hockenheim.....	86
HS Offenburg.....	88
Aufgabenstellung im Verbundprojekt	88
Einführung.....	89

Förderung der Kommunikation im Rahmen des Verbundprojektes.....	90
Quantitative Erhebung – Institutionalisierung VDI 7000.....	92
Analyse der Kriterien zur Einschätzung der öffentlichen Relevanz.....	94
Analyse der Kriterien zur Einschätzung der öffentlichen Relevanz (nach VDI 7000, 3.1.1 „Öffentlichkeitsbeteiligung in die Projektentwicklung integrieren“).....	94
Medienanalyse Wärmespeicherung in Aquiferen (nach VDI 7000, 3.1.2 „Anspruchsgruppen und deren Themenfelder analysieren“)	95
Begleitung eines Anwohnerdialogs zur außergerichtlichen Mediation (nach VDI 7000 3.3.4 „Alternative Konfliktlösungen zu rechtlichen Auseinandersetzungen finden“)	96
Qualitative Analysenansätze	97
Akzeptanz / Partizipationsmodelle	98
Grundsätze partizipativer Projektbegleitung	98
Schlussfolgerungen	99
Kurzbeschreibung der Forschungsergebnisse.....	99
Fortschritte für die Wissenschaft und/oder Technik durch die Forschungsergebnisse	99
Nutzen, insbesondere praktische Verwertbarkeit der Ergebnisse und Erfahrungen.....	100
Konzept zum Ergebnis- und Forschungstransfer auch in projektfremde Anwendungen und Branchen.....	101
Literatur.....	101

Das Verbundvorhaben GeoSpeicher.bw zielte darauf, an mehreren Demovorhaben in Baden-Württemberg den effektiven und effizienten Einsatz geothermischer Wärme- und Kältenutzung und vor allem der Wärme-Speicherung zur Reduzierung fossiler Energieträger zu demonstrieren und wissenschaftlich zu begleiten. In den Demoprojekten sollten unterschiedliche ober- und untertägige Konzepte genutzt werden. Bei allen Vorhaben wurde auf eine transparente, dem jeweiligen Stand des Projekts angepasste, Bürgerinformation und -beteiligung großen Wert gelegt. Eine Partizipation durch bürgerschaftliches Engagement sollte somit intensiv angeregt werden.

Das Vorhaben ist in die folgenden vier Arbeitspakete (AP) gegliedert:

AP1: Erkundung und Monitoring

AP2: Modellierung und technische Machbarkeit

AP3: Gebäude und Wirtschaftlichkeit

AP4: Transparente Information und Öffentlichkeitsbeteiligung

Das Projekt hatte eine Laufzeit vom 19.09.2016 bis zum 30.04.2020 (Förderzeitraum für alle Arbeitspakete und Projektpartner).

Die Autoren danken dem Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg für die finanzielle Förderung des Vorhabens und dem Projektträger Karlsruhe, Baden-Württemberg Programme (PTKA-BWP) für die Unterstützung der administrativen Abwicklung sowie beiden Institutionen für die gute Zusammenarbeit.

**Karlsruher Institut für Technologie (KIT),
Institut für Angewandte Geowissenschaften (AGW)**

Prof. Dr. Philipp Blum und Dr. Paul Fleuchaus

Förderkennzeichen: L75 16014

AP1: Erkundung und Monitoring

AP2: Modellierung und technische Machbarkeit

AP3: Gebäude und Wirtschaftlichkeit

Motivation

Weltweit befinden sich derzeit über 2.800 Aquiferspeicher in Betrieb, davon 95% in den Niederlanden, Schweden, Belgien und Dänemark (Abbildung 1). In Deutschland sind es lediglich vier, obwohl sich im Vergleich zu herkömmlichen Technologien hohe finanzielle und energetische Einsparungen erzielen lassen (Schüppler et al. 2019).

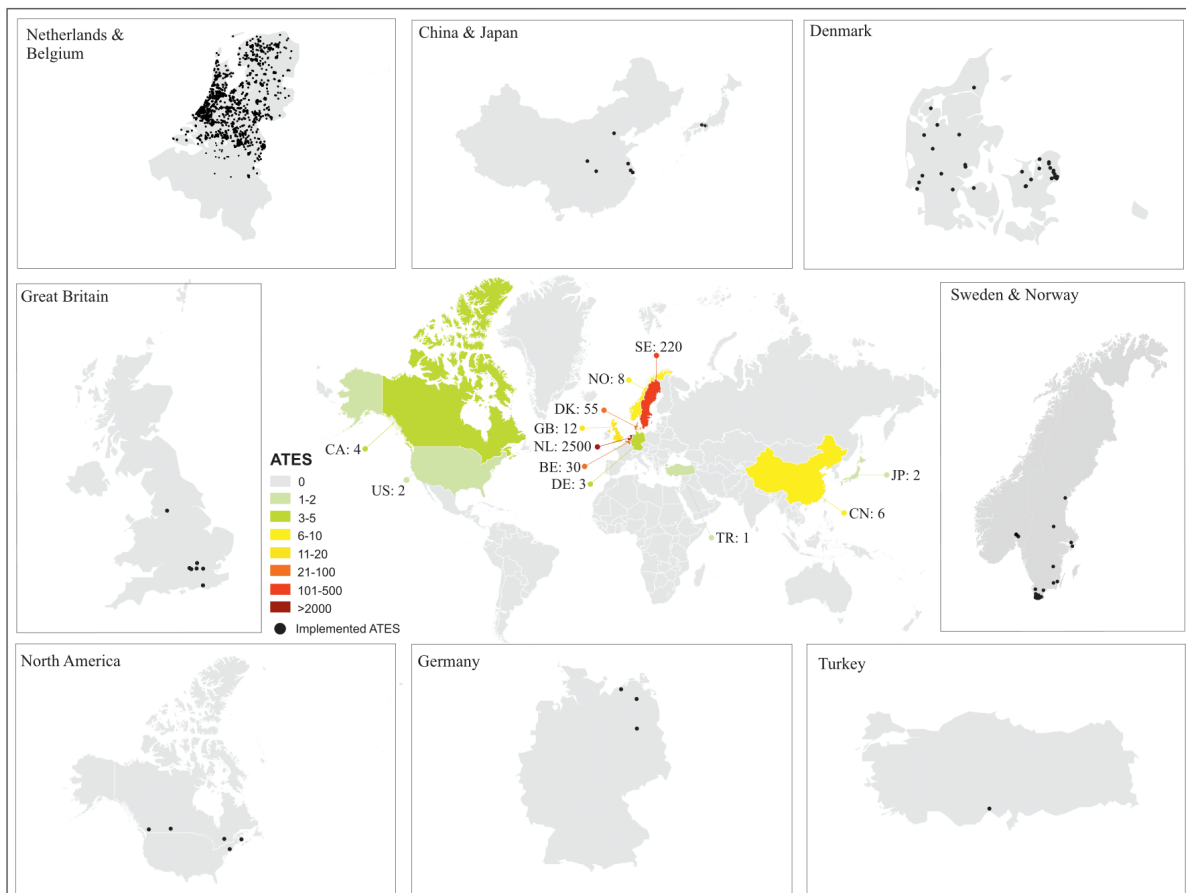


Abbildung 1: Überblick über die weltweite Verbreitung von Aquiferspeichern (Fleuchaus et al. 2018).

Um den Einsatz von Aquiferspeichern zukünftig auch in Deutschland zu fördern sind Demonstrationsprojekte der vielversprechendste Weg (Pellegrini et al. 2019, Fleuchaus et al. 2020). Im Projekt Geospeicher.bw soll deshalb die erfolgreiche Nutzung von Aquiferspeichern für die Wärme- und Kälteversorgung demonstriert werden.

Ziele

Der KIT Campus Nord (CN) hat einen jährlichen Kältebedarf von über 15 GWh. Die Kälteversorgung erfolgt derzeit dezentral über Kompressionskältemaschinen. In Hinblick auf die Energiewende an öffentlichen Einrichtungen soll die Kälteversorgung am KIT Campus Nord durch die Errichtung eines Kältenetzes zentralisiert und mit auf die Versorgung durch regenerative Energien umgestellt werden. Im Zuge des Projekts GeoSpeicher.bw ist deshalb geplant, die erfolgreiche Nutzung eines Aquiferspeichers für die Kälteversorgung am Standort zu demonstrieren. Über Freikühler eingefangene winterliche Kälte soll aktiv im Grundwasser für die Klimatisierung im Sommer gespeichert werden. AP1 umfasst den Aufbau geologischer, hydrogeologischer, thermischer und hydrogeochemischer Standortmodelle. Darauf aufbauend soll in AP2 der Wärmetransport im Untergrund anhand von analytischen und numerischen Verfahren modelliert werden. Der geplanten Aquiferspeicher soll auf Grundlage zuvor erfasster Lastprofile einzelner Gebäude unter Berücksichtigung des standortspezifischen Untergrunds konzipiert werden.

Ergebnisse

Aquiferspeicher am KIT Campus Nord

Am Demonstrationsstandort KIT Campus Nord wird der jährliche Kältebedarf von rund 15 GWh dezentral über Kompressionskältemaschinen gedeckt. Diese Art der Kälteversorgung ist weder wirtschaftlich noch nachhaltig. Aus diesem Grund wird die Zentralisierung der Kälteversorgung am KIT Campus Nord durch den Bau eines Kältenetzes angestrebt. In Hinblick auf die Energiewende an öffentlichen Einrichtungen soll das geplante Kältenetz durch den Einsatz regenerativer Energien mit Kälte versorgt werden. Im Zuge des Projekts GeoSpeicher.bw ist deshalb geplant, die erfolgreiche Nutzung eines Aquiferspeichers für die Kälteversorgung zu untersuchen. Über Freikühler eingefangene winterliche Kälte soll aktiv im Grundwasser für die Klimatisierung im Sommer gespeichert werden.

Der Kältebedarf am KIT Campus Nord wird weder dezentral an den einzelnen Gebäuden noch zentral erfasst. Aufgrund der Wichtigkeit stichhaltiger Informationen wurde der Kältebedarf an 35 Gebäuden in einer Masterarbeit in Zusammenarbeit mit dem Institut für Energiewirtschaft (KIT) analysiert. In einem ersten Schritt wurden Daten zur installierten Kälteleistung der Kompressionskältemaschinen (KKM) im Zuge einer Befragung der jeweiligen Gebäudeleiter am Campus erhoben. Die Genauigkeit der Bedarfsermittlung wurde für zwei Gebäude repräsentativ validiert: Für die Gebäude 348 und 448 standen exakte Monitoringdaten des Stromverbrauchs der KKM zur Verfügung (Abbildung 2).

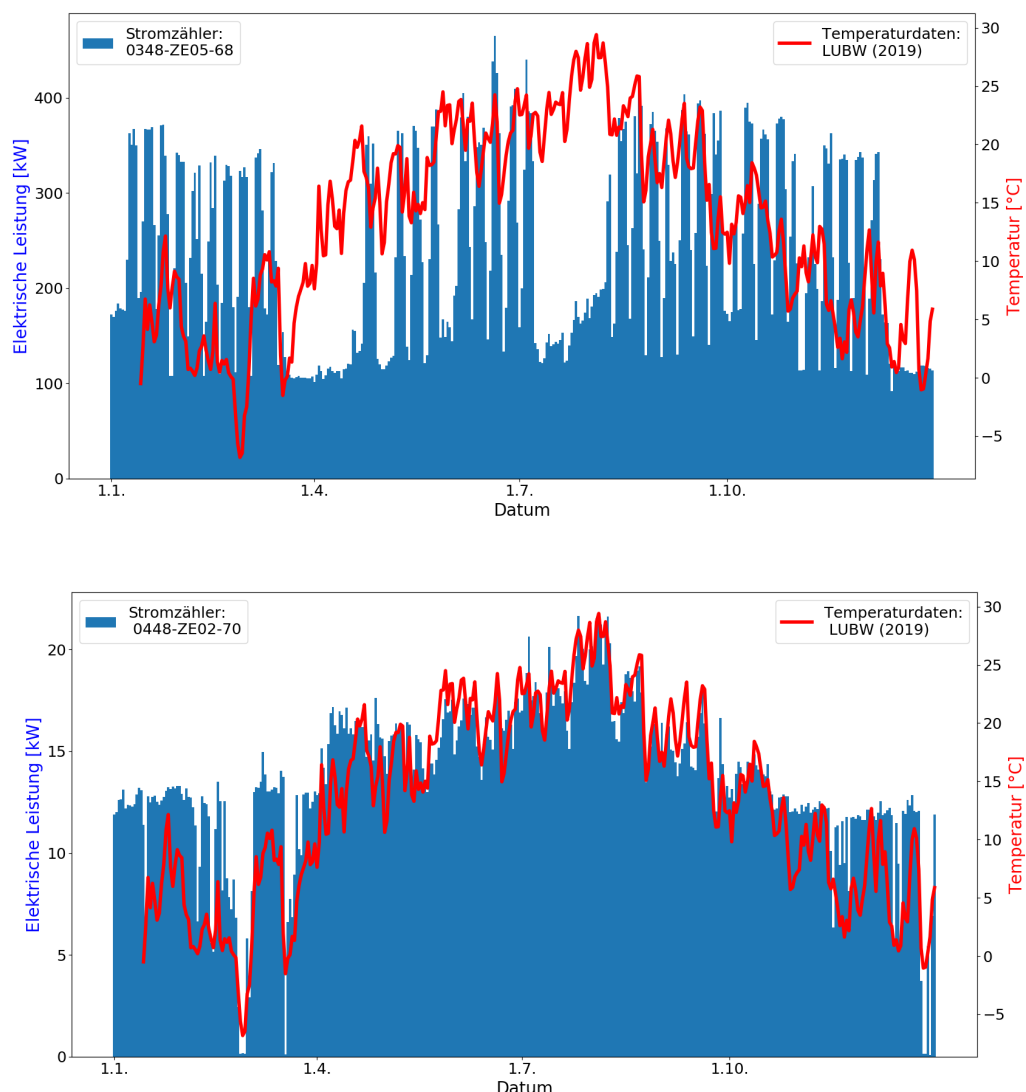


Abbildung 2: Mittlere elektrische Leistung der Kälteanlage an den Gebäuden 348 (oben) und 448 (unten) sowie die mittlere Lufttemperatur in Karlsruhe (2018).

Auf Grundlage der gewonnenen Daten wurden in einem zweiten Schritt die Kältekosten (c/kWh) der einzelnen Gebäude errechnet. Aufgrund der großen Unsicherheit der unterschiedlichen Parameter erfolgte die Berechnung mithilfe einer Monte Carlo (MC) Simulation. Die

Ergebnisse der MC-Simulation (Kältekosten) sind in Abbildung 3 als Funktion der installierten Kapazität dargestellt.

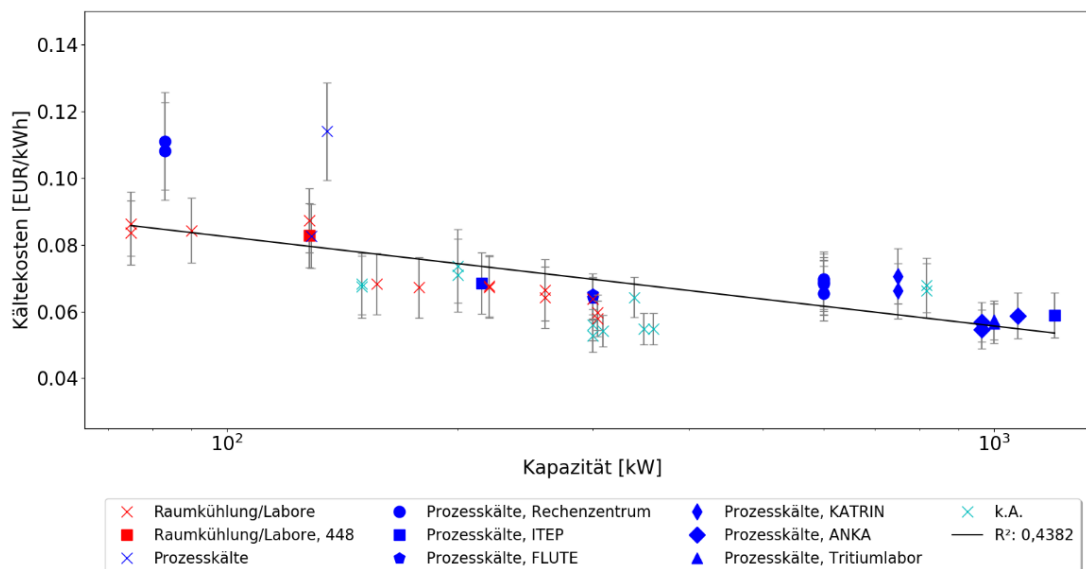


Abbildung 3: Kältekosten der 47 betrachteten Anlagen am Campus Nord.

Es ist deutlich zu erkennen, dass die Kältekosten mit der Höhe der installierten Leistung sinken. Dies spricht für eine Zentralisierung der Kälteversorgung über ein Kältenetz. Ein Kältenetz bietet zudem den Vorteil, überschüssige Redundanzen auszugleichen und somit die laufenden Kosten erheblich zu verringern. Auf Grundlage der berechneten Kältekosten wurde ein erster Entwurf für einen möglichen Verlauf des geplanten Kältenetzes skizziert. Der geplante Verlauf orientiert sich an der Höhe der Kältekosten sowie der Höhe des Kältebedarfs (Abbildung 4). Aufbauend auf der Bedarfs- und Wirtschaftlichkeitsanalyse wurde in einem zweiten Schritt die geologischen und hydrogeologischen Randbedingungen am Standort untersucht.

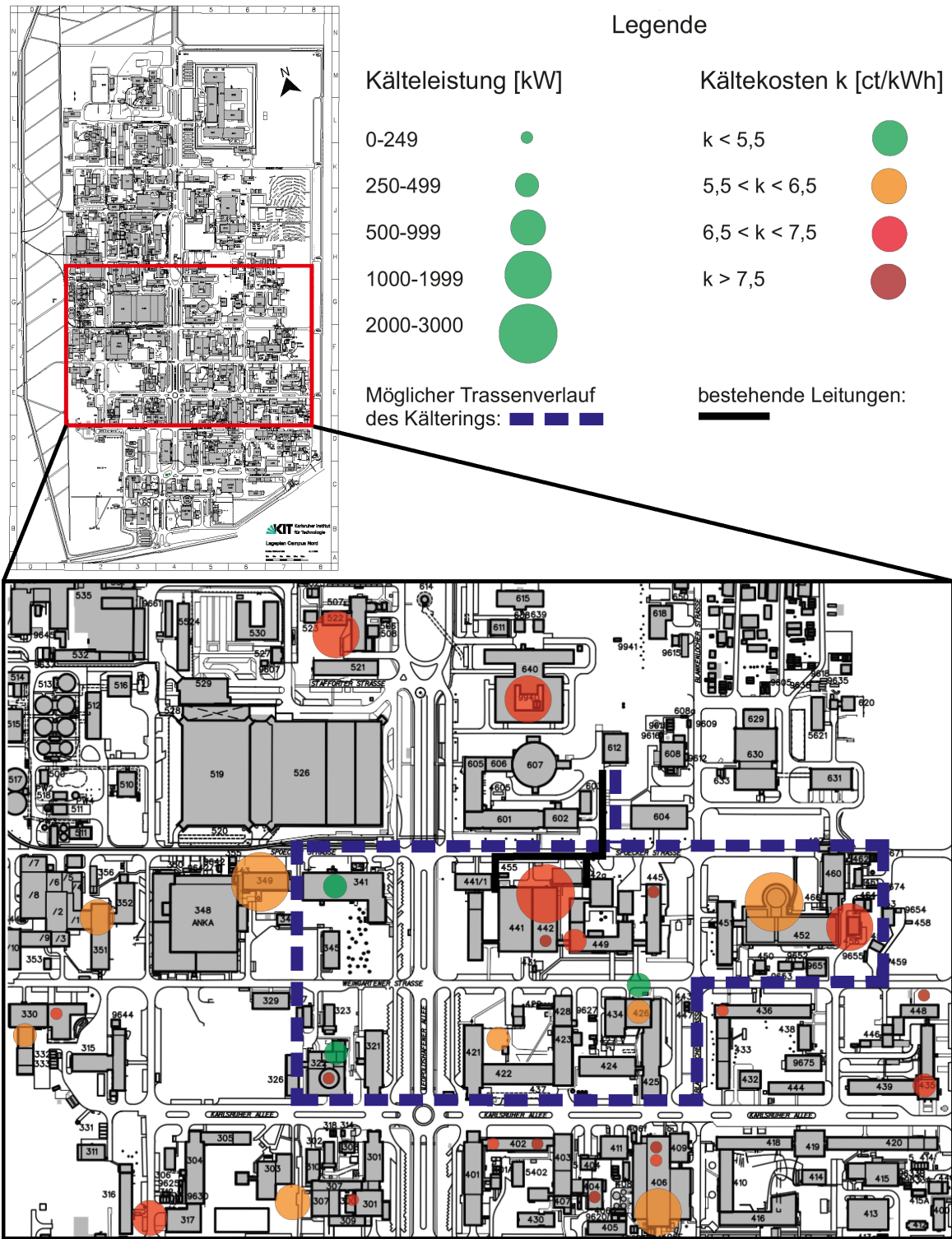


Abbildung 4: Verteilung von installierter Kälteleistung und spezifischen Kältekosten im Untersuchungsgebiet. Durchmesser der Kreise: Kapazität der Anlagen in $\text{kW}_{\text{Kälte}}$ (je größer, desto mehr Leistung). Farbe der Kreise: Kosten in ct/kWh (von grün für niedrige Betriebskosten bis rot für hohe Betriebskosten).

In AP1 wurde im Rahmen einer Bachelorarbeit anhand von Grundwasserstichtagsmessungen die Fließgeschwindigkeit sowie die Fließrichtung des Grundwassers am Campus Nord (CN) untersucht (Blesch 2018). Basierend auf den zuvor in AP1 gesammelten Untergrundparametern

sowie den Ergebnissen von Blesch (2018), erfolgte im Rahmen einer Projektstudie in AP2 die thermische Simulation des geplanten Kältespeichers (Bastiás 2018). Abbildung. 5 zeigt das kalibrierte hydraulische Modell sowie die Ergebnisse der thermischen Simulation nach 20 Jahren. Die Ergebnisse zeigen, dass trotz hoher Grundwasserfließgeschwindigkeiten 68% der im Winter über Freikühler eingespeisten Kälte wiedergewonnen werden kann. Die geförderten Temperaturen liegen zwischen 9 und 11 °C und eignen sich für eine direkte Gebäudeklimatisierung.

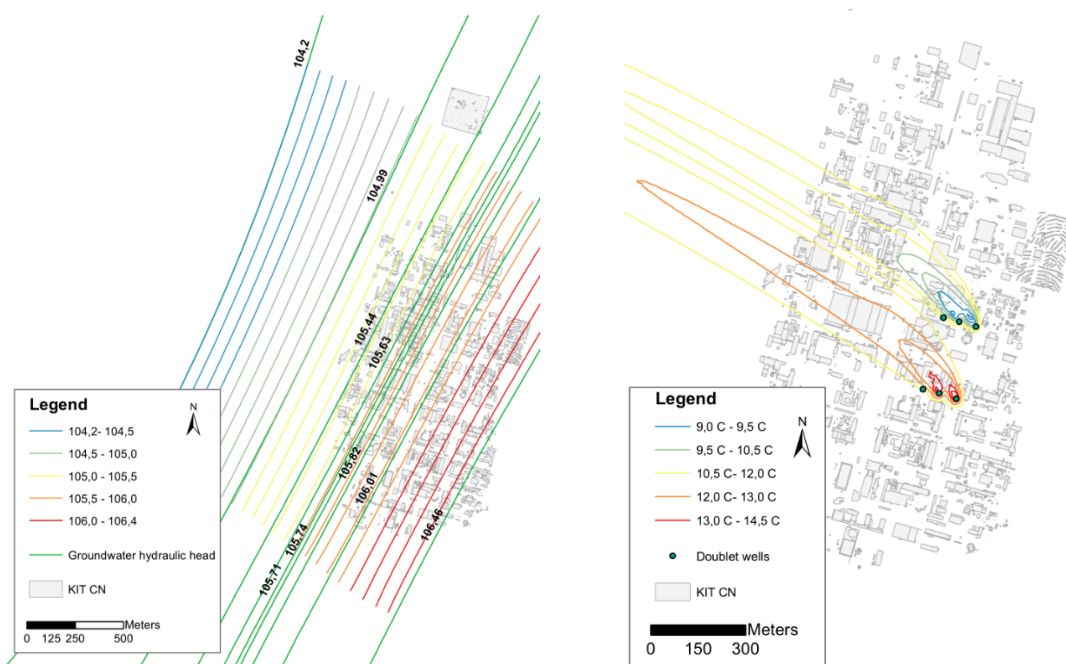


Abbildung 5: Links: Kalibriertes hydraulisches Modell für den Projektstandort Campus Nord basierend auf den modellierten Grundwassergleichen von Blesch (2018). Rechts: Ergebnisse der thermischen Simulation für den Betrieb des Pilotspeichers an Gebäude 612 (Bastiás 2018).

In Hinblick auf die langfristige Vision wurde in einem nächsten Schritt in AP2 die technische und ökonomische Machbarkeit für die Kälteversorgung des gesamten Campus Nord untersucht. In Zusammenarbeit mit der Firma IF Technology und Facility Management vom KIT wurde aufbauend auf AP1 eine thermische Simulation des geplanten Kältespeichers durchgeführt. Abbildung. 6 zeigt die Verteilung der Wärme- und Kälteflüssen auf dem Campusgelände nach fünf Speicherzyklen.

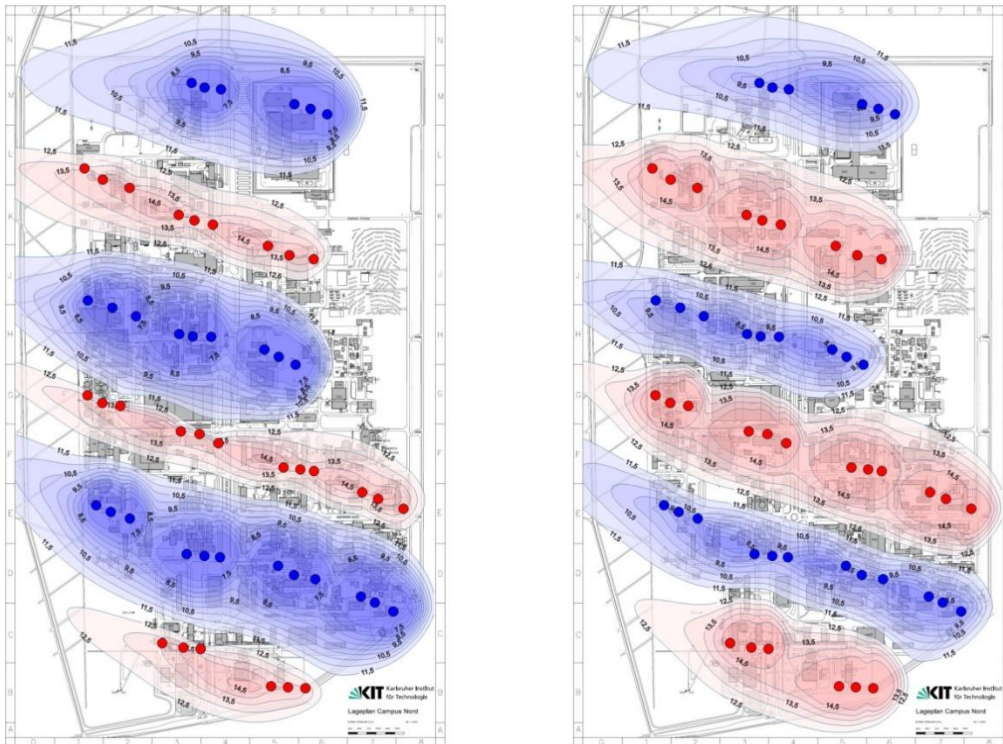


Abbildung 6: Ergebnisse der thermischen Simulation nach 5 Speicherzyklen am Ende des Beladungs- (links) und Entladungszyklus (rechts).

Für die Bereitstellung von 15 MW Kälte werden nach ersten Berechnungen 54 Entnahme- und Eingabebrunnen mit einer Gesamtförderleistung von 4 Mio. m³/a benötigt. Durch die aktive Einspeicherung von Kälte im Winter über Freikühler und eine optimale Ausrichtung der Grundwasserbrunnen in Grundwasserfließrichtung ließe sich eine durchschnittliche Entnahmetemperatur von 8 °C und Wiedergewinnungsraten von rund 75% der eingespeicherten Kälte erzielen. Eine Temperaturdifferenz von rund 5 K im Vergleich zur natürlichen Grundwassertemperatur im Sommer würde eine direkte Gebäudeklimatisierung ermöglichen. Nach ersten Schätzungen beliefen sich die Investitionskosten für die Errichtung des Kältenetzes und des Aquiferspeichers auf bis zu 15 Mio. Euro. Unter Berücksichtigung hoher Energie- und Wartungskosten der dezentralen Kälteanlagen ließen sich allerdings Einsparungen von ca. 1 Mio. Euro pro Jahr erzielen.

Fazit

Die im Zuge des Projektes GeoSpeicher.bw durchgeführten Untersuchungen haben ein großes Potential der Aquiferspeicherung weltweit (Fleuchaus et al. 2018), aber auch vor allem in Deutschland gezeigt (Fleuchaus et al. 2020b). Am Projektstandort Campus Nord am KIT konnte sowohl die technische als auch wirtschaftliche Machbarkeit eines Aquiferspeichers zur

Kälteversorgung nachgewiesen werden. Trotz aussichtsreicher Ergebnisse wurden die Projektergebnisse allerdings bei der strategischen Planung der Wärme- und Kälteversorgung am KIT bisher nicht berücksichtigt. Dies deckt sich auch mit den Ergebnissen von Fleuchaus et al. (2018), (2020) und Fleuchaus (2020), wo Chancen, Risiken und Potentiale der Aquiferspeicherung weltweit analysiert wurden. Demnach scheitert die weltweite Nutzung der Technologie weniger an technischen oder untergrundspezifischen Aspekten. Entscheidende Barrieren für eine flächendeckende Anwendung sind vielmehr ein geringer Bekanntheitsgrad der Technologie sowie fehlende Anreizprogramme seitens der Politik (Fleuchaus et al. 2018). Eine Risikoanalyse von Hochtemperaturspeicherprojekten hat zudem gezeigt, dass für eine erfolgreiche Realisierung großer Projekte zunächst die passenden Randbedingungen geschaffen werden müssen. So hat eine Umfrage unter Experten der Aquiferspeicher- und Geothermiebranche ergeben, dass Risiken wie ein komplexes Genehmigungsverfahren, ein fehlender Rückhalt für die Technologie im Bereich der Bevölkerung oder fehlende Fördermaßnahmen als kritisch eingeschätzt werden (Fleuchaus et al. 2020). Die Analyse vergangener Aquiferspeicherprojekte hat dagegen gezeigt, dass die Aquiferspeichertechnologie aus technischer Sicht funktioniert und auch an unterschiedlichsten Standorten erfolgreich umgesetzt werden kann. Zur Schaffung der optimalen Randbedingungen wird daher die Schaffung weiterer Demonstrationsprojekte nachdrücklich empfohlen, ohne diese wird die Aquiferspeichertechnologie in Baden-Württemberg sich nicht etablieren können.

Literatur

Blesch L. (2018): Erstellung von Grundwassergleichenplänen zur Bestimmung der Grundwasserfließrichtung für einen geplanten Aquiferspeicher am KIT Campus Nord. Bachelorarbeit, Karlsruhe Institut für Technologie, Institut für Angewandte Geowissenschaften. [nicht veröffentlicht]

Bastiás J. (2018): Numerical model of ATEs system at KIT Campus North. Projektstudie, Karlsruhe Institut für Technologie, Institut für Angewandte Geowissenschaften. [nicht veröffentlicht]

Duchesne A (2019) Wirtschaftlichkeitsanalyse der Kälteversorgung eines Forschungszentrums. Masterarbeit, Karlsruhe Institut für Technologie, Institut für Angewandte Geowissenschaften. [nicht veröffentlicht]

Fleuchaus, P.: Global application, risk and performance analysis of Aquifer Thermal Energy Storage (ATES). Dissertation, Karlsruhe Institute of Technology (KIT) (2020)

Fleuchaus, P.; Godschalk, B.; Stober, I.; Blum, P. (2018): Worldwide application of aquifer thermal energy storage – A review. In: Renewable and Sustainable Energy Reviews 94, S. 861–876. DOI: 10.1016/j.rser.2018.06.057.

Fleuchaus, P., Schüppler, S., Bloemendal, M., Guglielmetti, L., Opel, O., Blum, P.: Risk analysis of High-Temperature Aquifer Thermal Energy Storage (HT-ATES). Renewable and Sustainable Energy Reviews 133, (2020). Doi: 10.1016/j.rser.2020.110153

Fleuchaus P., Schüppler S., Stemmler R., Menberg K., Blum P.: Aquiferspeicher in Deutschland. Eingereicht in Grundwasser (2020b)

Pellegrini, M.; Bloemendal, M.; Hoekstra, N.; Spaak, G.; Andreu Gallego, A.; Rodriguez Comins, J. et al. (2019): Low carbon heating and cooling by combining various technologies with Aquifer Thermal Energy Storage. In: The Science of the total environment 665, S. 1–10. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.01.135.

Schüppler S, Fleuchaus P, and Blum P (2019) Techno-economic and environmental analysis of an Aquifer Thermal Energy Storage (ATES) in Germany. Geothermal Energy 7(1):669 doi: 10.1186/s40517-019-0127-6.

**Hochschule Biberach (HBC),
Institut für Gebäude- und Energiesysteme (IGE)**

**Prof. Dr.-Ing. Roland Koenigsdorff und Meinhard Ryba mit
Michael Bachseitz, Fabian Neth, Adinda Van de Ven, Stephan Volkmer**

Förderkennzeichen: L75 16017

Demovorhaben Biberach an der Riß

Die Kalte Nahwärme Hochvogelstraße in Biberach

Beim Projekt Kalte Nahwärme (KNW) Hochvogelstraße in Biberach dienen 35 Erdwärmesonden (EWS) mit je 200 m Tiefe und ca. 10 m Abstand voneinander als zentrale Wärmequelle für ein NKW-Netz zur Versorgung eines Neubaugebiets am Stadtrand. Die Quellwärme wird durch zentrale Pumpen, die in einer Technikzentrale in einer modifizierten Fertiggerade zusammen mit den Sammlern der EWS untergebracht sind, über zwei Netzstränge zu den dezentralen Wärmepumpen in den einzelnen Häusern transportiert. Das EWS-Feld liegt an der Nord-Ost-Ecke des Baugebiets unter einer Streuobstwiese (Abbildung 1).



Abbildung 1: Luftaufnahme vom Neubaugebiet Hochvogelstraße mit EWS-Feld (roter Kreis) und Technikzentrale (roter Pfeil) Quelle: Privat

Die Inbetriebnahme des KNW-Netzes erfolgte Mitte 2016 mit dem Anschluss erster Häuser. Die weiteren Anschlüsse von Wärmepumpenanlagen als Wärmeabnehmer erfolgten sukzessive mit der Bebauung des Gebiets, bis der Vollausbau Ende 2019 erreicht wurde. Bauherr und Betreiber der KNW-Anlage ist der kommunale Energieversorger e.wa riss GmbH & Co. KG, Biberach. Das Betreiberkonzept sieht vor, dass die einzelnen Gebäudeeigentümer im Baugebiet die Wärmepumpenanlage selbst errichten und betreiben. Die Schnittstelle zum KNW-Netz stellt jeweils der Verdampfer der Wärmepumpe (Heizbetrieb) bzw. der Kondensator (möglicher maschineller Kühlbetrieb) dar.

Abbildung 2 enthält ein hydraulisches Prinzipschema des Netzes. Rot umkreist sind darin die beiden parallelen zentralen Pumpen im der Technikzentrale (im gestrichelten Rechteck) und die dezentralen Zubringerpumpen zu den Wärmepumpen bei den Verbrauchern, die durch Magnetventile abtrennbar sind. Eine innovative Besonderheit dieser Anlage ist die Möglichkeit, dass das EWS-Feld bei Niedriglast durch ein Bypassventil (blauer Kreis) umgangen werden kann. Dann wirkt die Ringleitung mit den beiden Strängen ähnlich einem Erdwärmekollektor als ausschließliche Wärmequelle. Die Umwälzung im Ring erfolgt dann durch die dezentralen Umwälzpumpen der Kundenanlagen.

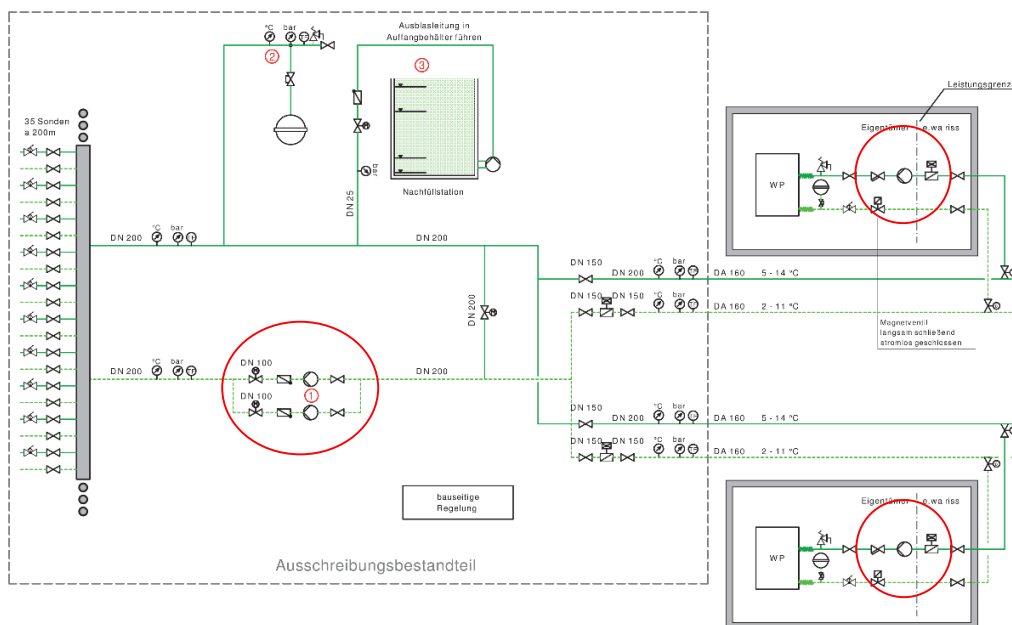


Abbildung 2: Hydraulikkonzept KNW-Biberach mit einem exemplarischen Verbraucher je Strang (Quelle: Planungsbüro Roland Reiter).

Erkundung

Im Vorfeld des Vorhabens erhielt die HBC von der e.wa riss im Rahmen einer vorgelagerten wissenschaftlichen Begleitung während der Konzeptionsphase die zum geologischen Standort vorliegenden Unterlagen (u. a.: *Dokumentation der geologischen Begleitung/Überwachung und Auswertung Thermal Response Test sowie Konzeption der Erdwärmesondenanlage*). Basierend auf einer Probebohrung mit Ausbau zur Testsonde, an der ein Thermal Response Test (TRT) erfolgte und die später Teil des EWS-Feldes wurde, ergeben sich u. a. folgende, thermisch-energetisch relevante geologische Daten am Standort (Angaben Fa. Baugrund Süd):

- geringmächtige Verwitterungsdecke; darunter:
- bis 69 m u. GOK Fein- bis Grobkies; darunter:
- Mergel, Mergelstein und Sandstein (obere Meeresmolasse); darunter:
- von 140 m u. GOK bis Bohrende (160 m u. GOK) geröllführende Schichten.

Ab 86 m wurde gespanntes Grundwasser angetroffen, nach Bohrende regelte sich der Grundwasserspiegel auf 64,5 m u. GOK ein.

Im Rahmen der vorgelagerten wissenschaftlichen Begleitung erfolgte eine Auswertung des von der Fa. Baugrund Süd durchgeführten TRT an der 160 m Testsonde, die die folgenden Kennwerte ergab:

Tabelle 1: Ergebnis der TRT-Auswertung der HBC

Beschreibung	Formelzeichen	Wert	Einheit
Ungestörte Erdreichtemperatur	$\bar{\vartheta}_{E,0}$	11,86	°C
Effektive Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs	λ_E	2,63	W/(mK)
Geschätzte Volumetrische Wärmekapazität des Erdreichs	c_v	2,18	MJ/(m ³ K)
Effektiver Bohrlochwiderstand	$R_{b,eff}$	0,053	(mK)/W

Diese Daten wurden im Rahmen des vorliegenden Vorhabens aufbereitet und für die weitere Projektbearbeitung zur Verfügung gestellt. So wurden die ungestörte Erdreichtemperatur und der Bohrlochwiderstand aus dem TRT entsprechend auf die mittlere Sondentiefe im EWS-Feld umgerechnet, da das EWS-Feld aus 34 Sonden mit 200 m Tiefe und der Testsonde mit 160 m Tiefe besteht. Darüber hinaus wurde der Bohrlochwiderstand auf die geplanten Betriebsbedingungen umgerechnet [1]. Die aufbereiteten Kenndaten sind Tabelle 2 zu entnehmen. Bei der Umrechnung der ungestörten Erdreichtemperatur wurde von einem geothermischen Gradienten von 0,03 K/m ausgegangen.

Tabelle 2: Aufbereitete Kenndaten für das EWS-Feld

Beschreibung	Formelzeichen	Wert	Einheit
Ungestörte Erdreichtemperatur	$\bar{\vartheta}_{E,0}$	12,44	°C
Effektiver Bohrlochwiderstand	$R_{b,eff}$	0,057	(m·K)/W

Konzept für die Betriebsüberwachung

Da die Planung des EWS-Feldes und des zugehörigen Kalten Nahwärmenetzes Hochvogelstraße Biberach zu Beginn des Vorhabens bereits abgeschlossen war (vorgelagerte wissenschaftliche Begleitung durch die HBC), wurde hinsichtlich der thermischen und energetischen Überwachung des EWS-Feldes auf das im Vorfeld festgelegte Messkonzept zurückgegriffen. Zu Projektbeginn war das Messkonzept vom Betreiber des Kalten Nahwärmenetzes wie folgt umgesetzt:

- Außentemperaturerfassung und Raumtemperaturfühler in der Technikzentrale
- Ein und Austrittstemperaturmessung am Sondenfeld
- Ein und Austrittstemperaturmessung an jedem der beiden Stränge
- thermische Energiezählung an beiden Strängen mit Datenaufzeichnung auch von Leistung, Volumenstrom und Ein- und Austrittstemperaturen neben der Wärme und Kälte
- Druckdifferenzmessung am Sondenfeld und an den beiden Strängen
- Erfassung des Betriebssignals der Netzpumpen
- Temperaturmessung über die Sondenlänge an zwei mit je 10 Temperaturfühlern im Abstand von 20 Metern bestückten Sonden (Messtiefe 20m bis 200m).

Die Aufzeichnung der Daten erfolgt in 5-Minutenintervallen durch die Leittechnik, die die Daten in Tagesdateien abspeichert. Die Zusammenführung der Tagesdateien und die Prüfung der Datenlage wurde mit der Open-Source-Software KNIME Analytik Plattform¹ umgesetzt, in der auch die weitere Datenauswertung und Datenaufbereitung vorgenommen wurde. Die Überprüfung der Daten auf Vollständigkeit und Plausibilität ergab:

- (1) Mit einem Bypass können das Sondenfeld und die Technikzentrale vom Netz getrennt werden. Dann erfolgt die Versorgung der Wärmepumpenanlagen durch das als Kollektor wirkende Netz. Das Betriebssignal zum Status des Bypasses (Auf/Zu) war zunächst nicht aufgeschaltet. Die Aufschaltung wurde seitens der HBC veranlasst und am

¹ <https://www.knime.com/>

28.02.20218 von der ausführenden Firma der Automatisierung der Technikzentrale umgesetzt.

- (2) Eine Erstausswertung der an den beiden Sonden gemessenen Temperaturen ergab durchweg zu hohe, nicht plausible Temperaturwerte. Hierzu wurde festgestellt, dass die Temperaturmessungen an den Sonden in 2-Leiter-Schaltung anstelle in 4-Leiter-Schaltung ausgeführt wurden, so dass ein signifikanter Einfluss des Leitungswiderstandes auf die Messung vorliegt. Zusammen mit der Automatisierungsfirma wurde über Kabellisten eine Messwertkorrektur erarbeitet, die seit dem 13.03.2018 direkt in der Leittechnik vor Ort vorgenommen wird. Die Korrektur der Datenwerte vor diesem Zeitpunkt erfolgt bei der Datenaufbereitung durch die HBC.
- (3) Ein Datenpunkt für die Druckdifferenz am Sondenfeld ist in der Datenaufzeichnung vorhanden, die Messung selbst wurde hardwaretechnisch aber nicht umgesetzt.

Für die Betriebsüberwachung am Standort wurden Auswertungen der Aus- und Eintrittstemperatur und der Fluidmitteltemperatur am Sondenfeld sowie der Temperaturentwicklung an den Sonden mit Temperaturfühlern in der Softwareumgebung von KNIME umgesetzt. Aufgrund der Ungenauigkeit der Temperaturmessungen an den Messsonden durch die 2-Leiter-Schaltung wurde von einer Auswertung der absolut gemessenen Temperaturen an den Sonden Abstand genommen. Berechnet wurde je Zeitschritt stattdessen für jeden Messfühler die Temperaturänderung gegenüber einer noch zu Anfang der Datenreihe ungestörten Anfangstemperatur, die zugehörig zum Messfühler ermittelt wurde. Die Temperaturänderungen der Fühler wurden über die Sondenlänge gemittelt. Das Ergebnis zum Verlauf der Temperaturänderung an den beiden Sonden über den Auswertzeitraum zeigt die folgende Abbildung 3.

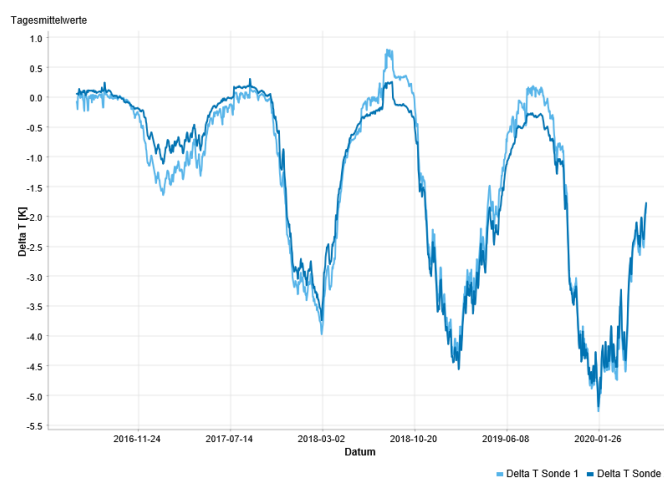


Abbildung 3: Zeitlicher Verlauf der Temperaturänderungen an den beiden mit Temperaturfühlern bestückten Sonden im Sondenfeld

Das erarbeitete Konzept der Betriebsüberwachung und vergleichenden Bewertung von Betriebsergebnissen beruht auf einer Untergliederung der Zeitreihen in Jahreszyklen. Diese erfolgt anhand des Verlaufs der Temperaturspreizung, die im Wechsel von einer Kühl- zu einer Heizperiode bzw. von einer Heiz- zu einer Kühlperiode einen Nulldurchgang aufweist, was anhand des Diagramms in Abbildung 4 für die ersten vier Jahreszyklen des Betriebs des Kalten Nahwärmenetzes dargestellt ist.

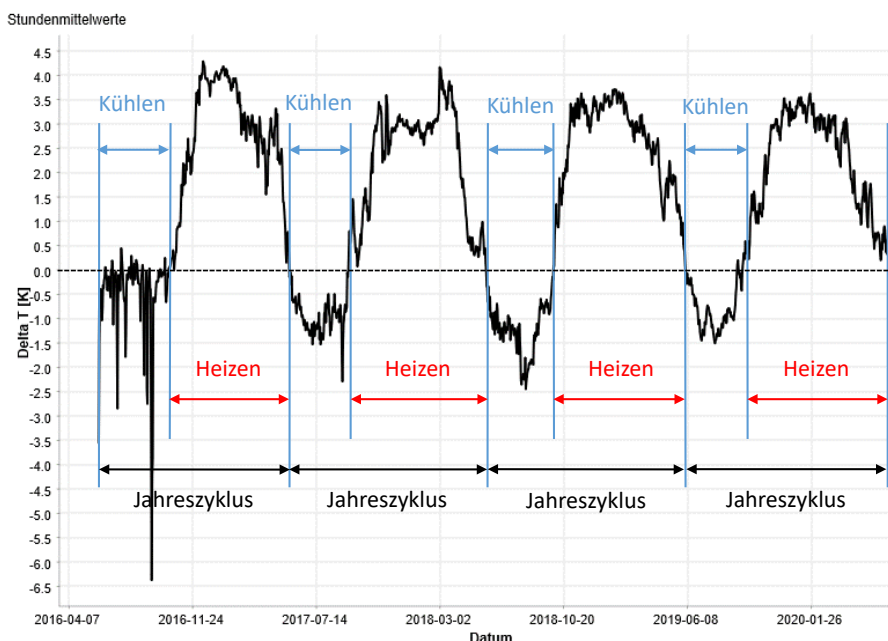


Abbildung 4: Zeitlicher Verlauf der Spreizung zwischen Sondenein- und Sondenaustrittstemperatur mit Identifikation der Wechsel zwischen Kühl- und Heiz- bzw. Heiz- und Kühlperioden anhand des Nulldurchgangs der Kurve sowie der Jahreszyklen

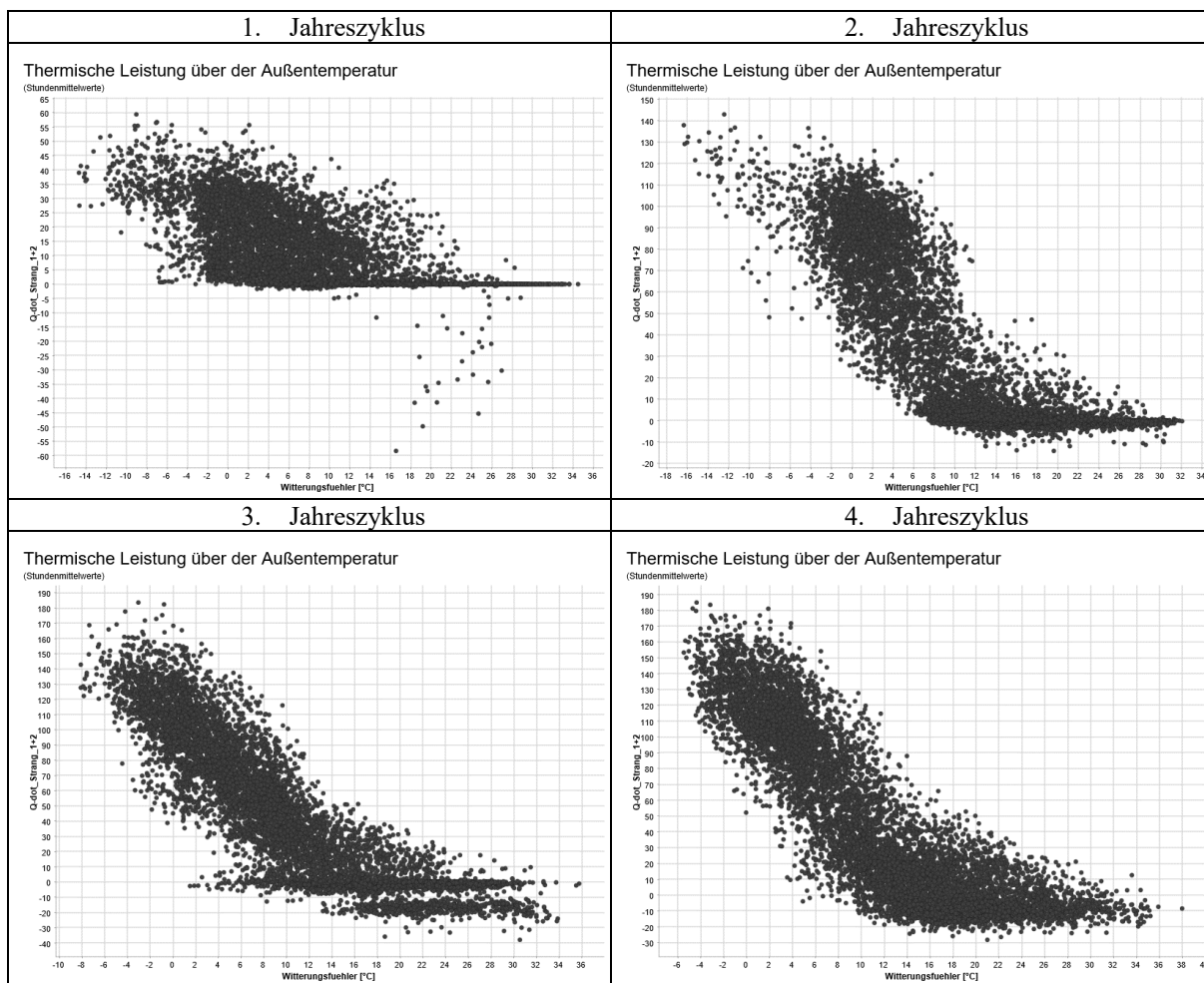
Mit der Inbetriebnahmephase zum Sommerbeginn 2016 beginnt ein Jahreszyklus jeweils mit einer Kühlperiode. Die erste Kühlperiode war deutlich von der Inbetriebnahme gekennzeichnet, was am schwankenden Verlauf der Spreizung zu Beginn der Zeitreihe zu erkennen ist. Die im Auswertzeitraum identifizierten Jahreszyklen sind in der folgenden Tabelle festgehalten.

Tabelle 3: Anfangs und Enddaten der Kühl- und Heizperioden und Jahreszyklen im Auswertzeitraum

01.06.16 - 10.10.16	Wärmeeintrag	1. Jahreszyklus 2016/17
10.10.16 - 24.05.17	Wärmeentzug	
24.05.17 - 09.09.17	Wärmeeintrag	2. Jahreszyklus 2017/18
09.09.17 - 27.05.18	Wärmeentzug	
27.05.18 - 30.09.18	Wärmeeintrag	3. Jahreszyklus 2018/19
30.09.18 - 04.06.19	Wärmeentzug	
04.06.19 - 19.09.19	Wärmeeintrag	4. Jahreszyklus 2019/20
19.09.19 - 16.06.20	Wärmeentzug	

In der folgenden Diagrammtabelle sind als Beispiel für einen Vergleich von Betriebsdaten zu den vier ausgewerteten Jahreszyklen Scatterplots einander gegenübergestellt, in denen die Werte der thermischen Stundenleistung am Sondenfeld über der Außentemperatur aufgetragen sind. Der Wärmeentzug ist hier positiv und der Wärmeeintrag negativ dargestellt.

Tabelle 4: Diagrammtabelle mit Scatterplots zur thermischen Entzugs- und Eintragsleistung aus bzw. in das Sondenfeld aufgetragen über der zugeordneten Außentemperatur für vier ausgewertete Jahreszyklen (jeweils Stundenmittelwerte)



Ziel solcher vergleichenden Auswertungen ist es, in einem kontinuierlichen betriebsbegleitenden Monitoring Unterschiede und Abweichungen im Betriebsergebnis im Sinne einer Betriebssüberwachung festzustellen und nach deren Ursachen zu forschen oder aber Änderungen im Betriebsregime auf ihren Erfolg hin zu überprüfen.

Der Betrachtungszeitraum in diesem Projekt stellt insofern eine Besonderheit dar, da er die Inbetriebnahme und den sukzessiven Anschluss der Häuser und den sukzessiven Bezug der Mehrfamilienhäuser beinhaltet. Das Diagramm in Abbildung 5 zeigt den zeitlichen Verlauf der thermischen Leistung am Sondenfeld. Der Zuwachs der thermischen Leistung durch den Zuwachs an Hausanschlüssen ist deutlich zu erkennen.

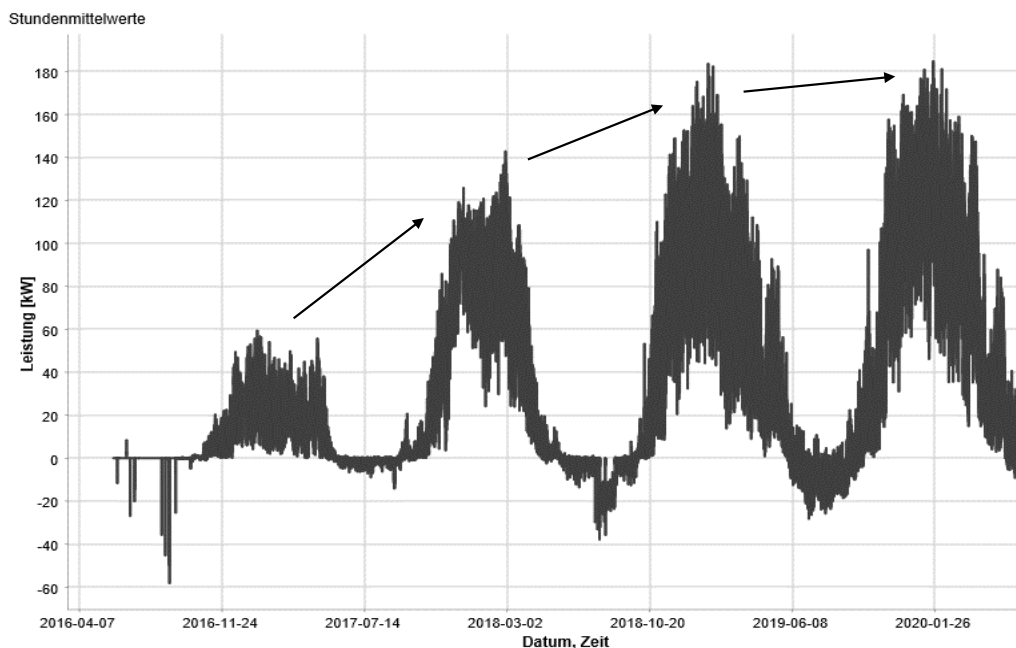


Abbildung 5: Zeitlicher Verlauf der thermischen Leistung am Sondenfeld mit Verdeutlichung des Leistungs-zuwachses durch die zunehmende Zahl an Hausanschlüssen (jeweils Stundenmittelwerte)

Der Ausbau und Bezug der Häuser und Wohnungen war im Herbst 2019 abgeschlossen, so dass ab dem 4. ausgewerteten Jahreszyklus 2019/20 mit einem betriebsbegleitenden Monitoring auf der Basis einer vergleichenden Bewertung von grundsätzlich vergleichbaren Betriebsergebnissen begonnen werden kann.

Der Zubau der thermischen Entzugsleistung spiegelt sich entsprechend auch in der Entwicklung der Jahresentzugsenergie wider, was im Balkendiagramm in Abbildung 6 anhand der rot dargestellten Entzugsenergie für die Jahreszyklen zu erkennen ist.

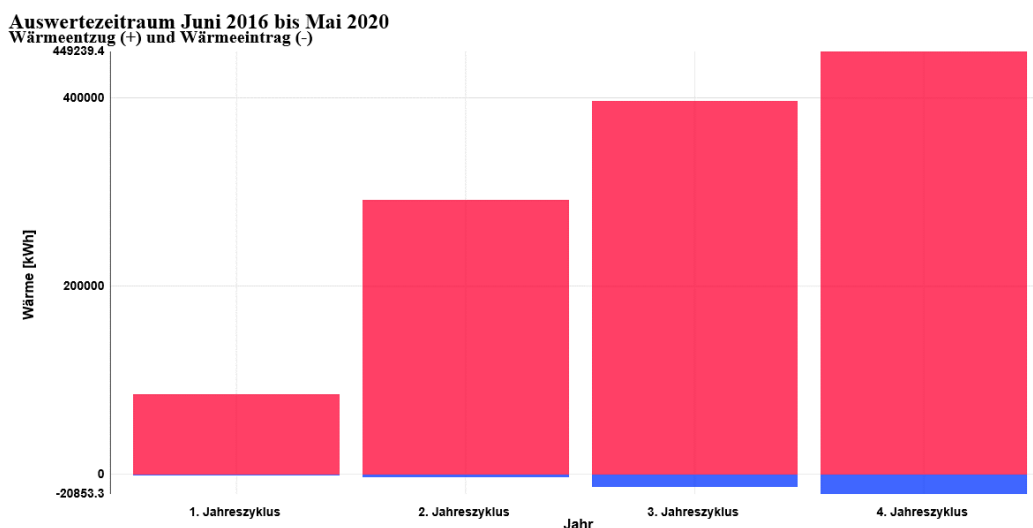


Abbildung 6: Balkendiagramm zum Wärmeentzug und Wärmeeintrag in den vier ausgewerteten Jahreszyklen

Ersichtlich wird im Diagramm auch, dass der Wärmeeintrag in das Netz untergeordnet ist. Der Wärmeeintrag in das Sondenfeld rührt derzeit kaum aus dem Umstand her, dass Gebäude geothermisch gekühlt werden, sondern aus dem Umstand, dass die Erwärmung der Sole durch das Erdreich im Sommer in den Anbindeleitungen und den Netzleitungen größer ist, als die Abkühlung durch den Entzug durch die sommerliche Warmwasserbereitung. Dies hat bei einem versuchsweisen längeren manuellen Abschalten der Netzpumpen durch den Netzbetreiber im Sommer des Jahres 2018 dazu geführt, dass die Sole sich im Netz übermäßig erwärmte und einzelne Wärmepumpen aufgrund einer zu hohen Quelltemperatur auf Störung gegangen sind. Das Netz musste vor einer Wiederinbetriebnahme der Wärmepumpen durch einen Sondenbetrieb erst abgekühlt werden. Grundsätzlich wäre eine Regeneration durch eine regelmäßige, möglichst direkte geothermische Gebäudekühlung im Sommer und der damit verbundenen Erhöhung der Temperatur im Sondenfeld bei einem überwiegenden Wärmeentzug durch die Wohnnutzung im Gebiet wünschenswert und sollte entsprechend vom Betreiber beworben werden.

Im Nachgang zum Vorhaben erfolgt ein Transfer der Monitoringergebnisse und gewonnenen Erkenntnisse an den Betreiber des Kalten-Nahwärmenetzes, welche dieser sowohl für den weiteren Betrieb der Anlage Hochvogelstraße Biberach als auch für künftige Vorhaben innovativer Wärmeversorgungen nutzen möchte.

Modellierung und thermisches Monitoring des Sondenfeldes

Da das KNW-Projekt in Biberach zu Projektbeginn bereits umgesetzt war, wurden für das thermische Monitoring des Sondenfeldes modellbasierten Auswertung und Bewertungen der Temperaturentwicklung im Sondenfeld mit den folgenden Ansätzen durchgeführt:

1. Berechnungen mit der Software EED² auf Basis von gemessenen Leistungs- und gemessenen, klimabereinigten (d. h. jahreskonstanten) Energiedaten. Da EED lediglich ein repräsentatives Jahr für die Erdreichbelastung (Wärmeentzug und/oder Eintrag) heranzieht und anschließend hiermit die Temperaturänderung über mehrere Jahre hinweg ermittelt, wurden die klimabereinigten Messdaten der letzten Messperiode mit nahezu Vollausbau der Wärmeabnehmer herangezogen.
2. Simulationen auf Basis des Superpositionsprinzips mit dimensionslosen Temperaturantworten (*g-functions*) mit über mehrere Jahre gemessenen, d. h. jahresweise variablen

² <https://buildingphysics.com/eed-2/>

Leistungs- und Energiedaten zum Vergleich mit den gemessenen Temperaturänderungen (vgl. Abbildung 3). Damit können die Temperaturreaktionen auf die tatsächlichen, von Jahr zu Jahr schwankenden Lastprofile berechnet werden. Darüber hinaus ist die Methode um eine variable, vom tatsächlichen Volumenstrom abhängige Berechnung und Berücksichtigung des Bohrlochwiderstands erweitert worden.

Aufbereitung der gemessenen Leistungs- und Energiedaten

Zur Verwendung in den Simulationen des EWS-Feldes wurden aus den Messdaten Monatswerte des Wärmeentzugs und des Wärmeeintrags sowie die jeweiligen monatlichen Spitzenlasten mit der zugehörigen Dauer extrahiert. Hierbei wurden Monate gleicher, mittlerer Länge, d. h. von 730 h/mon berücksichtigt. Zur Bestimmung der Spitzenlasten wurden je Monat die maximalen mittleren Stundenleistungen für den Wärmeentzug und den Wärmeeintrag bestimmt. Um die effektive Dauer der Spitzenlasten zu bestimmen, wurden gleitende Summen über 24 Stunden für den Wärmeentzug und den Wärmeeintrag gebildet und je Monat das Maximum dazu als maximale Tagesenergiewerte ermittelt. Diese geteilt durch die zugehörige maximale Leistung ergibt dann die Dauer der Spitzenlast für die Simulationen.

Für die Simulationsberechnungen mit EED wurden klimabereinigte Wärmeentzugswerte für den betrachteten Jahreszeitraum von April 2019 bis März 2020 verwendet. Die Klimabereinigung erfolgte mittels monatlicher Gradtagzahlen für den Standort Biberach, basierend auf einer Heizgrenze von 12 °C und einer Gebäudeinnentemperatur von 20 °C. Für das langjährige Mittel wurden die monatlichen Gradtage von Juni 2002 bis März 2020 berechnet und Mittelwerte je Monat gebildet, so dass sich langjährige Monatsmittelwerte ergeben. Der Bezug auf die nähere Vergangenheit einschließlich des Betrachtungsraums wurde gewählt, um den bereits stattgefundenen Klimawandel zu berücksichtigen.

Ergebnisse der Berechnungen mit EED

Die Simulationsberechnung mit EED mit Monatswerten der gemessenen Leistungen und der gemessenen, klimabereinigten (d. h. jahreskonstanten) Energiedaten dient dem Vergleich mit der EED-Simulation aus der Planung auf Grundlage der ursprünglichen Planungsdaten (Tabelle 4) und der getroffenen Annahmen zu Verteilung des Jahresheizwärmebedarfs (Tabelle 5).

Tabelle 4: Planungsdaten für die Auslegung des EWS-Feldes

Beschreibung	Formelzeichen	Wert	Einheit
Ungestörte Erdreichtemperatur	$\bar{\vartheta}_{E,0}$	12,66	°C
Effektive Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs	λ_E	2,53	W/(m·K)
Geschätzte Volumetrische Wärmekapazität des Erdreichs	c_v	2,2	MJ/(m ³ ·K)
Effektiver Bohrlochwiderstand	$R_{b,eff}$	0,07	(m·K)/W
Jahresheizwärmebedarf	Q_H	570.000	kWh/a
Jahresarbeitszahl	JAZ	4,4	

Tabelle 5: Annahme der prozentualen Verteilung des Jahresheizwärmebedarfs aus der Planung

Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
14,5	16,6	10,1	8,7	5,6	3,4	2,8	2,5	4,3	7,1	10,9	13,5

Abbildung 7 zeigt den Vergleich zwischen den EED-Simulationen mit den gemessenen klimabereinigten Messdaten (nur Heizfall u. kombiniert Heiz-Kühl-Fall) und auf Grundlage der Planungsdaten für den Betrachtungszeitraum von 25 Jahren. Bei der Simulation mit den gemessenen Daten ergibt sich eine deutlich größere Temperaturabsenkung (plus ca. 6 K), was teilweise darauf zurückzuführen ist, dass bei der Planungsauslegung keine Spitzenlast angesetzt wurde.

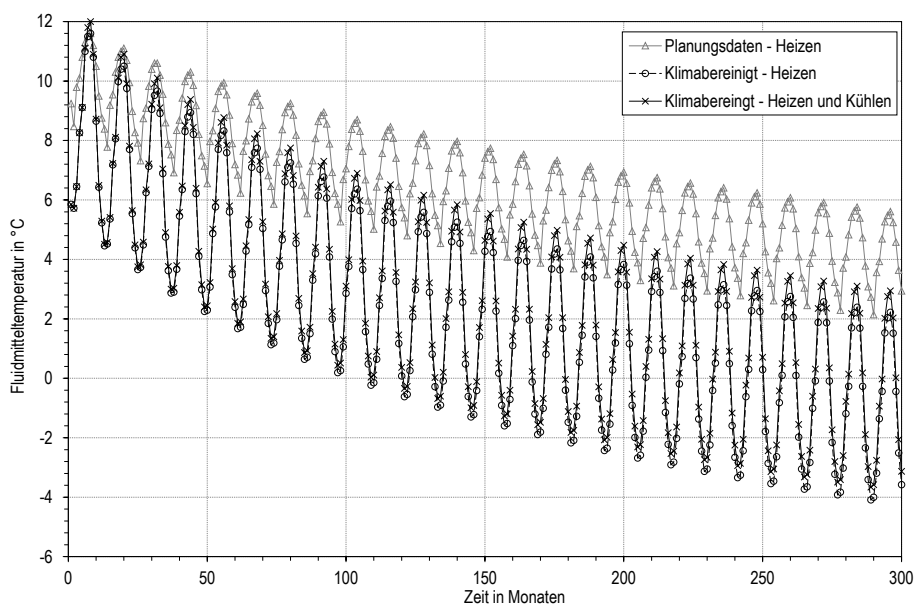


Abbildung 7: Vergleich der EED-Simulationen mit klimabereinigten Messdaten (Grundlast und Spitzenlast) und auf Grundlage der Planungsdaten

Der analoge Vergleich nur mit Ansatz der Grundlast auch bei der EED-Simulation mit den klimabereinigten Messdaten ergibt allerdings einen nur etwas geringeren Unterschied zwischen den berechneten Temperaturabsenkungen von ca. 5 K (Abbildung 8). In der Realität sind zwar

günstigere Temperaturen zu erwarten aufgrund des Einflusses der Anbindeleitungen sowie des Grundwassers am Standort, trotzdem ist eine weitere Überwachung erforderlich.

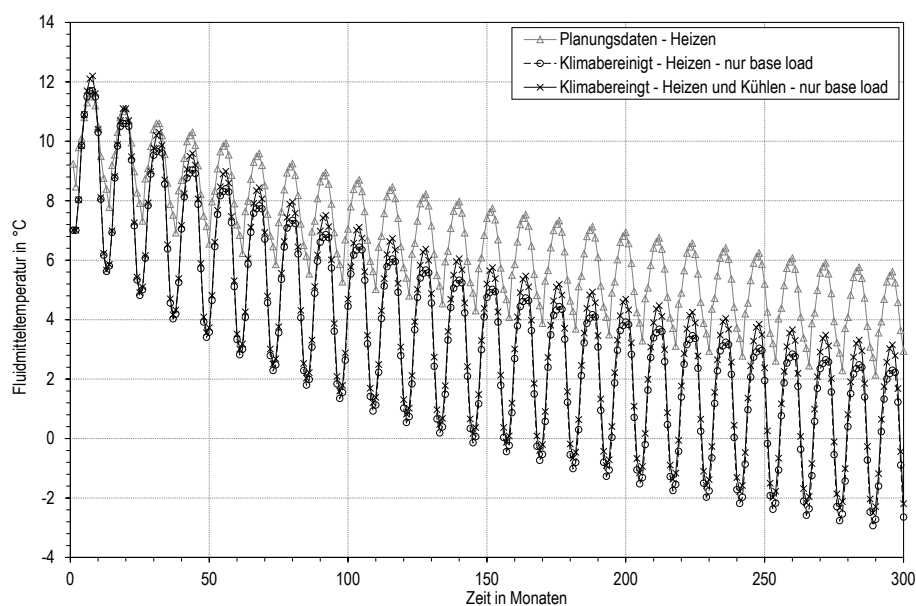


Abbildung 8: Vergleich der EED-Simulationen mit klimabereinigten Messdaten (nur Grundlast) und auf Grundlage der Planungsdaten

Modellgestützte Auswertung der thermischen Reaktion des Sondenfelds

Der Vergleich der aus den Messdaten ermittelten Fluidmitteltemperatur mit den Ergebnissen der Simulationsberechnungen auf Basis des Superpositionsprinzips mit dimensionslosen Temperaturantworten (*g-functions*) ist in Abbildung 9 dargestellt. Bei den Messdaten handelt es sich um Tagesmittelwerte, bei den Simulationsergebnissen um Monatswerte. Dargestellt sind die Berechnungsergebnisse für drei unterschiedene Lastfälle: absolute Fluidmitteltemperatur als Reaktion auf den resultierenden Wärmeentzug oder -eintrag im Monatsmittel (Grundlast, Vierecke schwarz), die absolute Fluidmitteltemperatur als Reaktion auf den gesamten Wärmeentzug (Spitzenlast Heizfall – Raute rot) und die absolute Fluidmitteltemperatur als Reaktion auf den gesamten Wärmeeintrag (Spitzenlast Kühlfall – Dreieck blau). Die Simulationsergebnisse basieren in Abbildung 9 noch auf einem festen Bohrlochwiderstandswert $R_b = 0,057 \text{ m}\cdot\text{K}/\text{W}$, welcher im TRT ermittelt und auf die geplanten Betriebsbedingungen umgerechnet wurde. Die ersten Jahre zeigen noch deutliche Abweichungen, was auf den geringen tatsächlichen Volumenströmen gegenüber der Auslegung zurückgeführt werden konnte. Hierdurch ist der angesetzte Bohrlochwiderstand nicht mehr gültig, sondern wesentlich größer, da die Erdwärmesonden laminar durchströmt werden.

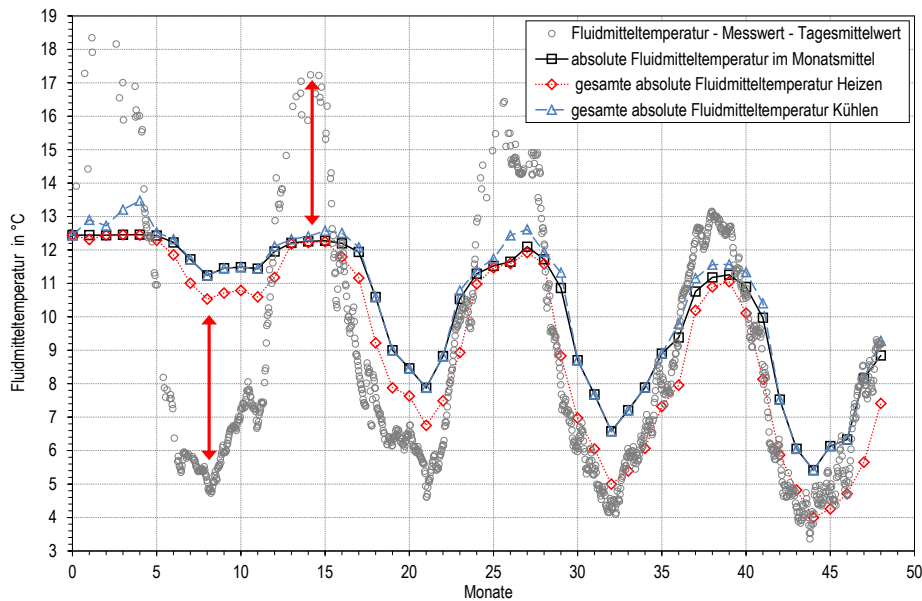


Abbildung 9: Vergleich der gemessenen und der mit festem Bohrlochwiderstandswert simulierten Fluidmitteltemperaturen

Ausgehend davon wurde der Bohrlochwiderstand im Simulationsmodell für jeden Berechnungszeitpunkt auf die tatsächlichen Betriebsbedingungen umgerechnet. Das Ergebnis des neuen Vergleichs von aus Messwerten ermittelten Fluidmitteltemperaturen und mit auf Basis eines volumenstromabhängigen Bohrlochwiderstands simulierten Fluidmitteltemperaturen ist in Abbildung 10 dargestellt. Bei dieser Simulation sind die Lastspitzen für Heizen und Kühlen nicht berücksichtigt, weshalb die simulierten Temperaturreaktionen in der Amplitude etwas schwächer ausfallen als die gemessenen. Für eine Simulation der Temperaturreaktionen auf die Spitzenlasten sind eine weitere Auswertung der Messdaten (momentane Volumenströme) sowie eine entsprechende Anpassung des implementierten Bohrloch-Widerstandsmodells erforderlich, was im Projektzeitraum nicht mehr fertiggestellt werden konnte.

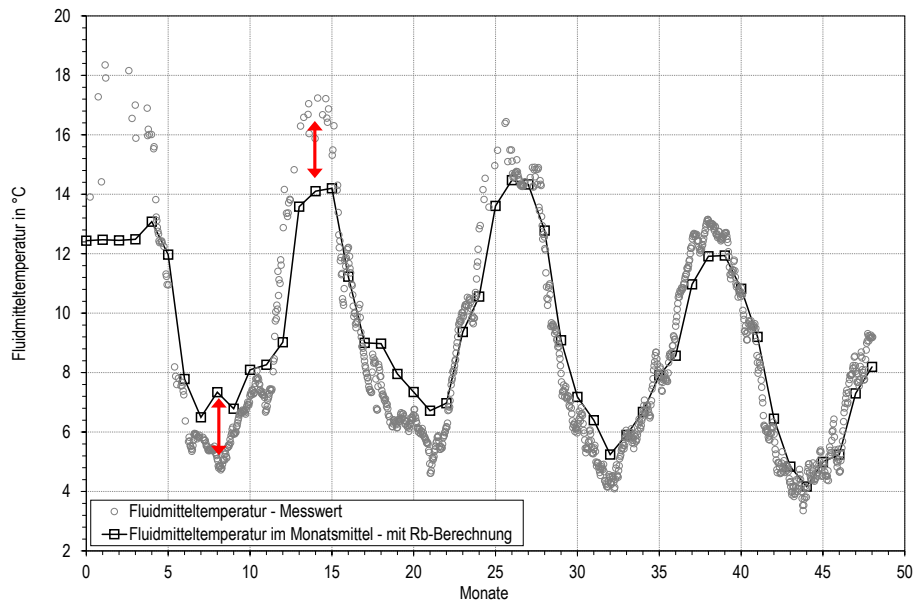


Abbildung 10: Vergleich der gemessenen und der mit volumenstromabhängigen Bohrlochwiderstandswerten simulierten Fluidmitteltemperaturen – Simulation ohne Lastspitzen Heizen und Kühlen

Für einen Vergleich mit den an den beiden Messsonden ermittelten Temperaturänderungen wurde eine Simulation der Temperaturänderung am Bohrlochrand durchgeführt. Bei diesem Ansatz kann im Simulationsmodell weitestgehend auf die Berechnung des Bohrlochwiderstandes verzichtet werden. Der Vergleich in Abbildung 11 zeigt, dass die Simulationsergebnisse mit den aus den Messdaten ermittelten Temperaturänderungen im grundsätzlichen Verlauf übereinstimmen, aber bei steigender Belastung des Sondenfeldes über mehrere Jahre hinweg die Temperaturreaktion der Simulationsberechnung gegenüber der tatsächlichen Temperaturreaktion zunehmend größer wird. Die geringere tatsächliche Abkühlung kann z. T. auf die vorhandene, sich positiv auswirkende Grundwasserströmung in einer Erdreichschicht zurückgeführt werden. Darüber hinaus ist der Effekt eines zusätzlichen Wärmeentzugs über die Anbindeleitungen bisher im Simulationsmodell nicht berücksichtigt, was die Abkühlung des Sondenfeldes ebenfalls reduziert.

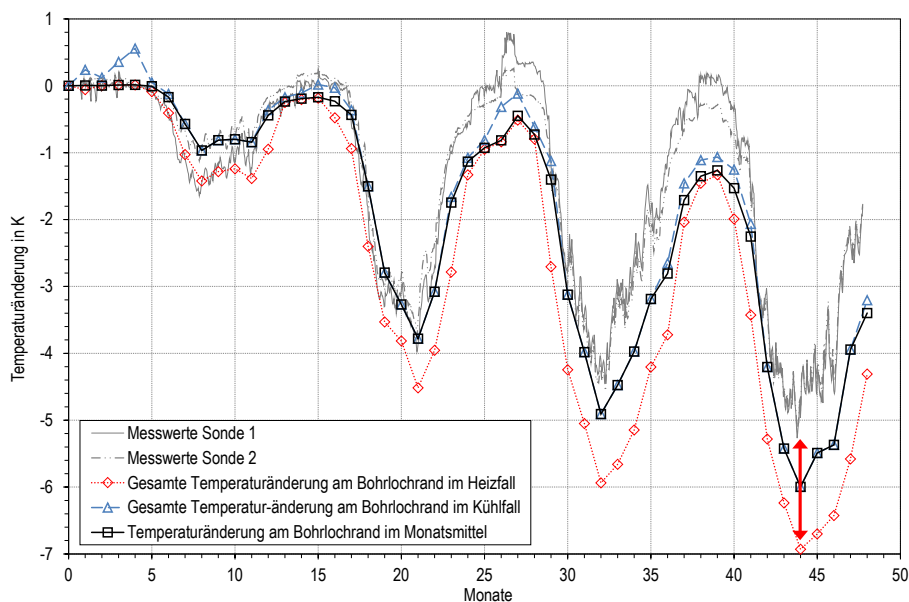


Abbildung 11: Vergleich der Temperaturänderung am Bohrlochrand zwischen Simulation und Messdaten

Modellierungen und Simulationen der Hydraulik des Kalten Nahwärmenetzes Biberach

Um die Hydraulik Kalter Nahwärmenetze nicht nur in Bezug auf eine planerische Auslegung, sondern auch in der dynamischen Betriebsführung (Funktion, Effizienz, Wirtschaftlichkeit) bewerten zu können, wurden Prototypen entsprechender hydraulischer Simulationsmodelle aufgebaut und auf das Beispiel des KNW-Netzes in der Hochvogelstraße in Biberach exemplarisch angewandt. Damit wurde der Grundstein für die Entwicklung künftiger, detaillierterer Planungs- und Bewertungswerkzeuge gelegt.

Für die hydraulische Modellierung wurden zwei unterschiedliche Ansätze verfolgt:

1. Eigene Programmierung in der Programmiersprache Python als Open-Source-Programm. Grundlage der Modellbildung ist die Graphentheorie, mithilfe derer ein nichtlineares Gleichungssystem des betrachteten Netzes erstellt wird. Aus diesem werden durch numerische Lösung die resultierenden Volumenströme und Drücke an den Knoten des Netzes bestimmt.
2. Modellierung mit MATLAB®/Simulink® und der Toolbox Simscape™ als kommerzielle, lizenz- und kostenpflichtige Lösung. Hierbei wird auf vorhandene, vordefinierte Blöcke zurückgegriffen, welche einzelne Bauteile und Komponenten des Netzes mit Teilmodellen abbilden. Nach Definition der Verknüpfungen der Bauteile und Komponenten zum hydraulischen Netz wird das resultierende Gleichungssysteme automatisch erstellt.

Generell wird bei beiden Ansätzen ein mathematisches Netzwerkmodell aufgestellt, welches numerisch gelöst werden kann. Ergebnisse der Simulationen mit diesen Modellen sind Druckverteilungen und Druckverluste, Volumenströme sowie beispielsweise auch die Pumpenergie für beliebige Betriebszustände, die für eine Bewertung von Betriebszuständen des Netzes benötigt werden.

Ergebnisse - Modellvergleich

Erste Simulationen des an der HBC in Python programmierten Modells funktionierten zuverlässig und liefern plausible Ergebnisse. Da keine hinreichenden hydraulischen Messdaten vom KNW-Netz in Biberach vorliegen, erfolgte ein validierender Vergleich mit dem MATLAB®/Simulink®/Simscape™-Modell anhand eines kleinen, exemplarischen Netzausschnittes. Die Übereinstimmung zwischen beiden Modellen ist bei turbulenten Strömungssituationen mit großen Reynolds-Zahlen gut, während bei kleinen Reynolds-Zahlen, insbesondere im laminaren Bereich, zunächst noch Abweichungen in den berechneten hydraulischen Widerständen im Bereich von 15 - 25 % auftraten. Diese waren v. a. bedingt in den jeweils verwendeten Ansätzen für Rohrleitungswiderstände, was durch entsprechenden Abgleich behebbar ist.

Ergebnisse – Betriebsvarianten und Bewertung mittels Kennzahlen

Um verschiedene Betriebsvarianten eines KNW-Netzes von der in Biberach eingesetzten Bauart (Sondenfeld und Verteilnetz mit einer Bypassstrecke verbunden) allgemein bewerten zu können, wurde eine Parameterstudie an einem Modellnetz durchgeführt und die Ergebnisse mittels eigens definierter dimensionsloser Kennzahlen dargestellt. Die dimensionslosen Kennzahlen berücksichtigen die Verhältnisse der Druckverluste von Sondenfeld und Verteilnetz (a_k), der Betriebsdauern der beiden Teilnetze (a_t) sowie den Nutzungsgrad der zentralen und dezentralen Pumpen (a_n).

In der folgenden Grafik Abbildung 12 ist exemplarisch ein Ergebnis dieser Parameterstudie für ein Nutzungsgradverhältnis (a_n) von 1,5 dargestellt. Dies entspricht der Annahme, dass eine größere zentrale Pumpe einen höheren Nutzungsgrad als viele kleine dezentrale Pumpen erreicht (bspw. 45% zentral vs. 30% dezentral). Die Farbräume geben die Zielgröße, also das Verhältnis des Stromverbrauchs der beiden Varianten (nur zentrale Pumpen vs. zentrale Pumpe für Sondenfeld und dezentrale Pumpen für das Verteilnetz) an. Bei Werten kleiner 1 ist die Kombination im Vorteil, bei Werten darüber die zentrale Lösung. Im vorliegenden Fall wäre

der Betrieb der Zentralpumpe alleine energetisch umso günstiger, je länger das Sondenfeld im Vergleich zum Verteilnetz in Betrieb ist.

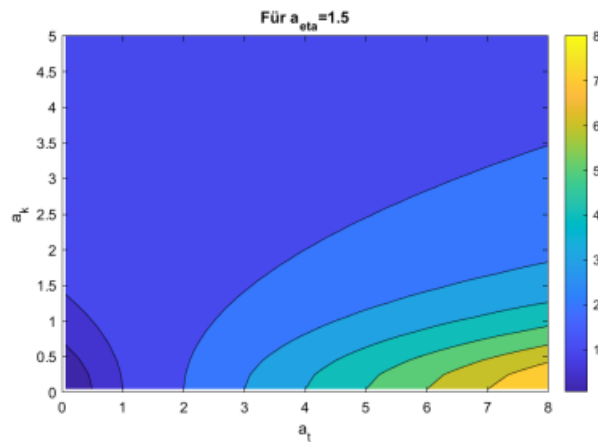


Abbildung 12: Beispiel-Ergebnis Parameterstudie zur Hydraulik

Eine zentrale Pumpe ist aus energetischer Sicht über weite Teile des möglichen Parameterbereichs gegenüber einer Kombination aus zentraler und dezentralen Pumpen im Vorteil. Darüber hinaus gehende Berechnungen zeigen, dass die Lösung mit ausschließlich dezentralen Pumpen, die im Betrieb immer auch das Sondenfeld durchströmen müssen, nur in Grenzfällen energetisch sinnvoll ist.

Aus gesamtwirtschaftlicher Sicht ist dagegen zu differenzieren. Der höheren Effizienz zentraler Umwälzpumpen steht der zusätzliche Investitions- und Unterhaltungsaufwand für eine zentrale Technik gegenüber, im vorliegenden Fall mit sogar eigener Technikzentrale. Außerdem hängt es vom Betreiberkonzept ab, wer die Energiekosten für den Betrieb der Umwälzpumpen trägt. Sind beispielsweise die dezentralen, wärmepumpenseitigen Umwälzpumpen im Eigentum der einzelnen Gebäudeeigentümer, ist deren Einsatz und Betrieb für den KNW-Netzbetreiber wirtschaftlicher als die Vorhaltung und der Betrieb einer zentralen Pumpenanlage.

Fazit und Ausblicke zur Kalten Nahwärme Hochvogelstraße Biberach

Die projektbezogenen Ergebnisse und Erkenntnisse zum Projekte Kalte Nahwärme Hochvogelstraße in Biberach lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die KNW-Anlage und KNW-Netz funktionieren technisch und in der Performance grundsätzlich gut im Rahmen der Erwartungen.
- Dies konnte mithilfe des im Vorhaben aufgesetzten Monitoring- und Auswertekonzepts anhand der Messungen und deren Analyse über 4 Jahresperioden gezeigt werden.
- Der Betrieb der EWS-Feldes und daraus resultierend die energetische Performance sind allerdings noch durch einen gezielteren und verstärkten Wärmeeintrag (z. B. Begünstigung von direkter geothermischer Kühlung der Gebäude im Sommer) steigerbar.
- Zur vertieften Auswertung wurde eine thermisch-energetische Modellierung entwickelt, die auf das reale, jahresvariable Lastprofil zurückgreift.
- Weiterhin wurde die Modellbildung für hydraulische Simulationen erfolgreich gestartet und prototypisch umgesetzt.
- Die KNW-Anlage in Biberach ist ein Prototyp in der Region, künftige derartige Anlagen können deshalb weniger aufwändig und günstiger gestaltet werden. Dazu gehört auch das Betreiberkonzept.

Ausblicke:

- Das aufgesetzte Monitoring kann vom Betreiber weitergeführt werden und ist so von nachhaltigem Nutzen. Im Hinblick auf die weitere Temperaturentwicklung im EWS-Feld ist diese auch erforderlich, um langfristig unzulässige Temperaturen zu vermeiden.
- Die Erkenntnisse und Ergebnisse wurden und werden von der HBC den Projektbeteiligten sowie im Rahmen der Energie- und Klimaschutzaktivitäten der Stadt Biberach im Detail vermittelt und mit diesen diskutiert. Die Projektergebnisse fließen damit direkt in einen Praxistransfer ein.
- Aus wissenschaftlicher Sicht besteht weiterer Forschungsbedarf im Bereich der Modellentwicklung und Simulation (weitere Modellentwicklung und Einbindung volumensstrom-variabler Bohrlochwiderstands-Modelle, Weiterführung der Modellbildung, Simulation und Analysen zur Hydraulik) sowie bei der wissenschaftlichen Auswertung Begleitung und Weiterentwicklung einfacher, aber optimierter Betriebskonzepte auf verschiedenen Ebenen. Weiterhin ist eine genauere Einbeziehung des offenbar nicht vernachlässigbaren thermischen Effekts der Anbindeleitungen und des Verteilnetzes in die entsprechenden Planungswerkzeuge wünschenswert.

Weitere Demovorhaben

Hans-Rehn-Stift

Beim Hans-Rehn-Stift handelt es sich um eine 1977 erbaute Altenwohnanlage in Stuttgart-Rohr. Im Jahr 2007 erfolgte eine Sanierung der Technikzentrale. Neben einem Gas-BHKW und einem Gaskessel beinhaltet die Technikzentrale als innovative Elemente eine große thermische Solaranlage und eine Wärmepumpe, der abhängig von der Außenlufttemperatur die Außenluft oder ein Sondenfeld mit 20 Erdwärmesonden (Gesamtlänge ca. 2000 m) als Wärmequelle dient. Zusätzlich besteht die Möglichkeit einer Anhebung der Verdampfeintrittstemperatur in die Wärmepumpe durch die thermische Solaranlage. Geplant ist, das bestehende Gebäude abzureißen und durch Neubauten mit Wohnnutzung zu ersetzen. Die vorhandene Technikzentrale soll in das künftige Versorgungskonzept integriert werden.

Tabelle 6: Anlagendaten Hans-Rehn-Stift

Anlagendaten gemäß Schema:	
Erdwärmesondenfeld	20 Sonden, Gesamtlänge 1.990 m
Außenlufteinheit	ca. 130 kW
Thermische Solaranlage	304 m ²
Wärmepumpe	ca. 170 kW _{th}
Gas-BHKW	50 kW _{el} /100 kW _{th}
Gasspitzenlastkessel	560 kW _{th}
Speicher	Trinkwarmwasserspeicher 1,0 m ³ Pufferspeicher BHKW 2x 2,5 m ³ Pufferspeicher 100 m ³

Seitens des Instituts für Geotechnik (IGS) der Universität Stuttgart wurden dem IGE der HBC umfangreiche Mess- und Betriebsdaten aus dem zurückliegenden Betrieb der Technikzentrale von Mitte 2011 bis Ende 2014 zur Auswertung zur Verfügung gestellt. Erforderlich für eine Auswertung war es, die Vielzahl von einzelnen Monatsdateien je Betriebsbereich zusammenzuführen und ein umfangreiches Gesamtdatenmodell zu erstellen. Umgesetzt wurde dies mit der Open-Source-Software KNIME Analytik Plattform. Ziel der Auswertungen war es, die Funktionsweise der bestehenden Anlage anhand der Betriebsdaten nachzuvollziehen. Der Fokus lag dabei auf der Quellenseite der Wärmepumpe mit dem EWS-Feld, der Außenlufteinheit und der Temperaturanhebung am Verdampfeintritt der Wärmepumpe durch die thermische Solaranlage.

Die folgende Abbildung 13 zeigt als Beispiel in einem Scatterplot für den Jahreszeitraum 2013 die jeweils gemessenen Leistungen über der jeweils gemessenen Außentemperatur aufgetragen. Deutlich zu erkennen ist, dass die Außenlufteinheit (ALE) erst bei Außenlufttemperaturen über ca. 10 °C zum Einsatz kommt. Darunter dienen die Erdwärmesonden (EWS) als Quelle für die

Wärmepumpe. Die thermische Solaranlage wird über die ganze Außentemperaturbandbreite für eine Temperaturerhöhung am Verdampfereintritt genutzt.

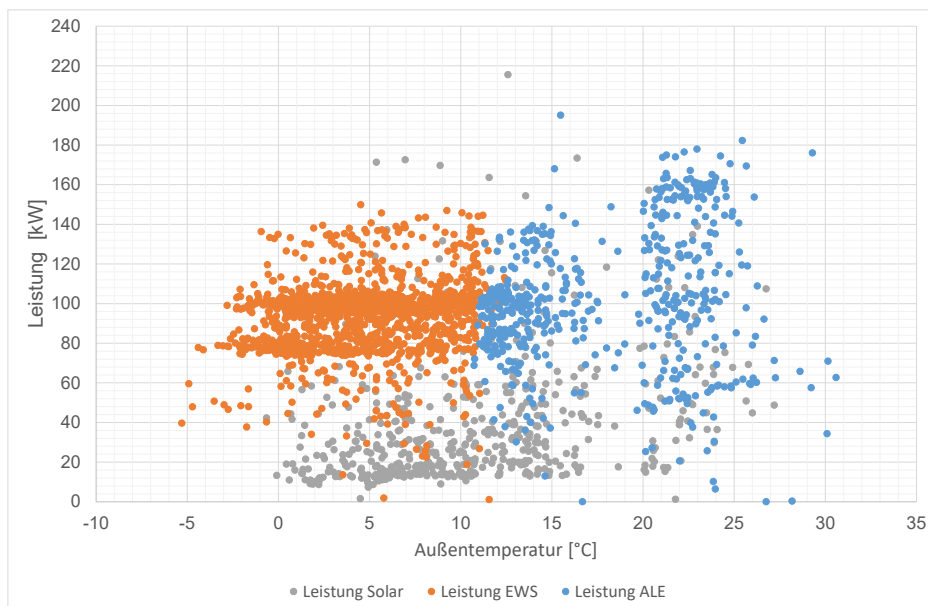


Abbildung 13: Thermische Leistungen auf der Quellenseite der Wärmepumpe aufgetragen über der Außentemperatur (Stundenmittelwerte)

Die aus den Auswertungen gewonnenen Informationen und Daten sowie ergänzend ein Lastprofil für ein typisches Wohngebäude wurden an den Projektpartner IGS übergeben. Das erstellte Lastprofil beruht auf der Methode der VDI 4655 [3] und der Gebäudetopologie für Deutschland des Instituts für Wohnen und Umwelt [4].

Bonner Bogen

Beim Projekt „Bonner Bogen“ handelt es sich um einen bestehenden Aquiferspeicher mit einer komplexen Energiezentrale. Neben der Versorgung eines Hotels mit Wärme- und Kälte sind weitere Gebäude und eine Rechenzentrums Kühlung an die Energiezentrale angeschlossen. Das Einzelprojekt „Bonner Bogen“ wurde erst nach Projektbeginn als Demonstrationsvorhaben in das Projekt GeoSpeicher.bw aufgenommen.

Tabelle 6: Anlagendaten Energiezentrale Bonner Bogen

Anlagendaten der Energiezentrale gemäß Anlagenschema	
2x Gas-Brennwertkessel	Heizleistung: je 1000 kW
Wärmepumpe	Kälteleistung: 625 kW Heizleistung: 919 kW
Rechenzentrums Kühlung durch Grundwasser	Kälteleistung: 260 kW (Auslegung Grundwasser Wärmetaucher)

Am IGE der HBC wurden zu diesem Demonstrationsvorhaben die folgenden Arbeiten durchgeführt:

- (1) Bewertung des bisherigen Betriebs anhand der vorliegenden Mess- und Ablesedaten
- (2) Analyse des bestehenden Anlagenkonzepts anhand von Bestandsunterlagen (Hydraulikschema, Funktionsbeschreibung etc.) und Ermittlung von Optimierungspotenzialen.

Ad (1): Aus der Dokumentation der Messdaten war nicht in jedem Fall eine eindeutige Zuordnung der von den Zählern erfassten Energieströme möglich, sodass eine Aufnahme der bestehenden Energiezählerstruktur vor Ort notwendig war. Hierbei zeigten sich Lücken und Unzulänglichkeiten im bestehenden Messkonzept. Die Aufstellung eines überarbeiteten Messkonzepts konnte in der Projektlaufzeit aus Ressourcengründen allerdings nicht mehr realisiert werden.

Für die Prüfung und Analyse der umfangreichen zur Verfügung gestellten Messdaten musste eine Vielzahl von Einzeldateien mit Messdaten aus den verschiedenen Betriebsbereichen in ein Gesamtdatenmodell zusammengeführt werden. Umgesetzt wurde dies mit der Open-Source-Software KNIME Analytik Plattform. Der Fokus der Auswertung lag auf der Wärmepumpenanlage. Nicht abschließend geklärt werden konnte, welche Stromverbraucher genau mit dem Stromzähler für die Wärmepumpenanlage erfasst werden. Es spricht vieles dafür, dass der gemessene Stromverbrauch für die Wärmepumpe auch den Strom der für den Wärmepumpenbetrieb notwendigen Umwälzpumpen enthält. Sicher nicht im Wärmepumpenstrom enthalten ist der Stromverbrauch der Grundwasserpumpen. Zwischen Grundwasser und WP-Verdampfer (Heizbetrieb) bzw. WP-Kondensator (Kühlbetrieb) befindet sich ein Wärmetauscher zur hydraulischen Trennung. Die Grundwasserförderpumpen sind separat geregelt. Die folgende Abbildung 14 zeigt die für Monatszeiträume auf Grundlage der Messdaten ermittelten Arbeitszahlen der Wärmepumpe über den gesamten Auswertezeitraum.

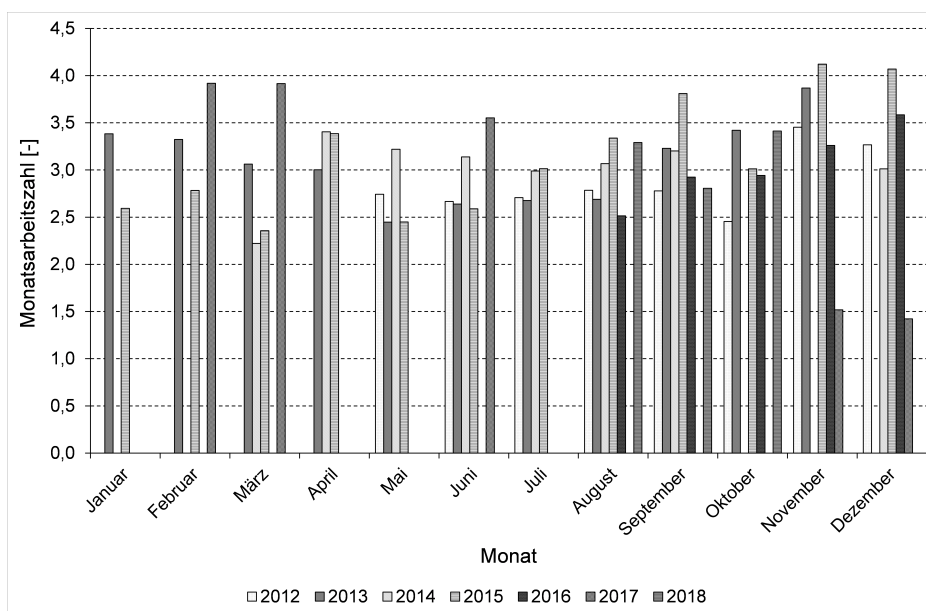


Abbildung 14: Aus den Messdaten ermittelte monatliche Arbeitszahlen für die den Auswertzeitraum von 2012 bis 2018

Es ist darauf hinzuweisen, dass der Auswertung nur die Tage zugrunde liegen, für die die Daten vollständig plausibilisiert werden konnten. In der Folge konnten nicht für jeden Monat Arbeitszahlen gebildet werden bzw. beruht die Monatsarbeitszahl teilweise nur auf wenigen auswertbaren Tagen eines Monats. Die folgende Abbildung 15 zeigt die ermittelten Jahresarbeitszahlen für den Auswertzeitraum. Hinter den Jahreszahlen ist in Klammern die Anzahl der auswertbaren Tage des Jahres angegeben.

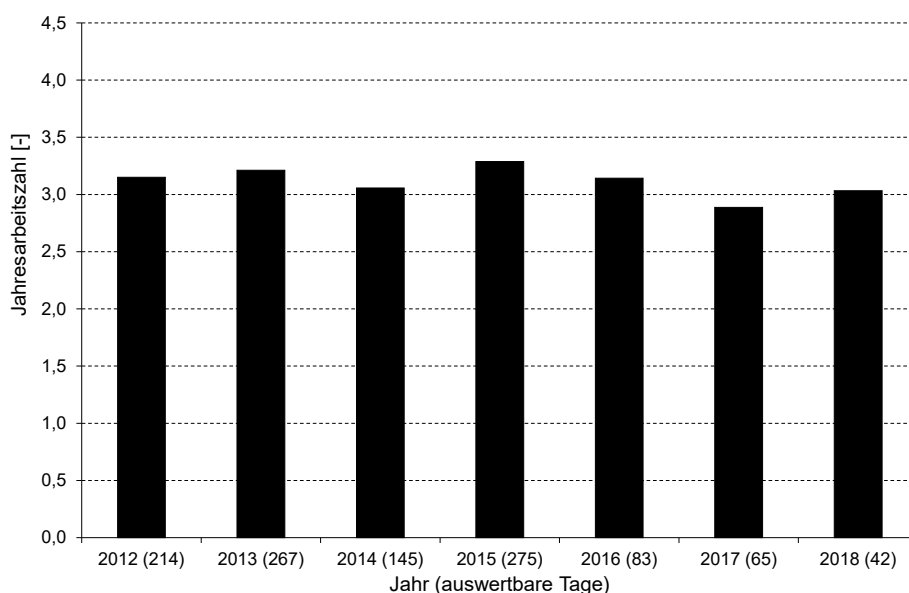


Abbildung 15: Jahresarbeitszahlen für die Jahre 2012 bis 2018

Trotz der teilweise unsicheren Datenlage kann die Aussage getroffen werden, dass die Wärmepumpenanlage mit einer Arbeitszahl über die betrachteten Jahre von knapp unter 3,2 keine hohe Effizienz aufweist.

Ad (2): Die Analyse des Anlagenkonzepts auf der Grundlage der vorliegenden Daten und der Anlagenaufnahme vor Ort ergab zusammengefasst folgende Feststellungen:

- Der Aquiferspeicher ist mit 6 Brunnen erschlossen, wobei jeweils drei Brunnen als Saugbrunnen und drei Brunnen als Schluckbrunnen fungieren. Die jahreszeitliche Umschaltung vom Winter- in den Sommerbetrieb und umgekehrt erfolgt anlagenzentral durch Umschaltung der Förderrichtung des Grundwassers, so dass die Brunnen ihre Funktion als Saug- bzw. Schluckbrunnen tauschen.
- Teile eines Rechenzentrums werden ganzjährig mit Grundwasser gekühlt. Die Abwärme des Rechenzentrums wird derzeit nicht direkt/anderweitig genutzt.
- Bei der zentralen Umschaltung vom Kühl- in den Heizbetrieb muss manuell auf eine eigentlich als Notkühlung für die Umluftkühlgeräte vorgesehene Schaltung zurückgegriffen werden. In dieser Betriebsweise liefert die Wärmepumpe Nutzkälte für die Kühlung an den Umluftkühlgeräten. Der Grund ist, dass nach der Umschaltung vom Kühl- in den Heizbetrieb Saug- und Schluckbrunnen ihre Funktion tauschen. Am jetzt Saugbrunnen wird durch den vorangegangenen Wärmeeintrag aus dem Kühlbetrieb jetzt erwärmtes Grundwasser gefördert. Das geförderte Grundwasser weist aufgrund der Umschaltung eine zu hohe Temperatur für die eigentlich gewollte direkte Grundwasserkühlung der Umluftkühlgeräte auf, was die maschinelle Kühlung durch die Wärmepumpe über den Notkühler erfordert. Die beschriebene manuelle Betriebsweise dürfte aus der Not heraus entstanden sein (fehlende Kühlung der Umluftkühlgerät nach Umschaltung), führt aber zu einem effizienten Wärmepumpenbetrieb, da die abgegebene Wärme der Wärmepumpe i. d. R. genutzt wird (gleichzeitige Wärme- und Kältenutzung).
- Von der zentralen Umschaltung vom Kühl- in den Heizbetrieb ist in gleicher Weise die Rechenzentrumskühlung betroffen, d. h. das Temperaturniveau der Kühlung wird bei der Umschaltung erhöht. Dies hat negative Auswirkungen auf die Effizienz der Kühlung.
- Die Feststellungen zur Umschaltung vom Kühl- in den Heizbetrieb zeigen, dass die unterschiedlichen gleichzeitig auftretenden Betriebszustände bei der Planung der zentralen Brunnenumschaltung nicht ausreichend bedacht wurden.

Ermittelte Optimierungspotenziale:

- Da zum Zeitpunkt des Termins vor Ort der Austausch der Wärmepumpe aufgrund eines Defekts anstand, wurde empfohlen, ein möglichst effizientes Gerät einzubauen. Dabei sollte auch die Effizienz der zur Wärmepumpenanlage gehörenden Umwälzpumpen überprüft werden.
- Anstelle der ganzjährigen Grundwasserkühlung des Rechenzentrums sollte die Abwärme soweit als möglich zur Deckung von Wärmebedarfen genutzt werden. Beispielsweise weist das von der Energiezentrale versorgte Hotel ganzjährige Wärmebedarfe auf, die gedeckt werden könnten.

Die an der Anlage Bonner Bogen durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass für komplexe Anlagen zunächst ein Monitoringkonzept und dann ein betriebsbegleitendes kontinuierliches Monitoring von der Inbetriebnahme an erforderlich ist. Die Auswirkung durch die zentrale Umschaltung der Brunnenanlage von einer zu einer anderen Betriebsweise wären frühzeitig aufgefallen und damit auch die Unzulänglichkeiten der Planung. Das aufgestellte Datenmodell und die gewonnenen Daten eines Monitorings lassen sich zur Optimierung aber auch für die (monetäre) Bewertung von notwendigen (Ersatz-)Investitionen in die Versorgungsanlage nutzen, was Investitionssicherheit schafft.

Tiefe Geothermie Bad Waldsee

Die Stadtwerke Bad Waldsee beabsichtigten im Sinne einer sicheren und sauberen Wärmeversorgung die Tiefengeothermie als Geschäftsfeld und damit einhergehend das Nahwärmenetz zur Gebäudeversorgung auszubauen. Zu Projektbeginn bestand aufgrund der Standortnähe zu Biberach a. d. Riß intensiver Kontakt von der HBC zum Projekt der Tiefen Geothermie in Bad Waldsee. Besprochen und diskutiert wurden unter anderen die folgenden Themen:

- Zeitplan der weiteren Erkundung.
- Transparentes Vorgehen gegenüber der Öffentlichkeit, insbesondere in Bezug auf die geplanten Erkundungen. Herausgehoben wurde, dass eine klare Abgrenzung zu in der Vergangenheit liegenden Erkundungen mit der Suche nach Bodenschätzen zu treffen sei.
- Umgang mit dem Erkundungsrisiko mit Schwerpunkt auf eine Absicherung des Fündigkeitsrisikos durch einen Versicherer.
- Einschätzung der geologischen Situation im Hinblick auf die Fündigkeitswahrscheinlichkeit hydrothermalen Reservoirs im Raum Biberach für evtl. künftige Projekte.

In Bezug auf die geplante Wärmeversorgung wurde in Zusammenarbeit mit den Stadtwerken Bad Waldsee die Konzeptidee verfolgt, das tiefengeothermisch gewonnene Thermalwasser bis auf ein möglichst niedriges Temperaturniveau im Sinne einer maximalen Exergienutzung zu nutzen. Wichtige Aspekte hierbei waren:

- Anschluss von Neubaugebieten, für deren Versorgung nur niedrige Vorlauftemperaturen benötigt werden, an den Rücklauf des Wärmenetzes nach der Versorgung von Bestandsgebäuden, deren Versorgung hohe Vorlauftemperaturen erfordern, aber damit auch hohe Rücklauftemperaturen liefern.
- Möglichkeiten für den Einsatz von Wärmepumpen zur Nutzung von Restwärmepotenzialen im Rücklauf zur Geothermiequelle.
- Problematik von chemischen Ausfällungen aufgrund einer zu starken Abkühlung des Geothermalwassers als ggf. limitierender Faktor bei der Nutzung des geothermischen Wärmepotenzials.

Bedauerlicherweise wurde das Projekt zur Wärmeversorgung durch Tiefengeothermie in Bad Waldsee aus wirtschaftlichen Gründen von der Stadtwerke Bad Waldsee GmbH im Jahr 2018 eingestellt.

Literatur

[1] VDI 4640 Blatt 5, August 2016: Thermische Nutzung des Untergrunds - Thermal Response Test, VDI-Gesellschaft Energie und Umwelt, Beuth Verlag GmbH, August 2016

[2] Sulger C.: Hydraulische Untersuchung eines kalten Nahwärmenetzes, Forschungsarbeit an der Hochschule Biberach, 2017

[3] VDI 4655, Mai 2008: Referenzlastprofile von Ein- und Mehrfamilienhäusern für den Einsatz von KWK-Anlagen, VDI-Gesellschaft Energie und Umwelt, Beuth Verlag GmbH, Mai 2008

[4] Loga, T.; Diefenbach, N.; Born, R.: Deutsche Gebäudetypologie – Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden, Institut für Wohnen und Umwelt (IWU), Darmstadt, 2011

Veröffentlichungen

Ryba M., Neth F., Van de Ven A., Volkmer S., Koenigsdorff R.: Monitoringergebnisse zum Kalten Nahwärmenetz in Biberach a. d. Riß, Vortrag, Der Digitale Geothermiekongress, November 2020

Transfer

Treffen der HBC mit der Geschäftsführung der e.wa riss und dem Baubürgermeister der Stadt Biberach zum Erfahrungsaustausch über den Betrieb des Kalten Nahwärmenetzes Hochvogelaustausch. Themen: Betriebs- und Monitoringergebnisse, betriebsbegleitendes Monitoring des EWS-Feldes und des Netzbetriebs, Erfahrungen in Bezug auf zukünftige innovative Vorhaben. Für Januar 2021 geplant.

Europäisches Institut für Energieforschung (EIFER)

Simon Schüppler und Dr. Roman Zorn

Förderkennzeichen: L75 16019

Einleitung

Grundwasserleiter bieten die Möglichkeit ungenutzte Abwärme zu speichern und diese zu Bedarfszeiten, beispielsweise für die Beheizung von Gebäuden wieder zu nutzen. Das Freizeitbad Aquadrom in Hockenheim weist ganzjährig bis zu 30 °C in den Kellerräumen durch die Beheizung der Innenbecken auf. Zudem befindet sich ein eigens betriebenes BHKW auf dem Gelände des Aquadroms mit Rücklauftemperaturen von ca. 80 °C (Abbildung 1). Hockenheim befindet sich auf der Niederterrasse des Oberrheingrabens und ist gekennzeichnet durch fluviatile und jungpleistozäne Ablagerungen sowie flächenhafte fluviatile Hochwasserabsätze und Rinnenfüllungen.

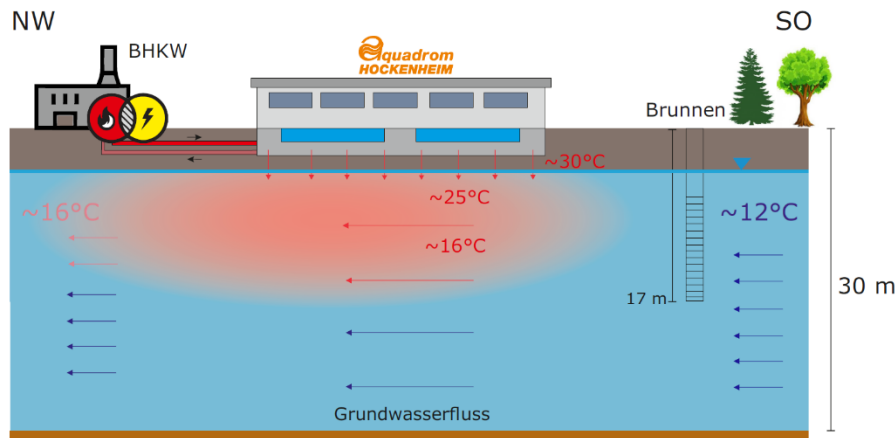


Abbildung 1: Schematische Darstellung der aktuellen Situation am Standort Aquadrom, Hockenheim.

Ob sich ein Grundwasserleiter für die Speicherung von thermischer Energie eignet, muss letztlich auf Basis einer umfangreichen (hydro-)geologischen Untersuchung beantwortet werden. Ziel dieses Arbeitspaketes ist daher die Erforschung und Bewertung des Standorts Aquadrom mit dem Hintergrund den oberen, ca. 30 m mächtigen sandig-kiesigen Grundwasserleiter für die Speicherung der ungenutzten Abwärme zu verwenden. Ein über das Trockenbohrverfahren angefertigter Brunnen (Februar 2018) mit einer Tiefe von 17 m und sieben weitere, auf dem

Gelände des Aquadroms verteilte Messpegel, ermöglichen die Charakterisierung des oberen Grundwasserleiters. Dazu gehören regelmäßige Messungen von Temperaturprofilen und Pegelhöhen sowie die Durchführung eines Pumpversuchs. Abschließend soll eine numerische Modellierung mit FEFLOW Aufschluss über den Wärmeeintrag des Aquadromgebäudes und über die Ausbreitung einer Wärmefahne im Untergrund durch einen potentiellen Speicherbetrieb geben.

Ergebnisse der Standortuntersuchungen

Grundwasserhöhen

Über den Verlauf eines Jahres wurde in regelmäßigen Abständen die Pegel von sieben Grundwassermessstellen mit dem Kabellichtlot gemessen. Die Kurvenverläufe in Abbildung 2b zeigen die saisonalen Schwankungen und lokalen Unterschiede, je nach Lage der Messstelle. Die Anstieg der Messwerte korrelieren überwiegend mit den aufgetretenen Starkregenereignissen. Die Niederschlagsdaten stammen von der nächstgelegenen Wetterstation des Deutschen Wetterdienstes in Waghäusl (Deutscher Wetterdienst (DWD) 2020). Überwiegend ist eine Parallelität der Ganglinien vorzufinden. Die Überschneidungen der Pegelhöhen, insbesondere in den Sommermonaten, weisen jedoch auf lokal schwankende Grundwasserfließrichtungen hin. Aufgrund der geringen Grundwasserflurabstände bestand im Januar und Februar 2017 nur ein Unterschied von ca. 0,8 m zwischen der Kellerbasis (98,3 m NN) und dem Grundwasserhöchststand in P3 (97,5 m NN). Bei Betrachtung von Stichtagsmessungen der Grundwasserpegel ergeben sich voneinander abweichende Grundwassergleichen zwischen 1,5° und 8° (Abbildung 2a).

Pumpversuch

Der im Anstrombereich des Aquadroms errichtete Brunnen wurde im Juni 2018 für einen dreistufigen Pumpversuch ($Q = 10, 20, 33 \text{ m}^3/\text{h}$) zur weiteren Charakterisierung der Hydrogeologie genutzt (Abbildung 3a). Der Pumpvorgang erfolgt über einen Zeitraum von 28 h. Zur Aufzeichnung der Grundwasserpegel und der Temperatur während des Pumpversuchs wurden drei zuvor kalibrierte Datenlogger der Firma Hydrotechnik (Typ 575) im Brunnen (Messfrequenz: 60 s) sowie in zwei weiteren brunnennahen Beobachtungspiegeln P3 und P8 (Messfrequenz: 10 min) eingebaut (Abbildung 3b). Alle weiteren auf dem Gelände des Aquadroms befindlichen Messstellen wurden in regelmäßigen Abständen mit einem Kabellichtlot gemessen. Die maximale

Absenkung im Brunnen betrug nach der 3. Pumpstufe 1,05 m. Die Auswertung des Pumpversuchs erfolgte mit der Software AQTESOLV der Firma HydroSOLVE (HydroSOLVE 1998-2020) nach Theis und zusätzlich mit Excel und dem Geradlinienverfahren nach Jacob-Cooper. Die Ergebnisse des Pumpversuchs sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Es handelt sich dabei um Mittelwerte aus den jeweiligen Entnahmeraten und des Wiederanstiegs.

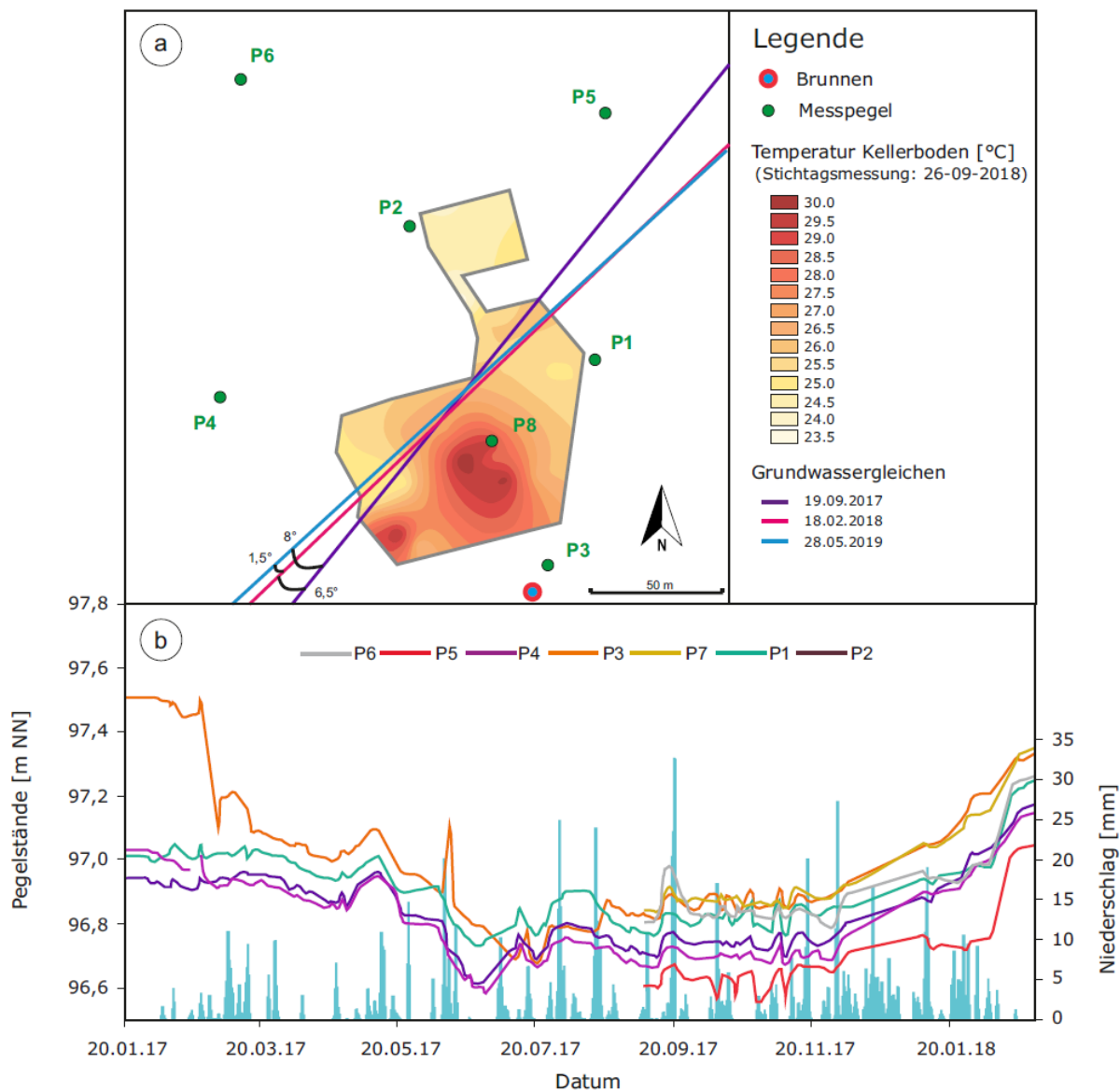


Abbildung 2: a) Abweichung der Grundwassergleichen von drei verschiedenen Stichtagsmessungen sowie gemessene Temperaturen am Boden des Kellers. b) Verlauf der Grundwasserhöhen über den Beobachtungszeitraum eines Jahres.

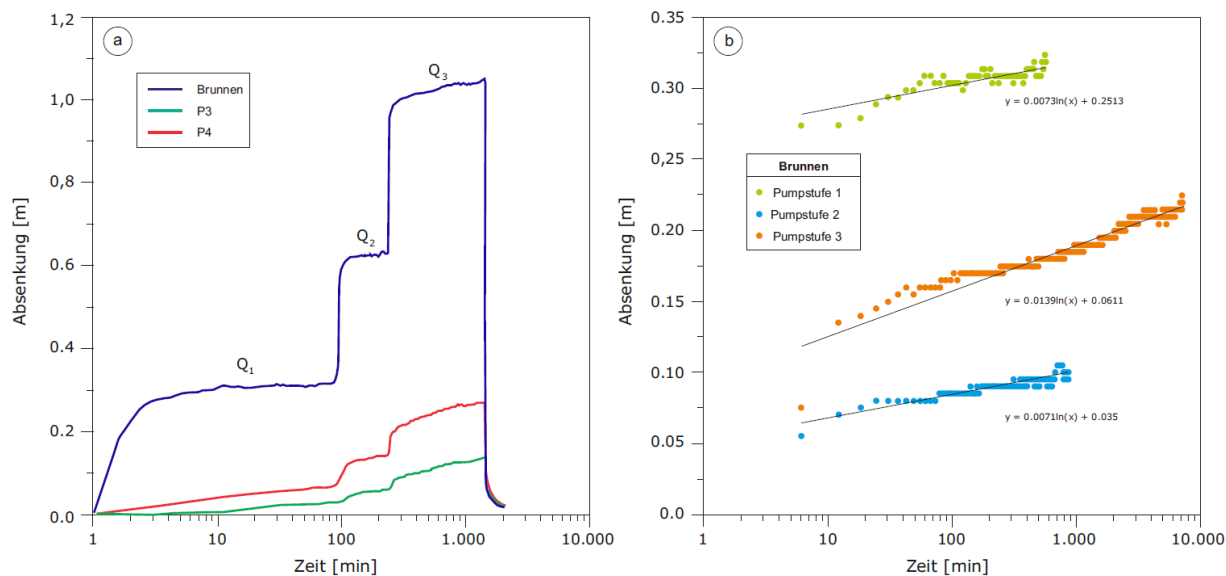


Abbildung 3: a) Erzielte Absenkungen und Wiederanstieg im Brunnen und Beobachtungspegeln bei drei Entnahmeraten. b) Semi-logarithmische Darstellung der erzielten Absenkungen im Pumpbrunnen zur Auswertung nach Cooper-Jacob (Geradlinienverfahren).

Tabelle 1: Parameter zur Charakterisierung des oberen Grundwasserleiter basierend auf dem Stufenpumpversuch. Gemäß der DIN 18130, Tl. 1 (Deutsches Institut für Normung) handelt es sich dabei um einen stark durchlässigen Aquifer.

Parameter	Wert	Einheit
Durchlässigkeitsbeiwert k_f	$2,07 \times 10^{-3}$	$m \ s^{-1}$
Transmissivität T	0,03	$m^2 s^{-1}$
Speicherkoeffizient S	0,42	-
Absenktrichter	115	m
Abstandsgeschwindigkeit v_a	175	$m \ a^{-1}$
Filtergeschwindigkeit v_f	53	$m \ a^{-1}$
Porosität (abgeschätzt)	30	%

Temperaturmessungen

In regelmäßigen Abständen wurden tiefenorientierte Profile am Standort aufgezeichnet. Diese wurden mit einer zuvor kalibrierten HOBO HD Messsonde (Genauigkeit 0,08 K, Präzision: 0,06 K) aufgenommen. Abbildung 4 zeigt exemplarisch Temperaturprofile, die im September 2018 im Brunnen und in 5 weiteren Messstellen erhoben wurden. Aufgrund der geringen Tiefe der Messstellen (max. 8 m) dienen diese nur der Charakterisierung des oberen Bereichs des Grundwasserleiters, der für gewöhnlich stark von oberflächlichen Temperatureinflüssen geprägt ist. Die gemessenen Temperaturprofile von P3 und im Brunnen gelten als ungestört, da

sie sich im Anstrombereich des Aquadromgebäudes befinden. Die mittlere Temperatur des Brunnens beträgt am Stichtag 13,0 °C und dürfte aufgrund des Messdatums das jahreszeitliche Maximum erreicht haben. Alle weiteren Messpegel befinden sich im Abstrom des Aquadroms und sind aufgrund der Bebauung stark thermisch beeinflusst. Insbesondere die Messstelle P8 weist aufgrund seiner Lage, die sich direkt unterhalb des Aquadroms befindet, besonderes hohe Temperaturen auf mit einem Mittelwert von 20 °C. Das Aquadrom gilt daher auch europaweit als *Hot Spot* (Tissen et al. 2019).

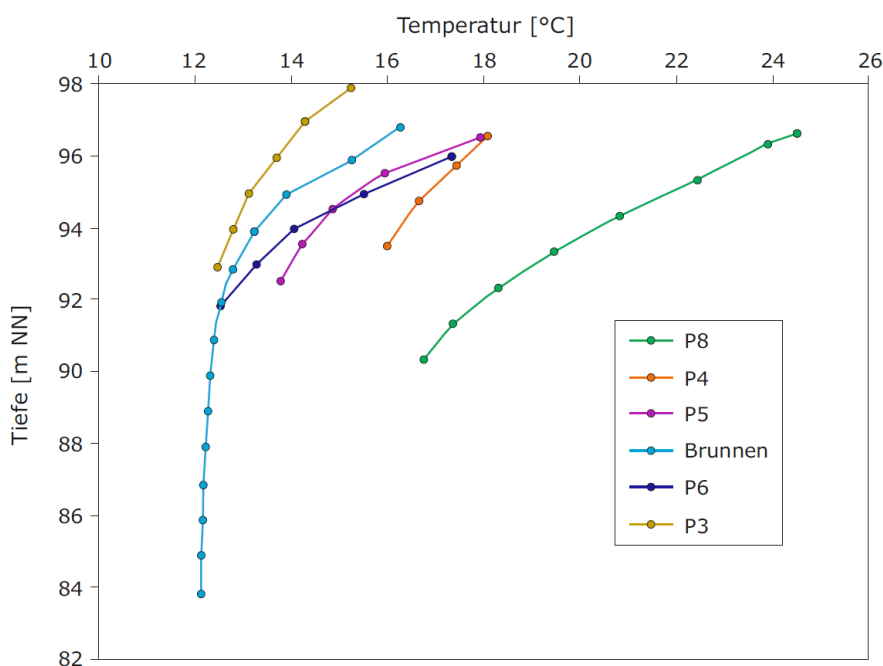


Abbildung 4: Tiefenorientierte Temperaturprofile gemessen im Anstrom- (Brunnen, P3) und Abstrombereich (P4, P5, P6, P8) des Aquadromgebäudes.

Gemäß der Definition von Benz et al. (2017) liegt die anthropogene Wärmeintensität (AHI) damit lokal direkt unterhalb des Aquadroms bei 7 K und durchschnittlich bei 3,9 (\pm 2,6) K im Abstrom des Gebäudes, jeweils mit der Einschränkung, dass nur im oberflächennahsten Bereich gemessen werden konnte.

Wärmetauscher-Lösung

Die Stadtwerke Hockenheim arbeiten derzeit daher an der Inbetriebnahme einer Wärmetauscherlösung. Der konstruierte Wärmetauscher (Abbildung 5a) besteht aus drei Segmenten mit jeweils einer Länge von 3 m und ist bereits im dafür vorgesehenen Brunnen, errichtet im Frühjahr 2018, installiert (Abbildung 5b). Der Wärmetauscher dient der Durchführung thermischer Belastungstests im Untergrund. Dadurch lässt sich die genaue Fließrichtung unmittelbar im

Abstrombereich des Brunnens ermitteln und Rückschlüsse auf die Kontrollierbarkeit der Wärmefahne ziehen. Als Wärmequelle dient der Rücklauf des Aquadrom BHKWs, der über Heißwasser resistente Schläuche (Continental Dampf Trix 5000 (Continental 2020)) mit dem Wärmetauscher verbunden wird. Die zu erwarteten Eintrittstemperaturen am Wärmetauscher liegen bei ca. 40 °C. Über Wärmemengenzähler am Vor- und Rücklauf des Wärmetauschers, soll die im Untergrund eingebrachte Wärmemenge genau erfasst werden.

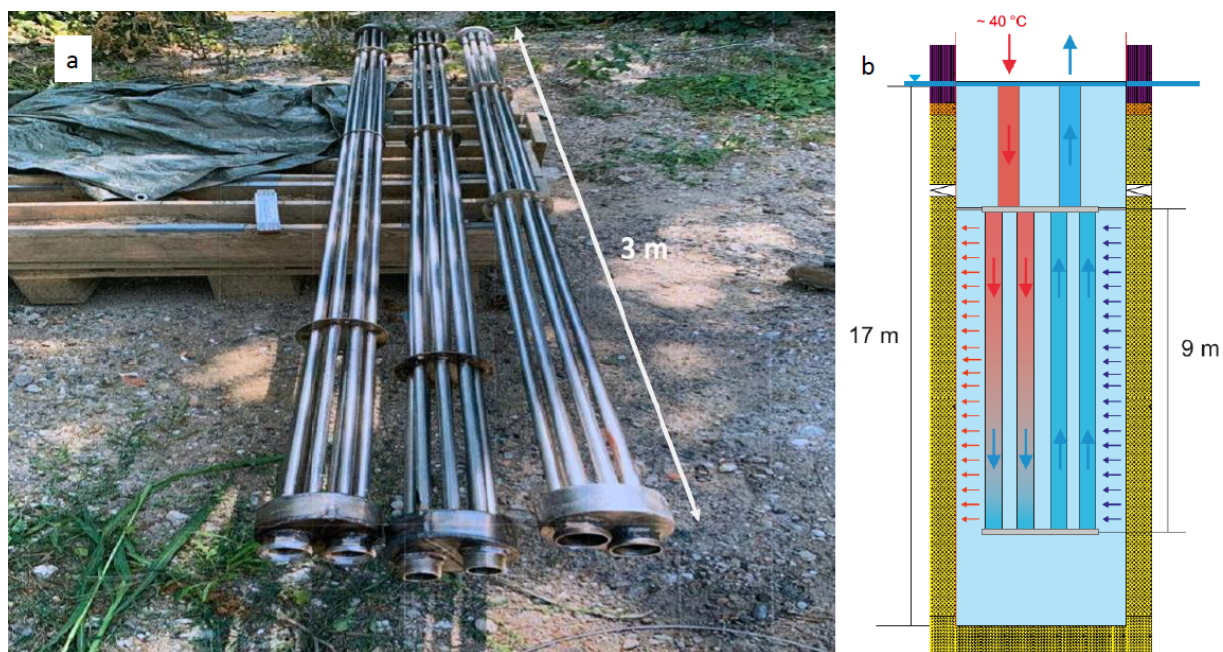


Abbildung 5: a) Von den Stadtwerken Hockenheim konstruierte Wärmetauscherlösung zur Durchführung thermischer Untergrundbelastungstests am Aquadrom. b) Schematischer Einbau und Funktionsweise des Wärmetauschers im dafür vorgesehenen Brunnen.

Thermisch-hydraulisches Modell

Ein numerisches Modell, das die grundlegenden hydraulischen Bedingungen des betrachteten oberflächennahen Aquifers in Hockenheim wiedergibt, wird mit dem Programm FEFLOW, Version 7.0, Udate 10 (Mike by DHI 2020) erstellt. Das betrachtete Gebiet umfasst eine Fläche von 29,38 ha und ein Volumen von $7,64 \times 10^6 \text{ m}^3$. Das Modell besteht aus 19 Layern wobei die obersten 13 Layer in einem Abstand von 1 m und die restlichen 6 Layer in einem Abstand von 2 m erstellt wurden. Der geringere Abstand in den oberen 12 m wurde gewählt, da hier im Bereich des Aquadroms entsprechende Temperaturmesswerte vorhanden sind. Die Abmessungen betragen 750 m x 400 m x 26 m (L x B x T).

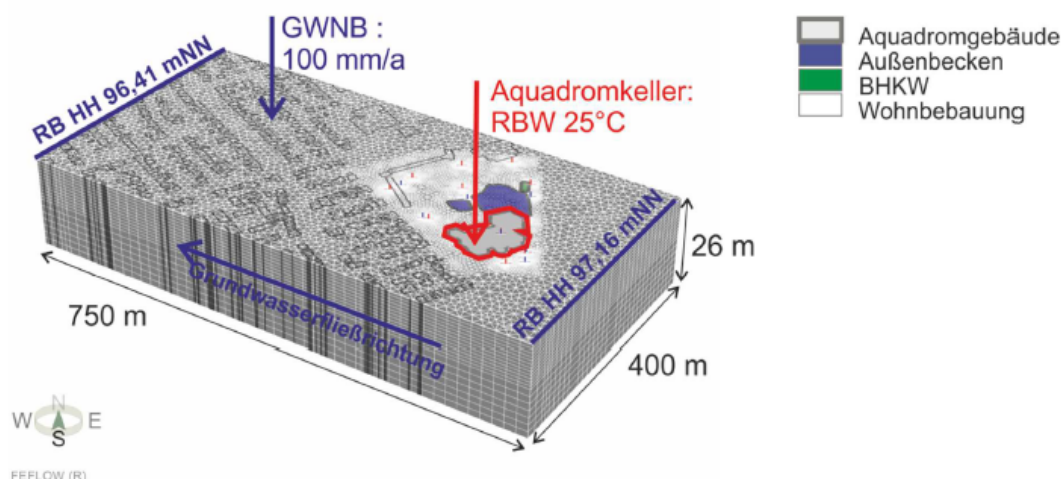


Abbildung 6: Blockbild mit den jeweils gewählten Randbedingungen zur hydraulischen Höhe (HH) und des Wärmetransfers (RBW).

Die Randbedingungen 1. Art bezüglich des hydraulischen Höhenunterschiedes des Modells wurden der Stichtagsmessung vom 30.03.2017 entnommen und auf die entsprechende Größe des Modells extrapoliert. Die Druckhöhe des südöstlichen Modellrandes wurde von der 97 mNN Grundwassergleiche aus anhand des Gradienten $i = 0,001$ auf 97,16 mNN extrapoliert. Die Druckhöhe des nordwestlichen Modellrandes wurde entsprechend auf 96,415 mNN extrapoliert. Die nordöstliche und südwestliche Modellgrenze erhält eine No Flow-Randbedingung, da sie senkrecht zu der Grundwasserfließrichtung verläuft. Für die Geländehöhe der obersten Ebene wurde 96 mNN gewählt, da dieser Wert unterhalb der niedrigsten Anfangsbedingung der Grundwasserdruckhöhe liegt und somit ein gesättigter Aquifer simuliert werden kann. Die genaue Beschreibung der Methodik und die gewählten Parameter für das Modell sind Grahovac (2019) zu entnehmen.

Zunächst wurde der Wärmeeintrag des Gebäudes anhand der Messdaten (siehe Kapitel 2) modelliert. Abbildung 7 und Abbildung 8 zeigen die modellierte Ausbreitungsrichtung und Temperaturen der Wärmefahne im Abstrom des Aquadroms.

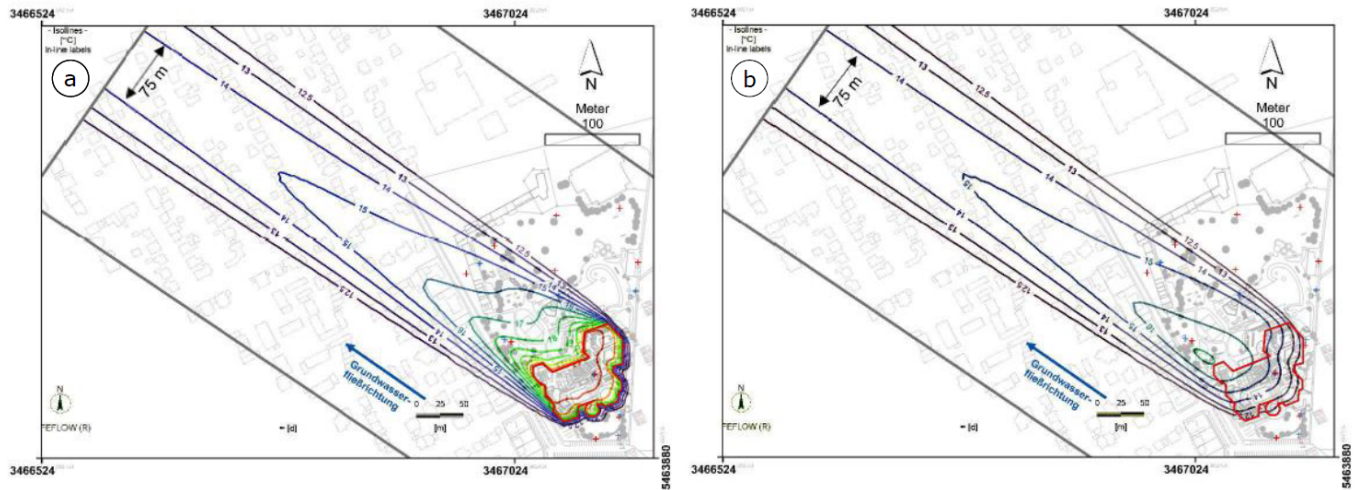


Abbildung 7: Ausbreitung und Isolinien der Wärmefahne in einer Tiefe von 96 mNN (a) und 87 m NN (b).

Für den Bereich der gesetzten Wärmerandbedingung am Aquadromgebäude ergibt sich bei stationären Bedingungen ein Wärmeeintrag in Höhe von 64 kW. Bezogen auf die ca. 5.000 m² große Fläche des Aquadromkellers ergibt sich eine Wärmestromdichte $q = 12,8 \text{ W m}^{-2}$. Diese ist aufgrund der Besonderheiten am Standort etwa 3,5-mal höher als die Wärmestromdichte bei klassischen Gebäuden ($3,6 \text{ W m}^{-2}$), die exemplarisch u.a. für die Stadt Karlsruhe untersucht wurden (Benz et al. 2015).

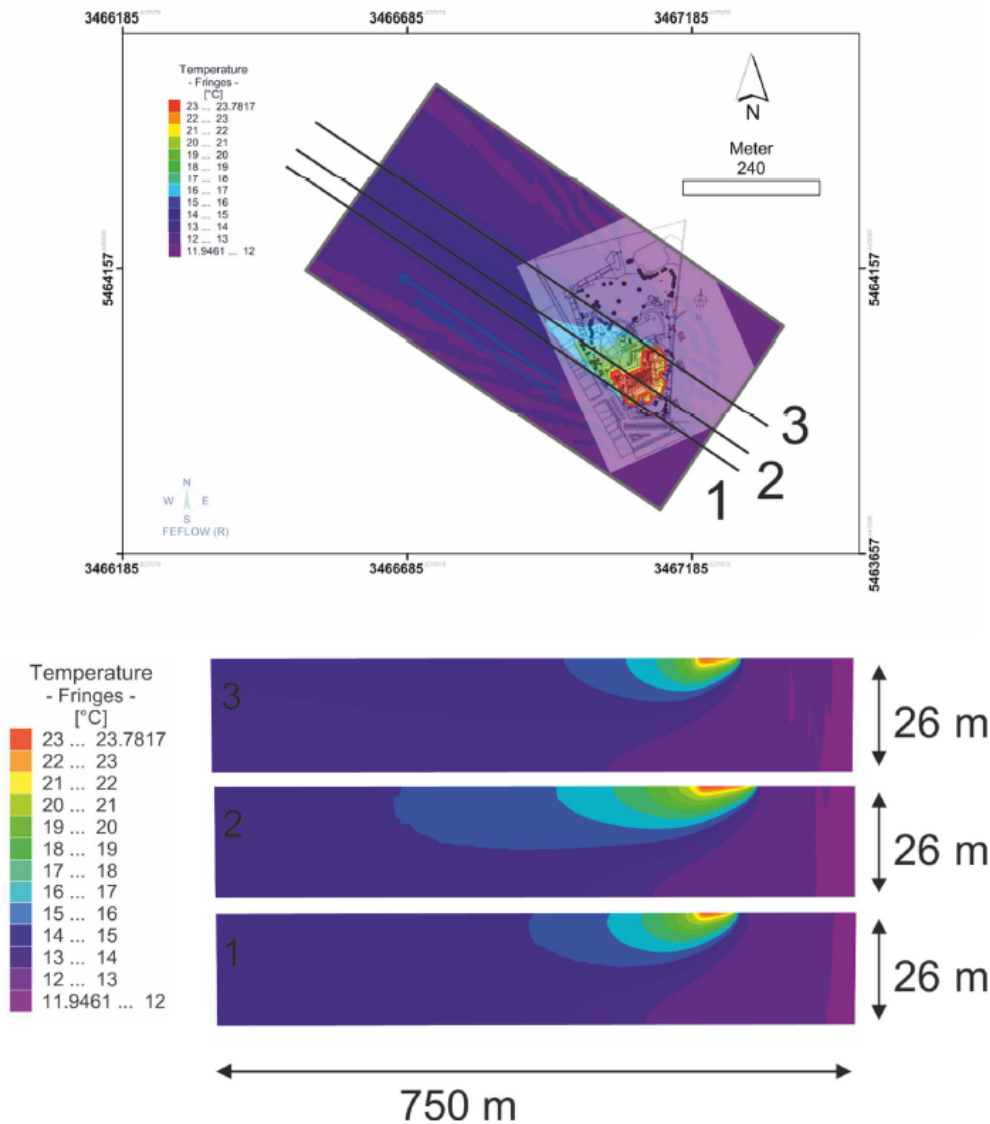


Abbildung 8: Querschnitt parallel zur Fließrichtung des Grundwassers und Ausbreitungsrichtung der Wärmefahne im Abstrom des Aquadroms.

Darüber hinaus wurde der in Kapitel 2 vorgestellte Betrieb der Wärmetauscherlösung modelliert. Näherungsweise wurde dafür ein geschlossenes U-Rohr-System angenommen, das vom Funktionsprinzip dem konstruierten Wärmetauscher entspricht. Abbildung 9 zeigt die Ausbreitung der Wärmefahne nach einer Betriebszeit von 180 Tagen. Die zu erwartende Wärmefahne weist dabei nur sehr geringe Temperaturen auf und unterscheidet sich nur geringfügig von den natürlichen Grundwassertemperaturen (ca. + 2 K). Dies ist auf die relativ geringe Durchflussmenge und Fläche des Wärmetauschers zurückzuführen, wodurch Temperaturunterschiede zwischen Vor- und Rücklauf von nur ca. 3-4 °C zu erwarten sind. Das in blau dargestellte Aquadromgebäude wird von der Wärmefahne nicht erreicht, sodass der erwärmte Bereich unterhalb des Gebäudes nicht noch zusätzlich erwärmt wird.

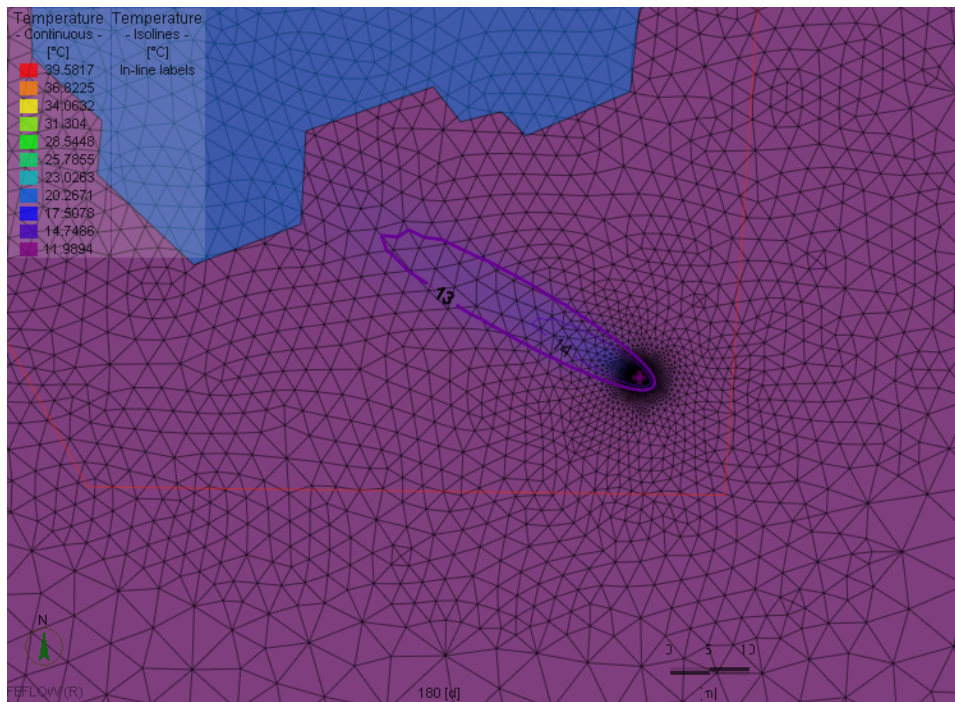


Abbildung 9: Ausbreitung der Wärmefahne durch den Betrieb des Wärmetauschers nach einer Laufzeit von 180 Tagen.

Schlussfolgerung und Ausblick

Die messtechnischen Tätigkeiten und Versuche auf dem Gelände des Aquadroms (Kapitel 2) sowie die thermisch-hydraulische Modellierung (Kapitel 3) ermöglichen eine Charakterisierung des oberen Grundwasserleiters am Standort Hockenheim. Aufgrund des ganzjährigen Wärmeeintrags des Aquadromsgebäudes, sind die oberen 15 m des Aquifers im Abstrombereich des Gebäudes thermisch gestört. Unabhängig von zusätzlichen Speicherlösungen, könnte diese Wärmemenge bereits jetzt sinnvoll z.B. für die Beheizung benachbarter Gebäude genutzt werden. Bevor der Wärmetauscher für thermische Belastungstests in Betrieb genommen wird, sollte ein besonderes Augenmerk auf das Monitoringkonzept des Versuchs gelegt werden. Im Model konnte gezeigt werden, dass die entstehende Temperaturfahne relativ schmal und nur einen geringen Temperaturunterschied gegenüber der natürlichen Grundwassertemperatur aufweist. Daher sollten unmittelbar im Abstrombereich des Brunnens entsprechende Messpegel installiert und mit geeigneter Messtechnik ausgestattet werden, die in der Lage ist die geringen Temperaturunterschiede aufzulösen.

Bei einer möglichen Umsetzung einer Speicherlösung muss insbesondere bei einem offenen System (z.B. Aquiferspeicher ATES) die relativ hohen Fließgeschwindigkeiten und die gerin-

gen Grundwasserstände berücksichtigt werden. Hohe Fließgeschwindigkeiten können beispielsweise mit einer kaskadenförmigen Anordnung der Entnahmebrunnen parallel zur Fließrichtung ausgeglichen werden, um die Wärmefahne möglichst ganzheitlich zu erfassen. Bei der Rückführung des geförderten Wassers, muss unbedingt eine zusätzliche Aufwölbung des Grundwassers vermieden werden, da die Grundwasserpegel bei Starkregenereignissen bereits jetzt unter 1 m gegenüber dem Kellerboden sind. Sollten sich die geplanten Versuche mit der Wärmetauscherlösung bewähren, kann dieser möglicherweise auch für einen dauerhaften Betrieb verwendet werden, um Veränderungen der Grundwasserhöhen zu vermeiden. Die Ausbreitungsrichtung- und Geschwindigkeit der Wärmefahne lässt sich aufgrund des Modells zwar abschätzen, sollte aber mit thermischen Belastungstests mittels Wärmetauscher noch genauer bestimmt werden. Sowohl testweise Wärmeinjektionen als auch und insbesondere ein dauerhafter Speicherbetrieb sollten berücksichtigen, dass der Abstrombereich des Aquadroms bereits aufgeheizt ist.

Literatur

Benz, S.A., Bayer, P., Blum, P.: Identifying anthropogenic anomalies in air, surface and groundwater temperatures in Germany. *The Science of the total environment* 584-585, 145–153 (2017). doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.01.139

Benz, S.A., Bayer, P., Menberg, K., Jung, S., Blum, P.: Spatial resolution of anthropogenic heat fluxes into urban aquifers. *The Science of the total environment* 524-525, 427–439 (2015). doi: 10.1016/j.scitotenv.2015.04.003

Continental (2020) Dampf Trix 5000. <https://www.continental-industry.com/en/solutions/fluid-handling/industrial-hoses/steam-cleaning-hoses-equipment/dampf-trix-5000>

Deutscher Wetterdienst (DWD) (2020) DWD Station Waghäusel-Kirrlach. <https://www.dlr.rlp.de/Internet/AM/NotesAM.nsf/am-webagrar/aa76a40779d7fa01c1257d710049c3b0?OpenDocument&TableRow=2.4>. Zugegriffen: 16. Oktober 2020

Deutsches Institut für Normung: DIN 18130-1:1998-05: Baugrund - Untersuchung von Bodenproben; Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwerts - Teil 1: Laborversuche

Grahovac, S.: Wärmeeintrag durch das Aquadrom Hockenheim in den Untergrund: ein Wärmetransportmodell. Masterarbeit, Karlsruhe Institut für Technologie (KIT) (2019)

HydroSOLVE, I.: AQTESOLV (1998-2020)

Mike by DHI (2020) Feflow. <https://www.mikepoweredbydhi.com/products/feflow>

Tissen, C., Benz, S.A., Menberg, K., Bayer, P., Blum, P.: Groundwater temperature anomalies in central Europe. *Environ. Res. Lett.* 14(10), 104012 (2019). doi: 10.1088/1748-9326/ab4240

**Universität Stuttgart,
Versuchseinrichtung zur Grundwasser- und Altlastensanierung (VEGAS)**

Dr. Jürgen Braun und Giulia Giannelli

Förderkennzeichen: L75 16015

**Abschlussbericht: Geospeicher.bw - Sanierung von Grundwasser in
Kombination mit ATES**

Einführung und Ziele

Niedrigtemperatur-ATES (Aquifer-Wärmespeicher) können als nachhaltige Energietechnologie für städtische Gebiete konzipiert und dort angewendet werden. In Stadtgebieten besteht allerdings häufig das Problem, dass dort die Grundwasserleiter durch Kontaminationen – insbesondere chlorierte Lösungsmittel – belastet sind. Aufgrund der ungeklärten Auswirkungen von ATES auf das Verhalten und die Verteilung von Schadstoffen sowie die Sorge über die Grundwasserqualität, dürfen in Deutschland ATES derzeit nicht in kontaminierten Bereichen installiert werden. Viele in-situ-Sanierungsverfahren, wie z.B. Monitored Natural Attenuation (biologisches Sanierungsverfahren), haben jedoch lange Laufzeiten, bis zu mehreren Jahrzehnten oder gar länger. Dieser Aspekt kann zu negativen Auswirkungen auf die städtische und industrielle Raumplanung führen und wirkt sich negativ auf die Neuentwicklung der Altlastenflächen aus. Angesichts des oft großen Flächenverbrauchs steigt in vielen europäischen Ländern der Druck auf die erneute Nutzung der Standorte sowie des darunterliegenden Untergrunds. Daher wurde ein Kombinationskonzept auf die Agenda einiger europäischer Länder gesetzt, um ATES und biologische Sanierung zu kombinieren.

Ziel dieses Arbeitspakets ist es, Studien zum Konzept der Kombination von ATES mit Grundwassersanierungen an vorhandenen Pilotstandorten oder auch kommerzielle Lösungen zu untersuchen.

Forschungsergebnisse

Kopplung mit biologischer Sanierung

Die Bodenenergienutzung wird in den Niederlanden seit den 1980er Jahren angewendet. Aufgrund des erwarteten Wachstums der Systemanzahl wurde eine Untersuchung der Auswirkungen dieser Anlagen und deren Kombinationen mit anderen Techniken erforderlich. So gibt es mehrere Pilotstandorte, die bereits seit mehreren Jahren mit guten Ergebnissen in Betrieb sind und zur Patentierung der Sanierungsmethode geführt haben.

Das niederländische Forschungsprojekt „**MMB - Meer met Bodemenergie**“ (Mehr mit Untergrundenergie) war ein erster Schritt in diese Richtung. 35 Projektpartner waren beteiligt, darunter Vertreter von Regierung, Wirtschaft und Forschung, einschließlich Bioclear Earth (Engineering activities and related technical consultancy), Deltares Netherlands (Centre for Coastal Research), IF Technology (independent engineering consultancy firm) und der Universität Wageningen. Im Mittelpunkt der Forschung standen die chemischen, biologischen und physikalischen Auswirkungen der Nutzung der Bodenenergie auf den Untergrund. So ändert sich beispielsweise die Temperatur des Bodens im Nahfeld jedes Bodenenergiesystem; bei offenen Systemen treten zusätzlich hydrologische Effekte auf. Beispiele dafür sind Veränderungen des Grundwasserspiegels im Grundwasserleiter aus dem das Grundwasser entnommen wird. Das Forschungsprogramm umfasste eine Literaturstudie, Labortests von Bodenproben, thermische und hydrologische Modellierungen sowie Feldmessungen auf neun Bodenenergiesysteme in den Niederlanden und Flandern.

Im Rahmen des Projekts wurden zwei Anlagen überwacht [1] nämlich das Strijp-S Gelände mit historischen Gebäuden in Eindhoven und die Innenstadt von Utrecht, wo ATES und Sanierung gekoppelt wurden.

Auf dem **Strijp-S Gelände** wurde das Kombinationskonzept „**SANERGIE**“ (Synergie aus Sanierung und ATES) von Arcadis Netherlands entwickelt und umgesetzt. Arcadis setzte hier anstelle des klassischen ATES mit Kalt- und Warmwasserzonen im Untergrund ein sogenanntes Rezirkulationssystem ein, das eine konstante Strömungsrichtung verwendet und dem Grundwasser Wärme oder Kälte mit konstanter Temperatur (am Standort Eindhoven 12-13 °C) entzieht. Mit einem Kreislaufsystem zur Energiegewinnung ist ein effektiver Ansatz unter Vermeidung der Schadstoffausbreitung möglich, der auch die Stimulation des natürlichen Schadstoffabbaus ermöglicht. Das Rezirkulationssystem (*Abbildung 10*) besteht aus einem System von

Extraktions- und Infiltrationsbrunnen wobei die Infiltrationsbrunnen von den Extraktionsbrunnen umgeben sind, die das kontaminierte Grundwasser „einfangen“. Der natürliche Abbau am Standort ist durch die Dynamik der Vermischung von Bakterien, Nährstoffen und Verunreinigungen limitiert.

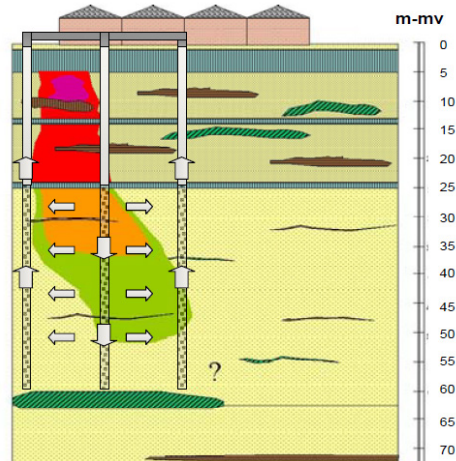


Abbildung 10: SANERGIE-Konzept von ARCADIS Netherland [2].

Konzeptionell ist dieses Grundwassersystem mit einer Waschmaschine vergleichbar: Wäsche, Wasser und Reinigungsmittel werden effizient gemischt: es wird eine "Biowaschmaschine" erzeugt. Bei unzureichenden natürlichen Bedingungen oder bei Nährstoffmangel bietet die Anlage die Möglichkeit, die notwendigen Stoffe zuzugeben. Es handelt sich um ein quasi-geschlossenes in-situ System (zumindest was die Schadstoffausbreitung angeht [1]).

Im Fall der Innenstadt Utrecht war die Kontaminationslage sehr komplex. Im Bereich des Utrechter Bahnhofs sind ca. 30 verschiedene Quellzonen und 20 Schadstofffahnen bekannt, wobei möglicherweise nicht alle Quellen bekannt sind. Die Schadstofffahnen beeinflussen sich im tieferen Grundwasser gegenseitig und die Verbindung zwischen der ursprünglichen Quelle und der Mischfahne ist oft nicht mehr nachweisbar, die „Störer“ können schlecht identifiziert werden. Somit ist ein individueller Ansatz für jede Quelle und Fahne nur für das oberflächennahe Grundwasser sinnvoll (*Abbildung 11* links).

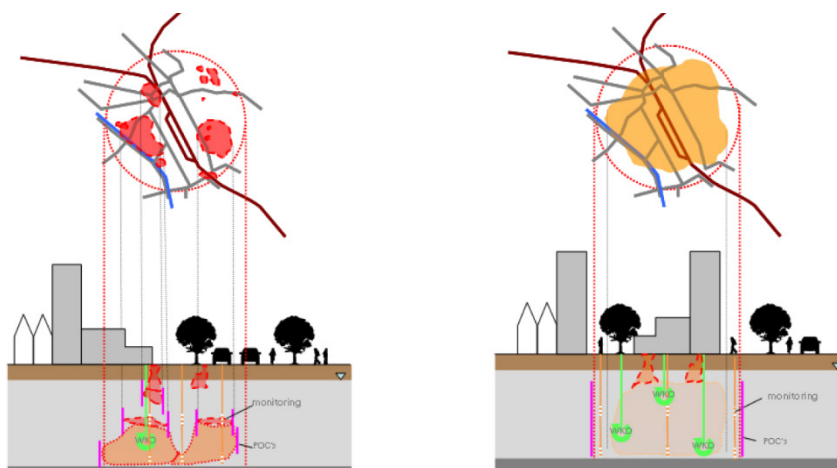


Abbildung 11: Unterschied zwischen dem von Arcadis Netherland vorgeschlagenen innovativen „Zoned Groundwater Management“ (rechts) und dem häufig angewandten „Case-based Groundwater Management“ (links) für die Innenstadt Utrecht [2].

In tieferen Aquiferbereichen wurde stattdessen ein Systemraum (*Abbildung 11* rechts) definiert, in dem sich die Schadstoffe bewegen und vermischen dürfen und in dem die funktionale Nutzung des Grundwassers mit ATEs erlaubt ist. Das umgebende Grundwasser, das sich außerhalb dieses Raumes befindet, bleibt dabei vor Kontaminierung geschützt [2] [3].

Darüber hinaus wurden im Rahmen des MMB-Projekts in zwei Doktorarbeiten [4] [5] der Einfluss der Dosierung zusätzlicher dechlorierender Biomasse auf den biologischen Abbau der chlorierten Kohlenwasserstoffe (CKW) unter den Bedingungen der klassischen Wärme-/Kältespeicherung betrachtet. Effizienz und Brunnenverstopfung wurden durch Labortests untersucht.

Die Ergebnisse der Untersuchungen des MMB-Projekt sind in zwölf separaten Abschlussberichten dargestellt, die jedoch nur auf Niederländisch verfügbar sind.

Im Abschlussbericht Teil 9 „Auswirkungen auf die Sanierung - Auswirkungen von ATEs auf die Bodensanierung - Ergebnismessungen an Pilotstandorten und im Labors“ wurden insbesondere die Ergebnisse der Feldmessungen von beiden oben erwähnten Anlagen vorgestellt. Für eine Übersetzung des Berichts wurde im Laufe des Projekts (Februar 2019) von der Firma Proverb oHG ein Angebot eingeholt. Die Übersetzungskosten NL-D für den Berichtteil 9 allein würden 9.972 Euro kosten, eine Übersetzung NL/E wurde für 11.634 Euro angeboten. Dies war im Finanzrahmen von Geospeicher.bw leider nicht möglich.

Im Abschlussbericht sind auch folgende Berichtsteile von Interesse:

Teil 10: Kombinationsmöglichkeiten von ATES und Boden-Dekontamination - Überblick über Techniken und neue Möglichkeiten.

Teil 11: Flächenbezogenes Grundwassermanagement - Integration der Bodenenergie in das flächenbezogene Grundwassermanagement - Möglichkeiten und Schwerpunkte.

Die Auswirkungen von ATES auf Kontaminationen wurde auch im EU-Projekt „City Chlor“ (2009-2013) untersucht. Zu diesem Zweck bildeten die niederländischen Partner (Bioclear, Deltares, Utrecht University, die Consultingfirma MWH und Universität Wageningen) einen „City Chlor Think-Tank“ [6]. Dabei wurden Ideen und Konzepte entwickelt, um die Kombination der ATES mit biologischer in-situ Sanierung effizienter zu gestalten. Somit konnten Empfehlungen für eine intelligente und effektive Überwachung im Rahmen der "Biowaschmaschine" und eines verantwortungsvollen Grundwassermanagements erarbeitet werden. Zur Untersuchung wie das (Bio-)Monitoring optimiert werden kann wurden Transport und Abbau der Kontamination in der „Biowaschmaschine-“ Testanlage um ein neues ATES-System herum mit verschiedenen Methoden erfasst. Weiterhin wurde die Wirkung von ATES auf den Abbau von LCKW-Schäden im Untergrund im Bahnhofsbereich untersucht und die Auswirkungen von ATES auf den Redox-Zustand sowie die Ausbreitung von Wärme/Kälte in der wasserführenden Schicht in verschiedenen Tiefen durch passive Probenahmegeräte bzw. Glasfaserkabel bestimmt [7].

Inzwischen steht diese neue Technologie, die so genannte ATES Plus, in den Niederlanden auf dem Markt zur Verfügung [8]. Seit Anfang 2016 hat die Firma Bioclear Earth Pilotprojekte in Apeldoorn und Den Bosch gestartet. Weitere Pilotprojekte laufen derzeit auch in Utrecht und Kopenhagen (Dänemark). Erste ökonomische Bewertungen zeigen, dass mit diesen Verfahren enorme Verbesserungen der Grundwasserqualität mit einem relativ geringen Mehraufwand erreicht werden können. Hydrogeologische als auch chemische Bedingungen sowie eine entsprechende Systemplanung sind wichtige Bausteine für eine effiziente und ökonomische Anwendung und damit entscheidend für den Erfolg der Methode.

Eine Übertragbarkeit dieser Konzepte nach Deutschland ist derzeit jedoch auf Grund der deutschen Gesetzgebung, die „zone-based“ Ansätze (noch) nicht zulässt, schwierig. Ein erster Ansatz wäre es sanierungsbedürftige Standorte mit geeigneten Eigenschaften (wo die Kombination mit ATES von wirtschaftlichen Vorteil sein könnte) zu identifizieren und dann in enger

Zusammenarbeit zwischen Universitäten, Ingenieurbüros und lokaler Verwaltung eine entsprechende Ausnahmegenehmigung anzustreben.

Kopplung mit Pump and Treat

Ein weiterer interessanter Aspekt betrifft die mögliche thermische Nutzung von Brunnen, die im Rahmen von "Pump and Treat" (P&T)-Maßnahmen gebaut und genutzt werden durch wassergekoppelte Wärmepumpen. P&T-Systeme sind in-situ Grundwassersicherungsverfahren, bei denen kontaminiertes Grundwasser entnommen und on-site mittels chemischen, physikalischen und/oder biologischen Prozessen gereinigt wird, um gelöste Schadstoffe zu entfernen. Danach wird das Wasser in Vorfluter eingeleitet, in industriellen Prozessen verwendet oder in den Aquifer reinfiltiert. Pump-and-Treat Systeme dienen als hydraulische Barriere gegen die Ausbreitung gelöster Schadstoffe, weshalb sie häufig in Kombination mit anderen Sanierungsmaßnahmen (Quellensanierung) eingesetzt werden. Die lange Zeitskala dieser Technik ist zusammen mit dem hohen Energiebedarf und den damit verbundenen Kosten ein großer Nachteil.

Derzeit ist eine große Anzahl von P&T-Systemen in Betrieb und ein Ende ihrer Betriebsdauer ist oft nicht absehbar. Daher wäre es sinnvoll, die ökologische und wirtschaftliche Nachhaltigkeit durch die Nutzung des energetischen Potentials des gewonnenen Wassers zu verbessern. Das gewonnene Wasser kann direkt (passives Kühlen) oder über eine Wärmepumpe verwendet werden, um Gebäude oder industrielle Prozesse in der Nähe der Anlagen zu heizen und/oder zu kühlen. Die thermische Nutzung von P&T-Systemen kann zu einer teilweisen Rückgewinnung ihrer Wartungskosten führen.

Es gibt derzeit keine Pilotanlage, in der diese Kombination getestet wird. Ein oft limitierender Faktor ist die (geringe) Wasserentnahmerate der Anlagen, die ja hinsichtlich der Ökonomie der on-site-Reinigung optimiert sind.

Derzeit gibt es nur wenige theoretische Studien [9] zu den Faktoren, die diese Kombination aus Sicht der technischen Effizienz behindern oder begünstigen könnten. Es liegen keine Wirtschaftlichkeitsstudien vor.

Literatur

- [1] I. Dinka, S. Lieten, E. de Vries, N. Hartog und N. Hoekstra, „Meer met Bodemenergie. Rapport 9 – Effecten op sanering Effecten van bodemenergiesystemen bij inzet bodemsanering - resultaat metingen op pilotlocaties en in labtesten.“ Goedgekeurd door de Technische Commissie Meer met Bodemenergie, 2012.
- [2] ARCADIS Netherland, „Sustainable synergies for the subsurface; combining groundwater energy with remediation, an illustration with 2 cases,“ 2010.
- [3] M. van Tulder, „Sustainable solution (synergies) for large scale Groundwater contaminations,“ in *EKOS*, Sao Paulo, 2010.
- [4] Sommer, „Modelling and monitoring of aquifer thermal energy storage - Impacts of heterogeneity, thermal interference and bioremediation“.
- [5] Ni, „Bioremediation of Chlorinated Ethens in Aquifer Thermal Energy Storage,“ PhD Thesis, 2015.
- [6] Bioclear, Deltares, WUR, UU/Deltares, MWH, NL Agency/Bodem+, Municipality of Utrecht, „City Chlor Think-Tank - Conceptual Site Model - Bio-washing machine,“ 2013.
- [7] Bioclear, Deltares, MWH, WUR, NL Agency/Bodem+, municipality of Utrecht, „Integration of results CSM "Bio-Washing machine" - Different innovative characterization methods and models for optimisation of the area-oriented approach,“ 2013.

[8] BioClearearth, „ATES plus: sustainable cooling and heating with a bonus,“ 2018. [Online]. Available: <https://bioclearearth.com/techniques/ates-plus-sustainable-cooling-and-heating-with-a-bonus>.

[9] C. A., „How Can We Make Pump and Treat Systems More Energetically Sustainable?,“ *Water 12*, December 2019.

Universität Stuttgart, Institut für Geotechnik (IGS)

Prof. Dr-Ing. Christian Moormann, Dr.-Ing. Patrik Buhmann und Matin Liaghi

Abschlussbericht zu den Vorhaben: Erdwärmesondenfeld des Hans-Rehn-Stifts in Stuttgart Tunnelgeothermieanlage Rosensteintunnel in Stuttgart Aquadrom Hockenheim

Berichtszeitraum: März 2017 bis April 2020

Das Institut für Geotechnik der Universität Stuttgart (IGS) bearbeitet seit März 2017 das Verbundvorhaben 'GeoSpeicher.bw'. In diesem Kontext wurden wissenschaftliche Untersuchungen zu den als repräsentativ ausgewählten Fallstudien durchgeführt.

- Erdwärmesondenfeld des Hans-Rehn-Stifts in Stuttgart,
- Tunnelgeothermieanlage Rosensteintunnel in Stuttgart und
- Aquadrom Hockenheim

Hiermit wird der Abschlussbericht zu dem vom IGS bearbeiteten Aufgabenstellungen im Rahmen des Projektes 'GeoSpeicher.bw' vorgelegt.

Hans-Rehn-Stift

Um die Grundlast des Wärmebedarfs im Hans-Rehn-Stift zu decken, wurden im direkten Umfeld 21 Erdwärmesonden mit einer mittleren Tiefe von 90 m installiert.

Erste Phase

In der ersten Phase des Projekts wurde ein thermisch-hydraulisch gekoppeltes numerisches Simulationsmodell entwickelt und verwendet, um den Anfangszustand des Erdwärmesonden-Feldes und den 2007 in der 190 m tiefen Sonde Nr. 8 durchgeführten Thermal Response Test (TRT) zu simulieren. Der thermische Initialzustand des Untergrundes, der vor dem TRT-Test bzw. dem Erdsondenbetrieb im Untergrund herrschte, wurde mithilfe einer numerischen Simulation berechnet. Hierfür wurde ein numerisches thermisch-hydraulisch gekoppeltes Modell in der Softwareumgebung COMSOL Multiphysics Version (5.3) entwickelt. Die in Abb. 1 dargestellte Modellgeometrie umfasst einen Berechnungsabschnitt mit 200 m Tiefe, 10 m Länge und

7 m Breite. Innerhalb des dreidimensionalen Berechnungsbereichs wurde eine Erdwärmesonde (BHE) mit 190 m Tiefe und 20 cm Durchmesser in den Koordinaten $X = 3 \text{ m}$, $Y = 3,5 \text{ m}$ implementiert. Die Dimension wurde so gewählt, dass die Temperaturverteilung der BHE nicht durch die Modellgrenzen beeinflusst wird.

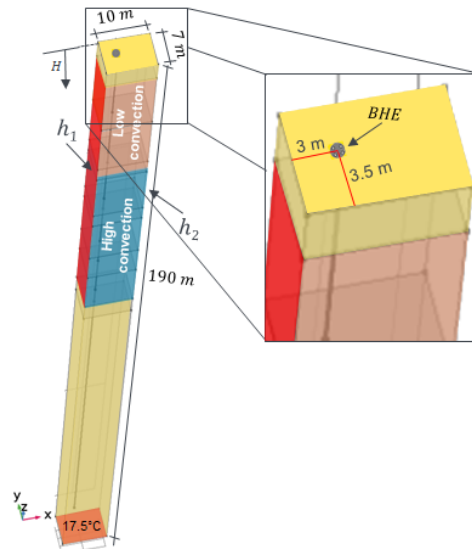


Abbildung 1: Hans-Rehn-Stift - Numerisches Modell zur Simulation des TRT mit Domänengeometrie und Grenzen.

Zur Definition der Randbedingungen: Oberer Wärmestrom, Grundwasserströmung (Hydraulischer Höhe h_1 und h_2) und geothermischer Gradient wurden alle verfügbaren Bestandsunterlagen ausgewertet und die Informationen das numerische Modell integriert. Aufgrund der hohen Anzahl an implementierten Daten zeigten die Simulationsergebnisse eine gute Übereinstimmung mit denen im Feld aufgezeichneten Daten. Auf Basis der Simulationen wird die solare Speicherzone auf eine Tiefe von 6 m bestimmt. Auch das Grundwasserströmungsgebiet konnte mit einer guten Übereinstimmung simuliert werden (Abb. 2 (a)).

Nach einer erfolgreichen Simulation der Anfangstemperatur des Untergrundes im Feld wurde das numerische Modell zur Simulation des durchgeführten TRT-Tests in Hans-Rehn-Stift verwendet. Die TRT-Bedingungen wurden in das Modell implementiert. Die Ergebnisse der Messungen und der Simulation sind der (Abb. 2 b & c) zu entnehmen.

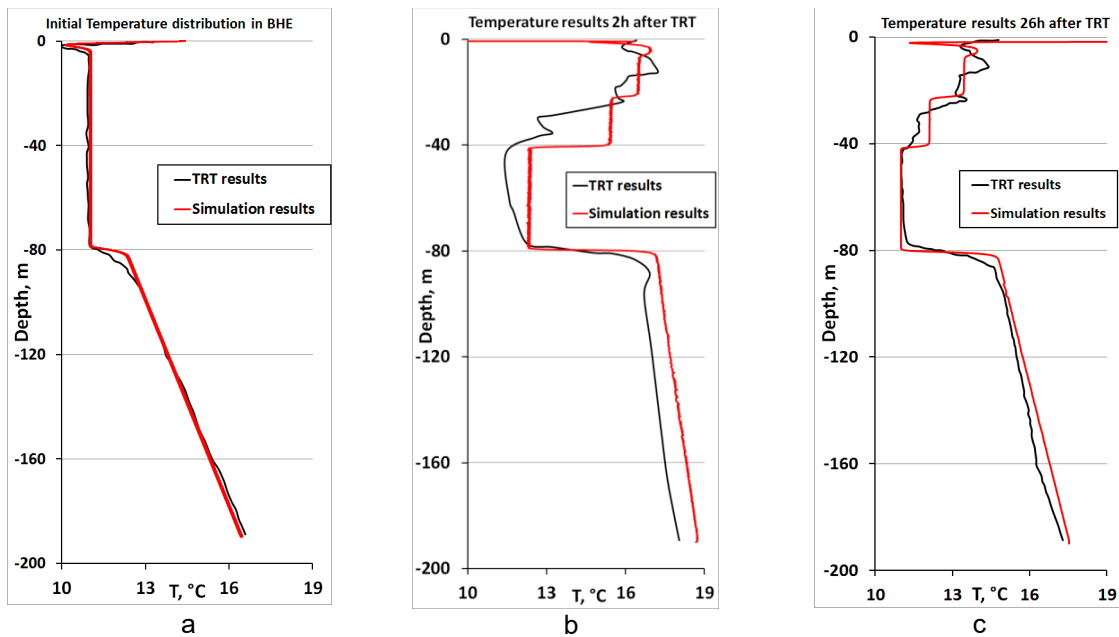


Abbildung 2: Vergleich des Temperaturverlaufs innerhalb der Rohrleitungen der Erdwärmesonde im Initialzustand (a) und TRT-Status (b & c).

Wie in Abb. 2 zu sehen ist, zeigt sich nach 26 h (b) eine bessere Übereinstimmung zwischen der Simulation und der Feldmessung als dies nach 2 h (a) der Fall ist. Der Grund dafür ist, dass sich das System mit zunehmender Zeit nach Abbruch des Versuchs dem stationären Zustand immer mehr annähert, insbesondere aufgrund hoher Konvektion im Bereich zwischen 39 m und 80 m. Mittels eines TRT-Tests wurde festgestellt, dass die überschüssige Wärme um die Erdwärmesonde herum durch konvektive Prozesse nach unten transportiert wird. Die schrittweise Absenkung der Temperatur in den Bereichen zwischen 6 m und 18 m sowie 18 m und 39 m ist auf unterschiedliche hydraulische Leitfähigkeitswerte und unterschiedliche Fließgeschwindigkeiten des Grundwassers zurückzuführen. Die wellige Form des TRT-Temperaturprofils an der Oberfläche könnte auf die Vermischung der Flüssigkeit im Rohr während der Messung zurückzuführen sein. Der Unterschied zwischen dem exakten Zeitpunkt der Messung im Feld und dem Extrahieren der Ergebnisse aus dem numerischen Modell, insbesondere nach 2 Stunden, könnte als weitere Ursache für die Abweichung genannt werden. Daher wurde eine zusätzliche Parameterstudie durchgeführt, um den Einfluss einiger Parameter zu untersuchen, d.h. der zugeführte Volumenstrom innerhalb der Rohre, die Dicke der Betonüberdeckung, die Wärmeleitfähigkeit und die Fließgeschwindigkeit des Grundwassers wurden im Sinne einer Sensitivitätsanalyse variiert. Die abschließende und detailliertere Parameterstudie wurde in der dritten Phase dieser Studie durchgeführt.

Zweite Phase

In der zweiten Phase des Projekts wurde eine Untersuchung des gesamten Erdwärmesondenfeldes durchgeführt. Hauptziele der Untersuchung waren:

Hydrologische Studie zur Bestimmung der Richtung des Grundwasserstroms, zur Beurteilung der thermischen Interaktion der Erdwärmesonden untereinander.

Simulation des langfristigen Betriebs des Gesamtsystems zur Analyse der Temperaturentwicklung im Untergrund.

Für die hydrologische Studie wurde ein Wassereinzugsgebiet auf der Grundlage des „S&P Hydrology Study Report“ um den Projektstandort herum definiert. Zwei Vorfluter und zwei Reservoirs wurden jeweils als feste Potentiale auf der linken und rechten Seite des Modells definiert. Das Ergebnis der Simulation definierte die Richtung des Grundwassers im Feld, insbesondere im Hinblick auf das Erdwärmesondenfeld (Abb. 3).

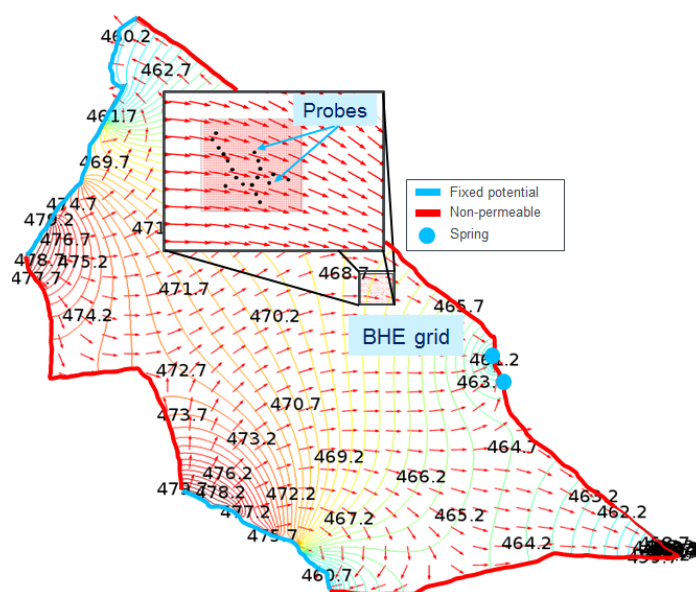


Abbildung 3: Orientierung des Grundwasserstroms im Umfeld des Erdwärmesondenfeldes

Die Berücksichtigung des gesamten Systems von Erdwärmesonden in der Simulation führt zu einem großen Berechnungsbereich. Daher werden die Erdwärmesonden vereinfacht als zylindrische Linienwärmesenken mit einer gleichmäßigen Wärmeentnahmerate dargestellt. Bei diesem Ansatz entfallen die Absorberrohrgeometrie und das Füllmaterial einer Erdwärmesonde, was zu einer schnelleren numerischen Berechnung führt (Abb. 4).

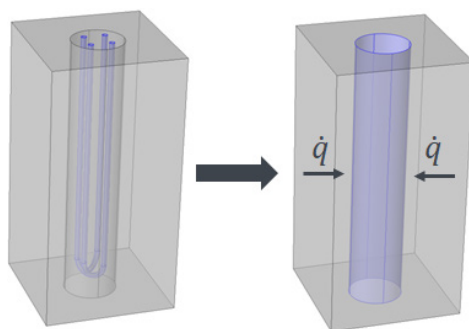


Abbildung 4: Hans-Rehn-Stift - Reduzierung einer Doppel-U-Erdwärmesonde auf eine zylindrische Quelle.

Um die Wärmestromgeschwindigkeit q im zylindrischen Modell zu definieren, besteht das detaillierte numerische Modell aus Absorberrohren und Füllmaterial, welches ein Jahr lang mit kontinuierlichem Betriebsmodus im Winter und ohne Betrieb im Sommer betrieben wurde. Am Ende der Simulation wurden die Wärmestromwerte an der Außenfläche der Erdwärmesonde bestimmt, um die drei verschiedenen Bedingungen des Untergrunds sowie der Tiefe der Erdwärmesonde abzubilden. Die extrahierten Werte sind als Wärmestromgrenzen für das zylindrische Modell definiert (Abb. 5).

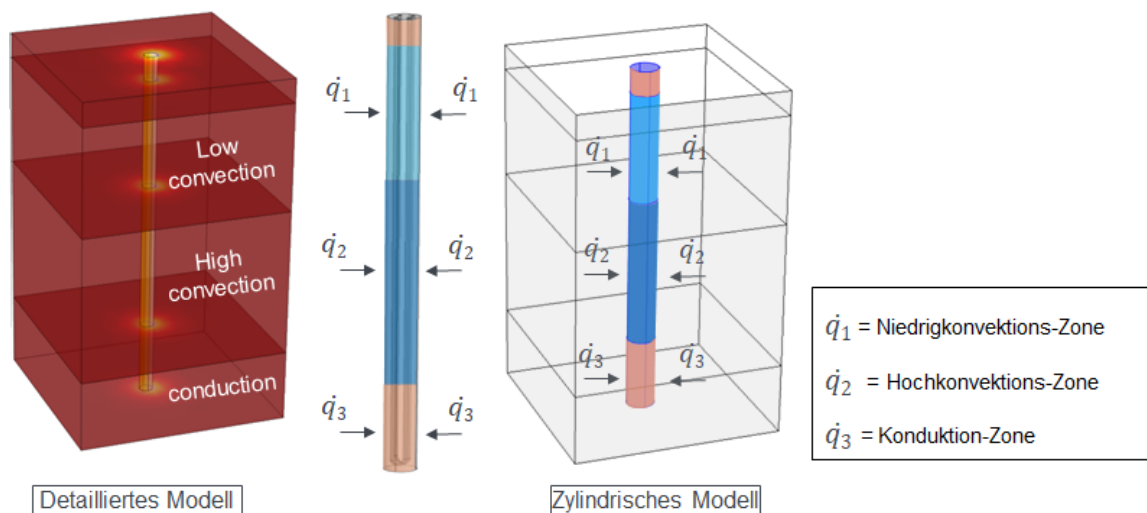


Abbildung 5: Definition der Wärmestromgrenzen gemäß Untergrundbedingungen

Alle Erdwärmesonden des Hans-Rehn-Stifts sind nach dem Ansatz des Zylindrischen Modells in ein geschichtetes Untergrundmodell mit Grundwasserströmung in den Schichten von 8 m bis

80 m eingebettet. Das numerische Modell wurde verwendet, um das Temperaturfeld des Untergrundes in den drei Zonen einer niedrigen und einer hohen Konvektion sowie einer reinen Konduktion für einen Jahresgang zu simulieren.

Die Simulation zeigt, dass sich die Temperatur des Bodens in der Hochkonvektionszone aufgrund der hohen Grundwassergeschwindigkeit innerhalb einer kurzen Zeitspanne von einem Tag auf die Anfangstemperatur erholt. In der Zone mit geringer Konvektion, folglich geringer Strömungsgeschwindigkeit des Grundwassers, dauert es zwischen 20 bis 68 Tage in Tiefen von 8m bis 25m bzw. von 25m bis 40m, bis die ungestörte Temperatur den Status vor Betriebsbeginn erreicht hat. In der Konduktionszone kann die Temperatur im Untergrund während des ganzen Sommers bis zu 92 % ihrer ungestörten Temperatur erreichen (kein Betrieb). Weitere Details sind im Interim-Bericht 2 erläutert.

Dritte Phase

In der dritten Phase des Projekts wurde im Kontext mit der numerischen Simulation des Thermal Response Tests eine detailliertere Untersuchung mit Hilfe einer Parameterstudie durchgeführt, die zu einer besseren Abschätzung der Grundwasserfließgeschwindigkeit und Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes um das Hans-Rehn-Stift führt ($v_f = 1,7 \text{ m/d}$ und $\lambda = 3,3 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$). Die Ergebnisse dieser Parameterstudie wurden von Liaghi et al. (2020) veröffentlicht. Auch in dieser Phase wurde das gesamte geothermische System, welches aus 21 Erdwärmesonden besteht, untersucht. Die Hauptziele der Studie wurden wie folgt definiert:

1. Numerische Simulation des gesamten Erdwärmesondenfeldes.
2. Bewertung des Potentials des Erdwärmesondenfeldes zur Energiespeicherung

Für diese Studie wurde eine neue Netzstruktur verwendet, um den Berechnungsaufwand und damit die Berechnungszeit der Simulation zu reduzieren. Dieser Ansatz bietet die Möglichkeit, ein numerisches 3D-Modell zu erstellen, das für das gesamte Netz repräsentativ ist und die auftretenden physikalischen Prozesse physikalisch zutreffend u.a. unter Berücksichtigung der Zirkulation der Flüssigkeit innerhalb der Rohre und der Ringraumverfüllung der Erdwärmesonden zu berücksichtigen. Das numerische Modell wurde erfolgreich durch Temperaturmessungen an dem geothermischen Sondenfeld aus dem Betrieb des Hans-Rehn-Stifts verifiziert (Zwischenbericht 3).

Das von der IGS entwickelte numerische Modell ist ein leistungsfähiges Werkzeug zur Analyse des BHE-Systems für zukünftige Energiekonzepte in Kontext mit der geplanten Modernisierung des Hans-Rehn-Stifts. Es besteht auch die Möglichkeit, das entwickelte numerische Modell mit einer Simulationssoftware für die Haustechnik, z.B. der TRNSYS-Software zu koppeln, um alle Energiekomponenten im Hans-Rehn-Stift gemeinsam zu untersuchen.

Die numerischen Untersuchungen zeigen, dass eine effiziente Energiespeicherung durch das geothermische Feld nicht möglich ist. Da sich nur ein kleiner Bruchteil der Länge der Erdwärmesonden in der Konduktionszone ohne Grundwassereffekt befindet, ist das Speicherpotential des geothermischen Systems gering. Die thermische Wirkung der Erdwärmesonden in den Tiefen von 20 bis 80 m unter GOK wird aufgrund der hohen Advektionswirkung in kurzer Entfernung abgeführt.

Rosensteintunnel

Das Straßenbauprojekt Rosensteintunnel (Tunnellänge rund 1.000 m) schließt im Gesamtaufbau der Bundesstraße B10 die Lücke zwischen Stuttgart-Zuffenhausen und Stuttgart-Ost (Abb. 6). Im Rahmen des Bauentwurfs entstand auch der Gedanke, den Rosensteintunnel mit einer Geothermieanlage zur Gewinnung von Energie aus der Erdwärme auszustatten. Daher befinden sich am Übergang sieben Blöcke jeder Tunnelröhre mit Absorberrohren. Die gesamte Absorberfläche beträgt etwa 3.330 m². Die gewonnene Energie aus dem System soll zukünftig zur Heizung in Winter und ein Teil der Kühlung im Sommer für das vorgeschlagene neue Elefantenhaus der Wilhelma genutzt werden.



Abbildung 6: Lage des Rosensteintunnels in Stuttgart (LHS Stuttgart Tiefbauamt)

Installation der Temperaturlanzen

Im Rahmen des GeoSpeicher-Projekts wurden 6 Temperaturlanzen mit einer Länge von 20 cm und 4 Temperaturlanzen mit einer Länge von 30 cm jeweils in der Außen- und Innenschale der nördlichen und südlichen Tunnelröhre des Rosensteintunnels installiert (Abb. 7) (1. und 3. Zwischenbericht). Untersuchungen am IGS zeigen, dass das Tunnelklima einen wesentlichen Beitrag zum geothermischen Potential einer Tunnelgeothermieanlage liefert. Ein Baustein zur Beschreibung dieser Wärmeströme ist die Kenntnis über den lokalen Wärmeübergang von der Tunnel Luft an die Tunnelschale. Die Überwachung der Temperaturentwicklung innerhalb der Tunnelschale (äußere und innere Tunnelschale) liefert wertvolle Informationen zur Bestimmung des zugehörigen Wärmeübergangskoeffizienten. Die 30 cm Lanzen sind so konzipiert, dass die Temperatur in der Innenschale besonders nah an der Oberfläche der Schale gemessen werden kann, ohne den natürlichen Luftstrom in den Röhren zu beeinflussen (3. Zwischenbericht).

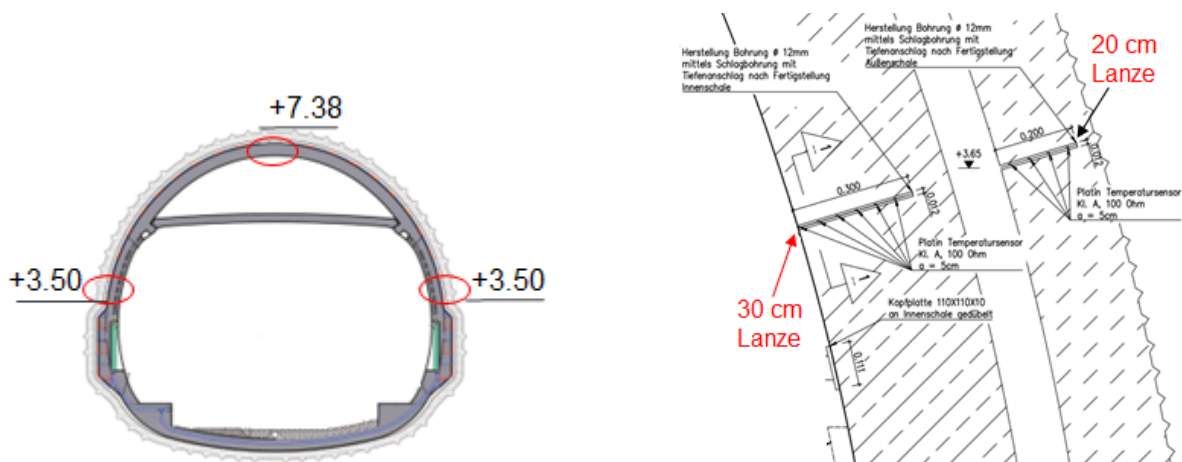


Abbildung 7: Rosensteintunnel - 20 cm-Lanzen in der Außenschale und 30 cm-Lanzen in der Innenschale im Bereich der Seitenwände und der Firste

Durch die Fertigstellung der Installationen ist es nun möglich, die Temperaturentwicklung innerhalb der Tunnelschale vor und nach der Freigabe des Verkehrs im Tunnel zu überwachen. Dies wird wertvolle Erkenntnisse zur Auswirkung des Verkehrsgeschehens auf die potenzielle geothermische Energie-Extraktion des thermisch aktivierten Tunnels liefern.

Installation von Datenloggern

Am 14.05.2020 wurde ein Datenlogger innerhalb eines Modulverteilerkastens an der Nordwand der Südröhre installiert. Sechs Temperatursensoren von der dortigen Außenschalenlanze und zwei der Innenschalenlanze sind an den Datenlogger angeschlossen (Abb. 8).

Der Datenlogger wurde für eine Testtemperaturaufzeichnung über einen Zeitraum von 12 Tagen eingestellt. Am 28.05.2020 wurde der Betrieb des Datenloggers für die Testperiode überprüft und die Aufzeichnung ausgelesen. Es zeigt sich, dass der Datenlogger gemäß der Programmierung arbeitet und die aufgezeichneten Temperaturdaten extrahiert werden können. Der Datenlogger ist nun mit den gleichen angeschlossenen Temperatursensoren auf ein Messintervall von 15 min eingestellt.

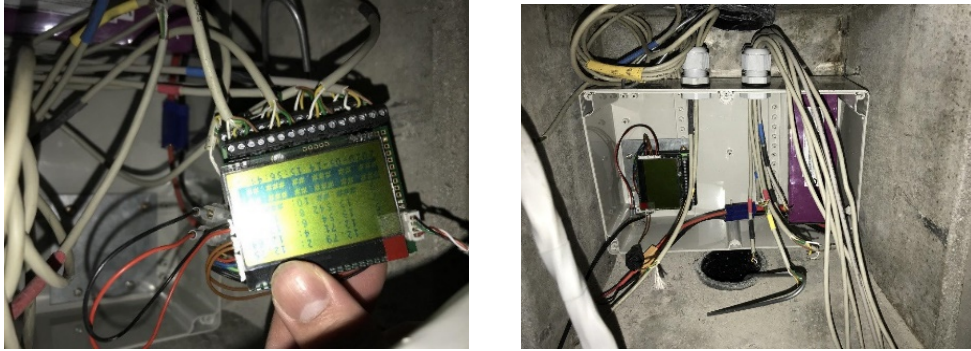


Abbildung 8: Rosensteintunnel - Installation des Datenloggers in einem Modulverteilerkasten.

Aquadrom Hockenheim

Das Freizeitbad Aquadrom in der Stadt Hockenheim liegt im Oberrheingraben etwa 6 km östlich des Rheins in Baden-Württemberg. Die örtlichen Stadtwerke betreiben das Bad, bestehend aus Innen- und Außenbecken, mit einer Grundfläche von ca. 6.000 m². Die vier Schwimmbecken haben eine konstante Temperatur von bis zu 32 °C und müssen daher permanent beheizt werden. Das Untergeschoss des Gebäudekomplexes befindet sich unterhalb der beheizten Schwimmbecken, was das ganze Jahr über zu erhöhten Lufttemperaturen führt. Die erwärmte Luft des Kellers gelangte in den Untergrund und erwärmt das Grundwasser unterhalb des Gebäudes.

Grundlagen

Wie bereits im vorherigen Bericht erwähnt, wurde ein dreidimensionales thermisch-hydraulisch gekoppeltes Modell entwickelt, um detailliertere Berechnungen durchzuführen. Ziel dieser Simulationen war es, die thermischen Auswirkungen auf den Untergrund und das oberflächennahe Grundwasser durch Schwimmbecken und ähnlichen spezifischen anthropogenen Wärmequellen zu untersuchen, da hierzu bisher kaum Erkenntnisse vorliegen. Deshalb wurde seit dem letzten Bericht eine detailliertere Studie durchgeführt, um die thermischen Auswirkungen des Aquadrom-Schwimmbeckens auf den Untergrund zu bewerten. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen werden in der Zeitschrift "Energie und Gebäude" veröffentlicht.

Die Studie betrachtet hauptsächlich den Wärmeeintrag des warmen Untergeschosses des Schwimmbeckens auf den darunterliegenden flachen Grundwasserleiter. Die Hauptziele sind daher eine quantitative Abschätzung des Wärmeflusses aus dem Souterrain in den Untergrund und die Bewertung der daraus resultierenden anthropogenen Wärmeintensität (AHI). Um eine

angemessene Genauigkeit bei der Ermittlung der lateralen und vertikalen Wärmeverteilung zu gewährleisten, werden auch meteorologische Daten des Feldes berücksichtigt und dem dreidimensionalen thermisch-hydraulisch gekoppelten Modell hinzugefügt. Ebenfalls wird die räumliche Dimension des Wärmeeintrags durch das Schwimmbecken und das geothermische Potential des gesamten Areals untersucht.

Numerische Simulationen

Die gemessenen Grundwassertemperaturprofile werden mit den Ergebnissen der Simulation verglichen, um das numerische Modell und die Genauigkeit der modellierten Werte zu verifizieren. So werden für den Vergleich die Messbrunnen P3, P8 und P4, die sich stromaufwärts, unter dem Keller bzw. stromabwärts des Gebäudes befinden, ausgewählt (Abb.9).

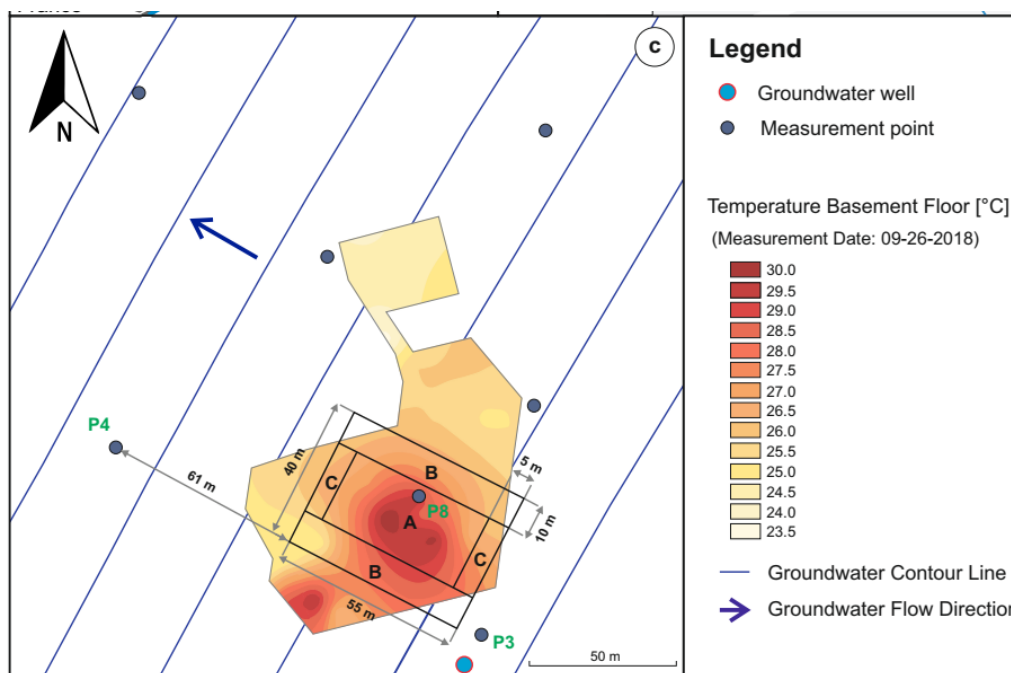


Abbildung 9: Aquadrom Hockenheim - Lage der Messbrunnen, Grundwasserkonturlinien, Messpunkte und Wärmekarte des Untergeschosses im Aquadrom.

Der Vergleich der vertikalen Temperaturprofile ist in Abb. 10 dargestellt. Es besteht eine gute Übereinstimmung zwischen den numerischen Simulationsergebnissen und den Messdaten für P8. Dieser Messpunkt befindet sich in der Mitte des Untergeschosses, dem heißesten Punkt mit einer nahezu konstanten Lufttemperatur von 29°C über das ganze Jahr. Im Gegensatz dazu sind P3 und P4 beide dem Einfluss der Außentemperatur ausgesetzt. Aufgrund der Tatsache, dass die Messungen in bis zu 8 m Tiefe durchgeführt wurden, beeinflusst die Schwankung der Außenlufttemperatur die vertikale Grundwassertemperaturverteilung stark. Die Ergebnisse zeigen,

dass die Wärmestromgrenze, die die Oberfläche des Modells definiert, die vertikale Grundwassertemperaturverteilung erfolgreich und mit hoher Genauigkeit reproduziert, indem die atmosphärische Bedingung in jedem Zeitschritt (stündlich) berücksichtigt wird.

Abbildung 10 zeigt, dass das numerische Modell in der Lage ist, jahreszeitliche vertikale Temperaturschwankungen im Untergrund zu erfassen. Als Grund für die geringe Abweichung zwischen den modellierten und den gemessenen Ergebnissen können die schwankende atmosphärische Temperatur, die Vereinfachung des Untergrundes und die leichte Variation der Grundwasser-Strömungsrichtung genannt werden. Es ist zu beachten, dass im Messbrunnen P8 ab Apr 2017 keine Aufzeichnung der Grundwassertemperatur verfügbar ist.

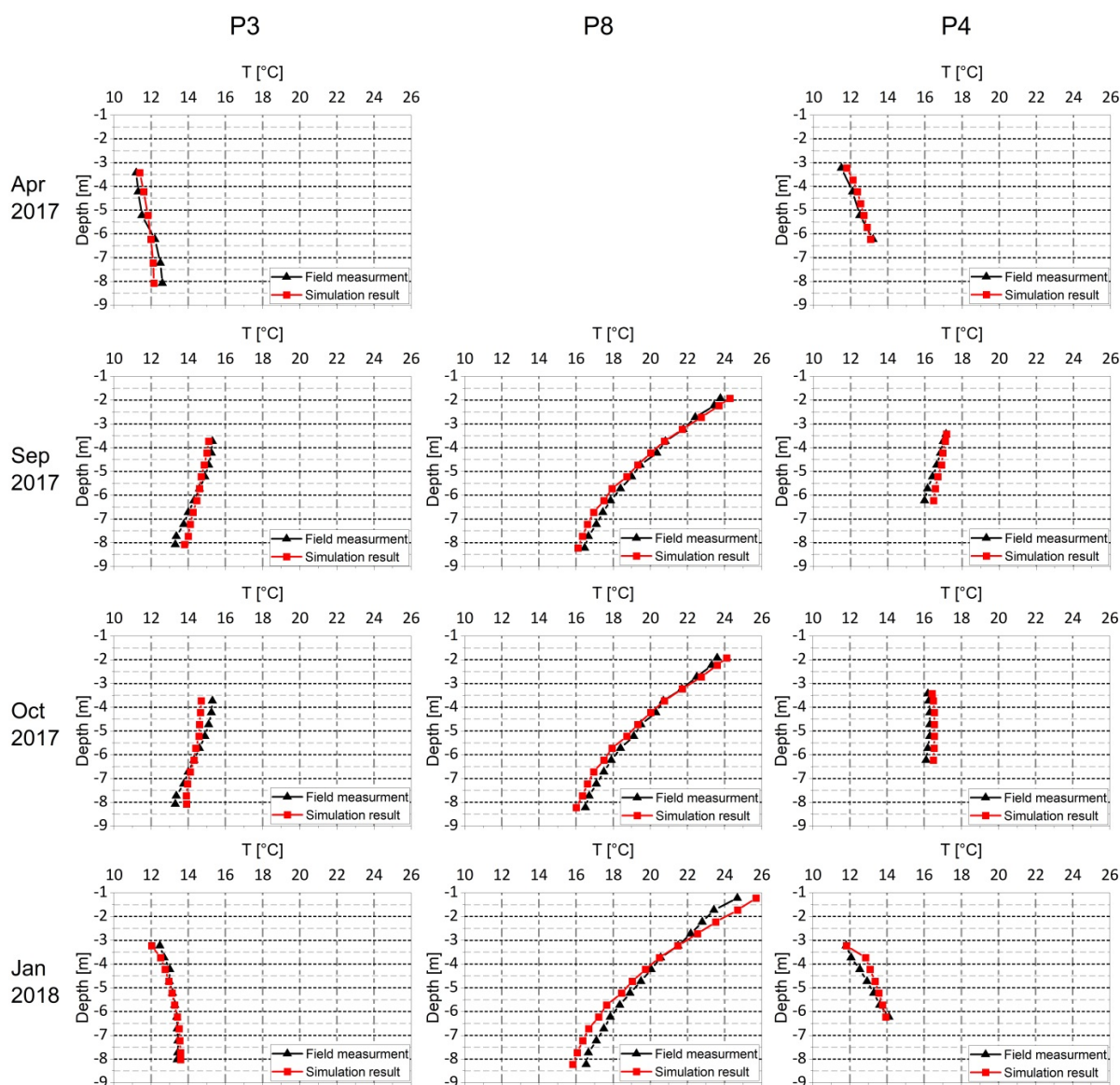


Abbildung 10: Aquadrom Hockenheim - Vergleich zwischen gemessenen Felddaten und numerischer Simulation

Thermische Auswirkungen des Schwimmbeckens auf den Untergrund

Das verifizierte Modell wurde zur Bewertung der thermischen Auswirkungen des Aquadrom-Schwimmbeckens auf das Grundwasser und den Untergrund verwendet. Die Dimension der Grenzen der Wärmeeinwirkung des Beckenkellers auf den Untergrund, wird als eine Schlüsselfrage für die wissenschaftliche Untersuchung betrachtet. Abb. 11 zeigt das Temperaturfeld am Unterlauf des Gebäudes im September 2017. Der Modellbereich wird bis zu 300 m stromabwärts erweitert, um umfassende Informationen über die dreidimensionale Wärmeverteilung zu erhalten.

Abb. 11 zeigt eine geschichtete Temperaturverteilung stromabwärts des Kellers. Zunächst wird die Wärmefahne auf ihrem Weg stromabwärts ausgeweitet. Mit zunehmendem Abstand zum Gebäude schrumpft die Breite der Wärmefahne jedoch, was eine Folge der atmosphärischen Temperatur und der Grundwasseradvektion ist. So wandern niedrigere Temperaturwerte weit in den Untergrund, während höhere Temperaturen schneller abgebaut werden.

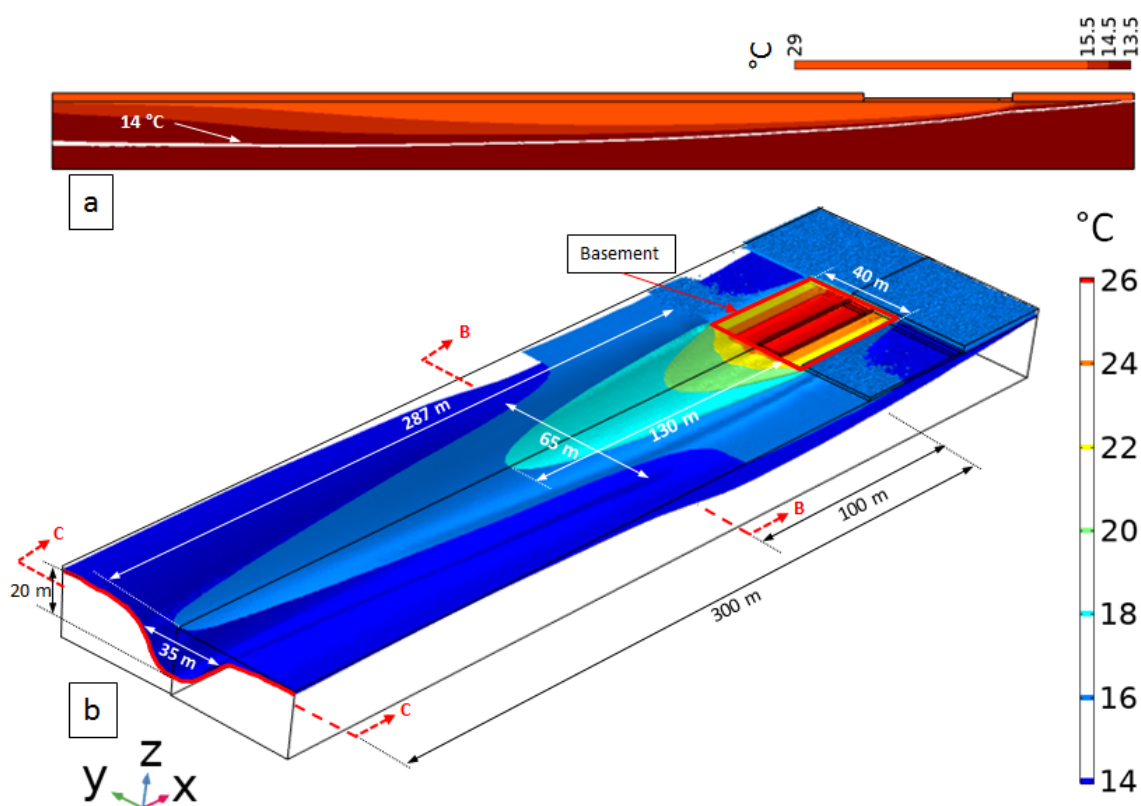


Abbildung 11: Temperaturverteilung im Untergrund infolge der Schwimmbeckenheizung

Abbildung 11a zeigt, dass eine Temperatur von 14°C, die als Mindestschwelle der Kellerwärmewirkung auf den Untergrund gilt, in bis zu 20 m Tiefe und mehr als 300 m stromabwärts im Grundwasser nachweisbar ist. In der Nähe der Oberfläche verteilt sich die Fahne mehr als 60 m von der Mitte des Untergrundes zu den Seiten. Mit zunehmender Tiefe nimmt die Breite der Fahne jedoch ab.

Aus den Simulationen kann geschlossen werden, dass die resultierende Temperaturfahne aus der Kellerwärme in der Nähe des Kellers eine größere Breite hat und mit zunehmender Tiefe und weiter stromabwärts abnimmt. Abb. 11b zeigt, dass die Temperaturfahne sich mit 18°C bzw. 16°C bis zu 67 m bzw. 287 m mit einer maximalen Tiefe von 6,5 m bzw. 8,7 m ausbreitet. Für einen höheren Temperaturbereich von ca. 22°C tritt die maximale Tiefe in der Nähe des stromabwärts gelegenen Kellerendes auf. Der Wärmetransport in Oberflächennähe bis 6 m Tiefe hängt stark von der Jahreszeit ab. In der kalten Jahreszeit wird die Wärme durch das Eindringen der kalten Witterung in die Tiefe abgeschwächt. In der heißen Jahreszeit hingegen wandert die dreidimensionale Wärmeverteilung mit höheren Temperaturen tiefer in den Untergrund.

Über eine effizientere Energiegewinnung durch flache geothermische Systeme, welche die städtischen Wärmeinseln im Untergrund ausnutzen, wurde schon in mehreren Studien berichtet. Feldmessungen und numerische Untersuchungen zeigen einen Anstieg der unterirdischen Temperatur aufgrund des anthropogenen Wärmeeintrags des Aquadroms. Die Untersuchungen zeigen erhöhte Grundwassertemperaturen im Unterlauf des Beckens mit Weiten von bis zu 300 m und mehr. Daher gibt es ein höheres geothermisches Energiepotenzial, das in dieser Region zur Deckung eines Heizenergiebedarfs gewonnen werden kann.

Veröffentlichungen

[1] M. Liaghi, B. Westrich, C. Moormann (2019): Parameter sensitivity analysis on thermal response test (TRT) under complex condition of groundwater flow using thermo-hydro coupled numerical model. 8. Symposium Umweltgeotechnik, Fachsektionstage Geotechnik: interdisziplinäres Forum, 29.-30. Oktober 2019, DGGT, Würzburg, S. 620-625. ISBN 978-3-946039-06-8.

[2] M. Liaghi, B. Westrich, C. Moormann (2020): Numerical simulation of thermal response test under high groundwater advection and evaluation of thermal properties of the subsurface in the practice of Hans-Rehn-Stift case study. Technische Akademie Esslingen TAE (Januar 2020)

Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, Institut für Geowissenschaften

Prof. Dr. Margot Isenbeck-Schröter, Dr. Simon Ritter mit dem Projektteam

Teilprojekt Universität Heidelberg (Teil 3): Einfluss der Einspeicherung von Wärme im oberflächennahen Aquifer auf die Hydrogeochemie des Aquifers (GeoSpeicher.bw)

Förderkennzeichen: L75 16016

Einleitung

Am 9. März 2017 fand in Karlsruhe das Kick-Off-Meeting zum Projekt *GeoSpeicher.bw* statt, bei dem alle Projektbeteiligten ihre jeweiligen Projekte, Partner und Doktoranden vorstellten. Bei dieser Gelegenheit wurde konkret für die Teilprojekte, die am *Aquadrom Hockenheim* zusammenarbeiten, eine erste Probenahmekampagne am Standort vereinbart. Die Termine der Probenahmen auf dem Standort sowie die Art der entnommenen Proben sind in Tab. 1 zusammengestellt. Die Projektbearbeitung erfolgte im gesamten Zeitraum verantwortlich durch Prof. Dr. Margot Isenbeck-Schröter und Dr. Simon Ritter. Beide wurden dabei von Studierenden im Bachelor- und Masterstudiengang Geowissenschaften sowie von den Mitarbeitern der Wasserlabors des Heidelberger Instituts für Geowissenschaften Silvia Rheinberger, Stefan Rheinberger und Christian Scholz sowie in der Verwaltung von Torsten Hoffmann unterstützt. Im Projektablauf wurde zunächst eine umfangreiche Literaturstudie zum Thema *oberflächennahe Geothermie und hydrogeochemische Einflüsse auf die thermische Nutzung von Grundwasserleitern* durchgeführt und dann eine detaillierte Versuchs- und Messstrategie für das Forschungsvorhaben entwickelt.

Ziel der Projektgruppe *Aquadrom Hockenheim* war es, auf dem Gelände des Aquadroms in Hockenheim ein ATES-System zu installieren bzw. zunächst die Möglichkeiten dazu zu prüfen und eine Empfehlung auszusprechen. Im Teilprojekt *GeoSpeicher.HD* wurden vor allem Fragestellungen zu hydrogeochemischen Veränderungen im Aquifer durch die Einspeisung höherer Temperaturen bearbeitet. Dazu wurden mehrere Probenahmekampagnen auf dem Standort zur Wasser- und Sedimentprobenahme sowie Laborexperimente in Säulen mit Material und Wasser vom Standort unter Variation der Temperatur durchgeführt. Die Ergebnisse der Untersuchungen kombiniert mit für die Interpretation der Messungen wichtigen geochemischen Modellierungen mit PHREEQC sowie die sich daraus ergebenden Folgen für die Entwicklung eines ATES-Systems am Aquadrom in Hockenheim werden nachfolgend kompakt dargestellt.

Die gesamten Datensätze, die im Zuge des Teilvorhabens erstellt wurden, sowie eine Beschreibung der verwendeten Methoden, sind in dem Online Datenrepositorium heiDATA der Universität Heidelberg veröffentlicht und unter dem Link <https://doi.org/10.11588/data/GLQLSH> abrufbar.

Tab. 1: Probenahmekampagnen auf dem Standort Aquadrom Hockenheim

Datum	Probenart	Aktivität	Analysen
03.04.- 12.04.2017	Wasserprobenahme	Direct-Push Bohrungen; Beprobung von P1-P4	Wasserstände, Kationen, Anionen, Spurenmetalle, SEE, Temperaturprofile
28.08.2017	Sedimentprobenahme	Rammkernsondierung; Bohrung neuer Rammpegel; Sedimentprobenahme	Königswasseraufschlüsse von Sedimentmaterial, Messung der Kationen
28.09.2017	Wasserprobenahme	Beprobung der neuen Pegel P1-P8	Wasserstände, Kationen, Anionen, Temperaturprofile
13.03.2018	Sedimentprobenahme	Errichtung von IB 1 Infiltrationsbrunnen im Anstrom; Beprobung des Sedimentmaterials	Königswasseraufschlüsse von Sedimentmaterial, Messung der Kationen
07.06.- 08.06.2018	Wasserprobenahme (Stefan Rheinberger)	Pumpversuch IB 1	Wasserstände, Kationen, Anionen
26.09.2018		Temperaturmessungen im Keller	Temperaturmessung
17.11.2018	Wasserprobenahme	Studentische Projektgruppe. Beprobung der Pegel und T-Messung	Wasserstände, Kationen, Anionen, CH4 Analysen,
13.11.2019	Wasserprobenahme	Studentische Projektgruppe. Beprobung der Pegel und T-Messung	Wasserstände, Kationen, Anionen, Temperaturprofile
08.06.- 10.06.2020	Wasserprobenahme	Hydrogeologische Übungen (Direct-Push Bohrungen; Beprobung der Pegel)	Wasserstände, Kationen, Anionen, Temperaturprofile

Hydrogeologische und hydrogeochemische Untersuchungen am Standort Aquadrom Hockenheim

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Arbeiten auf dem Standort *Aquadrom Hockenheim* vorgestellt.

Bestimmung der Grundwasserfließrichtung

Im ersten Schritt für die Planung und Umsetzung eines ATES-Systems am Standort Aquadrom in Hockenheim wurden im April 2017 hydrogeologische Untersuchungen im oberflächennahen

Aquifer durchgeführt. Zunächst wurde die Grundwasserfließrichtung in mehreren Stichtagsmessungen der bestehenden vier Grundwassermesspegel bestimmt. Das Grundwasser zeigt in allen Stichtagsmessungen ein Gefälle in Richtung Nord-Westen auf den Vorfluters Rhein zu (Abb. 1). Die absoluten Wasserstände variieren dabei in Abhängigkeit von der Jahreszeit gleichsinnig um bis zu 50 cm.

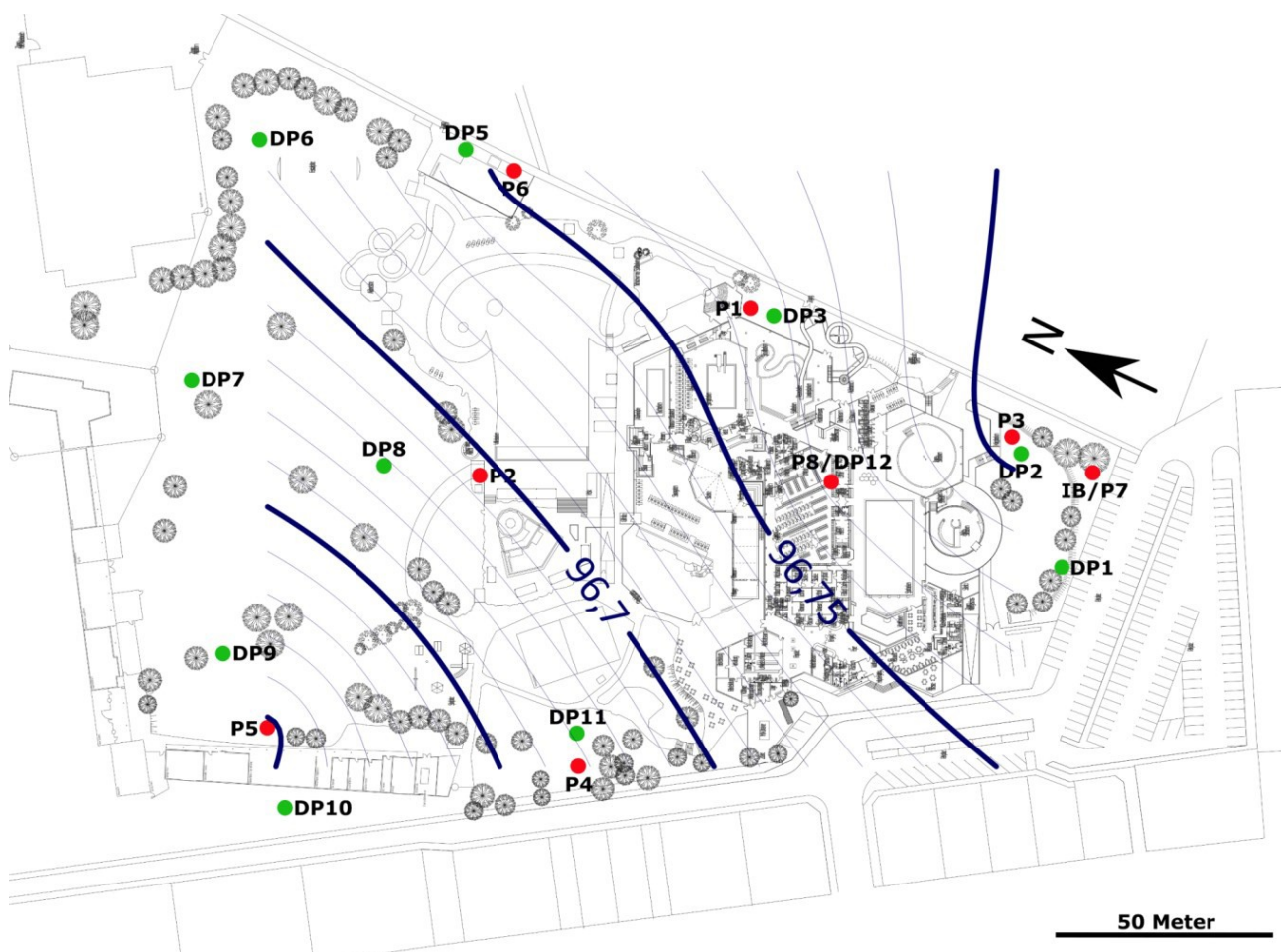


Abb. 1: Karte des Aquadromgeländes in Hockenheim. Die Grundwasserfließrichtung Nord- West wurde mit den Pegeln P1–P8 bestimmt (rote Kreise). DP1–DP12 stellen die Direct-Push Bohrungen dar. IB bezeichnet den Infiltrationsbrunnen. Daten aus der Probenahme Juni 2020.

Hydrogeochemie der Grundwässer am Standort

Im April 2017 wurden insgesamt elf Direct-Push Bohrungen mit dem Geoprobe System auf dem Gelände des Aquadroms durchgeführt, um eine hoch aufgelöste Datengrundlage für die Hydrogeochemie zu erhalten. Das Geoprobe-System ermöglicht eine tiefenzonierte Beprobung des Grundwassers in einer Tiefe bis zu 15 m unter Flur. Die Lage der Bohrungen findet sich in Abb. 1. So wurden zusammen mit Proben aus den bereits bestehenden vier Pegeln Grundwasserproben gewonnen und im Labor am Institut für Geowissenschaften untersucht. Während

die Pegel zur Überprüfung des Grundwasserchemismus im Jahresabstand beprobt wurden, erfolgte eine weitere Geoprobe-Kampagne nach Abschluss des Projektes gemeinsam mit Studierenden im Juni 2020. Insgesamt ergaben sich repräsentativ ähnliche Bilder. Typische Charakteristika zeigen die Piper-Diagramme in Abb.2 und die Stiff-Diagramme ausgewählter Messstellen in Abb. 3.

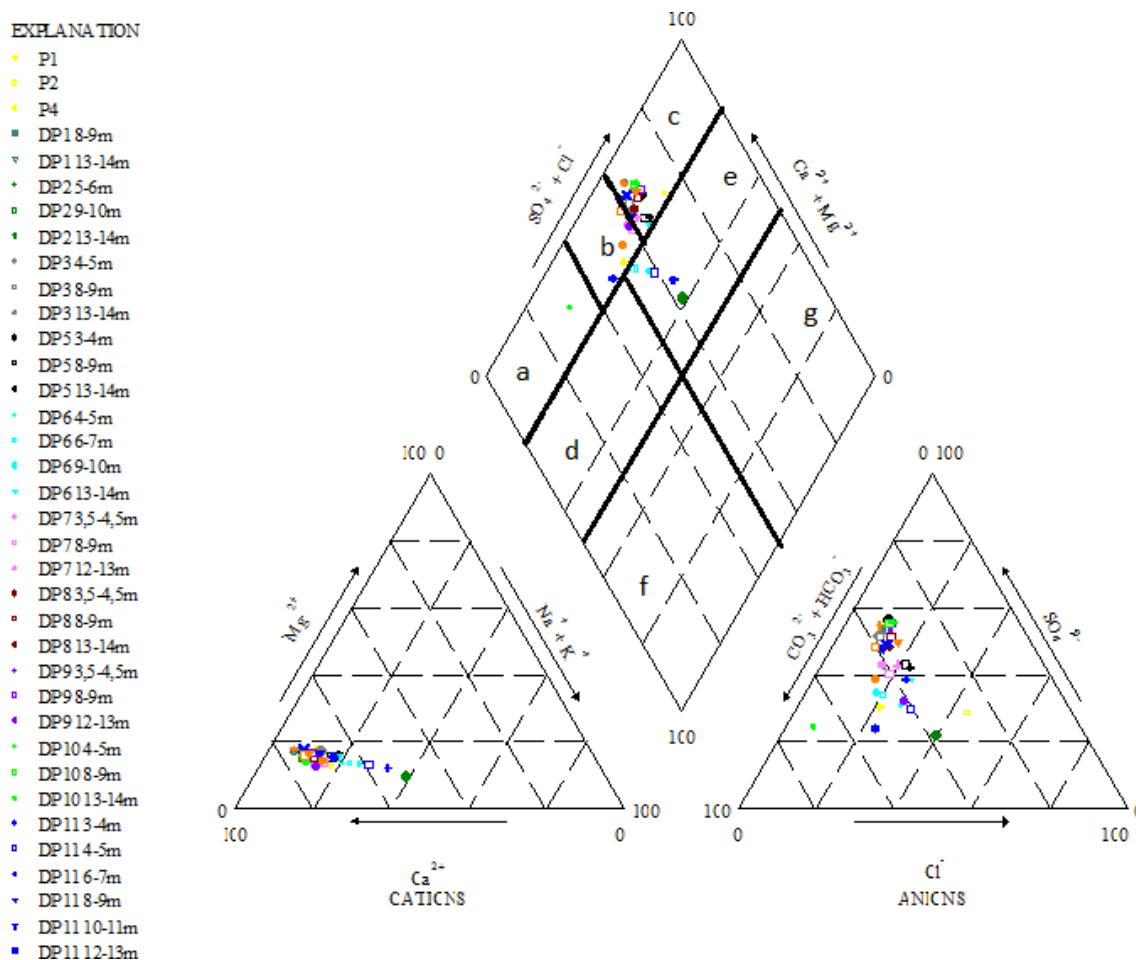


Abb.2: Piper-Diagramm der Grundwasserproben am Aquadrom in Hockenheim. Die Wässer sind überwiegend dem Typ Ca-HCO₃-SO₄ zuzuordnen. Dabei gehen oberflächennahe Wässer eher in Richtung Neubildungswasser (Ca-HCO₃-Typ) während die Sulfatgehalte nach unten zunehmen. Bei einzelnen Proben sind Versalzungserscheinungen zu finden (Ca-Cl-Typ). Daten aus der Probenahme April 2017.

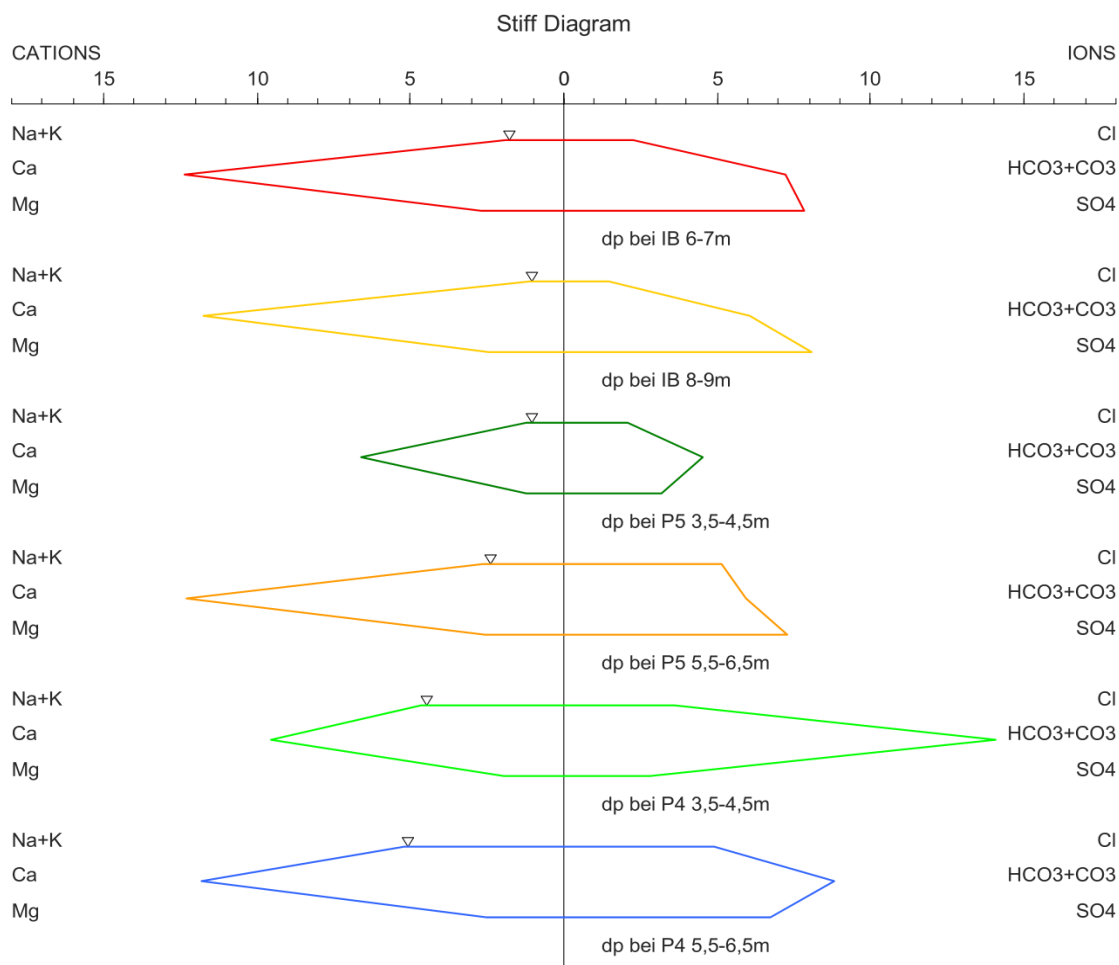


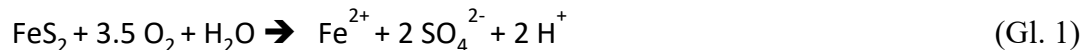
Abb. 3: Stiff-Diagramme ausgewählter Direct-Push-Wässer (DP) vom Standort Hockenheim. Der dominante Ca-HCO₃-SO₄-Typ (DP bei IB, 6-7 m), der durch Neubildung und Pyritoxidation entstanden ist, variiert hierbei durch einen höheren Neubildungsanteil im oberflächennahen Bereich (DP bei P 5 3,5-4,5 m) und höhere Sulfatgehalte in tieferen Bereichen (DP bei IB 8-9 m). Daten aus der Probenahme Juni 2020.

Der Großteil der Proben weist sehr ähnliche Kationenverhältnisse auf und zeigt typische Merkmale des Chemismus im oberen Aquifer des nördlichen Oberrheingrabens. Dabei sind die Ionengehalte bei einer gemessenen Leitfähigkeit um 1600 bis zu 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ vergleichsweise hoch.

Das oberflächennahe Grundwasser ist überwiegend vom Typ Ca-HCO₃-SO₄ (Abb.2, Abb. 3), dieses trifft auch für die Mischwässer aus den Pegelbeprobungen zu. Neben dem Haupttyp treten nur untergeordnet Calcium-Hydrogencarbonat, und Calcium- Chlorid bzw. Natrium-Hydrogencarbonat dominierte Wässer auf. So waren bei der ersten Probenahme leichte Versalzungserscheinungen zu beobachten (Ca-Cl-Typ), die vermutlich auf Kontamination durch das

Solebecken zurückzuführen waren. Im Frühjahr 2020 zeigten sich dagegen schon wieder Auf-süssungserscheinungen durch Dominanz von Hydrogencarbonat kombiniert mit höheren Natriumgehalten (Abb. 3, DP bei P4 3,5-4,5 m).

Der dominante hydrogeochemische Prozess im Aquifer ist nach der im carbonatischen Milieu auftretenden Carbonatlösung durch Kohlensäure die Pyritoxidation (Gl. 1), die das Neubildungswasser modifiziert.



Sedimentäres Pyrit stellt in den Sedimenten des Oberen Kieslagers die Reduktionskapazität bereit. Bei der Pyritoxidation wird unter Sauerstoff- und/oder Nitratverbrauch Eisen (II) und Sulfat freigesetzt sowie der pH-Wert erniedrigt. Als Pufferreaktion ist eine erhöhte Calcitlösung die Folge (Gl. 2).



Das Verhältnis der Freisetzung von Calcium und Hydrogencarbonat durch diese Pufferreaktion ist 1:1., während im Kalk-Kohlensäuregleichgewicht für ein typisches Neubildungswasser das Verhältnis 1:2 zu erwarten wäre (Gl. 3).



Da bei der Pyritoxidation auch Eisen freigesetzt wird, fällt ein Teil des Hydrogencarbonates in Form von geringlöslichem Eisencarbonat (Siderit) wieder aus (Gl. 4).



Das Verhältnis Calcium zu gelöstem Kohlenstoff (Ca : DIC) bildet die Mischung der geochemischen Prozesse im Grundwasser ab und liegt daher bei Einzelbetrachtung von Mischproben aus den Pegeln in der Nähe von 1:1, mit höheren Werten im oberflächennahen Bereich und tieferen Werten im unteren Bereich des Aquifers.

Das pH-Milieu der Wässer ist im neutralen Bereich, die Werte variieren von schwach sauer bis schwach alkalisch. Das Redoxmilieu im Aquifer bildet die oben genannten Prozesse ab. So ist der gelöste Sauerstoff aufgebraucht und die Nitratgehalte sehr niedrig, vereinzelt ist Nitrit nachweisbar. Eisen und Mangan liegen in Gehalten von wenigen mg/l vor. Die Bedingungen sind bereits oberflächennah als suboxisch bis anoxisch zu bezeichnen. Sulfatreduktion war unter

Standortbedingungen nicht zu beobachten. Dagegen konnten bei der Probenahme im November 2018 in den Pegelwässern Methangehalte zwischen 0,73 und 2.28 $\mu\text{mol/l}$ nachgewiesen werden.

Geochemische Modellierungen mit PhreeqC belegen, dass neben dem dominanten Calcitgleichgewicht bzw. einer leichten Untersättigung an Calcit die Eisen- und Mangancarbonate Siderit und Rhodochrosit meist in leichter Übersättigung sind und die Eisen- und Manganlöslichkeit begrenzen. Dieses ist an Modellrechnungen mit den Pegelwässern in Tabelle 2 gezeigt. Die Silikatminerale - hier gezeigt am Beispiel Chalcedon- sind ebenfalls gesättigt unter Standortbedingungen. Die Verhältnisse können sich, wie die Beispielrechnungen mit den Standortdaten zeigen, mit höheren Temperaturen ändern.

Tabelle 2: Sättigungsindizes wichtiger Aquiferminerale bei Normaltemperatur und bei 40 °C, Daten aus der Probenahme am 13.11.2019.

Messstellen:	P1		P3		P5		P7		P8	
Temperatur [°C]:	16	40	14,3	40	14,8	40	14	40	20,7	40
Calcite	-0,14	0,2	-0,13	0,24	-0,09	0,27	-0,13	0,25	-0,11	0,16
Chalcedony	0,18	-0,09	0,11	-0,18	0,11	-0,18	0,13	-0,17	0	-0,22
CO ₂	-1,33	-1,15	-1,3	-1,11	-1,48	-1,3	-1,39	-1,19	-1,49	-1,35
Gypsum	-0,71	-0,75	-0,88	-0,93	-0,8	-0,84	-0,8	-0,84	-1,18	-1,2
Rhodochrosite	0,32	0,59	0,12	0,42	0,24	0,41	0,17	0,46	0,3	0,49
Siderite	0,15	0,48	-0,13	0,13	-0,01	0,33	-0,04	0,31	0,01	0,26

Mit steigenden Temperaturen gehen laut Modell die Carbonatminerale in die Übersättigung und der P_{CO_2} steigt. Dagegen sind Silikatminerale eher untersättigt und können gelöst werden. Diese Fragestellung wurde anhand von Säulenversuchen unter kontrollierten Temperaturbedingungen experimentell weiterverfolgt (vergl. Kapitel 2.5).

Im Antrag wurde die Fragestellung der Gehalte an Spurenstoffen und Seltenen Erdelementen (SEE) und ihres Verhaltens unter steigender Temperatur angesprochen. Die Untersuchungen der ersten Standortproben ergaben, dass die Gehalte an Spurenmetallen und SEE jedoch nur so gering sind, dass temperaturbedingte Unterschiede in Experimenten nicht nachweisbar sind (Tabelle A1, <https://doi.org/10.11588/data/GLQLSH>). Daher wurde diese Fragestellung im folgenden Projektfortschritt nicht weiterverfolgt.

Grundwassertemperaturen

Der Einsatz des Geoprobe-Systems im Gelände ermöglichte neben der hochaufgelösten Wasserprobenahme auch die in-situ Aufnahme der Grundwassertemperaturen (Abb. 4). Die Profile zeigen drei verschiedene Verlaufsarten der Temperatur mit der Tiefe: Natürliche Temperaturverläufe, die im oberen Bereich jahreszeitlich bedingt beeinflusst sind und im unteren Bereich die mittlere Temperatur widerspiegeln (z.B. DP7), Temperaturverläufe mit deutlich erhöhten Oberflächentemperaturen durch unmittelbaren Wärmeeintrag (z.B. DP12) sowie Temperaturprofile im Abstrom der Wärmeeinträge, die vor allem im tieferen Bereich Wärmeeinfluss zeigen (z.B. DP11). Bereits ohne aktive Temperaturspeicherung ist ein erheblicher Wärmeeintrag durch die Gebäude des Aquadroms in das oberflächennahe Grundwasser zu beobachten. Dies zeigt der örtliche Temperaturverlauf mit niedrigen natürlichen Grundwassertemperaturen im Grundwasseranstrom (ca. 12° C), im Südosten des Geländes und deutlich erhöhten Grundwassertemperaturen (bis zu 16 °C) im Abstrom der Gebäude im Nord-Westen des Geländes (Abb. 5). Die höchsten Grundwassertemperaturen von bis zu 23° C wurden oberflächennah in der Messstelle DP12 im Betriebskeller des Bades gemessen. Im Keller herrscht ganzjährig eine Temperatur um 30°C. Durch den geringen Flurabstand des Grundwassers am Standort erklärt diese hohe Raumtemperatur die beobachtete Beeinflussung der Grundwassertemperaturen.

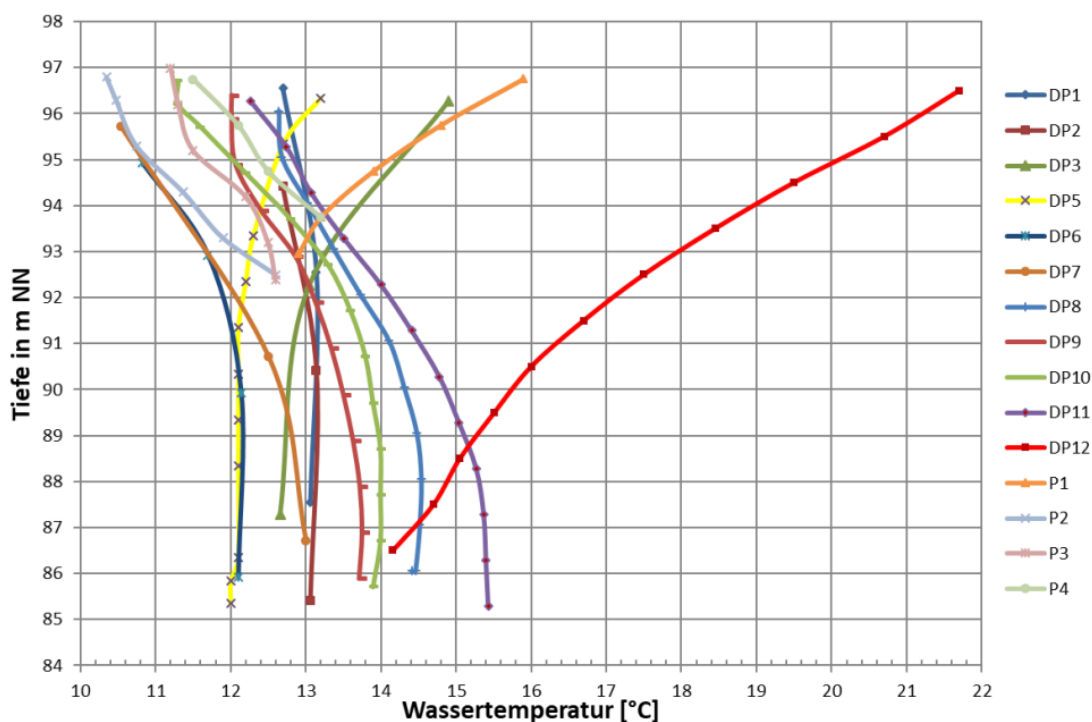


Abb. 4: In-situ Temperaturprofile in Direct-Push-Bohrungen auf dem Gelände des Aquadroms: Unbeeinflusste Profile, stark beeinflusste Profile und Profile im Abstrom des Wärmeeintrags. Daten der Direct Push Bohrungen im April 2017.

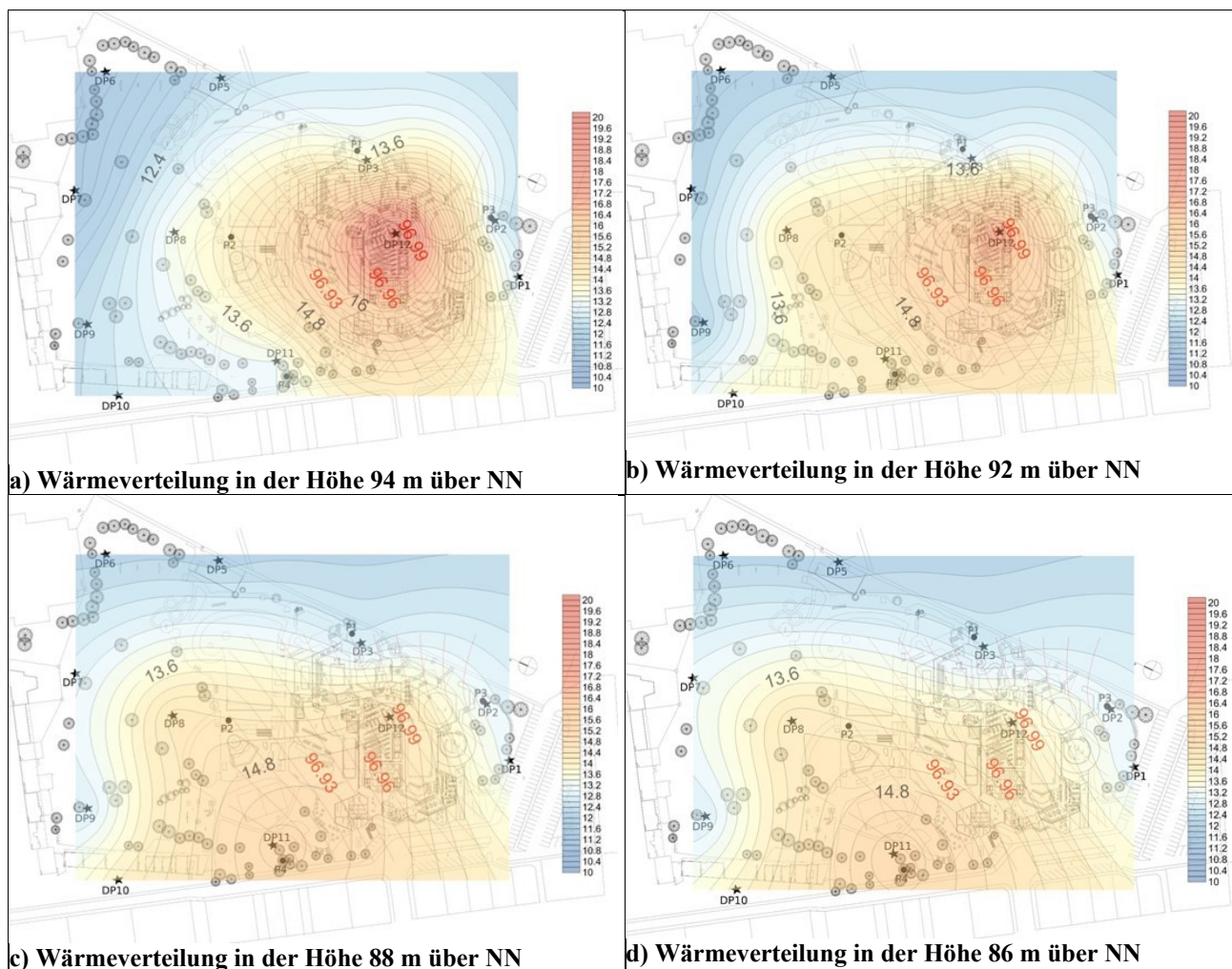


Abb. 5: Temperaturverteilung im Grundwasser in den Höhengniveaus 94 m (a), 92 m (b), 88 m (c) und 86 m (d) über NN. Der Wärmeeintrag erfolgt unterhalb des Kellers des Versorgungsgebäudes. Die Wärme wird mit dem Grundwasser in den Abstrom transportiert. Daten aus den Direct Pushbohrungen im April 2017

Charakterisierung von Aquifermaterial für den Einbau in Säulenexperimente

Im September 2017 wurden auf Grundlage der bisherigen Ergebnisse vier weitere Grundwasserbeobachtungspegel mit einer maximalen Ausbautiefe von 8 m unter Flur auf dem Gelände des Aquadroms errichtet und dabei Aquifermaterial für die ersten Säulenversuche aus Material der Bohrungen P7 und P5 gewonnen. Das Aquifermaterial ist weitestgehend als kiesiger Sand zu charakterisieren. Die Tab. 3 zeigt die wichtigsten Daten zur Beschreibung der in die Säulenversuche eingebrachten Sedimente. Wesentlicher Unterschied in den Säulen ist der Organikgehalt des Sediments. Die ausführlichen Daten für die Charakterisierung der Geochemie sind den

Datensätzen in Tabelle A3 zu entnehmen (<https://doi.org/10.11588/data/GLQLSH>). Bei der Errichtung des Infiltrationsbrunnens (IB1) am 13.03.2018 wurde Material für einen weiteren Säulenversuch entnommen und charakterisiert. Abbildung 6 zeigt typische geochemische Charakteristika des Aquifermaterials dieser Bohrung.

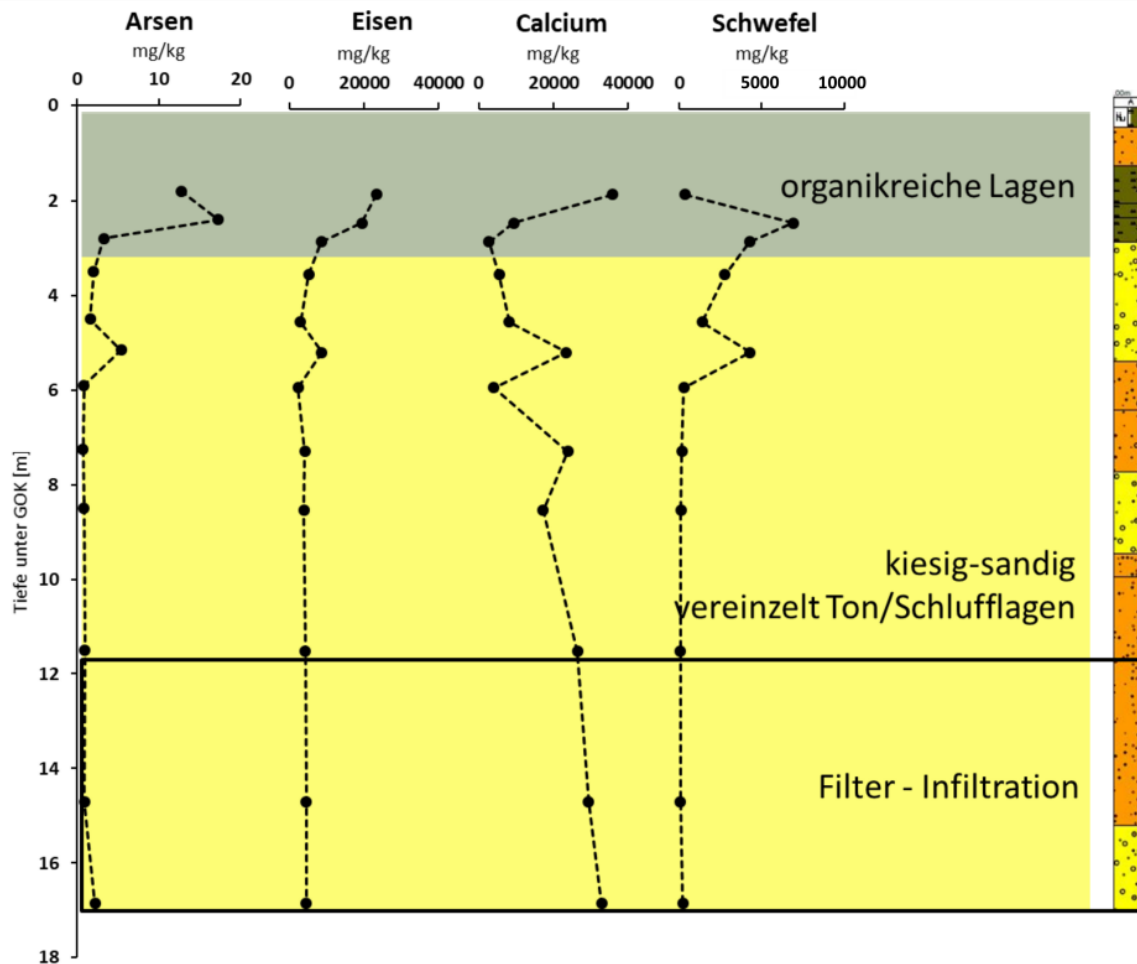


Abb. 5: Bohrprofil und geochemische Charakteristika des Aquifermaterials entnommen bei der Bohrung des Infiltrationsbrunnens IB1 am 13.3.2018.

Säulenversuche

Die in Tabelle 2 gezeigten Modellergebnisse für Mineralsättigungen unter erhöhten Temperaturen sollten in Säulenversuchen durch Beobachtungen erhärtet und weitere Erkenntnisse erzielt werden.

Um den Einfluss erhöhter Grundwassertemperaturen auf die Hydrogeochemie erfassen zu können, wurden 2017/2018 über drei Monate Laufzeit Säulenversuche mit Sedimentmaterial aus den gebohrten neuen Pegeln vom Standort bei verschiedenen Temperaturen und konstantem

CO₂ Partialdruck durchgeführt. Dabei wurden mit Aquifermaterial vom Standort gefüllte Säulen permanent mit künstlichem Standortwasser (im Labor nach Maßgabe angesetzt) durchströmt. Die Versuche mussten in einer Glovebox durchgeführt werden, um die Gaszufuhr zu regulieren und die Redoxbedingungen suboxisch bis anoxisch zu halten (Abb. 6). Darüber hinaus musste die Temperatur jeweils über einen gewählten Zeitraum konstant gehalten werden.

Die Ergebnisse dieser Säulenversuche wurden im Zwischenbericht 2019 dargestellt. Die Versuchsdaten sind in Tabelle A4 unter dem Link <https://doi.org/10.11588/data/GLQLSH> abgelegt.

Da während dieser Versuche bei der hohen Temperatur von 40°C die CO₂-Kontrolle kurzzeitig ausgefallen war und inzwischen die Bohrung des Infiltrationsbrunnens erfolgt war, wurde im Spätsommer 2019 vor Abschluss des Projektes ein weiteres Experiment mit Material aus der Bohrung des Infiltrationsbrunnens durchgeführt. Die Versuchszeit konnte dabei durch Erkenntnisse der vorangegangenen Experimente auf sechs Wochen verkürzt werden. Die Ergebnisse dieses Experimentes bestätigten im Wesentlichen die vorherigen Ergebnisse und sind im Folgenden kurz dargestellt.



Abb. 6: Aufbau der Säulenversuche mit Sedimentmaterial vom Standort Hockenheim in der Glove-Box im Labor: (1) Säulen, (2) Pumpe.

Der Säulenversuch wurde in zwei parallelen Säulen und drei Temperaturphasen durchgeführt. Die Einlaufzeit für die Säulen wurde mit einer Temperatur von 12°C begonnen, die der natürlichen Grundwassertemperatur von thermisch unbeeinflusstem Grundwasser am Standort Hockenheim entspricht. Anschließend wurde ein ATES-Betrieb durch die Erhöhung der Temperatur in den Säulen zunächst auf einen Sollwert von ca. 25°C und anschließend auf ca. 44°C nachgestellt.

Abbildung 7 zeigt den Temperaturverlauf in den Säulen im Vergleich zur Lufttemperatur in der Glovebox. Die Parameter Leitfähigkeit und pH-Wert (hier nicht gezeigt) zeigen keine trendmäßige Abhängigkeit von der steigenden Temperatur. Das Redoxpotenzial nimmt im Versuchsverlauf ab. Dieses ist vermutlich nicht nur auf die steigende Temperatur zurückzuführen, sondern wird bei Säulenversuchen in der Glovebox häufig beobachtet, wenn keine Oxidationsmittel mit dem Wasser eingegeben werden.

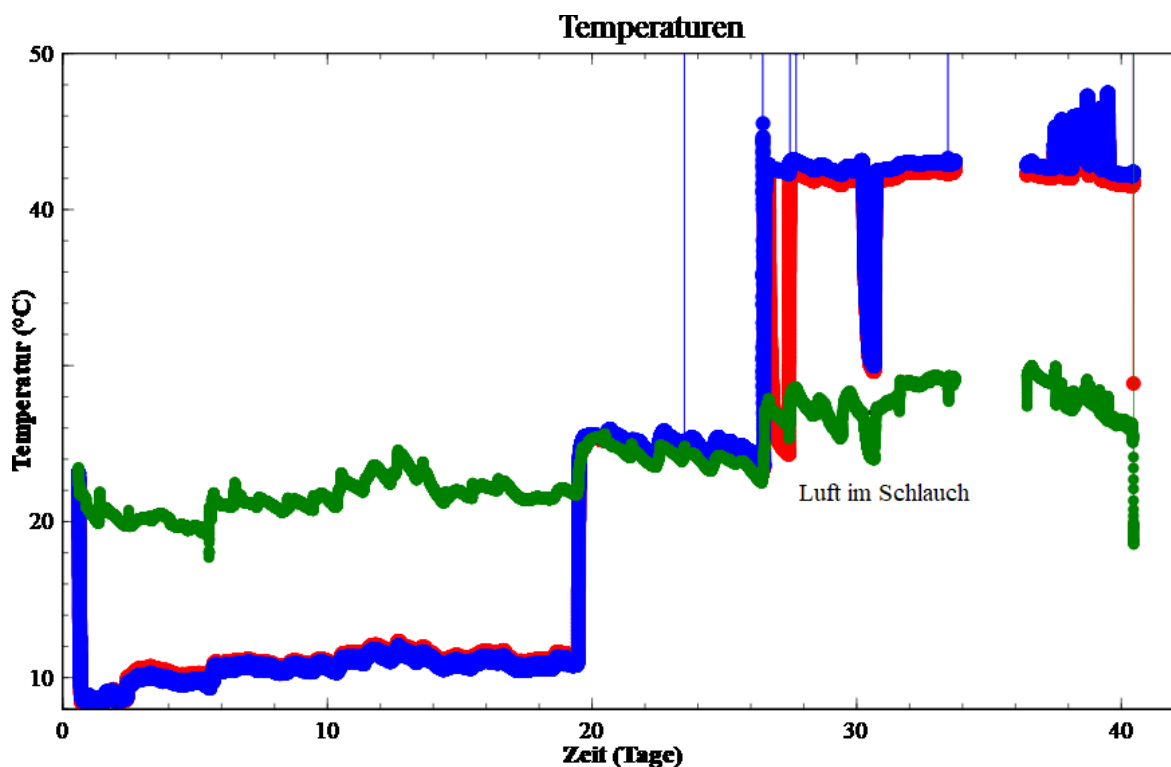


Abb. 7: Temperaturverlauf während des Säulenversuchs 2 in den Säulen (rot, blau) gemessen mit einem Temperatursensor verglichen mit der Lufttemperatur in der Glovebox (grün). Über ca. 19 Tage wurden 12 °C Grundwassertemperatur gefahren. Danach wurde für 8 Tage auf 25°C erhöht. Danach erfolgte die Einstellung auf 44 °C.

Die wesentlichen Ergebnisse der Säulenversuche stellen sich zusammengefasst wie folgt dar: Durch erhöhte Temperaturen im Aquifer wird eine höhere Silikatverwitterung beobachtet, d.h. der Austrag an Silizium steigt in Abhängigkeit von der Temperatur an (Abb. 8). Weiterhin wird

durch erhöhte Temperaturen und je nach Beschaffenheit des Sedimentmaterials gelöster organischer Kohlenstoff freigesetzt (Abb. 9). Dies kann zu einer Verschiebung des biogeochemischen Redoxmilieus im Aquifer führen, da die mikrobiologische Aktivität durch eine Erhöhung der Verfügbarkeit von organischem Kohlenstoff ansteigt. Im Langzeitversuch 2018 war parallel Sulfatreduktion beobachtet worden. Eine Sulfidproduktion wurde hier aufgrund der kürzeren Laufzeit nicht beobachtet, und der Sulfatgehalt verhielt sich - wie auch der Calciumgehalt - konservativ (Abb. 9 und Abb. 10).

Wie bereits in Tabelle 2 für das Standortwasser gezeigt, lässt sich auch für die Säulenversuche zeigen, dass die Löslichkeit der Silikate bei gesteigerten Temperaturen zu einer Untersättigung führt, während die Carbonate eher gefällt werden. Dabei stimmen Berechnungen und Beobachtungen weitestgehend überein.

Insgesamt verschiebt sich das geochemische Milieu bei geringer Wärmeeinspeisung (z.B. 25 °C) voraussichtlich nur unwesentlich, während bei höherer Wärmeeinspeisung (44 °C) mit deutlichen Effekten zu rechnen ist.

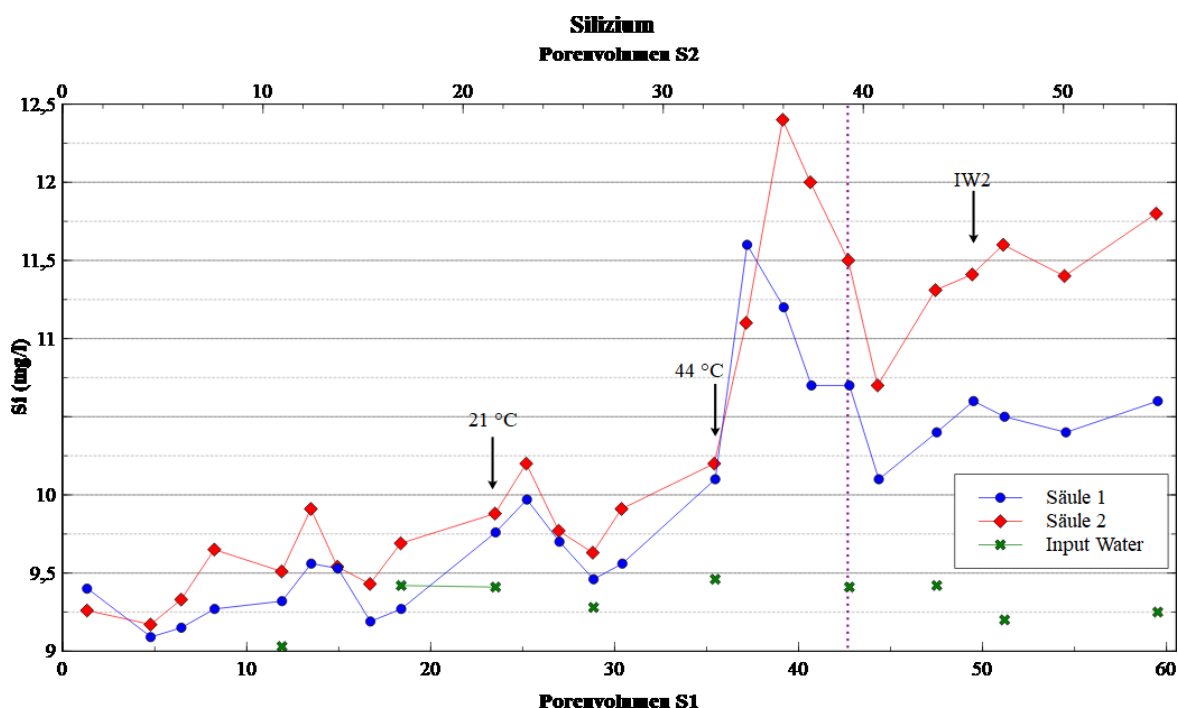


Abb. 8: Austrag von Silizium über den Versuchsablauf in Abhängigkeit von der Säulentemperatur verglichen mit dem Inputwasser. Es ist zu erkennen, dass der Siliziumaustrag bei Temperatursteigerung etwas verzögert ansteigt und deutlich über dem Siliziuminput liegt.

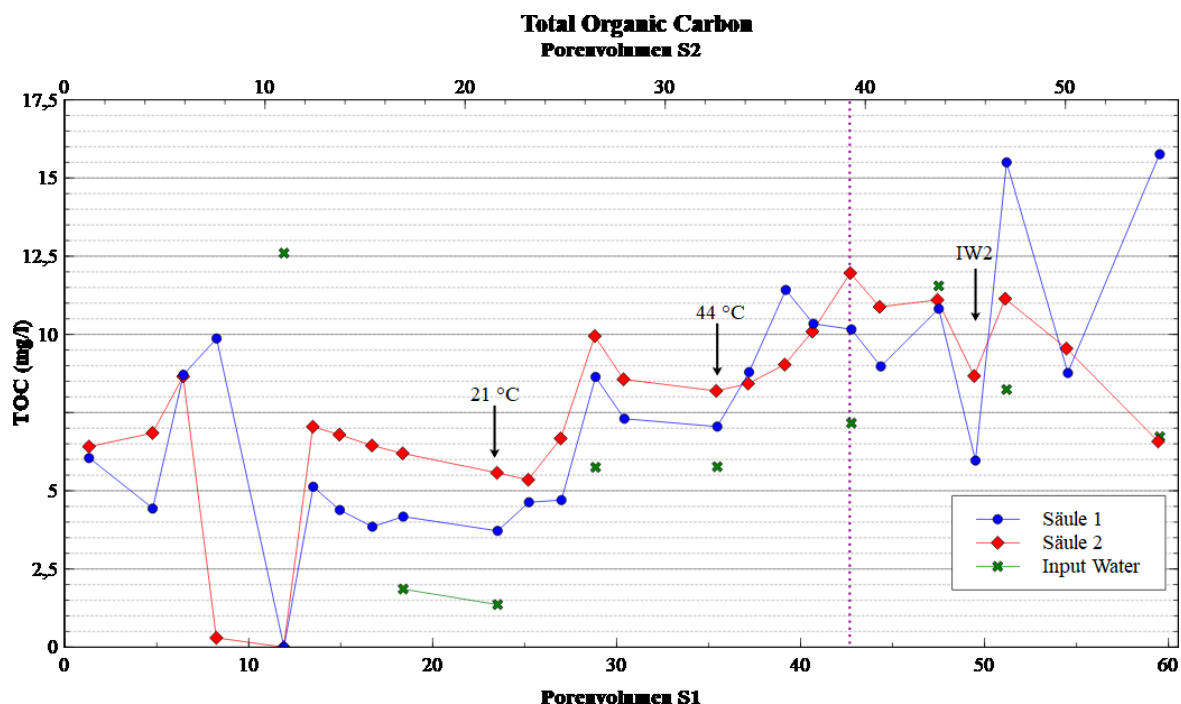


Abb. 9: Austrag von organischem Kohlenstoff über den Versuchsablauf in Abhängigkeit von der Säulentemperatur verglichen mit dem Inputwasser. Es ist zu erkennen, dass der Austrag bei Temperatursteigerung etwas verzögert ansteigt.

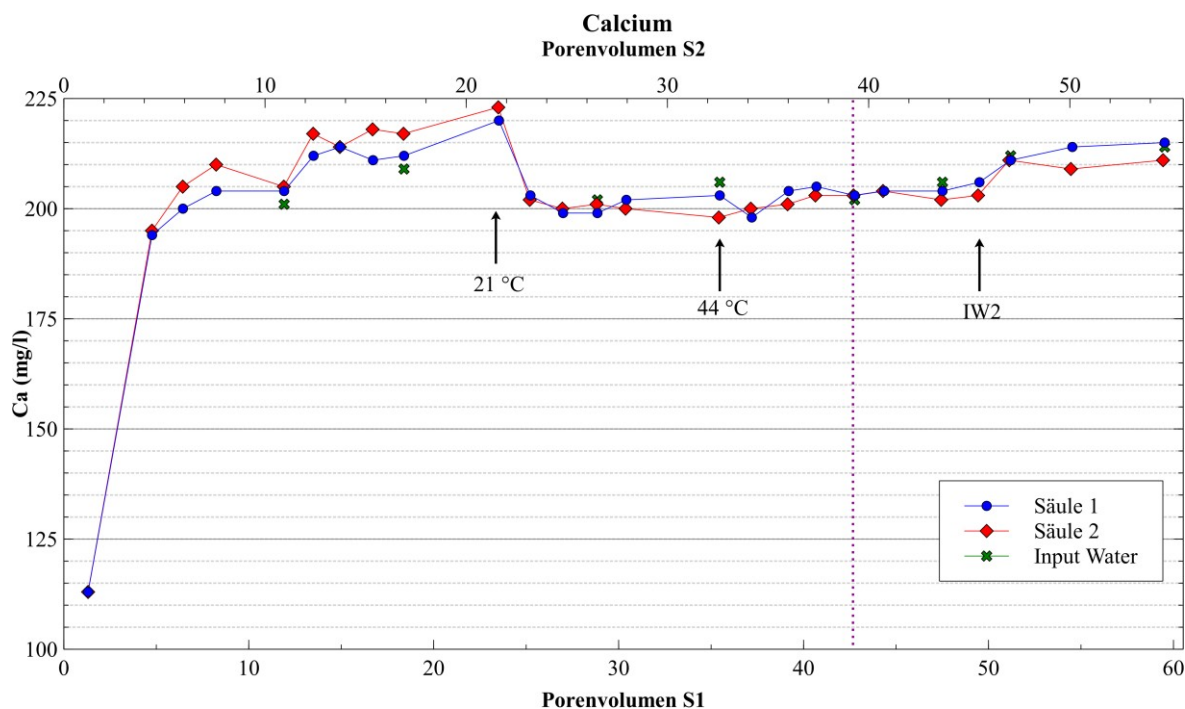


Abb. 10: Austrag von Calcium über den Versuchsablauf in Abhängigkeit von der Säulentemperatur verglichen mit dem Inputwasser. Es ist zu erkennen, dass der Calciumaustrag bei Temperatursteigerung nicht reagiert, sondern im Bereich des Input liegt.

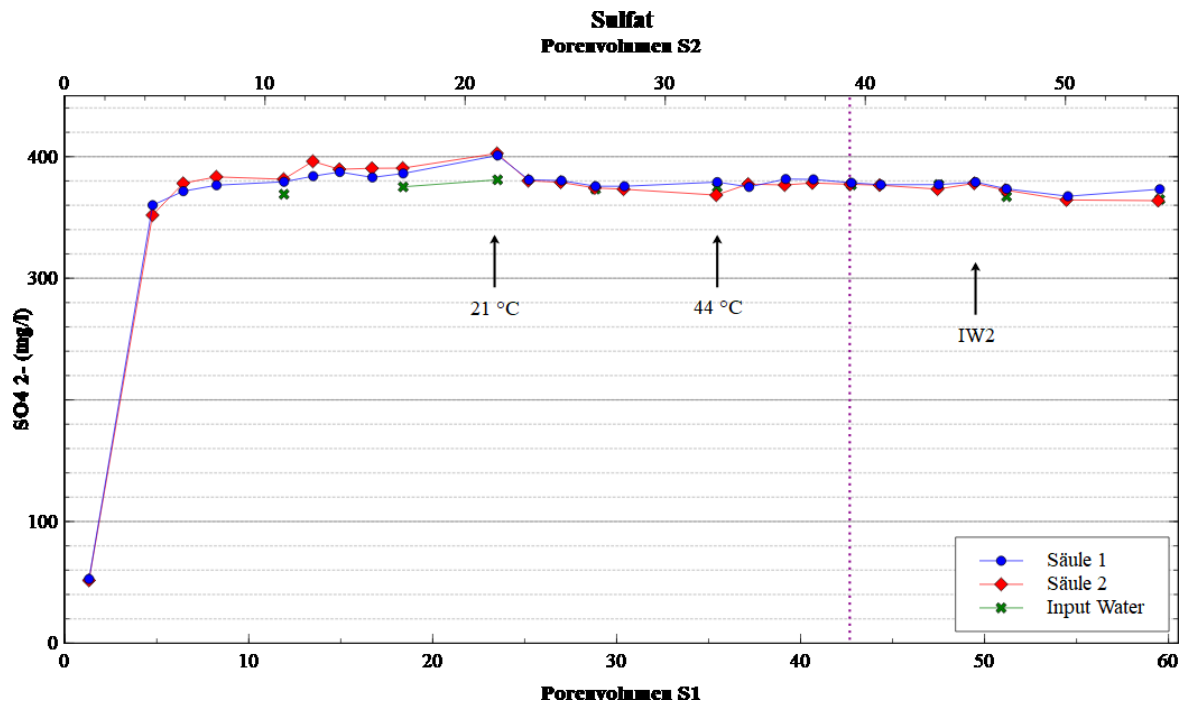


Abb. 10: Austrag von Sulfat über den Versuchsablauf in Abhängigkeit von der Säulentemperatur verglichen mit dem Inputwasser. Es ist zu erkennen, dass der Sulfataustrag bei Temperatursteigerung nicht reagiert, sondern im Bereich des Input liegt.

Schlussfolgerungen der Geochemischen Untersuchungen für die Planung und Umsetzung eines ATES-Systems am Standort Aquadrom in Hockenheim

Die Hydrogeochemie des Grundwassers könnte bei einer weiteren Temperaturerhöhung ein Problem darstellen, da dadurch die Kalzitlöslichkeit herabgesetzt wird. Da das Grundwasser aktuell mit Calcit gesättigt ist, würde eine Temperaturerhöhung zur Kalzitausfällung führen, wodurch die Porenräume im Aquifer teilweise verstopft werden könnten. Besonderes Augenmerk sollte hierbei auf den Filtern der Infiltrationsbrunnen liegen, denn diese könnten durch die Fällungsprodukte verstopft werden. Da Silikate eher zur Lösung neigen, ist im Aquifer selbst durch Aufhebung gegensätzlicher Effekte eher nicht mit einer messbaren Beeinträchtigung zu rechnen.

Das aktuelle suboxische bis anoxische Redoxmilieu im Aquifer spielt für die Infiltration von warmem Wasser dagegen eine wichtige Rolle. Besonderes Augenmerk sollte in der technischen Umsetzung darauf gelenkt werden, dass kein Sauerstoff im Infiltrationswasser vorhanden ist, denn dies hätte eine erhöhte Sekundärmineralausfällung zur Folge. Es könnten vermehrt Eisen-

hydroxide und Manganoxide entstehen, die eine „Verockerung“ von Anlagenteilen wie Brunnen oder Pumpen zur Folge hätten. Auch hier wäre eine Abnahme der Durchlässigkeiten bzw. im Effekt eine Abnahme der Infiltrationsrate im Infiltrationsbrunnen die Folge.

Da der Prozess der Pyritoxidation eine entscheidende Rolle in der Geochemie des Grundwassersystems spielt, würde eine Sauerstoffzufuhr durch Infiltration diesen Prozess verstärken und zu vermehrter Sulfatbildung beitragen. Dies könnte die Wasserqualität nachhaltig verändern, zumal der Sulfatgehalt schon z.T. deutlich über dem Grenzwert der Trinkwasserverordnung von 250 mg/l liegt.

Als langfristige Folge der Erwärmung könnte durch verstärkte Freisetzung von Organik ein Sulfat-Reduktionsmilieu entstehen. Hierbei wird das toxische Sulfid in das Wasser freigesetzt, welches neben der Nutzbarkeit des Grundwassers auch die Ökologie und Mikrobiologie des Grundwassersystems nachhaltig verändert.

Als wichtige Vorsichtsmaßnahme auf dem Standort wird daher empfohlen, bei laufendem Infiltrationsbetrieb die Sauerstoffgehalte zu minimieren und im Infiltrationsbereich sowie im Abstrom die Wasserchemie zu überwachen. So können die genannten Effekte frühzeitig zu erkannt und der Betrieb gegebenenfalls gestoppt und optimiert werden.

Hochschule Offenburg

Prof. Dr. Thomas Breyer-Mayländer, Prof. Dr. Detlev Doherr

AP4: Partizipation und Kommunikation Geothermie

Aufgabenstellung im Verbundprojekt

Die Hochschule Offenburg bearbeitet im Verbundprojekt „GeoSpeicher.bw“ das Arbeitspaket 4 „Transparente Information und Öffentlichkeitsbeteiligung“ mit dem Ziel, die unterschiedlichen Teilprojekte der Demostandorte kommunikativ zu begleiten und die dazugehörigen Forschungsergebnisse der interessierten Öffentlichkeit transparent zugänglich zu machen. Im Rahmen der Doktorandenschule und der begleitenden Promotion „Partizipatives Planungs- und Kommunikationsmanagement von Geothermieprojekten“ soll die im Januar 2015 veröffentlichte Richtlinie VDI 7000 als Grundstein für die Öffentlichkeitsbeteiligung beleuchtet und auf geothermische Anlagen angewendet werden.

Dazu wurden folgende Schritte durchgeführt:

- Besuch ausgewählter Projekt-Demostandorte, Informationsaustausch und gegenseitige Vernetzung,
- Besuch der Fachkonferenz VDI 7000 im Juni 2017 in Berlin und Vernetzung,
- Gezielte Auswertung von bestehender Literatur, Studien und Kommunikations- und PR-Konzepten zu Energieprojekten im Allgemeinen und zu Geothermie im Speziellen,
- Analyse der Kriterien zur Einschätzung der öffentlichen Relevanz (nach VDI 7000 3.1.1)
- Medienanalyse zur Wärmespeicherung in Aquiferen (nach VDI 7000, 3.1.2)
- Moderation und Auswertung eines Anwohnerdialogs (nach VDI 7000 3.3.4)

Einführung

Großprojekte stehen speziell bei Bauvorhaben stehen bei der Bevölkerung unter einer Art Generalverdacht. Schon der Begriff „großes Bauprojekt“ schreckt viele Menschen ab (vgl. Köcher 2011), ein Umstand, der vor allem auch im Kontext der Geothermie berücksichtigt werden muss (vgl. Hofmann/Leinemann 2013). Denn die Tatsache, dass Risikowahrnehmung durch unterschiedliche Stakeholder im Wesentlichen auf einem Konstrukt beruht, führt dazu, dass allein die Begleitberichterstattung zu Geothermieprojekten für eine nicht ganz einfache Akzeptanzlage sorgt. Verstärkt wird diese Stimmungslage durch einige wenige havarierte Projekte, die in den Fokus der Öffentlichkeit geraten sind und vielfach die öffentliche Meinung negativ beeinflussen.

Diese besondere Problemstellung wurde schon vor rund 10 Jahren registriert, so dass bereits im Rahmen des vom Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie geförderten Forschungsprojekts „Evaluation der Öffentlichkeitsarbeit für Geothermieprojekte in Deutschland und Erarbeitung von praxisbezogenen Hilfestellungen für Entwickler und Betreiber von geothermischen Anlagen“ ein eigener PR-Leitfaden für Geothermieprojekte entwickelt wurde, der seit 2014 den interessierten Kreisen zur Verfügung steht (Enerchange 2014).

Trotz der für Projekte mit erneuerbaren Energien allgemein hohen Akzeptanzwerte sind deutliche Widerstände gegen solche Projekte in der konkreten Umsetzung festzustellen, die aus dem NIMBY-Effekt („Not in my Backyard“), der neueren Variante des St.-Florians-Prinzips, resultieren. Daher werden in einigen empirischen Untersuchungen zur Akzeptanz von Infrastrukturprojekten auch direkt drei Zielgruppen identifiziert, die sich in die NIMBYS, FUNDIS und NEUTRALOS (Eisenkopf/Burdorf/Rhomberg 2015, S. 37) gliedern.

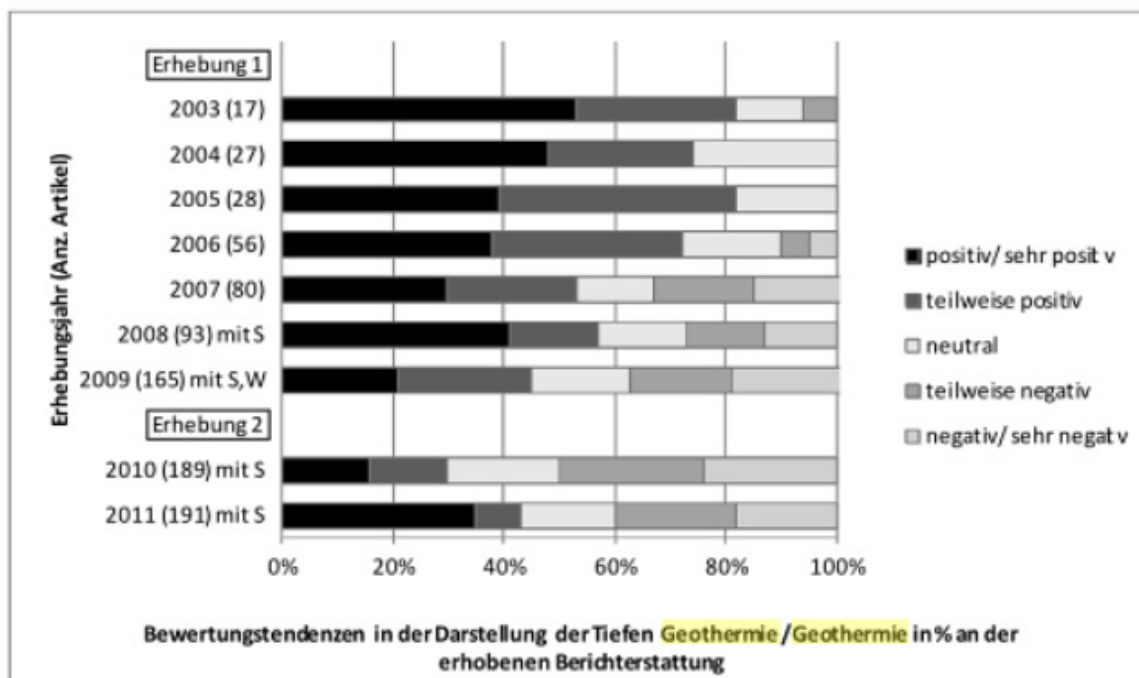


Abb. 1: Bewertungstendenzen in der Darstellung der Tiefen Geothermie/Geothermie, Quelle: Leucht 2013, S. 230

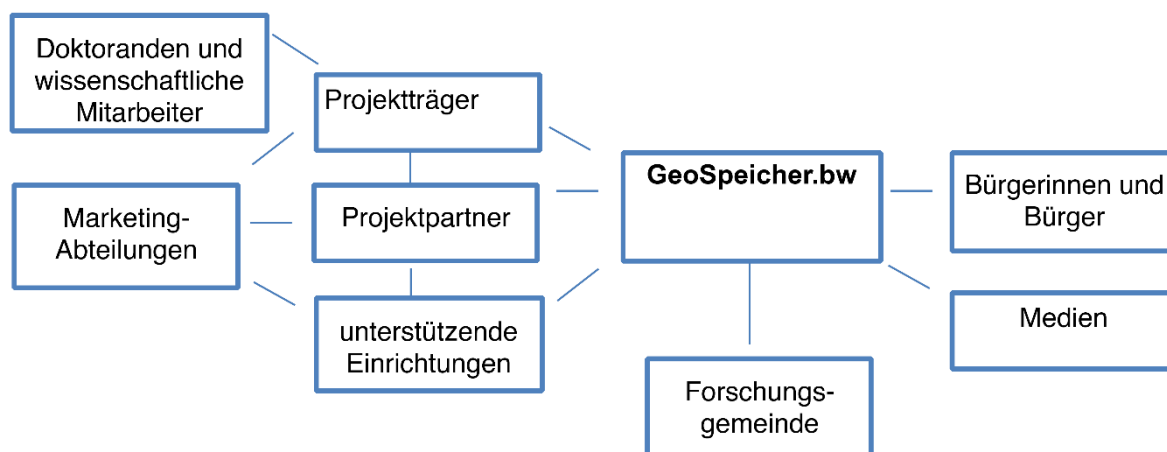
Im Projekt GeoSpeicher.bw erforschen vier unterschiedliche ATES-Demonstrationsprojekte (ATES = Aquifer Thermal Energy Storage) den Einsatz von Wärmespeicherung im Untergrund. Es ist anzunehmen, dass Befürchtungen und Ängste, die in Bezug auf Geothermieprojekte öffentlich geäußert werden, auch auf ATES-Projekte übertragen werden, da die Technologie in Deutschland noch weitgehend unbekannt ist (Holstenkamp 2017). Da nur eingeschränkte Informationen über die aktuelle öffentliche Wahrnehmung der Wärme- und Kältespeicherung in Aquifern zur Verfügung stehen, werden im Projekt Medienberichte und Leserkommentare von deutschen Tageszeitungen und Onlineportalen analysiert. Dabei werden nutzerseitig wahrgenommene Vor- und Nachteile bzw. akzeptanzhemmende und -fördernde Faktoren von ATES identifiziert und benannt.

Förderung der Kommunikation im Rahmen des Verbundprojektes

Aufbauend auf den Empfehlungen bestehender Literatur und dem Austausch mit den Projektpartnern wurde eine Projektwebseite erstellt, die vom Rechenzentrum der Hochschule Offenburg gehostet und betreut wird. Die Webseite war zur Projektlaufzeit unter www.geospeicher-bw.de erreichbar. Ziel der Webseite ist die Einrichtung einer allgemeinen Kommunikations- und Informationsplattform für die wissenschaftliche Kooperation sowie eine Testplattform für

die öffentliche Information durch Bereitstellung von verlässlichen Dokumenten über die Demonstrationsprojekte und Fachpublikationen. Diese Testplattform wurde vorgesehen für die interessierte Öffentlichkeit sowie für weitere Stakeholder wie Forschende und Forschungsinteressierte, Fachverbände, Medien und Politik.

Im Rahmen dieses Aufgabenteils wurde auch die Konzeption eines Projekt-Corporate Design (CD) festgelegt. Es ging dabei sowohl um die Grundelemente eines CD als auch um die Konzeption der Wortmarke GeoSpeicher.bw in Verbindung mit einer modularen Corporate Identity (CI). Hierfür war auch eine ausgedehnte Stakeholderanalyse erforderlich.

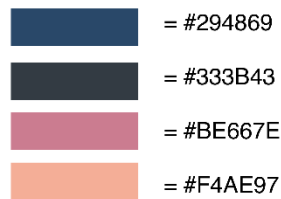


Positive Haltung zum Projekt → neutrale bis indifferente Haltung

Abb. 2: Relevante Zielgruppen der Geothermie-Projekte im Forschungsverbund GeoSpeicher

Es ergaben sich anhand der formulierten Ansätze und unter Festlegung eines zu erzielenden Wiedererkennungswertes spezielle Farbkombinationen, die in Abbildung 3 dargestellt sind. Diese Farbkombination vermittelt zwischen Rot (Wärme) und Blau (Kälte), ohne dabei bedrohlich zu wirken. Die weiße Schrift wurde aus Gründen der Lesbarkeit, aber auf als Hinweis auf eine offene, transparente und vertrauenswürdige Informationsquelle definiert.

Variante 1 Color Gradient



GeoSpeicher.bw



Abb. 3: Vorschlagsvariante für ein Projekt-Corporate Design im Forschungsverbund GeoSpeicher

Quantitative Erhebung – Institutionalisierung VDI 7000

Für die Umsetzung der Öffentlichkeitsbeteiligung bei Energieprojekten sind weitreichende konzeptionelle Ansätze von öffentlichen und privaten Einrichtungen zu verzeichnen. Wie und ob diese Empfehlungen – in der Regel in Form von informellen Handlungs-, Leit- oder Richtlinien – Umsetzung in der Praxis erfahren, ist jedoch weitgehend unbekannt. Eine bundesweite

Umfrage unter Energieversorgungsunternehmen soll unter anderem zeigen, ob der Bekanntheitsgrad der Richtlinie VDI 7000 in Baden-Württemberg aufgrund der Sonderstellung in der Gesetzgebung (§ 25 Abs. 3 VwVfG) höher ist als in anderen Bundesländern.

Um nun bereits im Rahmen des Planungs- und Projektmanagements eines Geothermievorhabens die erfolgskritische Beteiligung von und Kommunikation mit den unterschiedlichen Stakeholdern gewährleisten zu können, ist eine Anlehnung an die VDI-Richtlinie 7001 (siehe Abb. 4) empfehlenswert, die von einem der Autoren wie folgt charakterisiert wird: „Die VDI-Richtlinie 7001 richtet sich an Vorhabenträger, Generalplaner, Ingenieur-/Planungsbüros, Projektsteuerer und ausführende Unternehmen. Sie richtet sich aber auch an Behörden und Bauämter sowie an Verbände und Bürgerinitiativen.

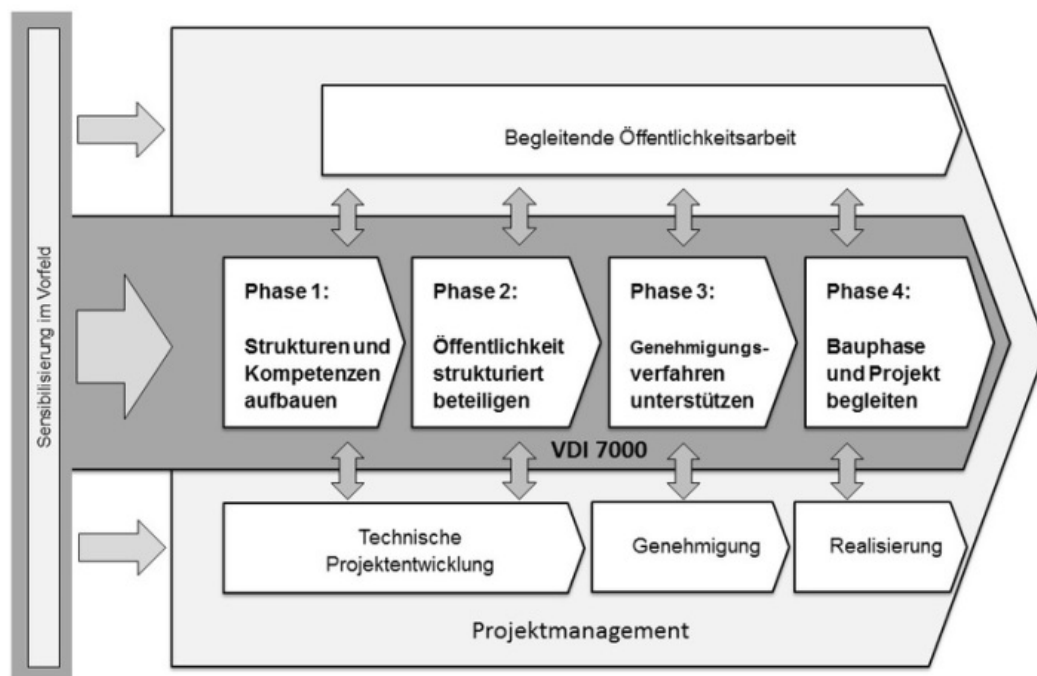


Abb. 4: Phasen nach der VDI-Richtlinie 7000 (Frühe Öffentlichkeitsbeteiligung bei Industrie- und Infrastrukturprojekten),

Quelle: VDI https://www.vdi.de/fileadmin/pages/vdi_de/redakteure/richtlinien/inhaltsverzeichnisse/2244254.pdf

Die Richtlinie besteht aus zwei großen Abschnitten:

- 1) Allgemeine Anforderungen an gute Kommunikation und Öffentlichkeitsbeteiligung,
- 2) Gute Kommunikation und Öffentlichkeitsbeteiligung in den Leistungsphasen der Ingenieurplanung.“ (Brettschneider 2015, S. 18).

Die angestrebte Partizipation und projektstützende Kommunikation ist jedoch auch davon abhängig, dass die Projektkonzeption im Sinne eines Produktmanagements an den unterschiedlichen Interessen von Stakeholdern orientiert wird, da auch hier die Prinzipien der integrierten Kommunikation, bzw. des integrierten Marketings relevant sind. Die Möglichkeiten und Grenzen, den Erfolg eines Geothermieprojekts auf Basis einer Unterstützung des Projekts mithilfe der VDI-Richtlinie 7001 zumindest auf der Ebene der Akzeptanz zu gewährleisten, sind ein noch nicht erforschtes Analysefeld, das seine besondere Bedeutung durch die inter- bzw. transdisziplinäre Aufgabenstellung bekommt. Damit steht die Thematik an der Schnittstelle zwischen unterschiedlichen traditionellen Professionen, wo sich in der Regel neue komplett eigene professionelle Regeln herausbilden, die wiederum in diesem Fall weit über Grundlegendiskussionen im Sinne des klassischen Technik- oder Wissenschaftsjournalismus hinausgehen.

Eine erste Grundsatzstudie konnte hier im Rahmen des Projekts vorbereitet und in die Auswertungen integriert, aber aufgrund der personellen Engpasssituation nicht abgeschlossen werden.

Analyse der Kriterien zur Einschätzung der öffentlichen Relevanz

Analyse der Kriterien zur Einschätzung der öffentlichen Relevanz (nach VDI 7000, 3.1.1 „Öffentlichkeitsbeteiligung in die Projektentwicklung integrieren“)

Zur Analyse wurde das Demonstrationsprojekt „Aquiferspeicher Aquadrom“ ausgewählt. Auf Grundlage der Richtlinie VDI 7000 wurde anhand der dort beschriebenen Kriterienliste die öffentliche Relevanz der frühen Öffentlichkeitsarbeit in Abstimmung mit der Leitungsebene eingeschätzt. Das Ergebnis zeigt, dass von sieben zu bewertenden Kriterien (Standort, Region, Politik, Technologie, Technikfolgen, Werte, Kommunikation) vier mit der Bewertung 3 oder höher eingestuft wurden, was die frühe Öffentlichkeitsarbeit nahelegt. Im Einzelnen waren dies die Punkte Standort (öffentliches Schwimmbad mit regem Besucherstrom, Pilotcharakter), Region (eventuell kritisches Meinungsbild durch Schadensfälle im süddeutschen Raum), Politik (Gemeinderatswahlen) und Technikfolgen (Umweltauswirkungen). Durch die Analyse konnte der Kern der möglichen öffentlichen Debatten festgestellt werden.

Medienanalyse Wärmespeicherung in Aquiferen (nach VDI 7000, 3.1.2 „Anspruchsgruppen und deren Themenfelder analysieren“)

Ziel der Untersuchung ist, „zentrale Akteure und Themenfelder, Erwartungen und Besorgnisse“¹ zu erheben. Denn innovative Technologien, die sich wie die Aquiferspeicherung 1 ebd., S. 26. noch im Entwicklungsstadium befinden, können in der Öffentlichkeit schnell auf Misstrauen oder Ablehnung stoßen (Romanach 2015). Für Vorhabenträger ist es deswegen im Rahmen ihrer Kommunikationsstrategie sinnvoll zu wissen, welche wahrgenommenen Risiken und Nutzen im öffentlichen Diskurs meinungsgebend sind und welche Interessensgruppen kommunikativ adressiert werden sollten. Die Richtlinie VDI 7000 empfiehlt dafür qualitative und/oder quantitative Medienanalysen.

Methode: Computergestützte qualitative Inhaltsanalyse der Berichterstattung von deutschen Print- und Onlinemedien über ATES-Vorhaben in Deutschland mit der Software Maxqda (Abb. 5)

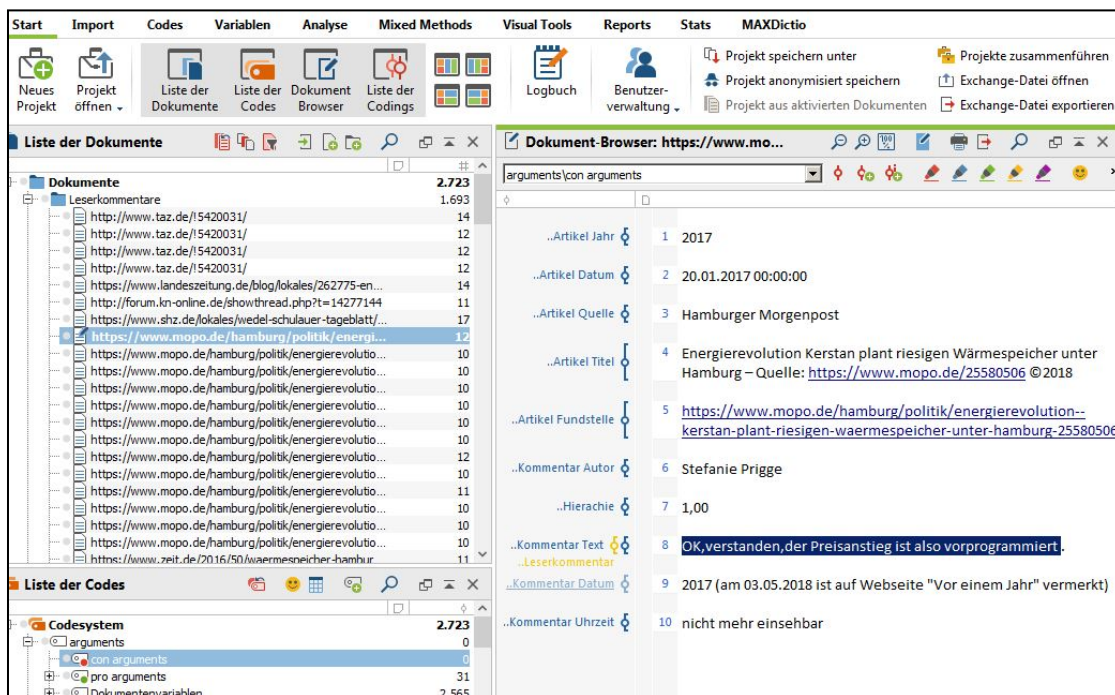


Abb. 5: Screenshot aus QDA-Software Maxqda (V. 12), In-Vivo Codierungsschema zur Berichterstattung über ATES-Vorhaben

Die computergestützte qualitative Inhaltsanalyse der Berichterstattung von deutschen

Print- und Onlinemedien über ATEs-Vorhaben in Deutschland zeigt, dass die projektspezifische lokale Relevanz von Aquiferspeichern für die Öffentlichkeit vorhanden war und Besorgnisse durch den Rückkanal der Leserkommentare formuliert wurden. Problematisiert werden unter anderem mangelndes Vertrauen in Politik und Vorhabenträger, mögliche Auswirkungen auf die Umwelt sowie Fragen der ökonomischen und technologischen Machbarkeit. Die Besorgnisse hinsichtlich der Aquiferspeicherung überschneiden sich dabei thematisch mit Besorgnissen, die auch gegenüber bisherigen Geothermieprojekten geäußert wurden (vgl. hierzu Meller et al. 2018).

Begleitung eines Anwohnerdialogs zur außergerichtlichen Mediation (nach VDI 7000 3.3.4 „Alternative Konfliktlösungen zu rechtlichen Auseinandersetzungen finden“)

Im Rahmen des Demoprojektes „Kalte Nahwärme Biberach“ wurden in einem von der Hochschule moderierten Anwohnerdialog zentrale Konfliktfelder erhoben. Ziel des Dialogs war es, verbliebene Interessenunterschiede möglichst zu minimieren und zu einer Einigung zu kommen. Methode: Harvard-Prinzip des sachbezogenen Verhandeln. Ergebnis: Im Gespräch erfolgten keine Vorbehalte gegen die Verwendung der Geothermie an sich. Thematisiert wurden die Schnittstelle zum Kunden (Spannungsdreieck Stadtwerke, Installateurbetriebe und Kunde) sowie der Wunsch nach transparenter Information und Kommunikation als Bringschuld der Vorhabenträger. Durch die Mediation konnten gemeinsame weiterführende Maßnahmen zwischen Vorhabenträger und Anwohner vereinbart werden.

Perspektiven: Die Anwendung der Richtlinie VDI 7000 hat in den Fallstudien gezeigt, dass einzelne Punkte auf geothermische Anlagen anwendbar sind und zu neuen projektspezifischen Erkenntnissen führen können. Dies hat sich besonders in der Erhebung von Konfliktfeldern gezeigt, die eine gezielte und frühzeitige Öffentlichkeitsbeteiligung nahelegen. Die singulären Teilergebnisse sollten in weiterführenden Studien überprüft und somit verifiziert werden. Es zeigt sich auch, dass die Anwendung des Instrumentariums der sachbezogenen proaktiven Konfliktlösung entscheidend davon abhängt, ob die Akteure vor Ort, die den Prozess von Seiten der Politik/Verwaltung steuern, auch tatsächlich an einer offenen Diskussionsatmosphäre interessiert sind und bereit sind, diese Konfliktlösungsstrategie persönlich zu unterstützen. Ein weiterer Erfolgsfaktor ist die Qualifikation des dabei eingesetzten internen oder externen Teams für die Mediation.

Qualitative Analysenansätze

In einer inhaltlichen Analyse über die Berichterstattung von Aquiferspeicherprojekten zeigt sich für den erhobenen Zeitraum der Jahre 1993 bis 2015 sich eine geringe Berichtsdichte. Leichte Anstiege sind im Zusammenhang mit dem Bau einer Anlage unter dem Reichstag in Berlin zu verzeichnen sowie im Jahr 2011 im Zuge eines aus Kostengründen nicht realisierten Aquiferspeichers im Berliner Stadtteil Prenzlau. Ein sprunghafter Anstieg zeigt sich ab dem Jahr 2016 (Abb. 6). Es lässt sich erkennen, dass das Thema Eingang in den überregionalen medialen Diskurs gefunden hat und davon auszugehen ist, dass sich die Relevanz weiter steigern wird.

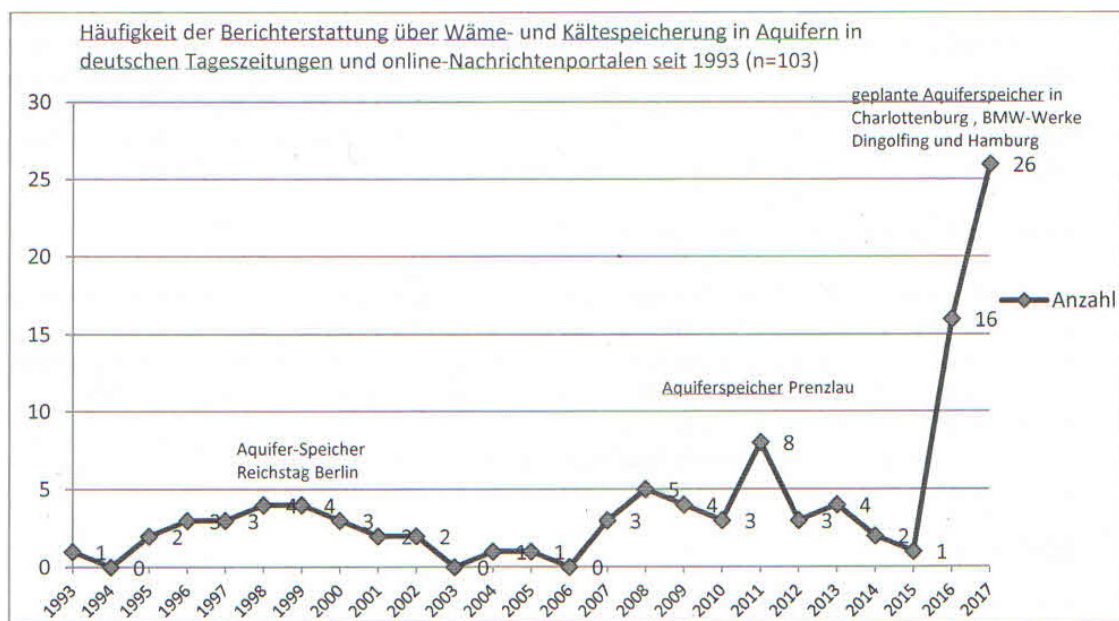


Abb. 6: Berichterstattungen über deutsche ATES-Projekte in deutschen Print-Medien und Nachrichtenportalen

Ein im Jahr 2016 gestartetes Forschungsprojekt der TU Berlin (Aquiferspeicher Charlottenburg) sowie weitere Projekte in Bayern (Aquiferspeicher BMW-Werke Dingolfing) und Hamburg (Aquiferspeicher Klärwerk an der Dradenau) führen seit 2016 zu einem sprunghaften Anstieg der Berichterstattung zum Thema Wärme- und Kältespeicherung in Aquifern in der regionalen und überregionalen Medienberichterstattung in Deutschland.

Akzeptanz / Partizipationsmodelle

Ein weiterer Gesichtspunkt für die Öffentlichkeitsarbeit ist die Beleuchtung der Akzeptanz, die durch Vertrauen in die Projektpartner entsteht. Dazu gehört die Analyse bereits durchgeführter Projekte an unterschiedlichen Standorten und Abgleich der inhaltlichen Ergebnisse und des Ansehens in der Öffentlichkeit mit den Modellempfehlungen der VDI-Richtlinie und die Erstellung von Modellempfehlungen für die Umsetzung (Methode: Literaturanalyse (Abschlussberichte), qualitative Interviews als leitfadengestütztes Experten-Interview). Besonders die beteiligten Stadtwerke als Umsetzer von öffentlichen Maßnahmen spielen hier eine große Rolle, weshalb die Erfahrungen aus den Nachbarländern, wie den Niederlanden, einfließen sollen.

Die Möglichkeiten und Grenzen, den Erfolg eines Geothermieprojekts auf Basis einer Unterstützung des Projekts mithilfe der VDI-Richtlinie 7001 zumindest auf der Ebene der Akzeptanz zu gewährleisten, sind ein noch nicht erforschtes Analysefeld, das seine besondere Bedeutung durch die inter- bzw. transdisziplinäre Aufgabenstellung bekommt. Damit steht die Thematik an der Schnittstelle zwischen unterschiedlichen traditionellen Professionen, wo sich in der Regel neue komplett eigene professionelle Regeln herausbilden, die wiederum in diesem Fall weit über Grundlegendiskussionen im Sinne des klassischen Technik- oder Wissenschaftsjournalismus hinausgehen.

Grundsätze partizipativer Projektbegleitung

Durch die wissenschaftliche Analyse der Kommunikationsbedingungen als ein Projektbaustein und die praktischen Unterstützungsmaßnahmen im Bereich der klassischen PR- und Öffentlichkeitsarbeit für das Projekt (Pressearbeit, Website und Corporate Design etc. s. o.) besaß das Projekt ein wesentlich höheres Level an Kommunikationsfokus als dies bei vergleichbaren rein technischen Projekten der Fall ist. Damit sind jedoch nicht nur die Elemente mit Außenwirkung gemeint, die im vorliegenden Projektteil erstellt wurden, sondern auch das Bewusstsein aller Beteiligten, dass dem Kommunikationspart ebenfalls eine fachliche Bedeutung zukommt. Dies bedeutet zunächst viel interne Schnittstellenarbeit im Sinne des internen Stakeholdermanagements (s.o.), bevor diese Aufgaben auf die externen Stakeholder und die Interaktion mit der Zivilgesellschaft ausgedehnt werden können.

Gerade auch im Hinblick auf Konflikte rund um Einzelprojekte war somit stets für alle Beteiligten ein Set an Lösungsmöglichkeiten verfügbar, was dazu führte, dass Konflikte entweder durch proaktive Kommunikation und ausreichende Transparenz vermieden werden konnten, oder – wie im Fall Biberach – beim Auftreten von Konflikten mit Hilfe der fachlich fundierten Herangehensweise Konflikte isoliert und bearbeitet werden konnten. Dabei zeigte sich, dass vor allem die erforderliche Kommunikation auf Augenhöhe auch hier ein Schlüssel zum Projekterfolg war.

Schlussfolgerungen

Kurzbeschreibung der Forschungsergebnisse

Als Gesamtergebnis des AP 4 kann zusammenfassend berichtet werden, dass die transparente und projektbegleitende Öffentlichkeitsarbeit für die verschiedenen Geothermie- Vorhaben zielgerichtet geplant und durchgeführt werden kann, da die untersuchten Standorte (Bäder, Klinikum) ohnehin häufig frequentiert werden und damit ein öffentliches Interesse gegeben ist. Auch sind die Projekte nicht von vornherein in der öffentlichen Diskussion negativ belastet, so dass der positive und nützliche Charakter des jeweiligen Projektes betont werden kann. Damit kann mit den Konzepten der partizipatorischen Öffentlichkeitsarbeit ein positiver Charakter der jeweiligen Projekte dargestellt und für interessierte Bürger*innen zugänglich gemacht werden.

Fortschritte für die Wissenschaft und/oder Technik durch die Forschungsergebnisse

Im Rahmen der Forschungsarbeiten des AP4 wurden die VDI-Richtlinien 7000 und 7001 als Grundlagen verwendet und deren Anwendung auf geothermische Anlagen überprüft und getestet. Aus den verschiedenen Projektstandorten in den verschiedenen Regionen Baden-Württembergs mit unterschiedlichen sozioökonomischen Aspekten wurden Erkenntnisse für andere derartige Projekte und die dazugehörigen Planungs- und Beteiligungsprozesse gewonnen, indem die Beteiligten, wie beispielsweise Bürgermeister*in, Bauexpert*innen und Stadtplaner*innen aus den Städten, Landkreisen und Regierungspräsidien aktiv informiert und zum Nachfragen und Nachahmen ermuntert wurden.

Als wichtig für die Öffentlichkeitsarbeit erwies es sich, dass die Partizipation der Öffentlichkeit in den Projektvorhaben auf mehrere Ebenen ausgelegt wurde. Auch konnte festgestellt werden, dass je nach Projektvorhaben unterschiedliche Schwerpunkte gesetzt werden müssen. So wurde für jedes Projektvorhaben zunächst geprüft, ob die klassische Partizipation im Sinne von Betreiber- und Betriebskonzepten für das Demovorhaben realisierbar sind bzw. welche Voraussetzungen diesbezüglich zu schaffen sind. Aber auch eine Partizipation über Daten-Sharing der Monitoring-Daten wurde in Erwägung gezogen, wie z.B. für den Standort Hockenheim (Aquadrom), wo die Temperaturdaten auch den interessierten Bürger*innen über eine Anwender-App verfügbar gemacht werden können.

Nutzen, insbesondere praktische Verwertbarkeit der Ergebnisse und Erfahrungen

In den Konzepten zur Partizipation der Bürger*innen an geplanten oder laufenden Geothermie-Projekten geht es immer wieder darum, Verständnis für das jeweilige Projekt und dessen unmittelbaren Nutzen für die Bevölkerung zu kommunizieren. Bleiben Planungen oder Vorhaben im Verborgenen, so steigt die Gefahr einer instinktiven Ablehnung. Auch muss eindeutig kommuniziert und belegt werden, dass es im Verlaufe des Projektes nicht zu Gefahren- oder Bedrohungssituationen kommt, die vermeintlich durch Verschweigen oder Zurückhaltung von Projektdaten vertuscht werden sollen. Dieses würde in jedem Falle zu unterschwelligem bis direkt geäußerten Abwehrverhalten führen bis hin zur Bildung von Bürgerinitiativen, die die öffentliche Meinung gegen das jeweilige Projekt beeinflussen wollen.

So ist sicherzustellen, dass nicht durch oben bezeichnete Mängel in der Öffentlichkeitsarbeit die Akzeptanz in der Bevölkerung schwindet oder, falls die Akzeptanz momentan weitgehend fehlt, sich die zurückhaltende oder sogar negativ eingestellte öffentliche Haltung gegenüber dem Projekt weiter verfestigt. Ein Werkzeug dazu ist die partizipatorische Bürgerbeteiligung z.B. im Rahmen eines Betreiberkonzepts. Dazu gehört auch, dass die Projektdaten auf einer zentralen gemeinsamen Plattform einheitlich dargestellt und diskutiert werden, welche auch für interessierte Bürger*innen zugänglich ist. Diese Plattform (z.B. eine Website) muss so gestaltet sein, dass sie die Informationen in geeigneter Form und transparent darstellt, die Kommunikation fördert und stets aktuelle und relevante Daten enthält.

Konzept zum Ergebnis- und Forschungstransfer auch in projektfremde Anwendungen und Branchen

Die Ergebnisse des AP4 können auf alle Projektvorhaben übertragen werden, für die eine Bürgerbeteiligung erreicht werden soll. Speziell die Vorhaben, die sich mit den Bereichen Grundwasser, Landschaftsnutzung und regenerative Energien befassen, liegen hier im Fokus. Auch bergbauliche Projekte sind in einem gewissen Rahmen geeignet, mit partizipatorischen Konzepten begleitet zu werden. Allerdings spielen hier zusätzlich weitere Faktoren wie gesetzliche (Bergrecht) und finanzielle Fragestellungen eine Rolle, die gesondert und projektspezifisch zu untersuchen wären.

Literatur

Bertelsmann Stiftung (2012): Mehr Transparenz und Bürgerbeteiligung – Prozessanalysen und Empfehlungen am Beispiel von Fernstraßen, Industrieanlagen und Kraftwerken. Gütersloh: Bertelsmann Stiftung.

Brettschneider, Frank (2012): Legitimation durch Kommunikation? Die gesellschaftliche Debatte über Ingenieurprojekte. In: mining+geo 3/2012, S. 435-439.

Brettschneider, Frank (2015): Kommunikation und Öffentlichkeitsbeteiligung in der Energiewende, in: Bundesnetzagentur (Hrsg.) (2015): Wissenschaftsdialog 2014: Technologie, Landschaft und Kommunikation, Wirtschaft, Bonn, Bundesnetzagentur, S. 13-31

Eisenkopf, Alexander/Burgdorf, Christian/Rhomberg, Markus (2015): Bürgerbeteiligung bei großen Infrastrukturprojekten – Erfolgsfaktoren guter Kommunikation, in: Bundesnetzagentur (Hrsg.) (2015): Wissenschaftsdialog 2014: Technologie, Landschaft und Kommunikation, Wirtschaft, Bonn, Bundesnetzagentur, S. 33-50

Enerchange (Hrsg.) (2014): Leitfaden: Öffentlichkeitsarbeit für Geothermieprojekte, Enerchange Freiburg

Hofmann, Thorsten/Leinemann, Ralf (2013): Bürgerbeteiligung konkret: Kommunikation und Recht bei Tiefengeothermie Projekten, in: Geothermische Energie Heft 76 // 2013 / 2, S. 6-8

Köcher, Renate (2011): Wie stehen die Bürger zu großen Infrastrukturvorhaben? Vortrag auf der Gemeinschaftsveranstaltung „Deutschland im Investitionsstau. Wege zu mehr Akzeptanz für große Infrastrukturmaßnahmen“ von BDI, HDB und BDS/BBZ in Berlin, 12. September 2011.

Leucht, Martina (2013): Sozio-technische Parameter der Projektentwicklung: Soziale Akzeptanz von Vorhaben der Tiefen Geothermie, in: Böttcher, Jörg (Hrsg.) (2013): Geothermie-Vorhaben

Tiefe Geothermie: Recht, Technik und Finanzierung, Oldenbourg-Verlag, München, S. 221-248

Meller, C., Schill, E., Bremer, J., Kolditz, O., Bleicher, A., Benighaus, C., Chavot, P., Gross, M., Pellizzone, A., Renn, O., Schilling, F., Kohl, T., 2018. Acceptability of geothermal installations: A geoethical concept for GeoLaB. *Geothermics* 73, 133–145.

Richtlinie VDI 7000: Frühe Öffentlichkeitsbeteiligung bei Industrie- und Infrastrukturprojekten. Düsseldorf: VDI, 2015.

Romanach, L., Carr-Cornish, S., Muriuki, G., 2015. Societal acceptance of an emerging energy technology. How is geothermal energy portrayed in Australian media? *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 42, 1143–1150.

VDI (2014): VDI-Richtlinie 7001 – Kommunikation und Öffentlichkeitsbeteiligung bei Planung und Bau von Infrastrukturprojekten. Standards für die Leistungsphasen der Ingenieure. Berlin: Beuth Verlag.