GFZ Helmholtz-Zentrum für Geoforschung

Speicher CITY

Gefördert durch:
Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt

# SpeicherCity: Modelle zur Systemintegration von Aquiferspeichern in Städten

**Teil II Eingehende Darstellung**

**Förderkennzeichen:** 03G0911B PT-Bearb.: Dr. Ute Münch

**Zuwendungsempfänger:** GFZ Helmholtz-Zentrum für Geoforschung

**Projektleitung:**
Guido Blöcher & Stefan Kranz

**Autor:innen:**
Elena Petrova,
Stefan Kranz,
Guido Blöcher

GFZ Helmholtz-Zentrum für Geoforschung
Telegrafenberg, 14473 Potsdam

**Verbundprojekt:** Speicher City

**Vorhaben:** Standort- und Systemcharakterisierung

**Laufzeit / Berichtszeitraum:** 01.11.2022 - 31.12.2025

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Forschung, Technologie und Raumfahrt unter dem Förderkennzeichen 03G0911B gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen / den Autoren.

## Inhalt

1. Erzielte Ergebnisse und Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele ..... 3
AP2.1 Ermittlung der relevanten Systemparameter..... 4
AP2.2: Potentialabschätzungen durch die Nutzung von Aquiferspeichern..... 7
AP2.3: Erstellung der Konzeptmodelle und Ermittlung der Speicherpotentiale.....12
AP2.4: Erstellung der Mess- und Monitoringkonzepte.....14
2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises .....17
3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit .....18
4. Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans.....19
5. Während der Durchführung bekannt gewordene Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen ..... 20
6. Erfolgte und geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses .....21
Erfolgte Veröffentlichungen.....21
Geplante Veröffentlichungen..... 23

## 1. Erzielte Ergebnisse und Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Innerhalb des Projekts SpeicherCity war das GFZ Potsdam für das Teilprojekt verantwortlich, das sich auf die Standort- und Systemcharakterisierung sowie die prozessbasierte Modellierung von Aquifer Thermal Energy Storage (ATES)-Systemen konzentrierte. Das GFZ zielte darauf ab, die Standorte und Systeme des geplanten ATES zu charakterisieren, die einflussreichen Parameter für die ATES-Effizienz zu identifizieren und auf Basis dieser Ergebnisse ein Monitoringkonzept für die Effizienz und Sicherheit der unterirdischen ATES-Systeme zu entwickeln. Die Hauptziele des Projekts waren:

1. Entwicklung einer quantitativen Methodik zur standortspezifischen Charakterisierung thermo–hydraulischer und geochemischer Parameter, die für den ATES-Betrieb relevant sind, mit Schwerpunkt auf Einzelbohrloch-(Push–Pull)-Tests.
2. Bewertung des ATES-Potenzials unter geologischer und betrieblicher Unsicherheit, einschließlich der Ableitung designrelevanter Kenngrößen wie Speicherkapazität, thermische Rückgewinnung und thermische Interferenz.
3. Entwicklung und Anwendung hochauflösender numerischer Modelle für gekoppelte thermo–hydraulisch–chemische Prozesse, einschließlich Unsicherheits- und Sensitivitätsanalysen.
4. Bereitstellung modellbasierter Beiträge für Monitoringkonzepte, Feldtestdesign und Betriebsstrategien am Pilotstandort Berlin-Adlershof.
5. Beitrag zu Integrationsaktivitäten innerhalb des Konsortiums, einschließlich der Kopplung an oberirdische Energiesystemmodelle sowie der Dissemination der Ergebnisse.

Die folgenden Abschnitte fassen die vom GFZ durchgeführten Arbeiten zusammen und zeigen, wie diese Ziele während der Förderperiode erreicht oder übertroffen wurden. Ein wesentlicher Schwerpunkt des Projekts lag daher in der Erstellung verschiedener konzeptioneller Modelle, der Bestimmung zentraler Systemparameter, die die ATES-Leistung bestimmen, einschließlich Permeabilität, Porosität, Aquiferdicke, thermischer Dispersivität, thermischer Retardation sowie Betriebsparameter wie Injektionstemperatur und Volumenstrom, und der Bestimmung ihres Einflusses auf den ATES-Betrieb.

Zur Bearbeitung dieses Ziels wurden Modelle unterschiedlicher Komplexität entwickelt, um sicherzustellen, dass die räumlichen und zeitlichen Skalen die relevanten Prozesse angemessen abbilden und gleichzeitig die Recheneffizienz erhalten bleibt (Beyer et al., 2026 in prep). Zu diesem Zweck wurden analytische Lösungen und numerische Modellierungen unterschiedlicher Komplexität für Wärme- und Tracer-Transport mit Optimierungstechniken kombiniert, um die Feldtestdaten zu interpretieren und die Sensitivität des Systems gegenüber natürlichen und technischen Parametern zu bewerten.

## AP2.1 Ermittlung der relevanten Systemparameter

Die zuverlässige Bestimmung relevanter Systemparameter ist eine zentrale Voraussetzung für die Planung, Auslegung und den langfristig sicheren Betrieb von ATES-Systemen. Die Effizienz von ATES wird maßgeblich durch die hydraulischen und thermischen Transporteigenschaften des Untergrunds bestimmt, insbesondere durch die effektive Porosität, die thermische und solutische Dispersivitäten sowie Retardationsprozesse. Unsicherheiten in diesen Parametern wirken sich direkt auf die Vorhersage der thermischen Ausbreitung, der Rückgewinnungsraten und der langfristigen Leistung eines Speichersystems aus. Vor diesem Hintergrund ist eine datenbasierte Charakterisierung der Aquiferparameter sowie das Verständnis der zugrunde liegenden Prozesse ein entscheidender Schritt in der frühen Projektphase.

Zur Bewertung der Permeabilität des Aquifers am Standort Berlin-Adlershof wandten Schwarz et al. (2025) eine Kombination aus analytischen Lösungen und numerischen Simulationen an, um zwei während der Bohrlochentwicklung durchgeführte Step-Rate-Tests auszuwerten. Die kombinierte analytische und numerische Analyse hydraulischer Tests während der Filterausbauphase am Standort Berlin-Adlershof erwies sich als effektiver Ansatz für die vorläufige Abschätzung von Aquifereigenschaften. Die analytische Auswertung der hydraulischen Tests ergab eine Aquifer-Transmissivität von $2.72 \cdot 10^{-11}$ $m^2$ und eine Skin-Zonen-Transmissivität von $2.97 \cdot 10^{-12}$ $m^2$. Der Skin-Faktor wurde auf einen Bereich von 0,79 bis 1,8 geschätzt, was auf nichtlineare Druckverluste im bohrlochnahen Bereich hinweist, die wahrscheinlich durch verbleibende Bohrspülung und erhöhte Fließgeschwindigkeiten infolge des spezifischen Bohrlochdesigns verursacht werden. Nachfolgende numerische Simulationen legen nahe, dass sich die geringdurchlässige Skin-Zone bis auf etwa 0,3 m vom Bohrloch erstrecken könnte, ein Parameter, der bei zukünftigen Experimenten berücksichtigt werden sollte. Obwohl die dargestellten Ergebnisse vorläufig sind, zeigen die Befunde, dass die Analyse von Step-Rate-Tests während der Bohrlochentwicklung die Planung nachfolgender Tests unterstützen und Optimierungsstrategien für die Bohrlochreinigung und -rehabilitation informieren kann.

Der Push-Pull-Test ist eine weitere etablierte Feldmethode zur In-situ-Charakterisierung effektiver Transportparameter in der unmittelbaren Umgebung eines Bohrlochs und ist insbesondere für ATES-Anwendungen attraktiv, da er mit vergleichsweise geringem technischem und logistischem Aufwand durchgeführt werden kann (Abbildung 1). Gleichzeitig erfasst er genau jene Skalen und Prozesse, die für den Betrieb eines ATES-Systems relevant sind. Daher wurde eine weitere Studie (Petrova et al., 2025a) durchgeführt, um das Kalibrierungspotenzial von Multitracer-Push-Pull-Tests unter parametrischer Unsicherheit abzuschätzen.

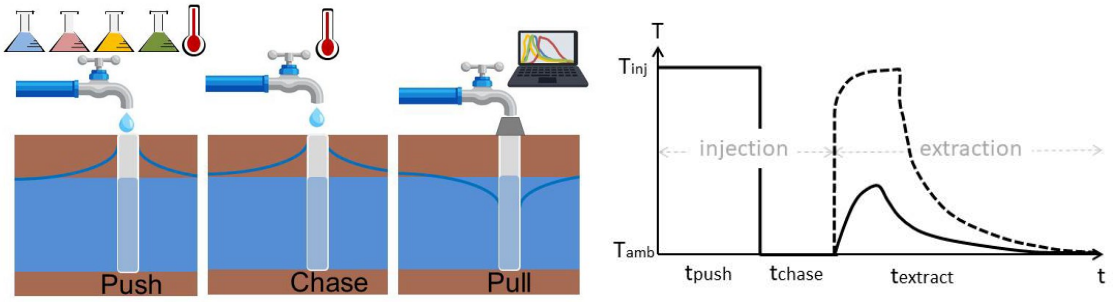


*Abb. 1: Konzeptionelle Darstellung eines Multitracer-Push-Pull-Tests (PPT) mit Push-, Chase- und Pull-Phasen (links) sowie die entsprechende Skizze typischer Durchbruchskurven eines einzelnen Tracers (in diesem Fall Wärme, wobei die Temperatur die primäre Variable darstellt), die am Bohrloch beobachtet werden (rechts); die gestrichelte schwarze Kurve entspricht einem Tracer mit vollständiger Rückgewinnung und geringerer Dispersion, während die durchgezogene Linie einer Tracer-Durchbruchskurve mit unvollständiger Rückgewinnung oder Abbau sowie stärkerer Dispersion entspricht. Die Retardation wird für beide Kurven als identisch angenommen (Petrova et al., 2025a).*

Die in dieser Studie ausgewerteten Push-Pull-Experimente wurden in einem sandigen Aquifer mit Penetrationsradien von etwa 0,5 m durchgeführt und basieren auf hochauflösenden Zeitreihen mehrerer gleichzeitig injizierter Tracer (Uranin, Iodid, Lithium) sowie der Temperatur. Der Einsatz mehrerer Tracer ermöglicht die kombinierte Analyse und Differenzierung verschiedener Transportmechanismen – von konservativem Massentransport über potenzielle schwache Sorption bis hin zur thermischen Retardation. Die Studie konzentrierte sich auf den spezifischen Standort Horonobe in Japan, für den zum Zeitpunkt der Veröffentlichung Daten verfügbar waren. Die generische Natur der Methodik ermöglicht jedoch ihre Anwendung auf jedes Optimierungsproblem im Zusammenhang mit Push-Pull-Tests.

Methodisch wurde ein physikbasiertes, eindimensionales radiales Transportmodell entwickelt, das Advektion, Dispersion, lineare Sorption und thermische Retardation berücksichtigt und die realen Randbedingungen der Push-Pull-Experimente explizit abbildet. Dazu gehören insbesondere zeitlich variable Injektionszeitreihen, Bohrlochspeicherung sowie die Injektion eines Chasers nach der Push-Phase. Das numerische Modell basiert auf einer stabilen Finite-Differenzen-Implementierung der Advektions-Dispersions-Gleichung und ermöglicht eine schnelle und robuste Simulation der Experimente (Petrova et al., 2025a). In der Modellierung wurden Messunsicherheiten explizit berücksichtigt, die mithilfe von zwei identischen Push-Pull-Tests quantifiziert und als Konfidenzintervalle in die Kalibrierung integriert wurden.

Die eigentliche Parameterbestimmung erfolgte stochastisch mithilfe eines surrogatbasierten Kalibrierungsansatzes (Petrova et al., 2023, 2025a). Aufgrund der bekannten Mehrdeutigkeit inverser Probleme in der Hydrogeologie und der

begrenzten Informationsdichte von Feldexperimenten wurde bewusst auf eine deterministische „Best-Fit"-Kalibrierung verzichtet. Stattdessen wurde ein Gaußsches Prozessregressionsmodell (GPR) verwendet, das die Beziehung zwischen den untersuchten Aquiferparametern und einer Zielfunktion (RMSE zwischen Modell- und Messdaten) approximiert (Abbildung 3). Dieses Surrogat ermöglichte eine effiziente Exploration des hochdimensionalen Parameterraums bei gleichzeitig deutlich reduziertem Rechenaufwand im Vergleich zu klassischen Monte-Carlo-Ansätzen und ermöglichte die Analyse kalibrierter Verteilungen für Porosität, solutische und thermische Dispersivität sowie Retardationsfaktoren.

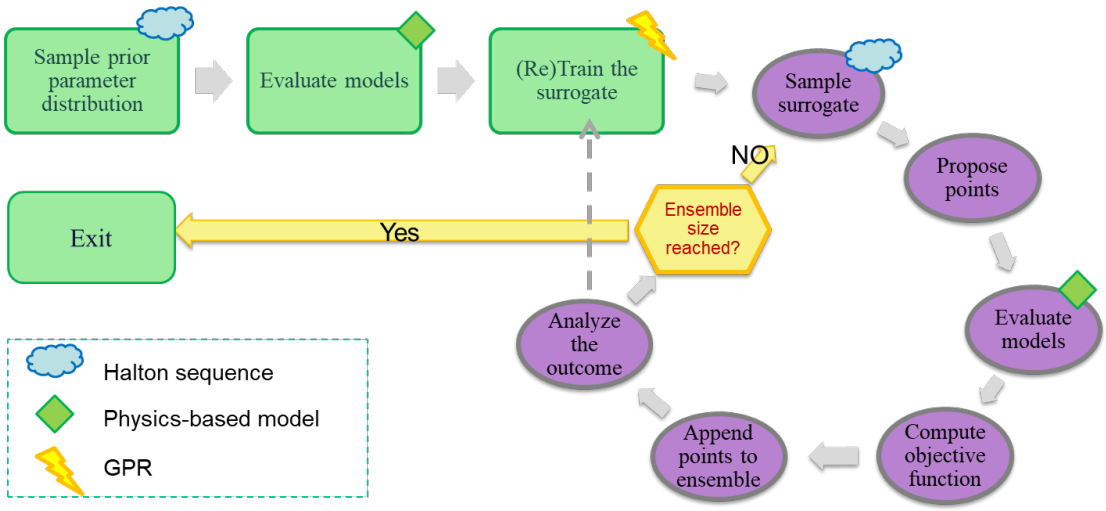


*Abb. 2: Flussdiagramm des Surrogatmodellierungsprozesses zur Optimierung advektiv-dispersiver Transportparameter eines PPT; die violetten Kreise beziehen sich auf die Hauptschleife der adaptiven Stichprobenahme (Petrova et al., 2025a).*

Die Ergebnisse zeigen, dass insbesondere Dispersivitäten und die effektive Porosität aus den Push-Pull-Daten gut bestimmt werden können. Die posterioren Verteilungen dieser Parameter sind im Vergleich zu den a-priori-Annahmen deutlich eingeengt, was auf eine hohe Sensitivität der Messdaten gegenüber diesen Größen hinweist. Die thermische Dispersivität wurde konsistent größer als die solutische Dispersivität geschätzt, was physikalisch plausibel ist und auf zusätzliche Wärmeleitungsprozesse zurückgeführt werden kann. Im Gegensatz dazu erwiesen sich solute Retardationsfaktoren als deutlich schwieriger zu identifizieren. Die Kalibrierung zeigte eine geringe Sensitivität gegenüber diesen Parametern, was sich in breiten, teilweise mehrdeutigen posterioren Verteilungen widerspiegelt. Dennoch deuten die Ergebnisse darauf hin, dass selbst Tracer, die üblicherweise als konservativ betrachtet werden, unter bestimmten Bedingungen eine schwache Sorption aufweisen können. Ein

zentrales Ergebnis dieser Arbeit ist die enge Kopplung zwischen geschätzter Porosität und potenziellen Sorptionseffekten. Die Studie zeigt, dass eine genauere, unabhängige Bestimmung der effektiven Dispersivität entscheidend ist.

Die systemrelevanten Parameter für den Standort Spandau in Berlin wurden im Rahmen des ATES-IQ-Projekts bewertet. Innerhalb dieses Projekts wurden die aus hydraulischen Tests gewonnenen Parameter zusammengefasst und analysiert, um das numerische Modellsetup der ATES-Feasibility-Studie zu konstruieren (Liu, 2025). Der Standort Spandau sowie das numerische Modellsetup sind in Abbildung 1 dargestellt.

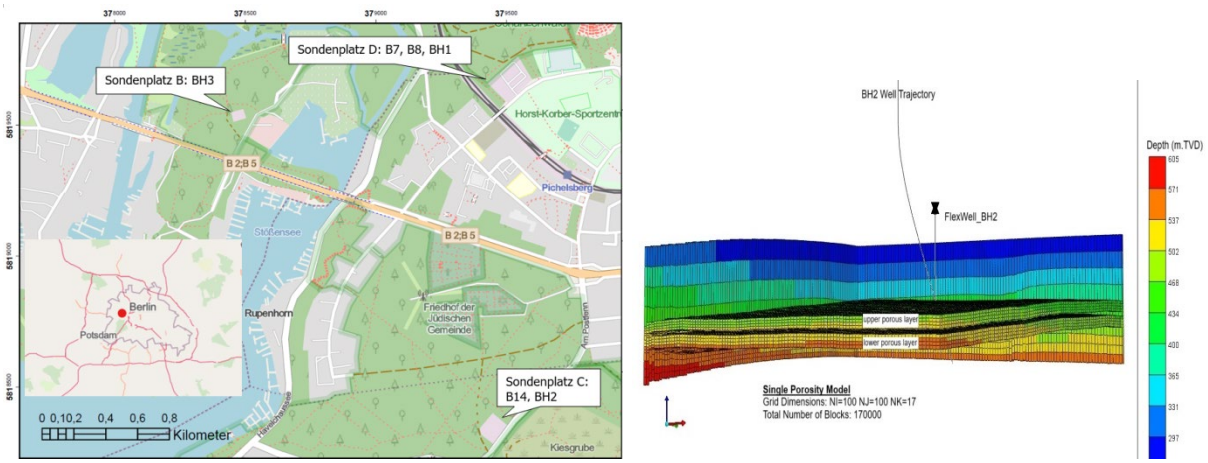


*Abb. 3: Modellaufbau für den Standort Berlin-Spandau. Links: Lage potenziell wiederverwendbarer Bohrungen in Berlin-Spandau (ehemaliger Gasspeicher); rechts: Modellaufbau und Diskretisierung (angepasst nach Liu, 2025).*

Das numerische Modell für Berlin-Spandau wurde auf einem kartesischen Gitter implementiert, das aus ungefähr 170.000 Zellen besteht (1000 m × 1000 m × 300 m) und die Muschelkalk-Formation repräsentiert. Die Brunnenarchitektur wird mittels einer Flex-Well-Formulierung dargestellt, die den Fluss in Tubing und Ringraum explizit berücksichtigt. Die Modellvalidierung basiert auf verfügbaren Pumpversuchsdaten, wobei die Permeabilitätswerte durch History-Matching mit den Daten aus dem ATES-IQ-Projekt kalibriert wurden, was zu zwei porösen Schichten im Bereich von 250 mD bis 700 mD führte (Liu, 2025).

### AP2.2: Potentialabschätzungen durch die Nutzung von Aquiferspeichern

Basierend auf den identifizierten Parameterbereichen wurden standortspezifische konzeptionelle Modelle entwickelt, die sowohl die geologische Struktur als auch die dominanten thermo–hydraulischen Bedingungen der untersuchten Aquifere widerspiegeln (Abbildungen 1, 4). Diese konzeptionellen Modelle integrieren Stratigraphie, Aquifermächtigkeit, hydraulische Leitfähigkeit, Porosität und Randbedingungen und bilden die Grundlage für nachfolgende analytische und numerische Analysen. Sie dienten

als konsistenter Rahmen für Potenzialbewertungen der Nutzung von Aquifer Thermal Energy Storage (ATES) und ermöglichten den Vergleich zwischen erwarteten Betriebsanforderungen und realistischen geologischen Randbedingungen (Beyer et al., 2026 in prep.).

Ein zentraler Aspekt der Potenzialbewertung war die explizite Berücksichtigung geologischer und betrieblicher Unsicherheit. Parameterbereiche, die aus der Interpretation von Push–Pull-Tests (Petrova et al., 2023, 2025), Literaturwerten und Standortdaten abgeleitet wurden, wurden durch den Modellierungsworkflow propagiert, um deren Einfluss auf Speicherkapazität, thermische Rückgewinnung und Systemleistung zu bewerten (Petrova et al., 2025b). Für die Fallstudie Berlin-Adlershof wurden die konzeptionellen Modelle unter Verwendung aktualisierter Bohrinformationen, geologischer Schnitte und standortspezifischer hydrogeologischer Daten verfeinert. Auf dieser Grundlage wurden sowohl analytische Lösungen als auch numerische Simulationen eingesetzt, um erreichbare Injektions- und Produktionsraten, die Temperaturentwicklung und die thermische Speichereffizienz unter realistischen Betriebsszenarien zu bewerten (Petrova et al., 2025b).

Ein zentraler Aspekt der Potenzialbewertung war die explizite Berücksichtigung geologischer und betrieblicher Unsicherheit. Aus Standortdaten, der Interpretation von Push–Pull-Tests und Literaturwerten abgeleitete Parameterbereiche wurden durch ensemblebasierte Modellierungsworkflows propagiert. Dies ermöglichte eine probabilistische Bewertung von Speicherkapazität, thermischer Rückgewinnung und Systemleistung anstelle einer rein deterministischen Machbarkeitsaussage. Ein solcher Ansatz ist insbesondere in urbanen Umgebungen relevant, in denen die Verfügbarkeit von Untergrunddaten begrenzt ist und Entwurfsentscheidungen unter Unsicherheit getroffen werden müssen.

Aufbauend auf diesen Simulationen wurde die Potenzialbewertung erweitert, um explizit die thermische Interferenz zwischen Bohrungen zu adressieren, die einen kritischen limitierenden Faktor für den ATES-Einsatz in dicht besiedelten urbanen Gebieten darstellt (Petrova et al., 2025b). In diesem Rahmen wurden thermische und hydraulische Kriterien gemeinsam berücksichtigt: die thermische Interferenz definiert den minimal zulässigen Abstand zwischen Bohrungen, während die hydraulische Leistungsfähigkeit den maximal möglichen Abstand aufgrund von Produktivitätsverlusten begrenzt.

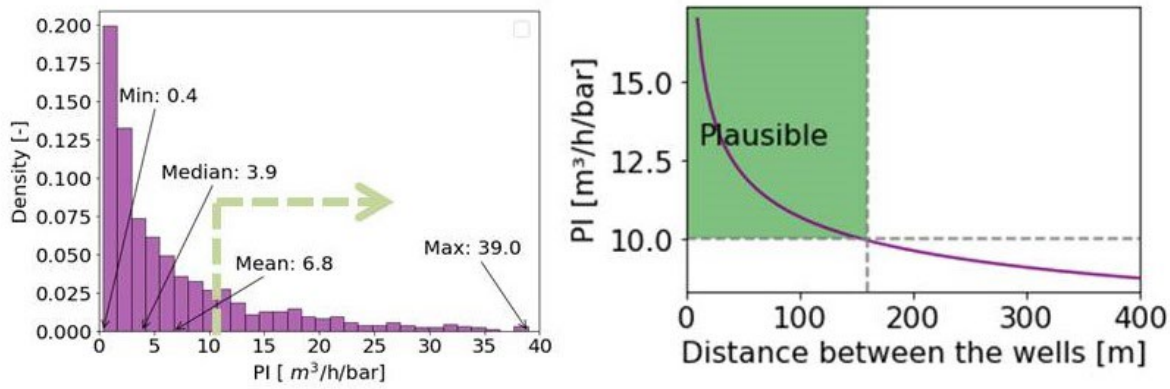


*Abb. 4 Links: Histogramm der Produktivitätsindizes, berechnet aus dem Ensemble physikbasierter Modelle, mit Darstellung der minimalen (0,4 m³/h/bar), medianen (3,9 m³/h/bar), mittleren (6,8 m³/h/bar) und maximalen (39,0 m³/h/bar) Werte. Der grüne Pfeil zeigt PI-Indizes, die für den Standort Adlershof plausibel sind. Rechts: brunnendistanzabhängige PI-Variation, berechnet für die Bedingungen des Standorts Adlershof. Der schattierte grüne Bereich zeigt den plausiblen Bereich der Brunnendistanzen, in dem PI-Werte technische und betriebliche Randbedingungen erfüllen. (Petrova et al., 2025b)*

Für Berlin-Adlershof zeigte die stochastische Surrogatmodellierung basierend auf einem Ensemble räumlich aufgelöster numerischer Simulationen, dass die Wahrscheinlichkeit thermischer Interferenz mit zunehmendem Bohrungsabstand asymptotisch abnimmt. Gleichzeitig weisen hydraulische Betrachtungen, ausgedrückt durch Produktivitätsindizes, auf eine abnehmende Systemeffizienz bei großen Bohrungsabständen hin. Die kombinierte Bewertung ergibt einen begrenzten, designrelevanten Bereich für den Bohrungsabstand, mit optimalen Abständen zwischen ungefähr 130 m und 160 m. Dieser Bereich stellt ein probabilistisch gestütztes Betriebsfenster dar und keinen einzelnen deterministischen Wert und unterstützt damit direkt eine risikoinformierte Planung.

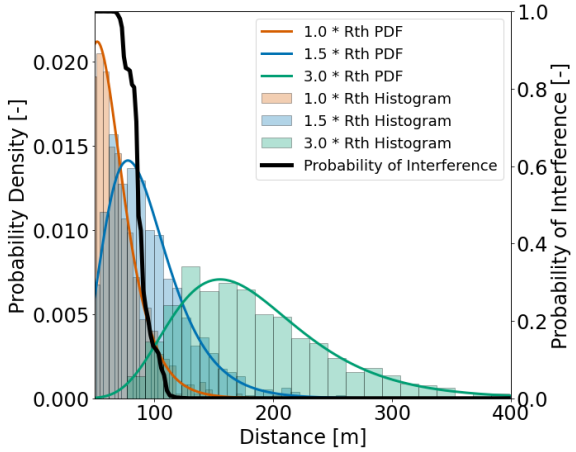


*Abb. 5: Vergleich der auf RFC basierenden Wahrscheinlichkeit thermischer Interferenz und des konventionellen thermischen Radius-Ansatzes. Die schwarze Linie stellt die durch den RFC geschätzte Wahrscheinlichkeit thermischer Interferenz dar, basierend auf einer stochastischen Analyse der Ergebnisse physikbasierter Modelle. Die farbigen Linien (orange, blau und grün) entsprechen thermischen Radien von 1, 1,5 und 3 Rth, berechnet aus dem Parameterensemble. Das Histogramm von 1,5 Rth bezieht sich auf den in der Ingenieurpraxis weit verbreiteten analytischen Ansatz zur Vermeidung thermischer Interferenz. (Petrova et al., 2025b)*

Die globale Sensitivitätsanalyse des Surrogatmodells zeigte darüber hinaus, dass die Bohrlochplatzierung bei weitem der einflussreichste Parameter für die Kontrolle thermischer Interferenz ist, gefolgt von Aquifermächtigkeit, Injektionsrate, Injektionstemperatur, Permeabilität und Porosität. Diese Ergebnisse unterstreichen die Bedeutung einer präzisen konzeptionellen Modellierung und Parametercharakterisierung in frühen Planungsphasen sowie den Wert unsicherheitsbewusster Potenzialbewertungen.

Die auf konzeptioneller, numerischer und Surrogatmodellierung basierenden Potenzialbewertungen liefern eine wissenschaftlich fundierte und übertragbare Grundlage zur Bewertung der ATES-Finanzierbarkeit am Standort Berlin-Adlershof und an vergleichbaren urbanen Standorten. Durch die explizite Berücksichtigung geologischer Unsicherheiten, thermischer Interferenz und hydraulischer Randbedingungen geht der entwickelte Ansatz über konventionelle Machbarkeitsstudien hinaus und liefert konkrete, designrelevante Hinweise für eine nachhaltige ATES-Implementierung in urbanen Umgebungen.

Zur Berücksichtigung des komplexen Verhaltens des Discrete Heating Network (DHN) sowie der transienten Energieeinträge in den Aquifer wurden die Oberflächen- und Untergrundsimulationen über ein externes Kopplungsschema gekoppelt (Tzoufka et al., 2026, in prep.). In Zusammenarbeit mit der TU Dresden und der TU München wurden gekoppelte Oberflächen–Untergrund-Simulationen entwickelt, um Modellierungen mit hochauflösenden unterirdischen ATES-

Simulationen unter Verwendung von TRNSYS und MOOSE-GOLEM zu integrieren (Abbildung 6).

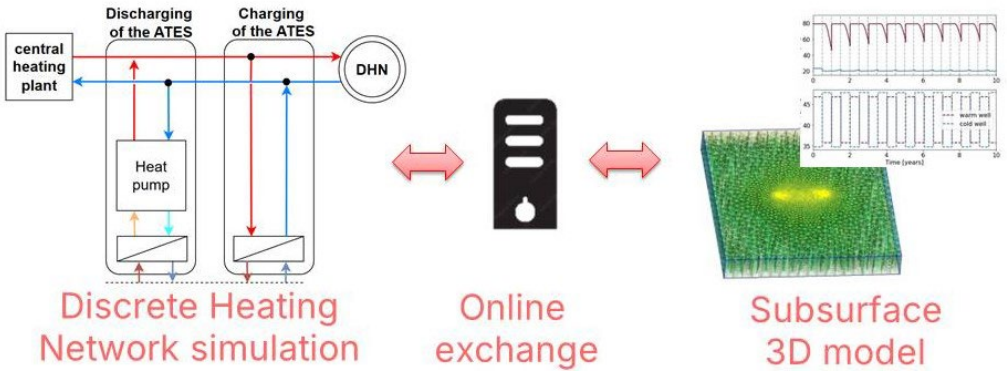


*Abb. 6: Schematische Darstellung des iterativen Kopplungs-Workflows zwischen der Oberflächen-Fernwärmenetz-(DHN)-Simulation in TRNSYS und der unterirdischen ATES-Simulation in MOOSE-GOLEM. (Tzoufka et al., 2026 in prep.)*

Innerhalb dieses iterativen Workflows lieferten Vorwärtssimulationen des Fernwärmenetzes, durchgeführt in TRNSYS, zeitabhängige Injektionstemperaturen für die ATES-Bohrungen, die über eine Webserver-Schnittstelle übertragen und in Randbedingungen für die unterirdischen MOOSE-GOLEM-Simulationen umgewandelt wurden. Die ATES-Simulationen berechneten anschließend die thermische Reaktion des Aquifers, einschließlich Temperatur- und Durchflusszeitreihen, die wiederum zur Aktualisierung der Randbedingungen des Fernwärmenetzmodells verwendet wurden. Diese bidirektionale Kopplung ermöglichte eine dynamische Interaktion zwischen oberirdischer Energienachfrage und unterirdischem thermischem Speicherverhalten und demonstrierte die Machbarkeit integrierter Simulationsframeworks zur Optimierung urbaner Energiespeicherung und Fernwärmebetriebs unter realistischen Betriebsbedingungen. Die Kopplung wurde für den jährlichen Betriebszyklus getestet. Die nächsten Schritte werden sich der Entwicklung von Ansätzen zur dynamischen Kopplung widmen, um realistische kurzfristige Änderungen innerhalb des DHN zu berücksichtigen.

Am Standort Spandau wurden die Simulationen des potenziellen ATES über einen Zeitraum von mehr als 15 Jahren durchgeführt. Abbildung 7 zeigt die simulierte Entwicklung des Produktivitätsindex (PI) für die Warm- und Kaltbohrung. Beide Bohrungen zeigen ein zyklisches und stufenartiges Verhalten, das durch periodische Anstiege des PI gefolgt von graduellen Abnahmen gekennzeichnet ist, was wahrscheinlich Betriebsmaßnahmen wie Workovers, Perforationsanpassungen oder Re-Komplettierungen widerspiegelt. Die Warmbohrung weist durchgehend höhere PI-Werte auf (bis zu ~1,3 L/s/bar) im Vergleich zur Kaltbohrung (Spitzenwerte um ~1,2 L/s/bar), während sich beide Systeme zwischen den Eingriffen auf einem Basisniveau zwischen ungefähr 0,7 und 0,8 L/s/bar stabilisieren. Die wiederkehrenden Peaks deuten darauf hin, dass

betriebliche Optimierungen einen starken kurzfristigen Einfluss auf die Bohrungsleistung haben, während der allmähliche Abfall zwischen den Peaks die Reservoir- und nahe Bohrloch-Druckausgleichsprozesse widerspiegelt.

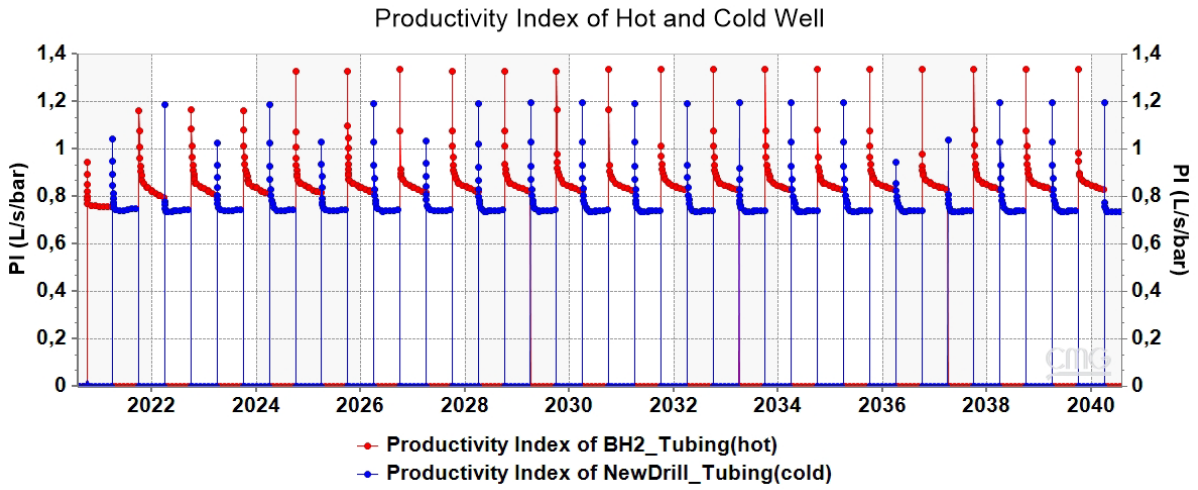


*Abb. 7: Produktivitätsindex der Kalt- und Warmbohrung während der ATES-Simulation am Standort Spandau. (adaptiert nach Liu, 2025).*

## AP2.3: Erstellung der Konzeptmodelle und Ermittlung der Speicherpotentiale

Standortspezifische konzeptionelle Modelle werden entwickelt (Abb. 3,4), die die relevanten geologischen, thermischen und hydraulischen Systemparameter integrieren und die Implementierung der zentralen Schnittstellenparameter zum Energiesystem ermöglichen (AP4 und AP5.1). Diese Systemparameter werden von den einzelnen Projektpartnern für jeden Standort innerhalb der zuvor definierten Parameterbereiche zugewiesen und ihre Relevanz wird mithilfe von Sensitivitätsanalysen untersucht. Ziel ist es, das Speicherepotenzial für jeden Standort abzuschätzen.

Für die im Projekt betrachteten Standorte wurden standortspezifische konzeptionelle Modelle entwickelt (Abb. 3), die die relevanten geologischen, thermischen und hydraulischen Eigenschaften der jeweiligen Aquifersysteme darstellen. Diese konzeptionellen Modelle liefern eine vereinfachte, jedoch physikalisch konsistente Beschreibung des Untergrunds und bilden die Grundlage für alle weiteren analytischen, numerischen und surrogatbasierten Modellierungen im Projekt.

Die konzeptionellen Modelle integrieren die wesentlichen Systemparameter, einschließlich Aquifergeometrie und -mächtigkeit, hydraulische Leitfähigkeit, Porosität, thermische Eigenschaften von Gestein und Fluid sowie Rand- und Anfangsbedingungen. Gleichzeitig ermöglichen sie die Definition der wichtigsten Schnittstellenparameter zum Energiesystem, insbesondere Injektions- und Fördervolumina, Temperaturschwankungen,

Betriebszyklen und zeitliche Lastprofile (AP4 und AP5.1). Dadurch wird eine konsistente Kopplung zwischen dem Untergrundmodell und dem Energiesystemmodell sichergestellt.

Die Parametrisierung der konzeptionellen Modelle erfolgte standortspezifisch durch die jeweiligen Projektpartner auf Basis verfügbarer geologischer und hydrogeologischer Daten, Bohrinformationen, Literaturwerte und interner Projektanalysen. Alle Parameter wurden innerhalb zuvor definierter, plausibler Parameterbereiche gesetzt, um die begrenzte Datenverfügbarkeit und die natürliche Variabilität des Untergrunds zu berücksichtigen. Auf diese Weise wurde von Beginn an eine unsicherheitsbewusste Modellierung verfolgt.

Sensitivitätsanalysen wurden durchgeführt, um die Relevanz einzelner Systemparameter zu bewerten (Petrova et al., 2025a; Liu, 2025). Diese Analysen untersuchten, wie stark Variationen geologischer und technischer Parameter die thermische Speicherkapazität, die hydraulische Produktivität und potenzielle betriebliche Einschränkungen beeinflussen. Die Ergebnisse dieser Analysen ermöglichten die Priorisierung der einflussreichsten Parameter und lieferten gleichzeitig Hinweise für gezielte Monitoring- und Datenerhebungsstrategien.

Am Standort Spandau wurde die Sensitivitätsanalyse in CMG durchgeführt, um die Schlüsselparameter zu identifizieren, die die Systemleistung der ATES-Simulation steuern. Die Permeabilität erwies sich als dominanter Faktor für den Produktivitätsindex und erklärte etwa 80 % der Reaktion im Fall der Warmbohrung (Abbildung 12). Die Injektionstemperatur spielt ebenfalls eine bedeutende Rolle, da sie die Fluidviskosität und den Strömungswiderstand beeinflusst und dadurch das Injektivitäts- und Produktivitätsverhalten verändert. Im Gegensatz dazu zeigt die thermische Leitfähigkeit nur einen geringen Einfluss auf den thermischen Rückgewinnungsfaktor. Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass höhere Permeabilität und längere Perforationsintervalle die Bohrlochleistung deutlich verbessern, während temperaturbedingte Viskositätsänderungen primär den Strömungswiderstand und die damit verbundenen Produktivitätsvariationen steuern.

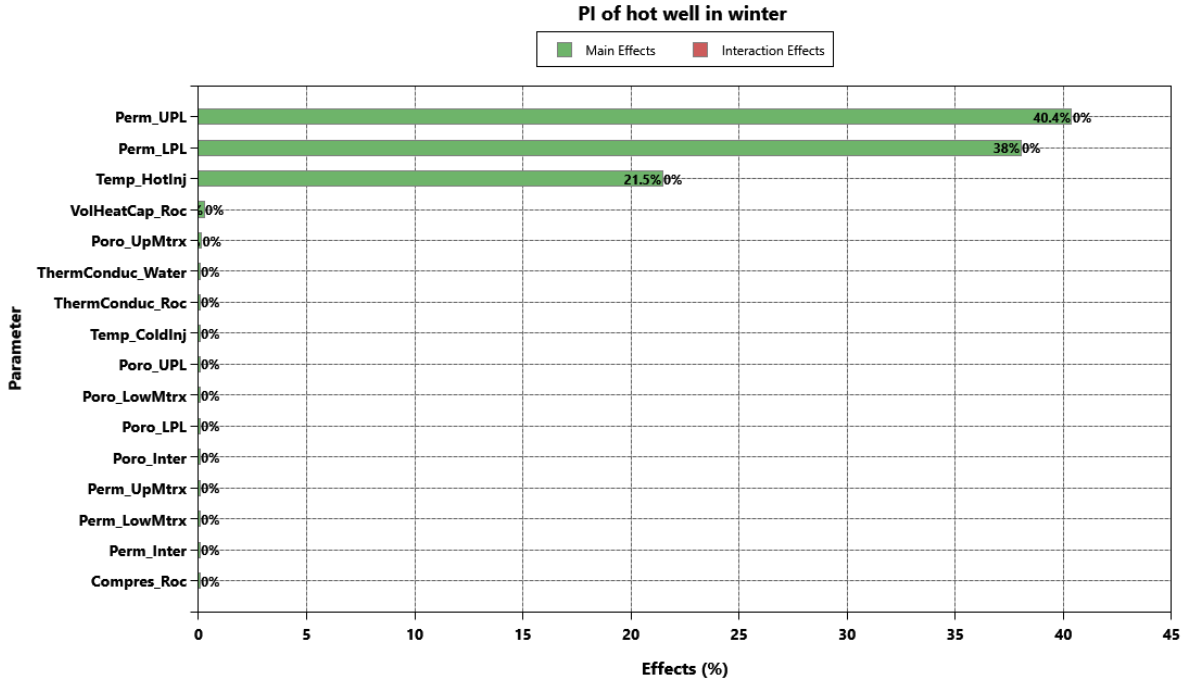


*Abb. 8. Einfluss der Parameter in % auf den Output des Produktivitätsindex der Warmbohrung BH2 (adaptiert nach Liu, 2025).*

Basierend auf den entwickelten konzeptionellen Modellen und den durchgeführten Sensitivitätsanalysen wurde das Speicherepotenzial jedes Standorts abgeschätzt. Diese Potenzialbewertung umfasst sowohl thermische Parameter (z. B. speicherbare Energiemengen, Wärmerückgewinnungsfaktoren) als auch hydraulische Aspekte (z. B. nachhaltige Förder- und Injektionsraten, Produktivitätsindizes). Die Ergebnisse zeigen, dass eine verlässliche Bewertung des Speicherepotenzials nur durch die kombinierte Betrachtung thermischer und hydraulischer Kriterien möglich ist und liefern standortspezifische Entscheidungsgrundlagen für die weitere Planung und Auslegung von Aquiferspeicheranlagen.

## AP2.4: Erstellung der Mess- und Monitoringkonzepte

Basierend auf den oben dargestellten Modellierungs- und Optimierungsergebnissen sowie ergänzenden Projekterfahrungen (Reallabor-Projekt) wurde ein umfassendes Monitoringkonzept für ATES-Systeme entwickelt. Dieses umfasst die Ausgestaltung von Push–Pull-Tests mit Wärme und multiplen Tracern sowie Leitlinien für Beobachtungsstrategien zur Detektion thermischer Durchbrüche, geochemischer Veränderungen und potenzieller Langzeitwirkungen. Die Ergebnisse dieser Arbeiten wurden als Beitrag im Hintergrundpapier zu ATES zusammengefasst (Blöcher et al., 2024; Buchholtz et al., 2025) und ermöglichen den Wissenstransfer sowie die Öffnung einer Dialogplattform zwischen Wissenschaft und Entscheidungsträgern. Es wurde gezeigt, dass Monitoringkonzepte die Systemleistung, die Umweltverträglichkeit

sowie die betriebliche Integrität über die gesamte Lebensdauer des Speichersystems adressieren müssen.

Ein zentrales Element des ATES-Monitorings ist das Performance-Monitoring, das das thermische und hydraulische Verhalten erfasst. Messungen von Temperatur, Druck und Zuflussprofilen in Förder- und Beobachtungsbohrungen ermöglichen die Bewertung der Wärmerückgewinnungseffizienz, der räumlichen Ausdehnung thermischer Plumes sowie die Identifikation thermischer und hydraulischer Verluste. Diese Daten sind essenziell, um Permeabilitätsänderungen, Verschlechterungen der Bohrlochperformance und potenzielle Integritätsprobleme frühzeitig zu erkennen. Kontinuierliche Durchfluss- und Volumenstrommessungen, ergänzt durch periodische Inflow-Profilierungen, werden empfohlen, um die langfristige Produktivität der Bohrungen zu bewerten, das hydraulische Gleichgewicht aufrechtzuerhalten und thermische Kurzschlüsse zu vermeiden. Solche Messungen bilden zudem die Grundlage für Entscheidungen über Wartungs-, Rehabilitations- oder Regenerationsmaßnahmen.

Das Umweltmonitoring ist ebenso wesentlich und muss sicherstellen, dass Veränderungen der Aquifereigenschaften, der Grundwassertemperatur, des Drucks und der Strömungsverhältnisse innerhalb akzeptabler Grenzen bleiben. Chemische Tracertests, die während der Injektions- und Extraktionszyklen eingesetzt werden, stellen ein leistungsfähiges Instrument dar, um tatsächliche Grundwasserströmungspfade zu charakterisieren, effektive thermische Dispersion zu quantifizieren und potenzielle Hystereseeffekte im zyklischen ATES-Betrieb zu identifizieren. Die Auswahl der Tracer muss so erfolgen, dass keine Beeinträchtigung des ATES-Betriebs oder der Grundwasserqualität entsteht.

Monitoringdaten bilden die Grundlage für numerische Simulationen und digitale Zwillinge von ATES-Systemen. Eine kontinuierliche Datenassimilation ermöglicht die iterative Aktualisierung von Modellen und verbessert die Vorhersage der Temperaturentwicklung, der hydraulischen Auswirkungen sowie langfristiger Speicherverluste. Zunehmend werden machine-learning-basierte Datenanalysen zur Verarbeitung großer Monitoringdatensätze eingesetzt. Automatisierte Monitoring-Systeme, kombiniert mit solchen datengetriebenen Ansätzen, bieten das Potenzial zur frühzeitigen Erkennung von Abweichungen vom erwarteten Systemverhalten und zur Echtzeit-Optimierung von Betriebsstrategien und erhöhen damit langfristig die Betriebssicherheit und Effizienz.

Die verteilte faseroptische Sensorik hat sich als Stand-der-Technik im ATES-Monitoring etabliert. Distributed Temperature Sensing (DTS), Distributed Strain Sensing (DSS) und Distributed Acoustic Sensing (DAS) ermöglichen räumlich aufgelöste und tiefenabhängige Messungen entlang von Bohrungen. Diese Daten können genutzt werden, um Zuflusszonen entlang der Filterstrecken

zu identifizieren, thermische Anomalien zu erkennen und die Bohrlochintegrität zu bewerten. Die Installation mehrerer DTS-Kabel in unterschiedlichen radialen Abständen von einer Bohrung ermöglicht die Abschätzung von Wärmeflüssen aus der Bohrung in die umgebende Formation und liefert damit direkte Einblicke in Wärmeverluste und Wärmeübertragungsprozesse.

Für einen nachhaltigen Langzeitbetrieb ist ein regelmäßiges hydrochemisches und mikrobiologisches Monitoring unverzichtbar. Die periodische Beprobung von Fluiden und Filtermaterialien ermöglicht die Erkennung von Veränderungen in der Wasserchemie sowie der mikrobiellen Aktivität. Durch den ATES-Betrieb induzierte Temperaturänderungen können mikrobiologische Gemeinschaften erheblich beeinflussen, indem sie bei hohen Temperaturen thermophile Arten oder in Abkühlungsphasen mesophile Arten begünstigen. Diese Veränderungen können geochemische Prozesse wie Sulfatreduktion, Methanogenese oder Eisenoxidation beeinflussen und technische Herausforderungen wie Biofouling oder Verockerung verursachen, die die Systemleistung reduzieren.

Hydrochemische Analysen sollten Parameter wie pH-Wert, Redoxbedingungen, elektrische Leitfähigkeit sowie Konzentrationen gelöster Stoffe (z. B. Eisen, Mangan, Sulfat) umfassen. Ein solches Monitoring ermöglicht die frühzeitige Identifikation von Ausfällungs-, Korrosions- oder Gasbildungsprozessen, die Porosität, Permeabilität oder Wasserqualität beeinträchtigen können. Sowohl aus betrieblicher als auch aus ökologischer Sicht ist eine kontinuierliche Bewertung der Umweltverträglichkeit erforderlich, um negative Auswirkungen auf Grundwasserökosysteme zu minimieren.

Trotz signifikanter Fortschritte bestehen weiterhin wichtige Wissenslücken. Dazu zählen die langfristige Anpassung mikrobieller Gemeinschaften an wiederholte thermische Zyklen, die Wechselwirkungen zwischen thermischer Belastung und bereits anthropogen beeinflussten urbanen Aquiferen sowie die Bedingungen, unter denen mikrobielle Prozesse zu Verockerung oder verstärkten Gasemissionen führen. Die Adressierung dieser Unsicherheiten erfordert integrierte Monitoringstrategien sowie die Weiterentwicklung gekoppelter thermo-hydro-chemisch-biologischer Modelle.

### *Dissemination, Zusammenarbeit und Wissenstransfer*

Die Projektergebnisse wurden in begutachteten Fachpublikationen (in Vorbereitung und veröffentlicht), Konferenzbeiträgen, eingeladenen Vorträgen, Postern sowie praxisorientierten Hands-on-Workshops präsentiert. Insbesondere ermöglichte ein Workshop im Rahmen des Deutschen Geothermiekongresses 2024 den Wissenstransfer an Praktiker und Forschende, wobei mehr als 15 Teilnehmende in der Einrichtung und Analyse von ATES-Modellen unter Verwendung von Open-Source-Tools geschult wurden.

Die enge Zusammenarbeit mit nationalen und internationalen Partnern (KIT, TU München, TU Dresden, TU Freiberg) stärkte die wissenschaftliche Wirkung des Projekts. Dies umfasste Software-Schulungen (Blöcher et al., 2024, 2025) im Rahmen des Geothermiekongresses sowie einer GFZ-Sommerschule, gemeinsame Modellierungsaktivitäten und die Kopplung von Untergrund-ATES-Modellen mit Fernwärmenetzsimulationen wie TRNSYS. Erste Ergebnisse zeigen eine stabile Konvergenz zwischen Oberflächen- und Untergrundmodellen und unterstreichen den Mehrwert integrierter Energiesystemmodellierung.

Alle geplanten methodischen Entwicklungen wurden umgesetzt, und mehrere Ziele wurden durch die Einführung von Surrogatmodellierung, unsicherheitsbewusster Optimierung und integrierter Systemkopplung übertroffen. Die Ergebnisse liefern sowohl standortspezifische Erkenntnisse als auch allgemein anwendbare Werkzeuge für die nachhaltige Planung und den Betrieb von ATES-Systemen in urbanen Umgebungen. Die wissenschaftlichen Resultate, kombiniert mit praktischen Monitoring- und Designempfehlungen, sichern eine hohe wissenschaftliche, technische und gesellschaftliche Relevanz über die Projektlaufzeit hinaus.

## 2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die Verwendung der Mittel durch das GFZ Potsdam erfolgte in Übereinstimmung mit dem bewilligten Projektantrag und dem geplanten Arbeitsprogramm. Die Ausgaben standen in direktem Zusammenhang mit der Durchführung der GFZ-Arbeitspakete zur Standort- und Systemcharakterisierung, numerischen Modellierung sowie Unsicherheitsanalyse von Aquifer Thermal Energy Storage (ATES)-Systemen.

Die Personalkosten stellten den größten Anteil des Budgets dar und wurden zur Finanzierung wissenschaftlicher Mitarbeitender eingesetzt, die an der Entwicklung, Implementierung und Anwendung analytischer, numerischer und Surrogatmodellierungsansätze arbeiteten. Die Arbeitszeit des Personals wurde für Modellentwicklung, Unsicherheits- und Sensitivitätsanalysen, die Auswertung von Push–Pull-Testmethoden, die Erstellung von Feldtestkonzepten sowie die Dissemination der Ergebnisse durch Publikationen, Workshops und Konsortialtreffen verwendet. Der Personaleinsatz entspricht dem ursprünglich geplanten Umfang und der vorgesehenen Laufzeit.

Reisekosten entstanden für die Teilnahme an Projekttreffen, wissenschaftlichen Konferenzen, Workshops sowie Koordinationsaktivitäten innerhalb des Konsortiums. Diese Aktivitäten waren wesentlich für den methodischen Austausch, die Integration der GFZ-Modellergebnisse in den Gesamtprojektkontext sowie die Vermittlung der Ergebnisse an die wissenschaftliche und anwendungsorientierte Gemeinschaft. Verbrauchsmaterialien und Betriebsmittel wurden in begrenztem Umfang eingesetzt und deckten vor allem rechnerbezogene Aufwendungen,

Datenverarbeitung sowie kleinere Materialien für Modelltests, Nachbearbeitung und Dokumentation ab. Größere Laborverbrauchsmaterialien waren nicht erforderlich, da der GFZ-Beitrag auf Modellierung und Datenanalyse fokussiert war. Numerische Simulationen wurden unter Nutzung der bestehenden GFZ-Recheninfrastruktur durchgeführt; größere Geräteanschaffungen waren nicht notwendig. Externe Dienstleistungen wurden nicht in Anspruch genommen. Alle zentralen wissenschaftlichen Aufgaben, einschließlich Modellentwicklung, Unsicherheitsanalyse und Ergebnisinterpretation, wurden inhouse am GFZ unter Nutzung der HPC-Kapazitäten durchgeführt. Die Ausgabenstruktur entspricht weitgehend dem ursprünglichen Finanzplan, ohne signifikante Abweichungen, die die Projektdurchführung oder -ergebnisse beeinflusst hätten.

## 3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die vom GFZ Potsdam im Rahmen des Projekts SpeicherCity durchgeführten Arbeiten waren sowohl notwendig als auch angemessen, um die übergeordneten Projektziele zu erreichen und die wissenschaftlichen sowie technischen Herausforderungen im Zusammenhang mit der Planung und dem Betrieb von Aquifer Thermal Energy Storage (ATES)-Systemen in urbanen Umgebungen zu adressieren.

Die Notwendigkeit des GFZ-Beitrags ergibt sich aus der inhärenten Komplexität von ATES-Systemen, die durch gekoppelte thermo–hydraulisch–chemische Prozesse gesteuert werden und erheblichen geologischen sowie betrieblichen Unsicherheiten unterliegen. Eine verlässliche Bewertung von Speicherepotenzial, Systemeffizienz und Langzeitwirkungen kann nicht allein durch vereinfachte oder deterministische Ansätze erreicht werden. Die Entwicklung und Anwendung unsicherheitsbewusster Modellierungsansätze, Methoden zur Parameteridentifikation sowie hochauflösender numerischer Simulationen waren daher essenziell, um eine wissenschaftlich fundierte Grundlage für Entscheidungsprozesse und Systemdesign bereitzustellen.

Die durchgeführten Arbeiten waren sowohl im Umfang als auch in der Methodik angemessen. Analytische Lösungen, Optimierungstechniken und numerische Modelle wurden komplementär eingesetzt, wodurch methodische Robustheit bei gleichzeitig hoher rechnerischer Effizienz gewährleistet wurde. Der Fokus auf Push–Pull-Tests und die Charakterisierung mittels Einzelbohrung war angesichts der Einschränkungen urbaner Standorte besonders geeignet, da dort die Datenverfügbarkeit häufig begrenzt ist und die Monitoringinfrastruktur minimiert werden muss. Die Integration von Wärme- und konservativen Tracern in den Analyseansatz stellte einen zielgerichteten und effizienten Ansatz dar, um Parameterunsicherheiten mit begrenztem Feldaufwand zu reduzieren.

Die Entwicklung fortgeschrittener numerischer und Surrogatmodellierungsansätze war angesichts der Notwendigkeit, einen großen Parameterraum unter geologischer und betrieblicher Unsicherheit zu

untersuchen, angemessen. Diese Methoden ermöglichten eine systematische Bewertung thermischer Interferenz, Speicherleistung und Designrestriktionen, die mit konventionellen Trial-and-Error-Simulationen nicht realisierbar gewesen wäre. Die daraus abgeleiteten designrelevanten Kenngrößen, wie beispielsweise optimale Bohrlochabstände, unterstützen direkt die praktische ATES-Planung und rechtfertigen damit den methodischen Aufwand.

Darüber hinaus war die GFZ-Arbeit in die Konsortiumsstruktur eingebettet. Modellergebnisse wurden in einer Form bereitgestellt, die eine direkte Integration in Monitoringkonzepte, Feldtestplanung sowie die von anderen Partnern entwickelten Energiesystemmodelle ermöglichte. Dies stellte die Kohärenz zwischen den Arbeitspaketen sicher und maximierte den Mehrwert des GFZ-Beitrags über reine Einzelergebnisse hinaus. Die angewandten Methoden und erzielten Ergebnisse stellen somit einen effizienten und wissenschaftlich begründeten Einsatz der bereitgestellten Mittel dar und haben wesentlich zum Erfolg des Gesamtprojekts beigetragen.

## 4. Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Das Projekt SpeicherCity hat die geplanten Ergebnisse erfolgreich geliefert und steht vollständig im Einklang mit den im aktualisierten Verwertungsplan beschriebenen Zielen und Maßnahmen. Die Resultate sind direkt für wissenschaftliche, gesellschaftliche und industrielle Anwendungen nutzbar. Hochaufgelöste urbane Untergrundmodelle der thermischen, hydraulischen und teilweise chemischen (Sorption) Wechselwirkungen wurden entwickelt und anhand von Felddaten validiert. Alle erzeugten Datensätze, einschließlich hydrogeologischer und thermischer Parameter, wurden aufbereitet und stehen den Forschungspartnern unter kontrolliertem Zugang zur Verfügung. Die Projektergebnisse wurden über begutachtete Publikationen, Konferenzbeiträge und spezialisierte Workshops für kommunale Akteure und Industriepartner disseminiert.

Die Modelle und Ergebnisse liefern Kommunen und Planern anwendbare Erkenntnisse zur Optimierung der Energiespeicherung in urbanen Gebieten, zur Reduktion ökologischer Auswirkungen und zur Verbesserung der Einhaltung regulatorischer Vorgaben. Methoden zur Bewertung und Minderung von Risiken im Zusammenhang mit unterirdischer Energiespeicherung wurden entwickelt und unterstützen einen sicheren und nachhaltigen Betrieb. Durch die Ermöglichung effizienter Speicherung und Integration erneuerbarer Energien trägt das Projekt direkt zu klimaneutralen urbanen Energiesystemen bei.

Die Pilotimplementierung in Zusammenarbeit mit kommunalen Energieversorgern (BTB) hat die praktische Anwendbarkeit der Modelle demonstriert. Die im Projekt entwickelten prädiktiven Modellierungswerkzeuge sind für den internen Einsatz am GFZ sowie für Lizenzierungs- oder

Beratungsleistungen gegenüber Industriepartnern einsatzbereit. Workshops und Schulungsmaterialien wurden für lokale Betreiber bereitgestellt und unterstützen die praktische Anwendung der Projektergebnisse.

Das Projekt erfüllt vollständig die im aktualisierten Verwertungsplan beschriebenen Maßnahmen, einschließlich Datenzugänglichkeit, Entwicklung von Modellierungswerkzeugen und Stakeholder-Einbindung. Die kurzfristige Verwertung umfasst die kontrollierte Freigabe von Datensätzen, die gezielte Dissemination von Modellergebnissen sowie die Integration in laufende Stadtplanungsprozesse. Die mittel- und langfristige Verwertung konzentriert sich auf die weitere Standardisierung der Modellierungswerkzeuge, den Ausbau von Beratungsleistungen und die Übernahme der Methoden in weitere urbane Energiespeicherprojekte. Darüber hinaus werden die gekoppelten THC-Vorhersagen mittels Open-Source-Software die langfristigen Parameteränderungen im Aquifer infolge des ATES-Betriebs weiter verbessern und eine physikbasierte Entscheidungsunterstützung bereitstellen, indem sie eine präzise Bewertung der ATES-Effizienz ermöglichen.

## 5. Während der Durchführung bekannt gewordene Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Während der Umsetzung des Projekts SpeicherCity wurden Fortschritte in der Entwicklung gekoppelter numerischer Modelle zur Vorhersage des Speicherverhaltens, zur Bewertung betrieblicher Risiken sowie zur Unterstützung der Optimierung von Speichersystemen erzielt.

Im Verlauf des Projekts wurde dieser extern berichtete Fortschritt kontinuierlich beobachtet und, soweit relevant, in Konferenzen, Workshops sowie in direkter Kommunikation mit Partnerinstitutionen diskutiert. Erkenntnisse aus diesen Entwicklungen wurden bei der Interpretation der eigenen Projektergebnisse berücksichtigt, wodurch die Ausrichtung am Stand der Forschung sichergestellt und die wissenschaftliche Validität der Projektmethodik gestärkt wurde.

Die von anderen Institutionen während der Projektlaufzeit berichteten Fortschritte bestätigten die Relevanz des Projekts SpeicherCity, ermöglichten ein Benchmarking der entwickelten Modelle und Datensätze und stellten sicher, dass die Ergebnisse einen substanziellen Beitrag zu laufender Forschung sowie zu praktischen Anwendungen im Bereich urbaner unterirdischer Energiespeicherung leisten.

## 6. Erfolgte und geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses

### Erfolgte Veröffentlichungen


1. Guido Blöcher, Simona Regenspurg, Stefan Kranz, Martin Lipus, Liang Pei, Ben Norden, Thomas Reinsch, Jan Henninges, Romy Siemon, Dominika Orenczuk, Sarah Zeilfelder, Traugott Scheytt, Ali Saadat,(2024), Best practices for characterization of High Temperature-Aquifer Thermal Energy Storage (HT-ATES) potential using well tests in Berlin (Germany) as an example, Geothermics, 116, https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2023.102830.
2. Blöcher, G., Cacace, M., Petrova, E., Tzoufka, K. (2024). Numerische Simulation eines Aquifer Thermal Energy Storage (ATES). Workshop at DGK 2024.
3. Buchholz, G., Blöcher, G., Farkas, M. P., Fleuchaus, P., Hahn, F., Junker, H., Kabus, F., Kirsch, R., Knaub, O., Koenigsdorff, R. (2025). Geothermische Speicher – Hintergrundpapier. Bundesverband Geothermie e.V.
4. De Lucia, M., Frigo, S., Lübke, M., Cacace, M., Petrova, E., Hofmann, H., Scheck-Wenderoth, M., Blöcher, G. (2026). Towards fully coupled Thermo-Hydro-Mechanical-Chemical (THMC) modelling in advanced reservoir engineering: GOLEM-PHREEQC. *Advances in Geosciences, 67*, 117–127. https://doi.org/10.5194/adgeo-67-117-2026, 2026.
5. Frigo, S., Cacace, M., De Lucia, M., Blöcher, G., Petrova, E., Leal, A. M. M., Saar, M. O., Hofmann, H. (2025). Coupling GOLEM, PHREEQC, and Reaktoro for enhanced simulation of reactive processes in geothermal systems. European Geothermal Congress 2025.
6. Kranz, S., Norden, B., Blöcher, G., Regenspurg, S., Virchow, L., Kieling, K., Pei, L., Petrova, E., Saadat, A. (2024). Hochtemperatur Aquiferspeicher – Vom Labor bis zur Anwendung. DGK 2024.
7. Liu, Yuxuan (2025), Evaluating the feasibility of reusing old wells for aquifer thermal energy storage (ATES): a sensitivity analysis of reservoir parameters. Master thesis at TU Berlin, Institute for Applied Geoscience.
8. Petrova, E., Blöcher, G., Cacace, M. (2023). Thermo-Hydro-Chemical transport modelling of aquifer energy storage. Annual General Assembly 2023 of the Program “Changing Earth – Sustaining our Future” (Helmholtz).
9. Petrova, E., Blöcher, G., Kranz, S., Regenspurg, S., Saadat, A. (2023). Push-pull tests for aquifer parameterization of ATES systems: Lessons learned from parameter optimization. European Geothermal Workshop, Utrecht, 2023.
10. Petrova, E., Blöcher, G., Kranz, S., Regenspurg, S., Saadat, A. (2023). Push-pull tests for evaluating the sustainability of ATES systems: Lessons learned from sensitivity acknowledging parameter optimization. GeoBerlin 2023. https://doi.org/10.48380/6bzk-qv26

11. Petrova, E., Cacace, M., Kranz, S., Zang, A., Blöcher, G. (2025). Thermal interference in aquifer thermal energy storage: Insights from stochastic surrogate modelling of well placement. *Applied Thermal Engineering*, Article 127012, https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.127012.
12. Petrova, E., Kranz, S., Norden, B., Cacace, M., Saadat, A., Blöcher, G. (2024). Optimal well distance selection for Aquifer Thermal Energy Storage (ATES) under geological uncertainty. ECCOMAS Congress 2024 – 9th European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering. https://doi.org/10.13140/RG.2.2.34935.84640.
13. Petrova, E., Schwarze, C. O., Virchow, L., Kranz, S., Blöcher, G. (2025). On the value of integrated modeling and optimization approaches for planning Aquifer Thermal Energy Storage on the example of Berlin-Adlershof. Der Geothermiekongress 2025.
14. Petrova, E., Selzer, P., Kranz, S., Zeilfelder, S., Hebig, K. H., Machida, I., Marui, A., Blöcher, G., Scheytt, T. (2025). Surrogate model supported optimization of a multitracer push-pull test in the Horonobe aquifer (Japan) under parametric uncertainty. EGU General Assembly 2025. https://doi.org/10.5194/egusphere-egu25-5774
15. Petrova, E., Selzer, P., Kranz, S., Zeilfelder, S., Hebig, K. H., Machida, I., Marui, A., Blöcher, G., Scheytt, T. (2025). Surrogate model supported optimization of a multitracer push-pull test in the Horonobe aquifer (Japan) under parametric uncertainty. Geothermics,Volume 133, December 2025, 103449, https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2025.103449
16. Petrova, E., Virchow, L., Kranz, S., Regenspurg, S., Saadat, A., Blöcher, G. (2023). Predictive flow and transport simulation of ATES at the example of Berlin-Adlershof. Der Geothermiekongress 2023.
17. Schwarze, C. O., Pei, L., Virchow, L., Petrova, E., Norden, B., Regenspurg, S., Kieling, K., Blöcher, G., Kranz, S. (2025). Characterization of the hydraulic properties of a planned Aquifer Thermal Energy Storage (ATES) system during well development. EGU General Assembly 2025. https://doi.org/10.5194/egusphere-egu25-16166
18. Song, Z., Zhao, Y., Blöcher, G., Tian, D., Petrova, E., Wang, F., Khaledi, K. (2026). Coal mine underground water reservoirs: A sustainable water storage solution for mining areas. *Tunnelling and Underground Space Technology, 168*, 107143, https://doi.org/10.1016/j.tust.2025.107143
19. Stemmle, R., Arab, A., Bauer, S., Beyer, C., Blöcher, G., Bossennec, C., Dörnbrack, M., Hahn, F., Jaeger, P., Kranz, S., Mauerberger, A., Nordheim, J. N., Ohagen, M., Petrova, E., Regenspurg, S., Rettenmaier, D., Saadat, A., Sass, I., Scheytt, T., Scholliers, N., Shao, H., Tzoufka, K., Zosseder, K., Blum, P. (2025). Current research on aquifer thermal energy storage (ATES) in Germany. *Grundwasser, 30, 107–124 (2025)*. https://doi.org/10.1007/s00767-025-00590-3
20. Virchow, L., Kranz, S., Regenspurg, S., Blöcher, G., Norden, B., Pei, L., Schwarze, C. O., Petrova, E., Cunow, C., Knüttel, L. (2025). Single-

well hot push-pull testing for efficient and reliable high-temperature ATES operation. European Geothermal Congress 2025.

**Geplante Veröffentlichungen**

Beyer C., Nordheim JN, Bauer S, Herrmann M, Blum P, Stemmle R, Petrova E, Blöcher G, Kranz S, Tzoufka K, Zosseder K, Dörnbrack M, Shao H 2026 (in preparation), Models for LT- and HT-ATES simulation: Lessons learned from six case studies in Germany

Tzoufka, K., Bock, K., Lehmann, L., Petrova, E., Blöcher, G., Kranz, S., Felsmann, C., Zosseder, K. (in preparation): Evaluation of aquifer thermal energy storage system integration into district heating systems: two case studies from Germany