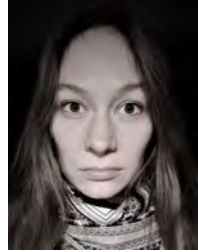


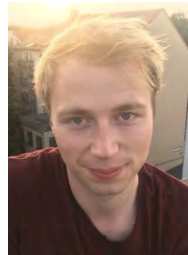
SpeicherCity – Modelle zur Systemintegration von Aquiferspeichern in Städten

Wer sind wir...



Elena Petrova (GFZ)

Jan Niklas Nordheim (CAU)



Maximilliam Dörnbrack (UFZ)



Ruben Stemmler (KIT)



Matthias Herrmann (KIT)

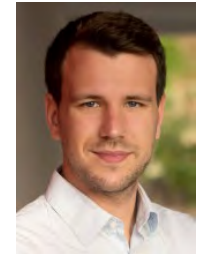


Unser Ziel ist die Integration von Aquiferspeichern in die heutigen sowie zukünftigen Energiesysteme

Σ 25

Laura Lehmann (TUD)

Kevin Bock (TUD)



Maximilian Noethen (MLU)



Florian Hahn (IEG)



Benjamin Pfluger (IEG)



Grubenwärmespeicher Markgraf II Bochum

- Pilotanlage zur saisonalen Wärmespeicherung aus Heatstore Projekt
- ehemalige Kleinzeche
- Festgestein in 23 m Tiefe




- Produktions-, Injektions- und Observationsbohrung vorhanden
- Bewirtschaftung mit solar aufgewärmten Wasser (max. 60°C)










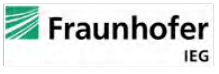







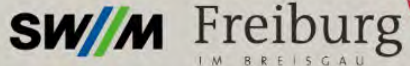


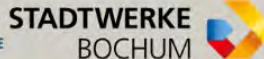


Stadt Freiburg i. Br.

- Lockergesteinsabfolgen mit hohem Potential für thermische Grundwassernutzung
- Daten zu Kältebedarf und thermisches Grundwassermodell vorhanden





SpeicherCity		
AP1: Koordination  	Advisory Board	
AP2: Standort- und Systemcharakterisierung  		AP8: Akzeptanz & Transfer  
AP3: Wärmetransportmodellierung  		AP7: Energiesystemmodellierung  
AP4: Kopplung Speicher- und Netzmodelle  	AP5: Netzmodellierung  	AP6: Umweltauswirkungen  
   		

Campus des Wissenschaftsparks Leipzig


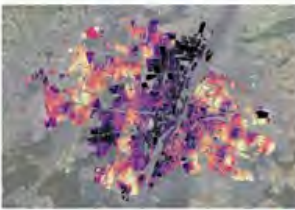
- bekannte Konzentration von Schadstoffen im Grundwasser vorhanden (ATES-L Projekt)
- zahlreiche Vorarbeiten, Daten, sowie Modellansätze vorhanden






Stadt München

- umfangreiche Daten von zahlreichen thermischen Grundwassernutzungen
- geplante Einbindung von saisonalen und kurzfristigen Hochtemperatur-Tiefenspeichern in das Münchner Fernwärmenetz

- 0 - 2,0 W/m²
- >2,0 - 5,5 W/m²
- >5,5 - 11,0 W/m²
- >11,0 - 17,5 W/m²
- >17,5 - 26,5 W/m²
- >26,5 - 38,0 W/m²
- >38,0 - 54,0 W/m²
- >54,0 - 70,5 W/m²
- >70,5 - 94,0 W/m²
- >94,0 - 130,0 W/m²
- >130,0 - 198,0 W/m²
- >198,0 - 327,5 W/m²





Grubenwärmespeicher Markgraf II Bochum

- Pilotanlage zur saisonalen Wärmespeicherung aus Heatstore Projekt
- ehemalige Kleinzeche
- Festgestein in 23 m Tiefe




- Produktions-, Injektions- und Observationsbohrung vorhanden
- Bewirtschaftung mit solar aufgewärmten Wasser (max. 60°C)










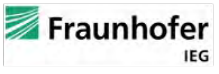










Stadt Freiburg i. Br.

- Lockergesteinsabfolgen mit hohem Potential für thermische Grundwassernutzung
- Daten zu Kältebedarf und thermisches Grundwassermodell vorhanden





SpeicherCity		
<p>AP1: Koordination</p>  	<p>Advisory Board</p>	
<p>AP2: Standort- und Systemcharakterisierung</p>  		<p>AP8: Akzeptanz & Transfer</p>  
<p>AP3: Wärmetransportmodellierung</p>  		<p>AP7: Energiesystemmodellierung</p>  
<p>AP4: Kopplung Speicher- und Netzmodelle</p>  	<p>AP5: Netzmodellierung</p>  	<p>AP6: Umweltauswirkungen</p>  
		

Uni Campus Kiel

- erhebliches Potential für Aquiferwärmespeicher
- zukünftige Energieversorgung von Laborgebäuden, Bürogebäuden, Wohnheimen und einem Rechenzentrum
- geplante Einbindung flexibler Temperaturniveaus und Monitoringansätze





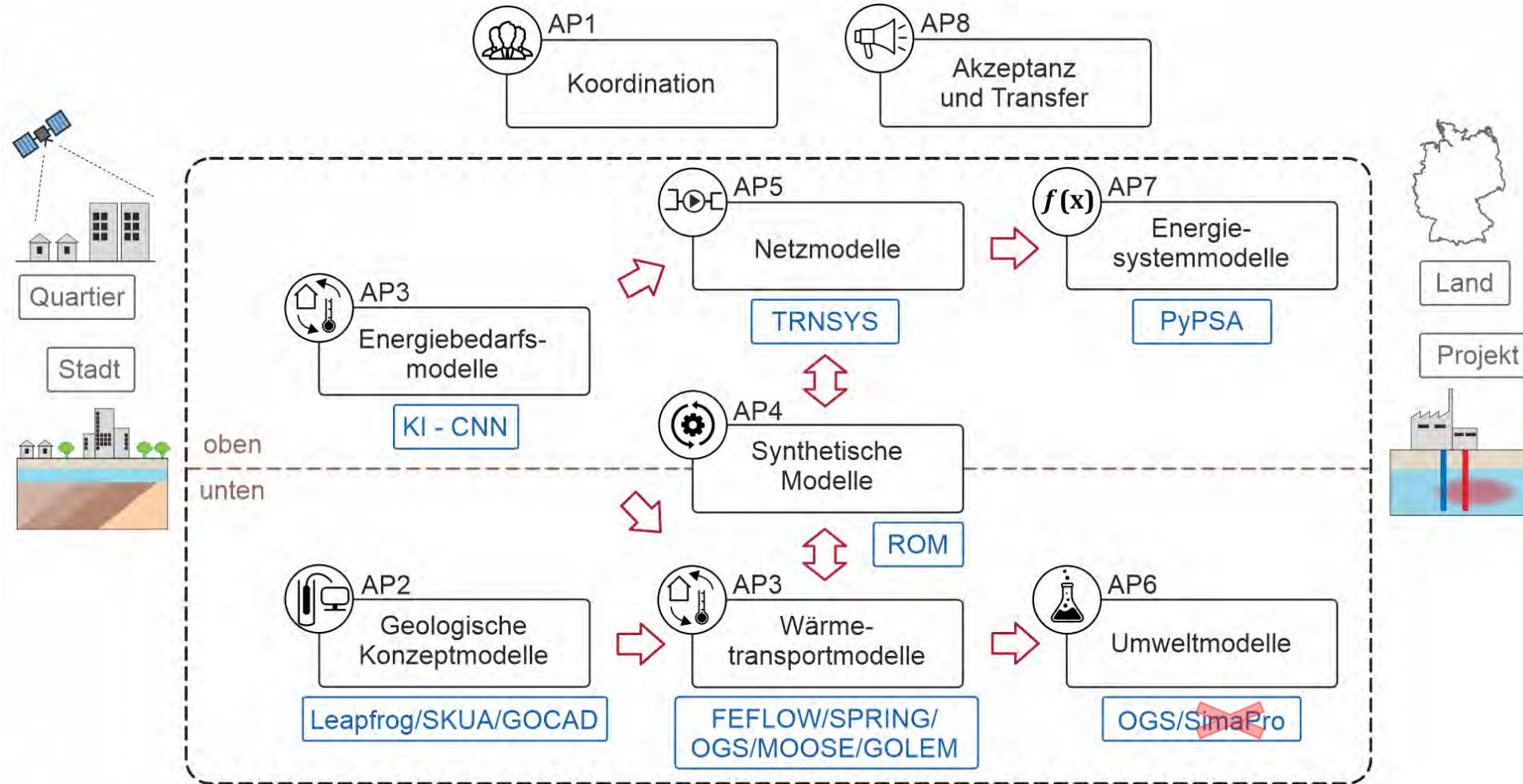
Berlin Spandau

- Wärme-/Kälteversorgung Stadtquartier
- Festgestein in ca. 500 m Tiefe
- bestehende Infrastruktur eines Erdgasspeichers
- zahlreiche Tiefbohrungen vorhanden





Modelle und Modellkopplungen



ROM = Reduced-order Modelle
TRNSYS-TUD: Netzwerkmodell

PyPSA = Python for Power System Analysis
SimaPro: LCA Software

Übersichtsartikel: Aktuelle ATES-Forschung in Deutschland

- Standorte aus SpeicherCity
- Standorte aus anderen Projekten
- Auch Berücksichtigung von MTES

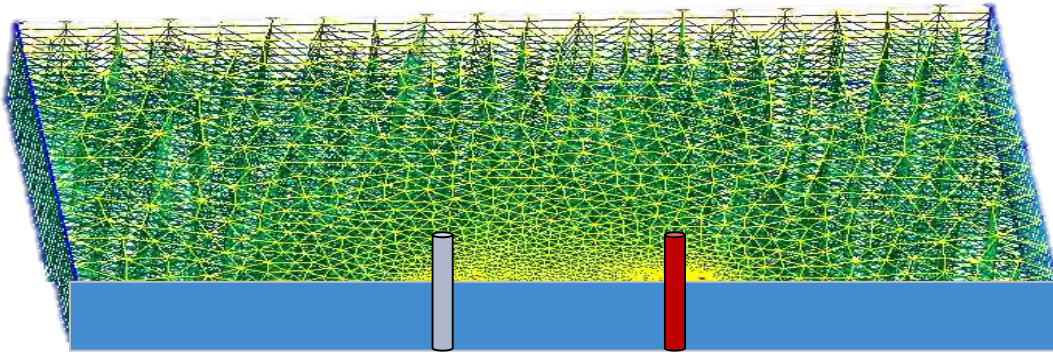
- Standortbeschreibungen und übergreifende Diskussion
- Ansprechpartner: Dr. Ruben Stemmler (KIT)

Aktuelle Forschungsstandorte in Deutschland



Optimal well distance selection for ATEs with the example of the Adlershof site (Berlin)

Model



GMSH-generated mesh and a set of input parameters are included in the MOOSE-GOLEM model, which solves TH system evolution of ATEs. Density-viscosity coupling according to IAPWS-97. Output is a spatio-temporal development of pressure and temperature.

Approach: Surrogate models (Ersatzmodelle)

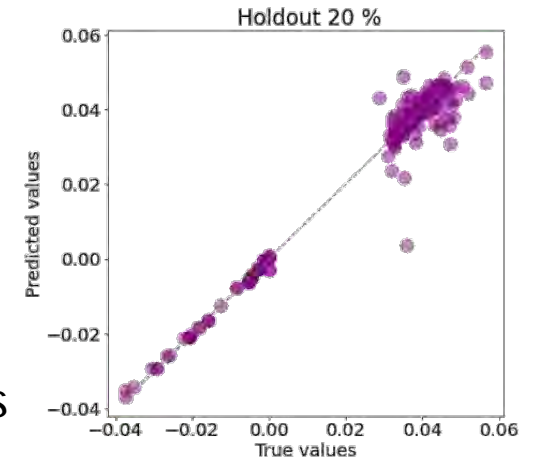
Metamodel (surrogate model) formulation with kernel k Matern 3/2.

$$f(\mathbf{x}) \sim \mathcal{GP}(m(\mathbf{x}), k(\mathbf{x}, \mathbf{x}'))$$

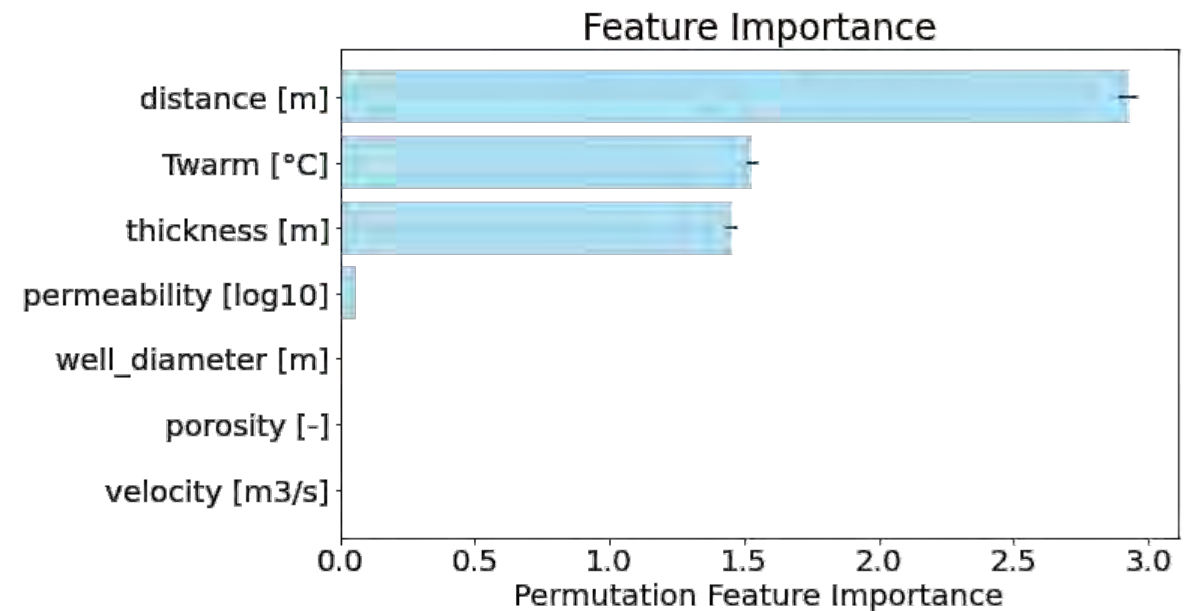
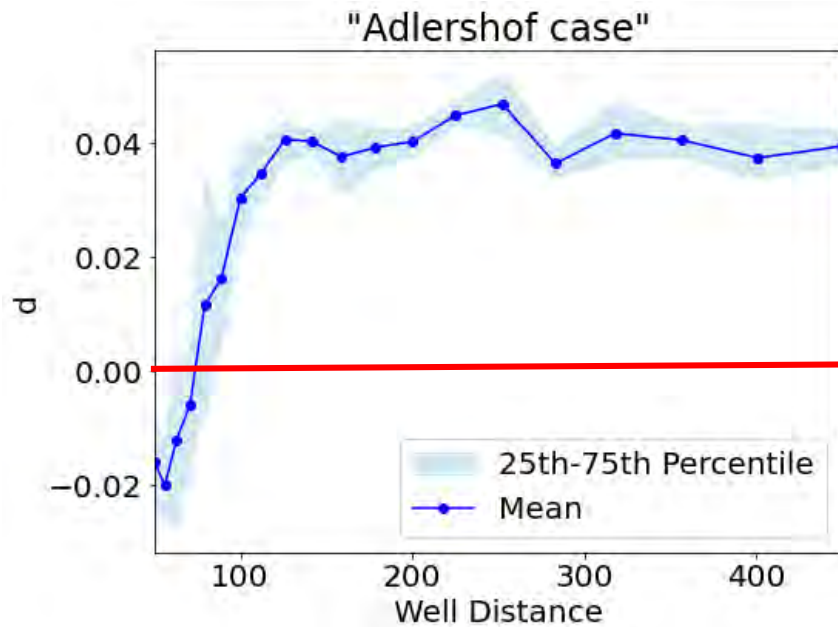
Calibration with cross-validation to minimise Root Mean Squared Error (RMSE):

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}$$

Ensemble size: 1500 full models



A metamodel was trained based on ensemble of spatially resolved physics-based models. The order reduction technique was developed to address the question of optimal well spacing under geological (permeability, porosity, aquifer thickness) and technical (well diameter, injection velocity, injection temperature) uncertainties.



Negative values of reduced model parameter d (y-axes) corresponds to thermal interference and reduction in energy recovery efficiency.

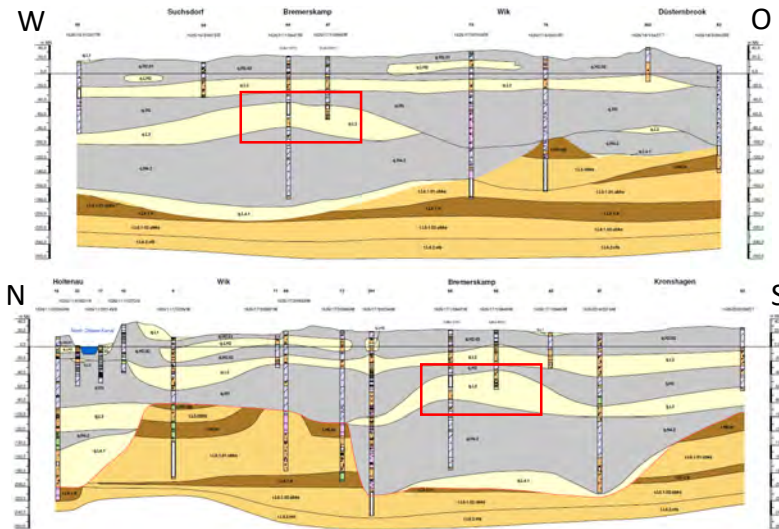
First results of parameter influence on the thermal interference in Adlershof. Higher values refer to higher impact.

Zielsetzung: ATES-Dimensionierung für den CAU-Campus bei Variabilität

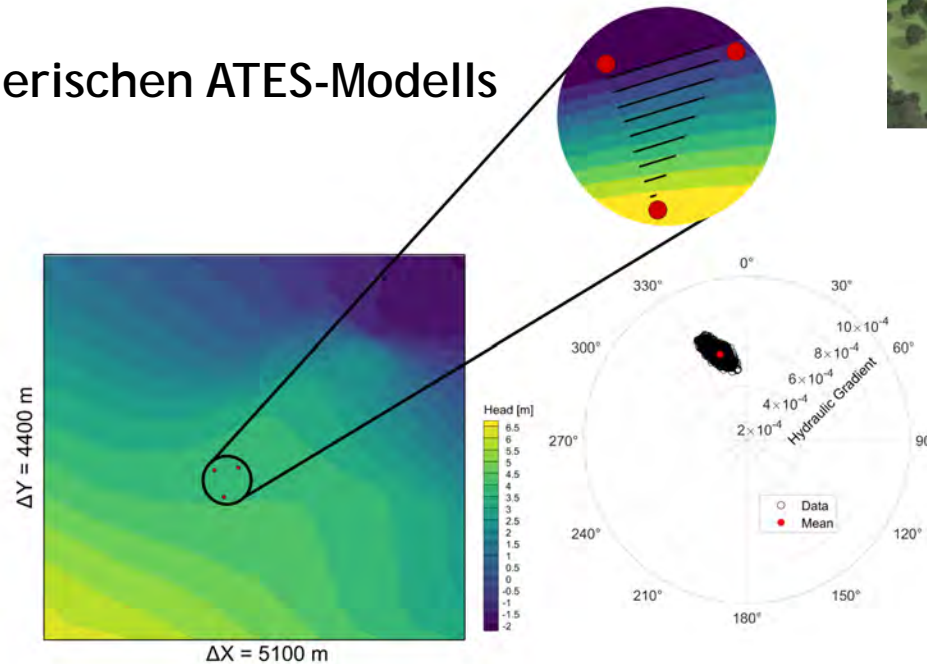
- der hydrogeologischen Ausprägung der Speicherschicht
- des zeitlichen Gebäudestruktur- und Energie-Entwicklungspfad



1) Aufbau und Kalibrierung des numerischen ATES-Modells



Geologisches Modell des LFU SH als Grundlage für den numerischen ATES-Modell im Campusbereich.



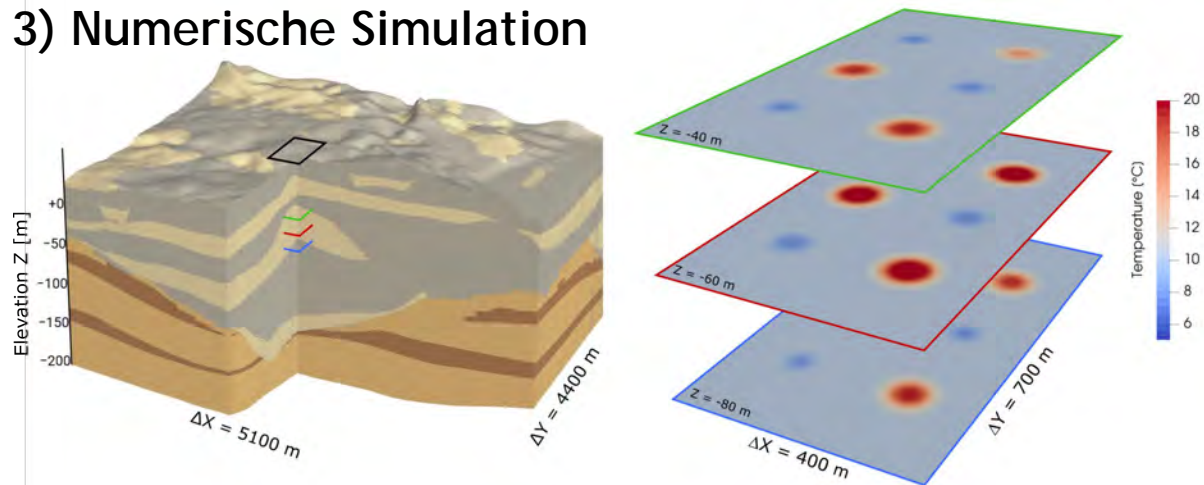
2D-Schnitt durch die simulierte Potentialverteilung im Vergleich mit dem gemessenen hydraulischen Gradienten.

- Hydraulischer Gradient ist nahezu konstant in Richtung und Betrag.
- Stationäre Kalibrierung des hydraulischen Modells erfolgte anhand von Stichtagsmessungen der Grundwasserstände (MS1). ✓
- In Arbeit: Systematik zur Kalibrierung von ATES-Modellen auf Basis der Projektstandortmodelle und Literaturlauswertung

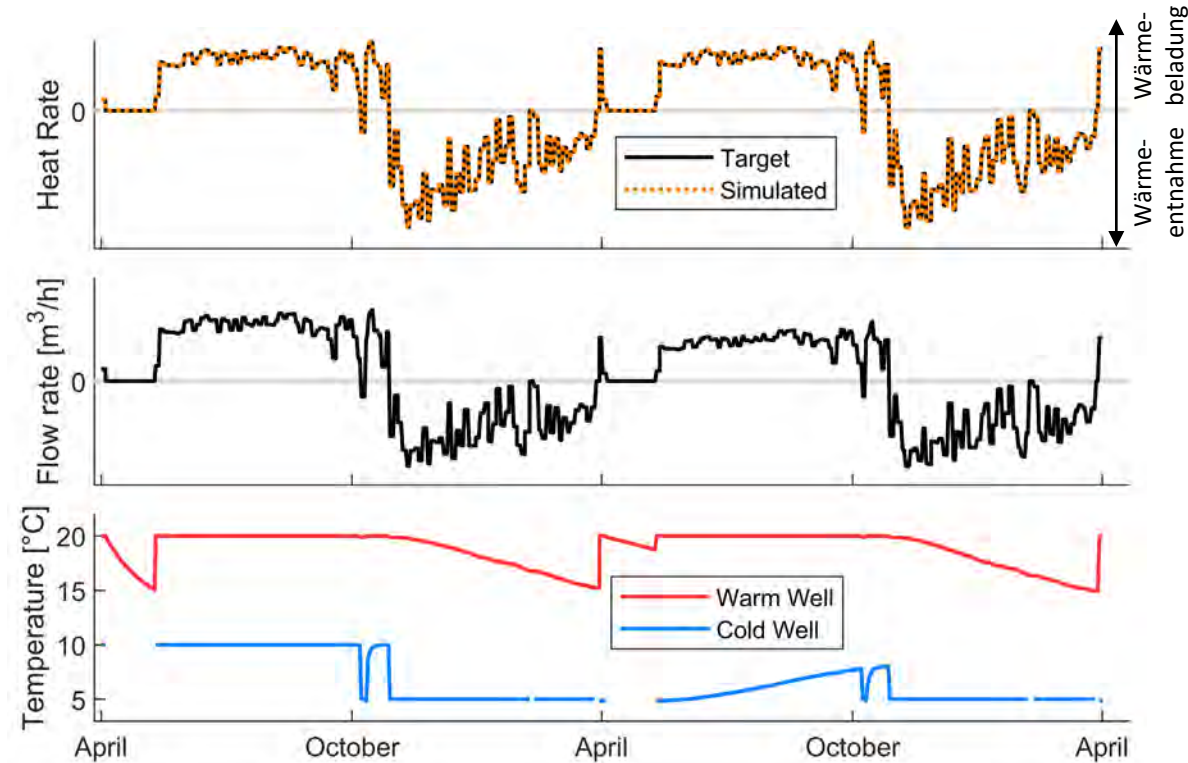
2) Ermittlung räumlich-zeitlicher Energiebedarfe

- Zeitlich aufgelöste gebäudespezifische Heiz-/Kühllasten und resultierende ATES-Lastzeitreihen ✓
- räumlich-zeitlicher Gebäude-Entwicklungsplan ✓
- in Arbeit: Ableitung Langzeitszenarien der ATES-Lastzeitreihen

3) Numerische Simulation



Numerische Simulation der durch ATES-Betrieb induzierten Temperaturfelder in der Speicherschicht bei Darstellung der Lastanforderung durch drei Brunnendubletten.



Lastzeitreihe des ATES (Vorgabe gegen Simulation), Pumprate und Temperaturen am warmen und kalten Brunnen.

Inhalte	2022						2023						2024						2025											
	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1 Aufbau & Kalibrierung ATES-Modell Campus Kiel																														
2 Ermittlung räumliche & zeitliche Energiebedarfe																														
3 Numerische Simulation ATES-Systeme																														
4 Ableitung übergeordnete Erkenntnisse für ATES-Simulation																														

3D hydrogeologisches Modell der Freiburger Bucht



OGWL
 $k_r = 0,1 \text{ bis } 4,4 \cdot 10^{-3} \text{ [m/s]}^a$
 $n_e = 15 \%^a$

HGE6
 $k_r = 2 \cdot 10^{-4} - 1 \cdot 10^{-6} \text{ [m/s]}^b$
 $n_e = 10 \%^b$

HGE7
 $k_r = 3 \cdot 10^{-3} - 5 \cdot 10^{-4} \text{ [m/s]}^b$
 $n_e = 15 \%^b$

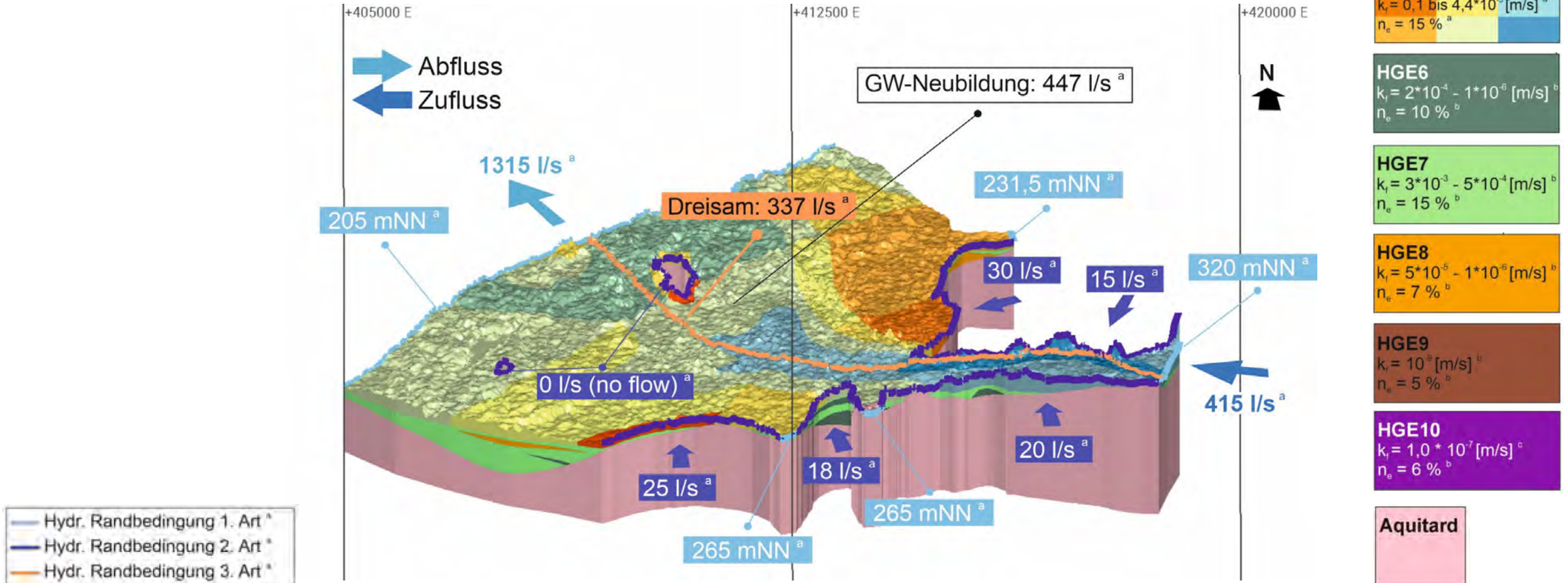
HGE8
 $k_r = 5 \cdot 10^{-5} - 1 \cdot 10^{-6} \text{ [m/s]}^b$
 $n_e = 7 \%^b$

HGE9
 $k_r = 10^{-3} \text{ [m/s]}^b$
 $n_e = 5 \%^b$

HGE10
 $k_r = 1,0 \cdot 10^{-7} \text{ [m/s]}^c$
 $n_e = 6 \%^b$

Aquitard

3D hydrogeologisches Konzeptmodell der Freiburger Bucht



AP4 (TUM): Synthetische Modelle zur Kopplung von Speicher- und Netzmodellen Workflow

1. Synthetic numerical model

- Evaluate HT-ATES development at the German Molasse Basin
- Numerical model representative of the reservoir conditions

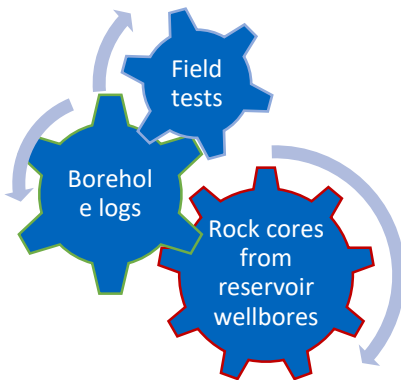
2. Reduced Basis Method

- Reduced Order Model (ROM) reproducing the finite element (FEM) solution

3. Parametric analysis

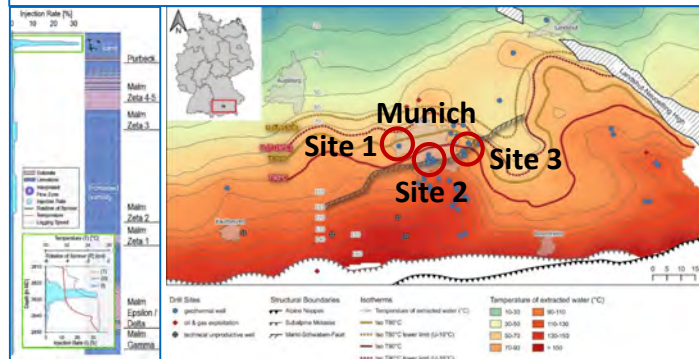
- ROM utilized in an extensive parameter matrix composed of encountered reservoir rock properties and feasible operation parameters

Deployed datasets



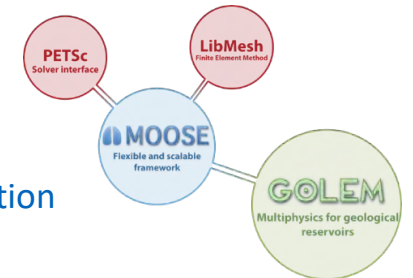
Fluid migration control in the reservoir

- ✓ North of Munich → Matrix/karst
- ✓ Central Munich → Karst
- ✓ South of Munich → Fracture/fault

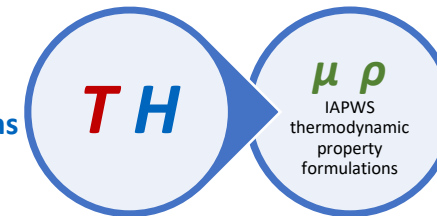


Numerical Analysis

Open-source **MOOSE** [1] framework (Multiphysics Object-Oriented Simulation Environment) and complementary **Golem** [2] application



Coupled thermal hydraulic simulations



Density and viscosity variation

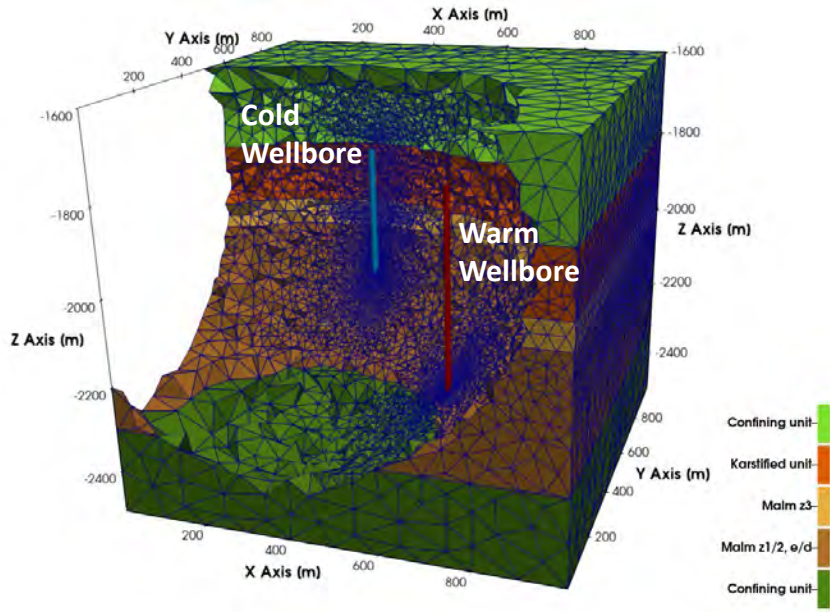
¹Permarn, C.J., Gaston, D.R., Andrš, D., Carlsen, R.W., Kong, F., Lindsay, A.D., Miller, J.M., Peterson, J.W., Slaughter, A.E., Stogner, R.H. and Martineau, R.C., 2020. MOOSE: Enabling massively parallel multiphysics simulation. *SoftwareX*, 11, p.100430.

²Cacace, M. and Jacquy, A.B., 2017. Flexible parallel implicit modelling of coupled thermal-hydraulic-mechanical processes in fractured rocks. *Solid Earth*, 8(5), pp.921-941.

AP4 (TUM): Synthetische Modelle zur Kopplung von Speicher- und Netzmodellen

Numerical approach and results

Numerical model



- Numerical models constrained by known Upper Jurassic reservoir properties and locally feasible operation parameters
- Heat storage performed through two vertical wells
- Seasonal operation with semi-annual load cycles over 10 a

Numerical results

Temperature and thermal efficiency

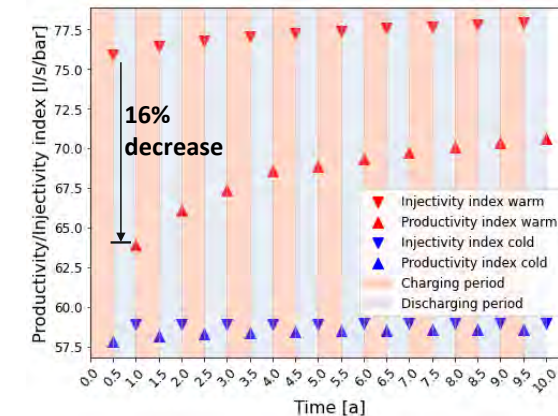
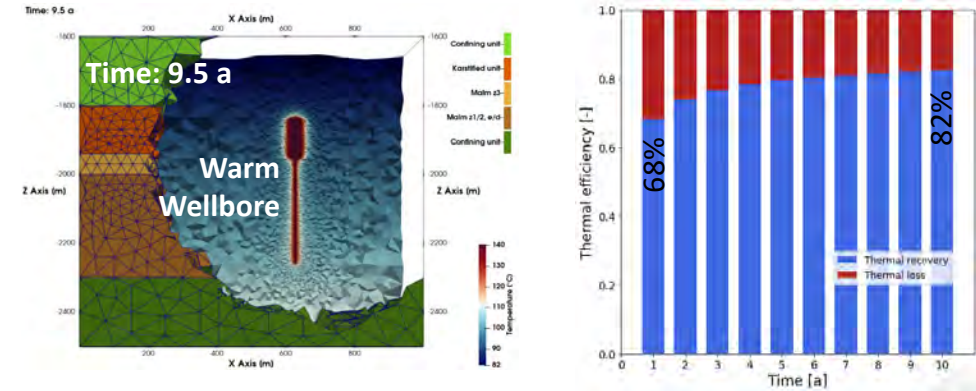
- ✓ Thermal perturbation in the reservoir rock matrix
- ✓ Preferential thermal front propagation in high-permeability zone
- ✓ Increase of thermal efficiency per year of operation

Productivity/Injectivity indexes

- ✓ Variance in productivity and injectivity indexes
- ✓ The injectivity index is higher than the productivity index in both wells

Milestones

Milestone M4.1	Sensitivity- and efficiency analysis based on synthetic numerical models	Completed
Milestone M4.2	Development of Reduced Order Model (ROM)	Next phase
Milestone M4.3	Application of Reduced Order Model (ROM) to a site	In progress



✓ Next phase: Application of parameter ranges to derive the Reduced Order Model (ROM)

Aktueller Stand:

- Modellierung und Initialsimulation eines typischen, Fernwärmenetzes aus dem Großraum München
- Konzeptionierung verschiedener ATES Speicherszenarien und deren Anbindung an das Fernwärmenetz

Speicherszenarien:

- Überschusswärme aus stromgeführter Betriebsweise einer KWK
- Wärmeüberschuss aus Grundleistungen einer Geothermieanlage

Geplant:

- Weitere Validierung des Wärmenetzes
- Konkrete Kopplung eines ATES-Modells an das modellierte Wärmenetz

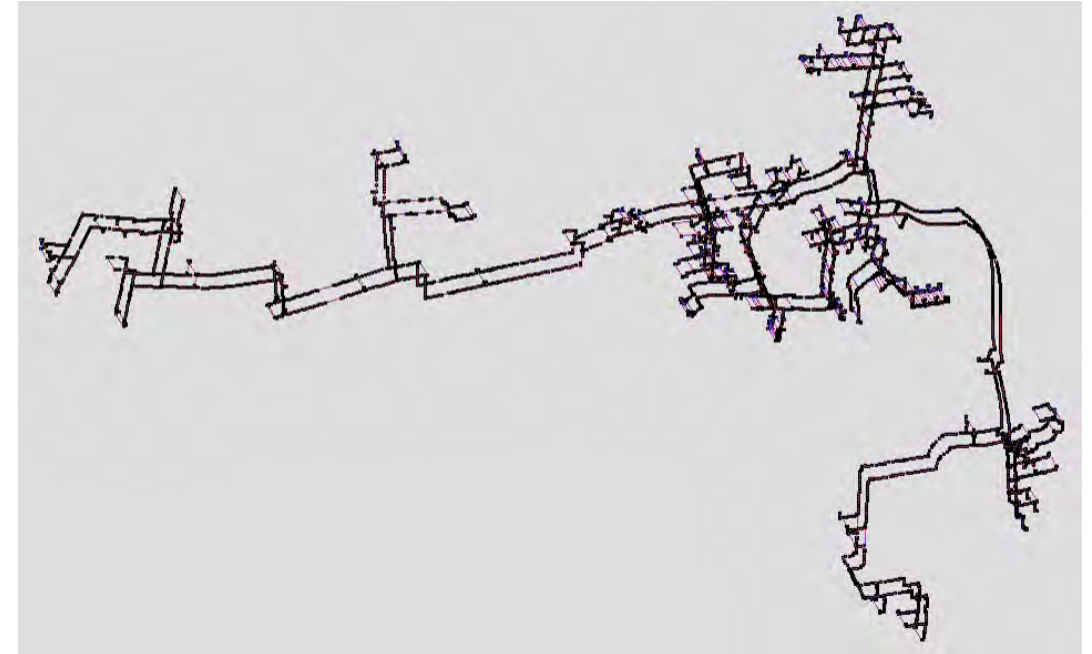


Abb.1: Ausschnitt aus der Simulation des exemplarischen Fernwärmenetzes

Parameter	Wert
Trassenlänge in [km]	~ 26
Angeschlossene Gebäude	~ 180

Co-Simulation: Fernwärmenetz und ATES

- Wärmeübertrager als Schnittstelle zwischen den Simulationen
 - WÜ-Modell berechnet Austrittsparameter
- Datenaustausch in erster Iteration sequenziell geplant
 - Ergebnisse von obertägiger und untertägiger Simulation dienen als Input der jeweils anderen
 - Ergebnisaustausch bis Konvergenz in beiden Simulationen erkennbar ist
 - Webbasierte Auswertung der Ergebnisse

Geplant:

- Co-Simulationen in sequenzieller Form
- Identifizieren von Konvergenzkriterien und mögliche Optimierungen
- Sobald möglich auch simultane Co-Simulationen

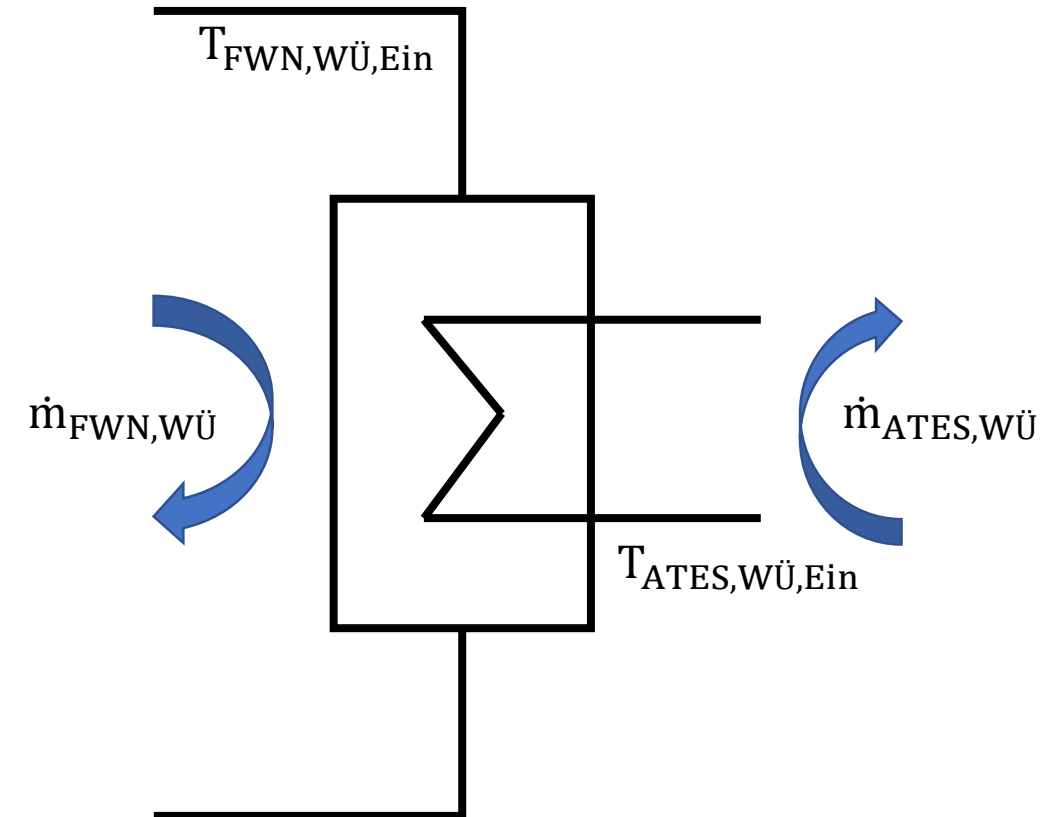


Abb.2: Schema Wärmeübertrager als Schnittstelle zwischen ober- und untertägiger Simulation

AP6 (UFZ): Umweltauswirkungen

KONATES

- Cyclic operation of an ATEs pilot plant in a contaminated aquifer for combination of thermal management with possible groundwater remediation
- Temperature range from 10°C up to 80°C

Test site and monitoring

- Long history of contamination: chlorinated volatile organic compounds
- Main contaminants: Trichloroethylene (TCE) up to 6.0 mg/l and cis-Dichloroethylene (cis-DCE) up to 0.4 mg/l



Construction of monitoring and sample sites (MET department, UFZ)

AP6 (UFZ): Umweltauswirkungen

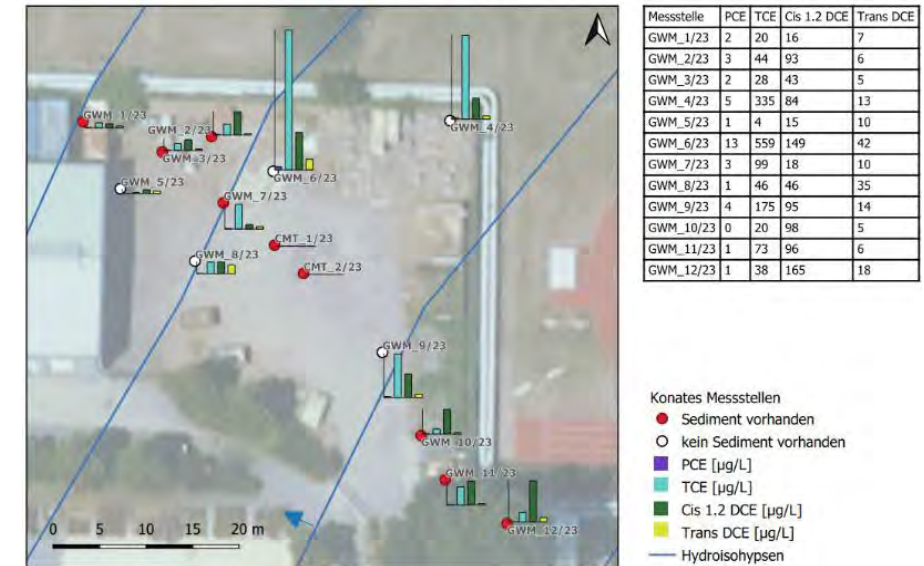
OGS model tailored for the KONATES site

- Cyclic operation of an ATES pilot plant in a contaminated aquifer for the combination of thermal management with possible groundwater remediation
- Temperature ranges from 10°C up to 80°C
- Main contaminants: Trichloroethylene and cis-dichloroethylene
- All permits were granted and the first run on the test site started on 24.05.24

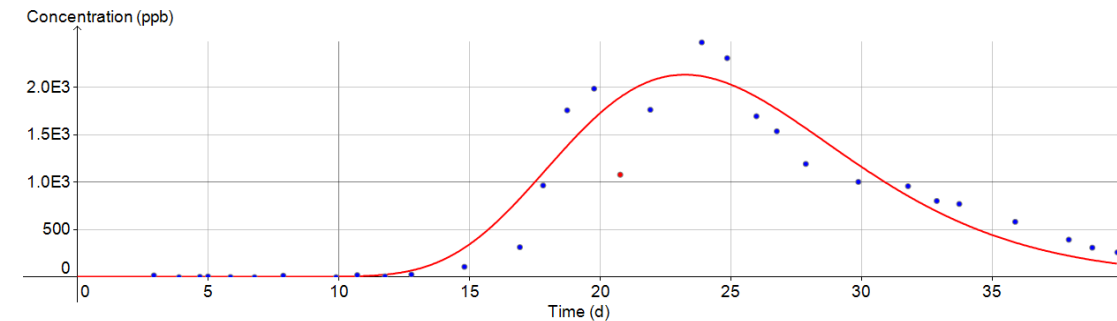
Calibration of OGS model parameters

- Tracer test showed prior model assumptions were fitting for the test site
 - used to further calibrate the model especially for component transport
- Hydraulic head measurements showed a rise in groundwater level on the test site up to 0.5 m since December '23

Verteilung der CKW-Konzentrationen am UFZ-Standort in Leipzig



Baseline monitoring of contaminants (analysis and figure by Enno Borgeest and Ralf Köber, CAU Kiel)



Breakthrough curve of tracer test (figure: Bruno Engelbrecht, UFZ)

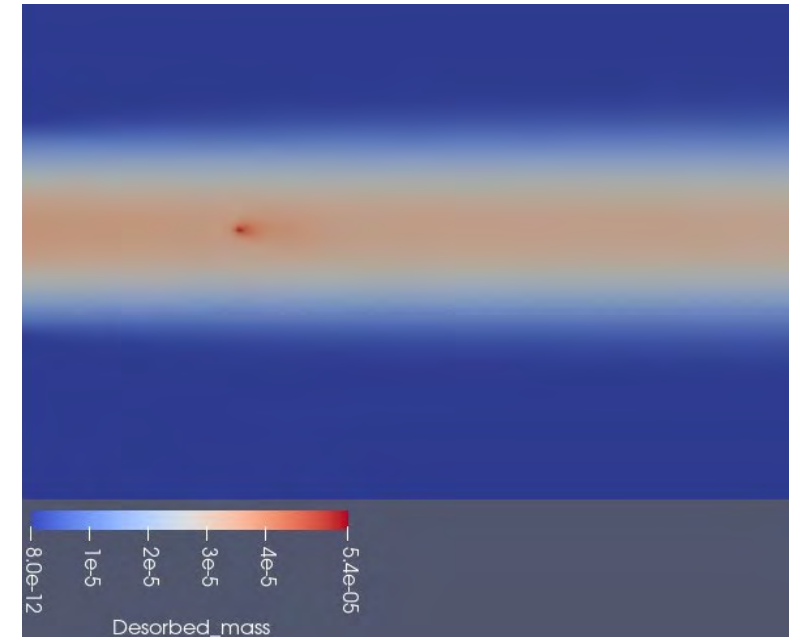
AP6 (UFZ): Umweltauswirkungen

Work on the development of Component Transport Feature

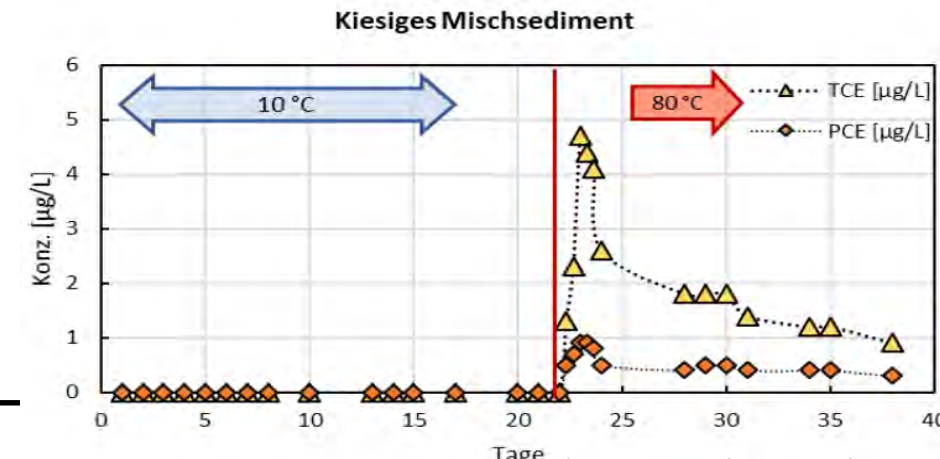
- Tracer test did not show strong heterogenous flow on the test site and no strong preferential flow paths of the tracer due to the geological situation
- Master student did literature review of thermal dependent sorption phenomena with focus on chlorinated VOCs
- Set up of simplified model to estimate desorbed contamination and amount of contamination as input for the on-surface remediation plant due to ATEs operation

Achievable Milestones in 2024

- Use of first laboratory data from the test site
 - recreating lab-scale flow experiment as a OGS simulation (heat facilitated contaminant desorption process)
 - Use data for test site scale model



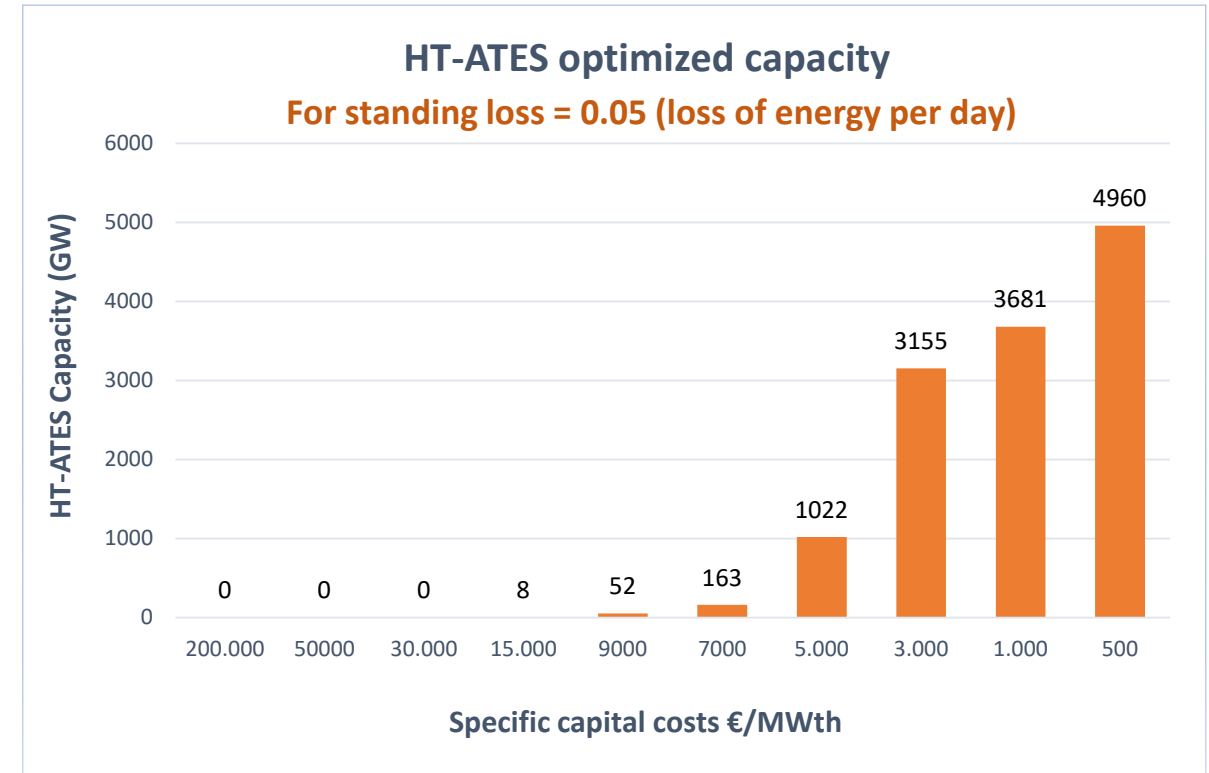
Desorbed TCE at heat plume peak (figure: Joy Brato Shil)



Flow experiment with test site sediments (analysis and figure: Ralf Köber, CAU Kiel)

Economic viability of HT-ATES

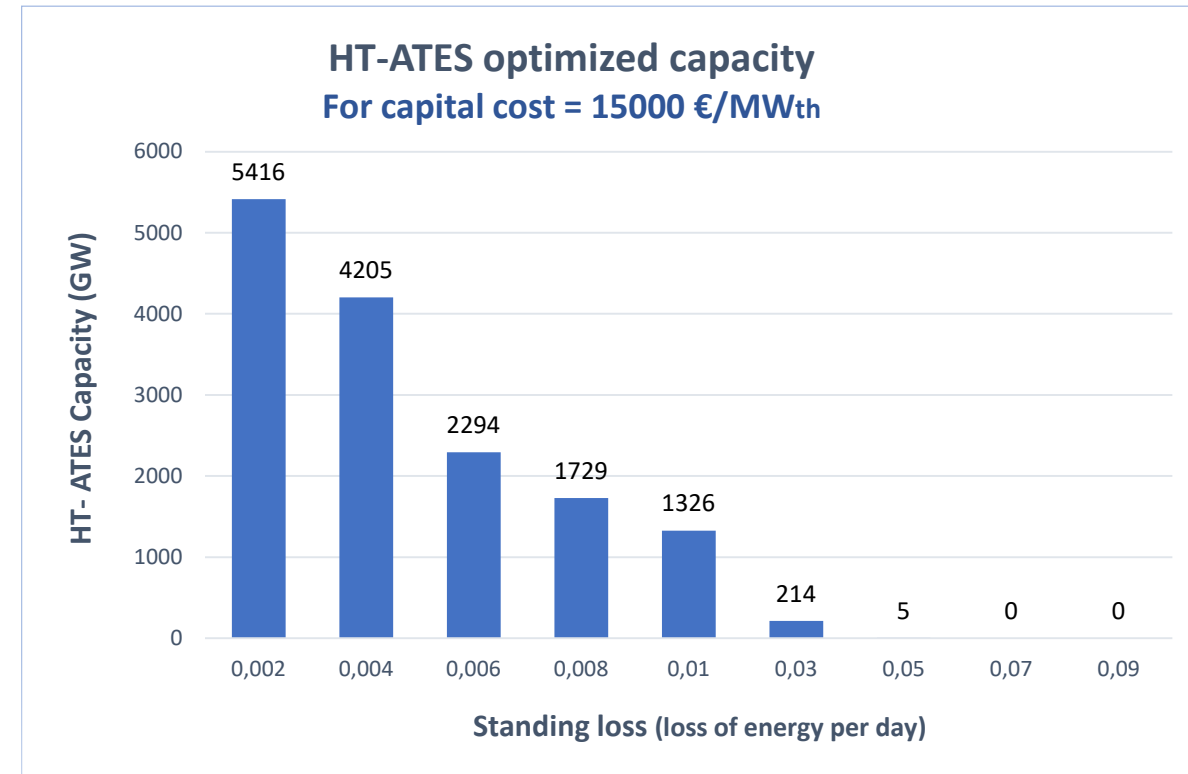
- Modelling the technical behavior of the HT-ATES to integrate in PyPSA-EUR-SEC energy system model
- Main drivers affecting integration of HT-ATES: Capital cost and standing (storage) losses
- In a sector-coupled model of Germany, HT-ATES for heating is modelled for heat storage purposes especially to convert excess electricity from grid to store it as a heat (**Power-to-Heat**).
- Assuming unlimited potential of HT-ATES for heating in Germany, the specific capital costs (€/MWth) at which ATES becomes economically viable is determined.
- The capital cost at which the HT-ATES shows a considerable share in the energy system is remarkably low.



<https://pypsa-eur.readthedocs.io/en/latest/>

AP7 (IEG): Energiesystemmodellierung

- Another sensitive parameter which decides the viability of HT-ATES is standing loss (or storage loss)
- HT-ATES with higher storage losses than 0.05 are not economically viable in the energy system provided the investment cost is 15.000 €/MW_{th}
- Future work:
 - 1) Potentials of HT-ATES at each spatial node can be estimated and the economic viability of HT-ATES can be determined accurately for Germany
 - 2) Potentials of HT-ATES at each spatial node can be estimated and the economic viability of HT-ATES can be determined accurately for Germany
 - 3) ATES for both heating and cooling could be more efficient than just for heating and can also be modelled for assessing it's economic viability
 - 4) ATES for individual building to provide both heating and cooling can also be modelled.



<https://pypsa-eur.readthedocs.io/en/latest/>

AP8 (MLU): Akzeptanz und Transfer

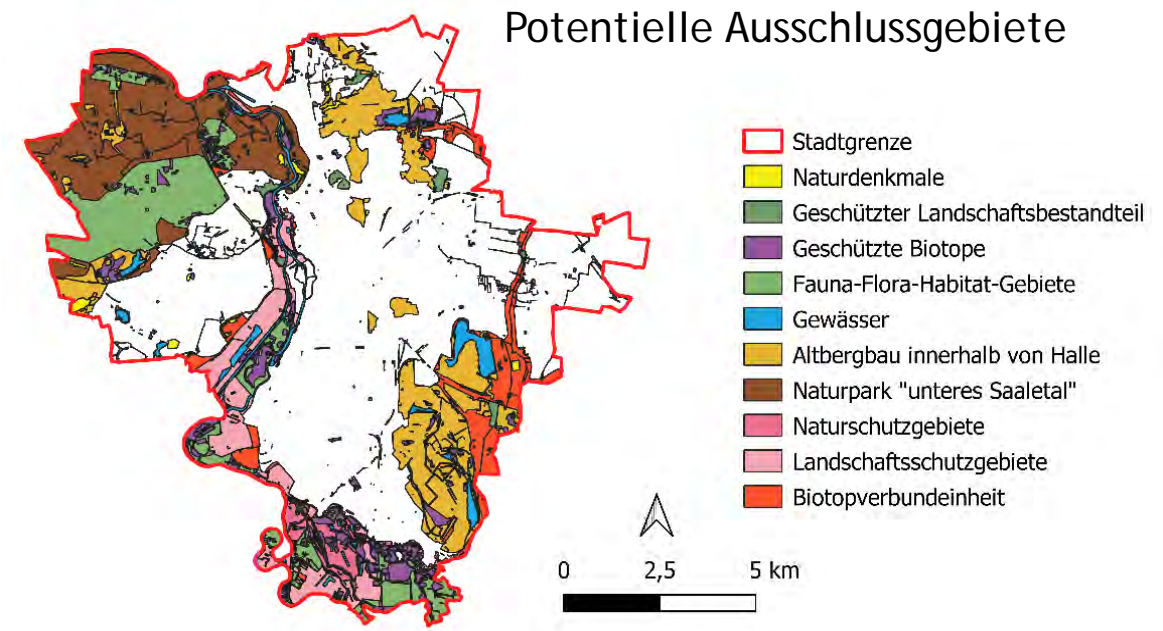
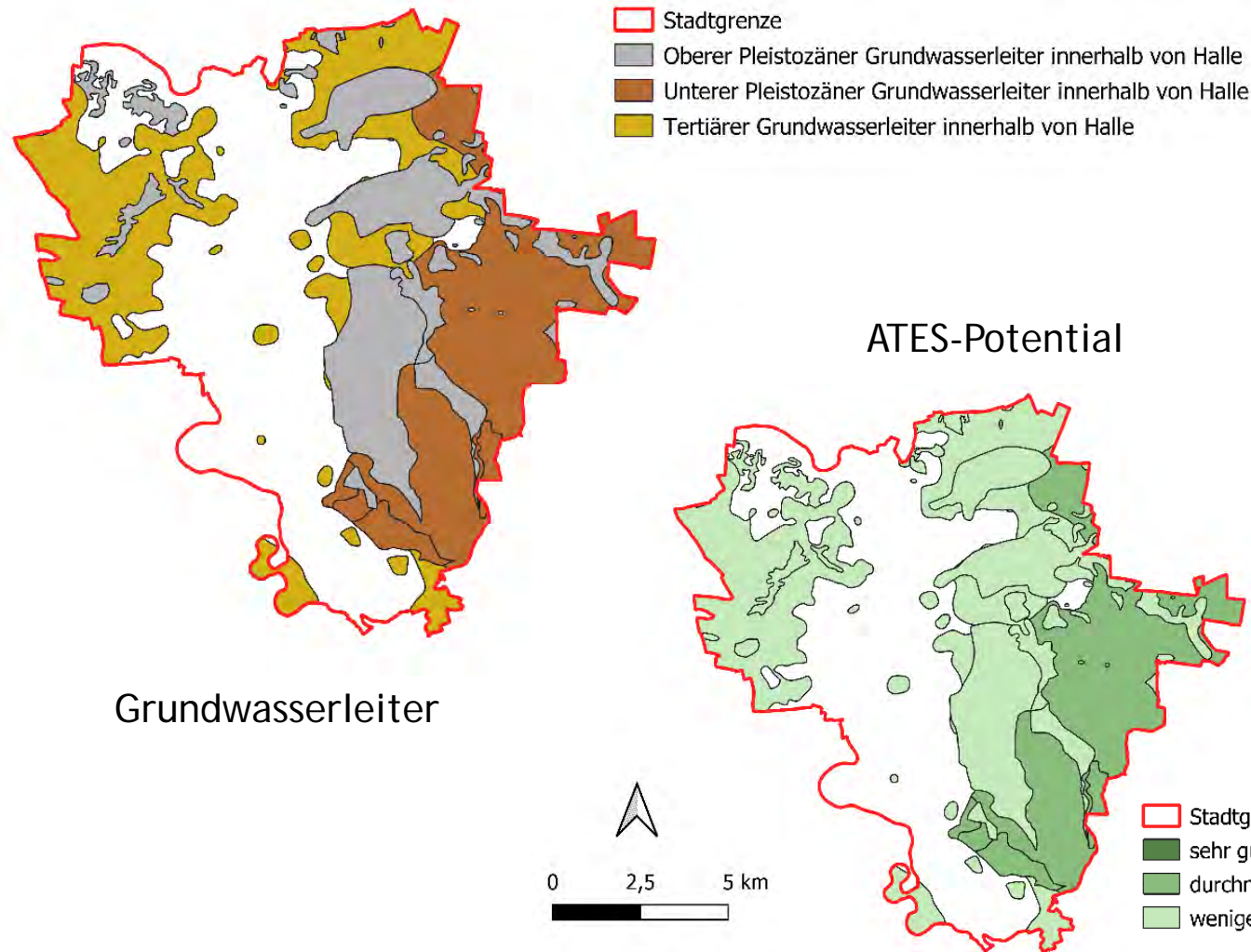


Speicher-
Lösungen
für die Zukunft

<https://speichercity.geo.uni-halle.de/>

- Aufbau der Projektwebsite
- Regelmäßige News
- Ergebnispräsentationen
- Koordination Workshop auf der GeoTHERM 2025

AP8 (MLU): Akzeptanz und Transfer



Nächste Schritte:

- (1) 3D geologisches Modell finalisieren
- (2) Hydraulische und thermische Parameter räumlich charakterisieren
- (3) Potentialstudie: 3D, Hydraulik, Landnutzung

Winkler (2021)

AP8 (MLU): Akzeptanz und Transfer

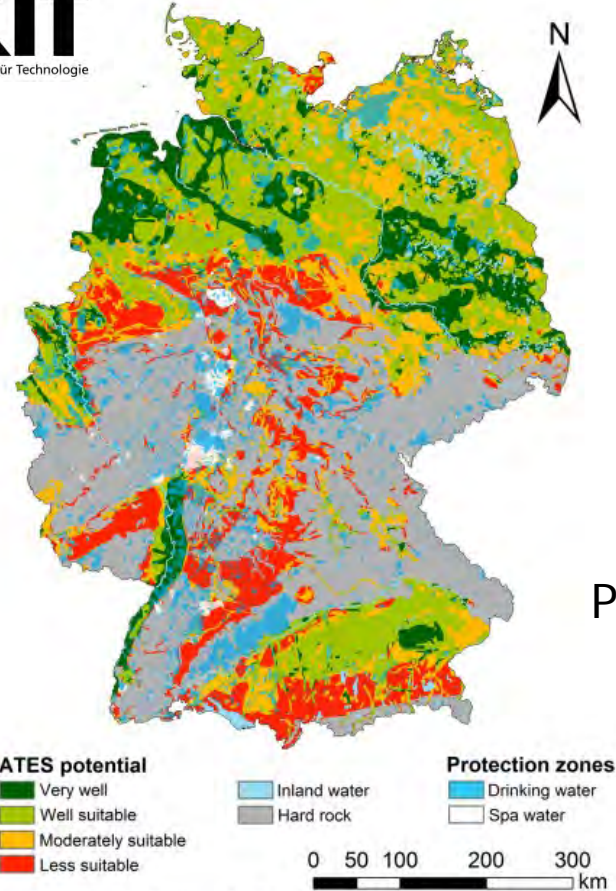


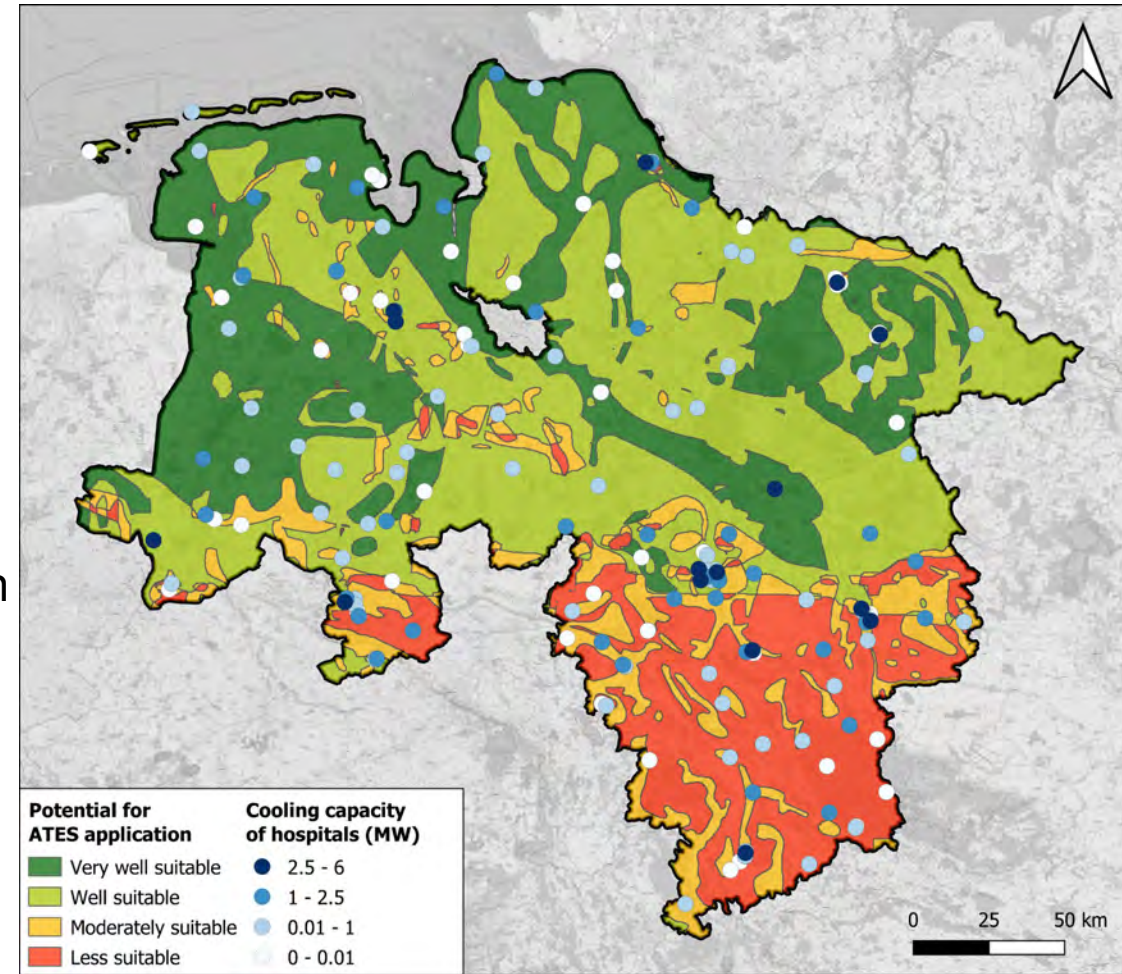
Fig. 8 ATEs suitability potential in Germany for the period near future (2021–2050) based on the reference criteria weighting scheme. Drinking and spa water protection zones are included. Protection zone data from BfG (2021), LfU (2021), LfUBW (2022a; b), HLNUG (2022), MULNV NRW (2022), NLWKN (2021)

Stemmler et al. (2022) *Geothermal Energy*

Identifizierung von ATEs-Schlüsselstandorten in Niedersachsen



Verknüpfung von ATEs-Potenzial und Kühlkapazitäten von Krankenhäusern



- ▶ Unterschiedliche ATES-Typen im Locker- und Festgestein werden untersucht (2 × NT-ATES, 4 × HT-ATES) und simuliert. Die Temperaturen liegen hier zwischen 5°C bis 80°C.
- ▶ Ergänzende standort-spezifische NMR-Messungen wurden auf dem Campus in Kiel durchgeführt.
- ▶ Im Rahmen des Projektes wurden 3D hydrogeologische Modelle und standort-spezifische Wärmetransportmodelle aufgebaut und unterschiedliche Simulationen durchgeführt (Leapfrog, OGS, MOOSE-GOLEM, FEFLOW).
- ▶ Die Kopplung der Reduced Order Models (ROM) mit dem Netzwerkmodell (TRYNSYS-TUD) soll beispielhaft mit dem Fernwärmenetz in München und ggf. auch in Berlin durchgeführt werden.
- ▶ Auf der **GeoTHERM 2025** soll ein Workshop zum Thema „Aquiferspeicher“ stattfinden (voraussichtlich am **19.02.2025**). Hierzu laden wir Sie alle herzlich ein. Weitere Informationen folgen!

Meilensteine bis 2024

Jahr		2022												2023												2024										
Partner	Meilensteine	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11						
AP1 - KIT	M1.1 Workshops (W) und Projekttreffen (P)						W						P						W						P											
	M1.2 Zwischenberichte																																			
	M1.3 Abschlussbericht (AB) / Publikationen (P)					P						P							P						P					P						
AP2 - GFZ	M2.1 Matrix der Systemparameter																																			
	M2.2 Konzeptmodelle Systemparameter																																			
	M2.3 Handlungsempfehlung Monitoring																																			
AP3 - CAU	M3.1 Kalibrierte Grundwassermodelle																																			
	M3.2 Gekoppelte ATES-Simulationen																																			
	M3.3 Publikation																																			
AP4 - TUM	M4.1 Sensitivitätsstudie / Effizienzanalysen																																			
	M4.2 Integration Wärmenetzmodellierung																																			
	M4.3 Anwendung auf Standort(e)																																			
AP5 - TUD	M5.1 Integration ATES in Energienetze																																			
	M5.2 Wärmeverlust/Speichertemperaturprofile																																			
	M5.3 Handlungsempfehlung ATES Steuerung																																			
AP6 - UFZ	M6.1 Ökologische Aspekte und Synergieeffekte																																			
	M6.2 Weiterentwicklung THC-Modell																																			
	M6.3 Umweltauswirkungen für Genehmigung																																			
AP7 - IEG	M7.1 Clusterbildung Deutschland																																			
	M7.2 Modelle Sektorkopplungsoptionen																																			
	M7.3 Handlungsempfehlung Ausbau																																			
AP8 - MLU	M8.1 Medienanalyse																																			
	M8.2 Wissenschaftsvideos SpeicherCity																																			
	M8.3 Planung nationale ATES Konferenz																																			

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!