

Regionale Wachstums-kern-Initiative

smood – smart neighborhood



Etablierung eines ganzheitlichen Systems
zur Erhöhung der Energieeffizienz im Quartier

TP 2.1 Entwicklung eines Gestehungskostentools zur Optimierung geogen gebundener Wärmespeicheranlagen

IM

VERBUNDPROJEKT VP 2

GeoHeatStorage



SCHLUSSBERICHT

Zuwendungsgeber: Bundesministerium für Bildung und Förderung
Förderkennzeichen: 03WKDH02A
Projektlaufzeit: 01.07.2019 bis 31.12.2022

Verfasser/Projektleitung:

JENA-GEOS-Ingenieurbüro GmbH
Marcus Meisel
+49 3641 4535-26
meisel@jena-geos.de

Jena, 21.04.2023



Inhaltsverzeichnis

1	Veranlassung, Gesamtziel VP 2 GeoHeatStorage	3
2	Ziele des Teilprojekts	3
3	Projektarbeit und Ergebnisse in den Arbeitspaketen	3
3.1	Standortvoraussetzungen, GIS und Anlagendesign	3
3.1.1	Methode zur Implementierung geologischer Standortvoraussetzung.....	3
3.1.2	Geoinformelle Clusterung entsprechend der Eignungsklassen geologischer Parameter	5
3.1.3	Ableitung des prinzipiellen Anlagendesigns.....	7
3.2	Aufbau Gestehungskostentool untertägiger Anlagenbestandteil und Zusammenführung mit Tool der übertägigen Gestehungskosten	9
3.3	Wirtschaftlichkeit, Optimierung Anlagendesign und Potenzial-Abfragetool (GIS) 10	
3.3.1	Übergeordnete Wirtschaftlichkeitsanalyse auf Basis probabilistischer Methoden	10
3.3.2	Methode zur Optimierung des Anlagendesigns	13
3.3.3	Weiterentwicklung des GIS zum Potential-Abfrage-Tool	14
3.4	Demonstrationsvorhaben und Dienstleistungsprodukt.....	15
3.4.1	Vorbereitung eines Demonstrationsvorhabens	15
3.4.2	Definition eines prototypischen Anlagenkonzeptes.....	16
3.5	Management und Organisation des Bündnisses des WK – Public Relations (Beziehungen im Bündnis und nach außen)	16
3.5.1	Beziehung im Bündnis.....	16
3.5.2	Beziehungen nach außen	18
3.5.3	Abschlussphase Wachstumskern-Förderung	18
4	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten	18
5	Nutzen und Verwertbarkeit	19
6	Während des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt bei anderen Stellen ...	19
7	Erfolgte und geplante Veröffentlichungen	20
8	Quellen	20



1 Veranlassung, Gesamtziel VP 2 GeoHeatStorage

Insbesondere die Wärmewende verlangt nach Lösungen, saisonal und geowirtschaftspolitisch bedingten Fluktuationen der Wärme- und Energiebereitstellung oder -überschüssen mit nachhaltigen Speicherlösungen zu begegnen. Saisonale Wärmespeicher stellen hierbei ein zentrales Instrument zur Realisierung dieses Vorhabens dar. Durch die Nutzung des geologischen Untergrundes als Wärmespeichermedium soll auf den massenhaften Einsatz von Baurohstoffen und Dichtungsbahnen weitgehend verzichtet werden, wie es bei herkömmlichen Behälter- oder Erdbeckenspeichern der Fall ist.

GeoHeatStorage liefert der smood-Technologieplattform einen großskaligen kostengünstigen Wärmespeicher, der für ein ganzes Quartier die saisonale Wärmespeicherung übernehmen kann. Hierfür werden oberflächennahe Kies-Grundwasserleiter unter Einbeziehung von Spezialtiefbauverfahren bautechnisch erschlossen.

2 Ziele des Teilprojekts

Für die Nutzung als Wärmespeicher waren Eignungskriterien des geologisch standortspezifischen Untergrundes zu definieren. In einem geografischen Informationssystem kann dann festgestellt werden, ob diese geologischen Standortvoraussetzungen für einen angefragten Standort gegeben sind. Aus diesen geologischen sowie den bautechnischen Randbedingungen und der für die spezielle Quartiersanwendung notwendigen Speicherkapazität werden das prinzipielle Anlagendesign, notwendige Untersuchungs- und Simulationsschritte erarbeitet.

Die Entwicklung des Gesteungskostentools für den untertägigen Anlagenbestandteil eines GeoHeatStorage und dessen Zusammenführung mit dem Tool der übertägigen Gesteungskosten sind zentraler Bestandteil und erwartetes Hauptergebnis des Teilprojektes. Mit der Wirtschaftlichkeitsanalyse wird Klarheit bzgl. der die Gesteungskosten beeinflussenden Faktoren geschaffen. Zusammenhangsmodelle des Gesteungskostentools mit dem geothermischen Simulator führen zur Optimierung des Anlagendesigns. Das GIS war zu einem Potenzial-Abfrage-Tool weiterzuentwickeln. Schließlich war aus den vorangegangenen Schritten ein standardisiertes Dienstleistungsprodukt zu entwickeln.

Da der unternehmerische Bündnissprecher zum hier berichtenden Unternehmen JENA-GEOS zugehörig ist, erfolgt im Rahmen dieses Teilprojektes auch die Berichterstattung zum Management und der Organisation des Bündnisses des WK – Public Relations (Kap. 3.5).

3 Projektarbeit und Ergebnisse in den Arbeitspaketen

3.1 Standortvoraussetzungen, GIS und Anlagendesign

3.1.1 Methode zur Implementierung geologischer Standortvoraussetzung

(Hydro-)geologische Situation (Mitteldeutschland)

Die (hydro-)geologischen Voraussetzungen für die Nutzung von Aquiferspeichern sind sowohl in Thüringen als auch Sachsen und Sachsen-Anhalt gegeben, unterscheiden sich aber vor allem in ihrer räumlichen Verteilung voneinander. Nach bisherigen Untersuchungsergebnissen sind in Thüringen günstige Bedingungen für die Errichtung eines Aquiferspeichers vor allem an das Fließgewässernetz gebunden und somit räumlich eng begrenzt. Allerdings liegen die großen Siedlungsflächen überwiegend an Flüssen, sodass sich das Potenzial zur Nutzung von Aquiferspeichern mit deren Verbreitung weitgehend deckt. Die quartären Lockergesteinsaquifere Thüringens bilden darüber hinaus häufig nur ein Grundwasserstockwerk. In Sachsen und Sachsen-Anhalt sind die Lockergesteinsaquifere hingegen überwiegend flächig vorhanden und umfassen mehrere Grundwasserstockwerke, die meist quartären Alters sind. Darüber hinaus existieren im Raum Sachsen und Sachsen-Anhalt verschiedene jungtertiäre Grundwasserstockwerke, die potenziell in Frage kommen könnten.



Physikalische Parameter

Für die Vordimensionierung, die Herstellung und den erfolgreichen bzw. nachhaltigen Betrieb eines GeoHeatStorage ist die Kenntnis über eine Reihe von geologischen, thermophysikalischen und hydraulischen/hydrologischen Parametern der genutzten Lockergesteinsaquifere eine grundlegende Voraussetzung. Eine messtechnische Bestimmung ist in Labor- oder Feldversuchen insbesondere dann sinnvoll, wenn für den Projektstandort keine oder nur wenige (öffentlich) verfügbare Daten vorhanden sind. In Tabelle 1 ist anhand von Erfahrungswerten eine Übersicht einiger relevanter Parameter mit Messgenauigkeiten und Schätzpreisen angegeben. Diese Angaben zur Messgenauigkeit sind dabei wesentlich abhängig vom angewendeten Verfahren und ggf. der Anordnung/des Zustandes der angewendeten Gerätschaften und somit als überschlägig anzusehen. Bei hinreichend genauer Kenntnis der standortspezifischen Geologie ist es alternativ möglich, auf Literaturdaten zurückzugreifen, auf welche in den nachfolgenden Abschnitten eingegangen wird.

Tabelle 1: Auswahl an messtechnisch bestimmbar Parametern mit Erfahrungswerten zur Messgenauigkeit und Preisschätzung.

Parameter	Verfahren	Messgenauigkeit	Kosten [€]
Wärmeleitfähigkeit λ [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]	Labor	$\pm 1 - 2 \%$	100 – 200
Wärmekapazität c [$\text{J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]	Labor	$\pm 1 - 2 \%$	400 – 500
Permeabilität [m/s]	Labor/Pumpversuch	$\pm 1 - 5 \%$	100 – 300
Grundwasserspiegel [m u. GOK]	Pegelmessung	mm - cm	100 – 300

Thermophysikalische Parameter

Für die Modellierung geothermaler Prozesse entscheidende thermophysikalische Parameter sind neben dem terrestrischen Wärmestrom Φ [W] aus dem Erdinnern, der auf Zeit und Fläche normiert zur Wärmestromdichte q [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$] führt, die **Wärmeleitfähigkeit λ [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]** und die **spezifische Wärmekapazität c [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]**. Aus der Wärmestromdichte q und der Wärmeleitfähigkeit λ ergibt sich der lokale Temperaturgradient $\text{grad } T$ [$\text{K} \cdot \text{m}^{-1}$] und damit die Temperatur T [K] im Reservoir [1, 2, 7].

Im Fall der Speicherung von Wärme bzw. Kälte in oberflächennahen Aquifern sind bei der Modellierung insbesondere die Wärmeleitfähigkeit und die spezifische Wärmekapazität des Fluids als Wärmeträgermedium, des Feststoffanteils im Aquifer (Sand/Kies) sowie der abdichtenden unterlagernden und ggf. überlagernden Gesteinsverbände zu berücksichtigen. In Tabelle 2 sind Angaben aus der Literatur zu den entsprechenden Wertebereichen als Grundlage für erste Modellierungen im Teilprojekt 2.2 „Hydraulisch-geothermische Simulation zur Dimensionierung & Designoptimierung geogen gebundener Wärmespeicheranlagen in urbanen Quartieren“. Die Wärmestromdichte spielt insbesondere bei der Speicherung eine untergeordnete Rolle.

Tabelle 2 Ergebnisse der Literaturrecherche zu thermophysikalischen Gesteinseigenschaften.

Material/ (Locker-)Gesteinstyp	Wärmeleitfähigkeit λ [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]		(volumenbezogene) spezifische Wärmekapazität ($\rho \cdot c_p$) [$\text{MJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$]	Quellenangabe
	min. – max.	empfohlener Rechenwert / Mittelwert*		
Ton/Schluff, wassergesättigt	1,1 – 3,1	1,8	(2,0 – 2,8)	[10]
Ton	0,6 – 2,6	1,53		[3]
Tonstein/Siltstein	1,05 – 1,45			[9]
Tonstein	0,6 – 4,0	2,04	(2,2 – 2,8)	[3]
Sand, wassergesättigt	2,0 – 3,0	2,4		[10]
Sand (Quartär)	0,1 – 2,75	1,44*		[3]
Sand (Tertiär)	1,8 – 2,2		(2,2 – 2,6)	[9]
Kies/Steine, wassergesättigt	1,6 – 2,5	1,8		[10]
Wasser (20°C)	0,50 – 0,59	0,5985 - 0,5992		[9], [1], [8]



Die Wärmeleitfähigkeit λ ist in Lockergesteinen mit Werten zwischen 1 und $3,1 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ etwas niedriger als im Festgestein [10], während jene von Wasser $0,598 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ (bei 20°C) beträgt. Somit sind die thermischen Verluste durch Wärmeleitung in hochdurchlässigen, stark porösen Lockergesteins-Aquiferspeichern geringer als in weniger porösen Festgesteins-Aquiferspeichern. Die volumenbezogene spezifische Wärmekapazität von Schluff bzw. Ton, Sand und Kies unterscheidet sich mit Werten zwischen $2,0 - 2,8 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$ unabhängig von der Korngröße kaum, ist aber deutlich kleiner als die von Wasser mit ca. $4,17 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$.

Hydraulische Parameter

Die hydraulischen Eigenschaften sind prinzipiell die wichtigsten Faktoren für den erfolgreichen Betrieb eines Aquiferspeichers. Dabei unterscheiden sich die Anforderungen an die hydraulischen Eigenschaften eines oberflächennahen (Lockergesteins-)Aquifers (Tabelle 3) vor allem hinsichtlich der Durchlässigkeit (Permeabilität), welche aufgrund der geringen Tiefenlage und der damit verbundenen relativ niedrigen möglichen Druckabsenkungen, deutlich größer sein muss.

Tabelle 3: Anforderungen an die geologischen und hydraulischen Eigenschaften eines oberflächennahen Lockergesteinsaquifers [3].

Parameter	Minimum	Mittel	Maximum
Mächtigkeit [m]	2 - 5	25	-
Aquifertiefe [m u. GOK]	5	50	150
Permeabilität [m/s]	$3\cdot 10^{-5}$	$3\cdot 10^{-4}$	$1\cdot 10^{-3}$
GW-Fließgeschwindigkeit [m/d]	0	0,1	0,3
Grundwasserspiegel [m u. GOK]	50	10	-5

Der hydrogeologische Parameter mit dem größten Einfluss auf die Gesteungskosten ist die Tiefenlage, da bei größeren Tiefen das entsprechende Tiefbauverfahren zur Schaffung eines GeoHeatStorage (GHS) im Vergleich zum Speichervolumen deutlich teurer wird.

3.1.2 Geoinformelle Clusterung entsprechend der Eignungsklassen geologischer Parameter

Der Entwicklungs- bzw. Arbeitsprozess für das Gesteungskostentool umfasste folgende Arbeitsschritte:

- 1) Identifikation der benötigten Eingangsgrößen zur Gesteungskostenberechnung
- 2) Bestimmung von Abhängigkeiten
- 3) Datenbeschaffung (z. B. k_f -Wert, Porosität, spezifische Wärmekapazität, Kosten)
- 4) Untergliederung in sinnvolle Betrachtungseinheiten (Wärmebedarf, Geologie, Brunnen und Pumpen, Investitions-, Betriebs-, Wartungs- und Gesteungskosten)
- 5) iterative Überarbeitung / Verbesserung

Für die im Gesteungskostentool verwendeten geologischen Parameter, u. a. k_f -Wert, Porosität und Wärmekapazität, wurden Literaturwerte hinterlegt. Diese bieten eine ausreichende Genauigkeit für die überschlägige Berechnung der Gesteungskosten und können an einigen Stellen des Tools durch Laborwerte ersetzt werden.

Entsprechend vordergründiger Verwertungsabsichten und verfügbarer Geodaten wurde für den Aufbau eines Geoinformationssystems (GIS) zu den hydrogeologischen Parametern vorerst und modellhaft der mitteldeutsche Raum mit der Metropolregion Leipzig ausgewählt (Abbildung 1). Hier steht mit dem hydrogeologischen Kartenwerk 1:50.000 (HK50) zunächst eine einheitliche Datengrundlage zur Verfügung. Die Karten sind zwischen 1979 und 1984 auf Grundlage der Analyse des internationalen Stands der hydrogeologischen Kartierung entstanden und beziehen sich auf alle süßwasserführenden Gesteinskomplexe innerhalb des Kartiergebietes. Später soll versucht werden, die gewonnenen Erkenntnisse aus der Detailauswer-



tung der HK50 über einen Parameterabgleich und Korrelationen (z. B. Durchlässigkeit / Lithologie) auf eine bundesweit einheitliche Datengrundlage (z. B. GÜK200, HÜK250) zu überführen.

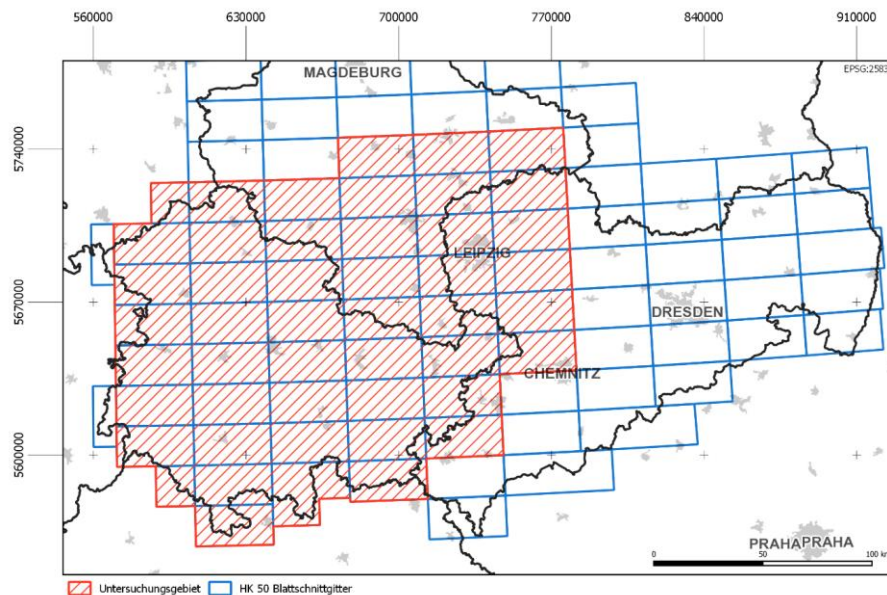


Abbildung 1 Lage des Untersuchungsgebietes in Mitteldeutschland mit der Metropolregion Leipzig (rot) und einer Darstellung der Blattschnittgitter der Datengrundlage (HK50, blau)

Die Auswertung der hydrogeologischen Kartenwerke im festgelegten Untersuchungsgebiet zeigt für die relevanten Parameter zum Betrieb von Aquiferspeichern (Tabelle 3), dass die Voraussetzungen in weiten Bereichen des Verbreitungsgebietes der Aquifere erfüllt werden. Die Mächtigkeit der obersten GWL schwankt dabei zwischen 2 m und mehr als 100 m. Mächtigkeiten, welche die Mindestanforderungen an den Betrieb von Aquiferspeichern nicht erfüllen, treten dabei vor allem in der geringmächtigen Lockergesteinsbedeckung im Thüringer Becken und im Werra-Becken auf.

Die Durchlässigkeit liegt im digitalisierten Areal bei Werten von $1 \cdot 10^{-4}$ bis $> 1 \cdot 10^{-3}$ m/s und bewegt sich somit ebenfalls innerhalb des geforderten Wertebereiches für oberflächennahe Aquiferspeicher.

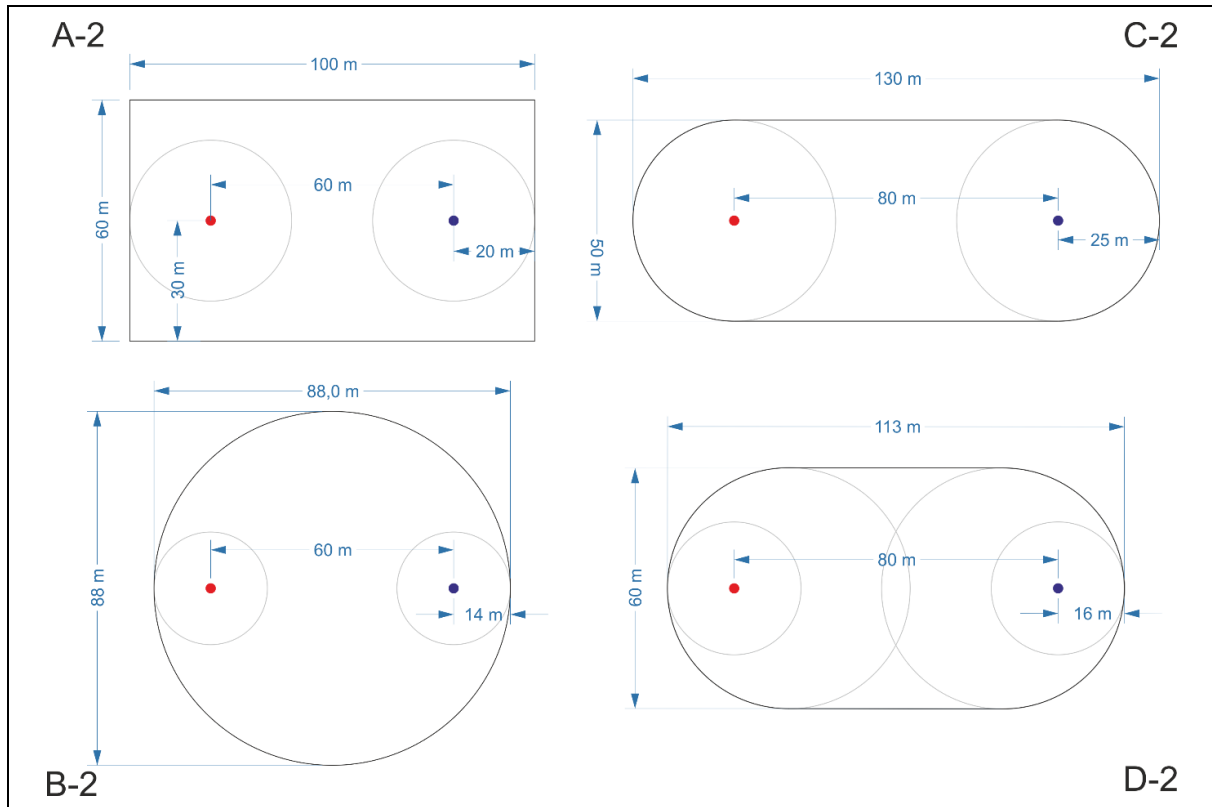
Die potenziellen Standorte zur Nutzung von Aquiferspeichern wurden entsprechend ihrer Parameter in Eignungsklassen unterteilt. Um eine konsistente Darstellung der acht quartären GWL (siehe Abbildung 1), insbesondere an den Blattschnittgittergrenzen der HK50 zu ermöglichen, wurden insgesamt fünf Grundwasserleiterkomplexe (GWLK) unterschieden, die sich wie folgt aufbauen:

- GWIsK I S1n – Ho (Saale 1 Nachschüttsande und holozäne Ablagerungen)
- GWIsK II S1n – S2v (Saale 1 Nachschüttsande bis Saale 2 Vorschüttsande)
- GWIsK III E1n – S1v (Elster 1 Nachschüttsande bis Saale 1 Vorschüttsande)
- GWIsK IV E1n – E2v (Elster 1 Nachschüttsande bis Elster 2 Vorschüttsande)
- GWIsK V E1v (Elster 1 Vorschüttsande)

Diese bauen sich zum großen Teil aus mehreren hydraulisch in Verbindung stehenden Grundwasserleitern auf. Insgesamt enthält der Datensatz über 5.000 Cluster mit standortspezifischen lithologisch-hydraulischen Parametern. Die Ergebnisse dieses Arbeitspaketes bilden die Datengrundlage für das Abfragetool (AP 2.1.3.3).



3.1.3 Ableitung des prinzipiellen Anlagendesigns



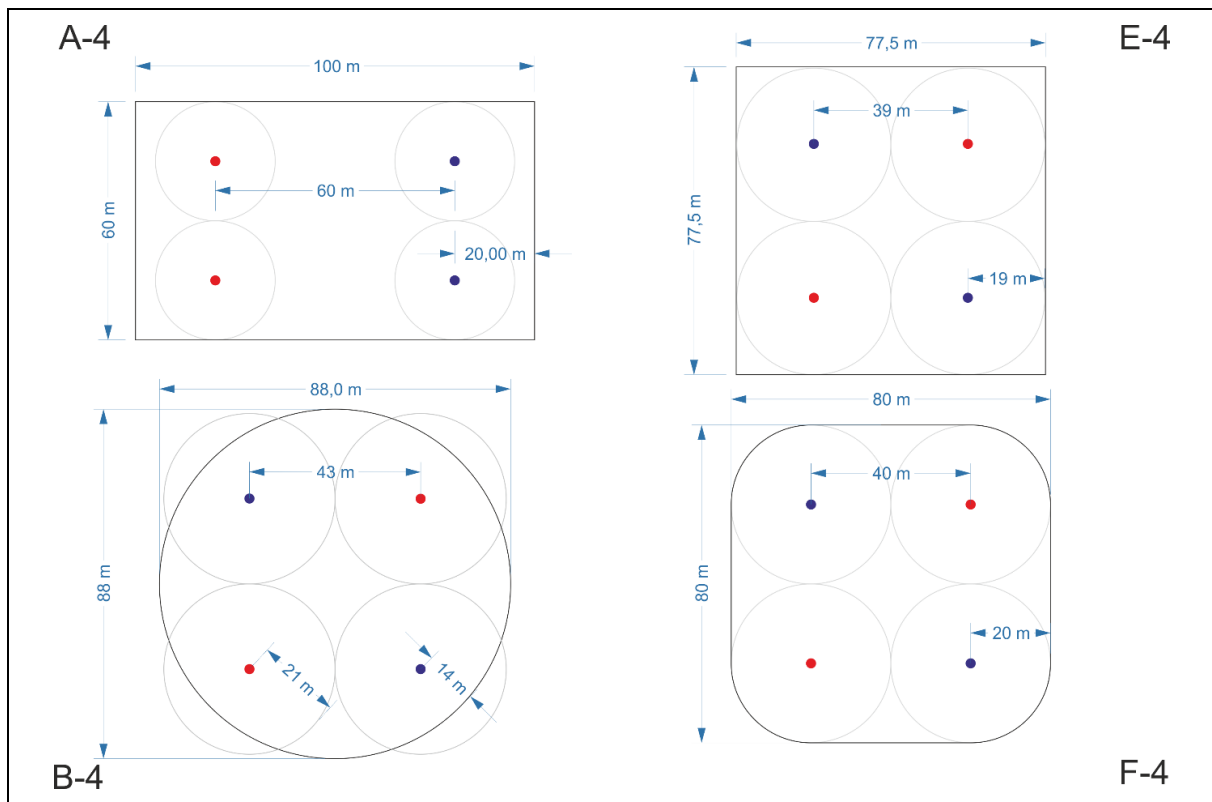
A	Rechteck	a [m]	b [m]	A [m²]	u [m]	V [m³]	u [%]
		100	60	6000	320	30000	
	Kreis	r [m]					
		0		0	0		
				6000	320		100
B	Rechteck	a [m]	b [m]	A [m²]	u [m]	V [m³]	u [%]
		0	0	0	0	30411	
	Kreis	r [m]					
		44		6082	276		
				6082	276		86
C	Rechteck	a [m]	b [m]	A [m²]	u [m]	V [m³]	u [%]
		80	50	4000	160	29817	
	Kreis	r [m]					
		25		1963	157		
				5963	317		99
D	Rechteck	a [m]	b [m]	A [m²]	u [m]	V [m³]	u [%]
		53	60	3180	106	30037	
	Kreis	r [m]					
		30		2827	188		
				6007	294		92

Abbildung 2 Speichergeometrien mit 2 Bohrungen, je ein Förder- und Schluckbrunnen

Zur Ableitung des prinzipiellen Anlagendesigns wurden unterschiedliche geometrische Anordnungen unter Berücksichtigung der geologischen und bautechnischen Randbedingungen im Hinblick auf die Speicherkapazitäten und Brunnenanordnungen miteinander verglichen. Das Anlagendesign ist u. a. abhängig vom gewählten bzw. zum Einsatz kommenden Tiefbauverfahren. Je nach Spezialtiefbauverfahren lassen sich hier auch Kurven realisieren. Gegenüber Speicherformen mit rechteckigen Grundrissen ergeben sich hier Einsparungen zum Beispiel



für den benötigten Verbau in Höhe von 10 – 14 % bei gleichem Volumen und damit eine deutliche Kostenreduktion (vgl. Abbildung 2 und Abbildung 3).



E	Rechteck	a [m]	b [m]	A [m²]	u [m]	V [m³]	u [%]
		77,5	77,5	6006	310	30031	
	Kreis	r [m]					
		0		0	0		
				6006	310		97

F	Rechteck	a [m]	b [m]	A [m²]	u [m]	V [m³]	u [%]
		40	40	1030	160	30283	
	Kreis	r [m]					
		20		5027	126		
				6057	286		89

Abbildung 3 Speichergeometrien mit 4 Bohrungen, je 2 Förder- und 2 Schluckbrunnen

Gegenüber der Referenzform A-2 kann man im äußersten Fall (idealer Kreis) 14 % des benötigten Verbaus einsparen. Bei der Kompromiss-Variante D-2, welche sowohl die Geometrie als auch die Wärmeverteilung berücksichtigt, werden immer noch ca. 8 % eingespart. Die Positionierung der einzelnen Bohrungen ist dabei maßgeblich von der geplanten Speichermenge (Wärme oder Kälte) bzw. Förderrate abhängig. Kommen 4 oder mehr Brunnen zum Einsatz hat sich gezeigt, dass eine Clusterung sowohl bzgl. der Wärmeverteilung als auch der der Menge des benötigten Spezialtiefbaus am effektivsten ist (vgl. Abbildung 3, Variante F-4). Hier beträgt das Einsparpotential bis zu 11 %.

Insgesamt lässt sich das Excel-basierte Geometrietool an beliebige Speichervolumina anpassen und trägt so zu schnellen und lösungsorientierten Auslegungsvarianten im Sinne von smood bei. Das prinzipielle Anlagendesign wurde demnach abschließend erarbeitet. Ebenfalls konnten daraufhin alle notwendigen Untersuchungsschritte zur Simulation des Aquiferspeichers erarbeitet und mit den Projektpartnern abgestimmt werden.



3.2 Aufbau Gesteungskostentool untertägiger Anlagenbestandteil und Zusammenführung mit Tool der übertägigen Gesteungskosten

Die Eingabe- und Ausgabemasken des Gesteungskostentools sind wie folgt gegliedert:

- 1.1 Grundlegende Angaben zum Wärmebedarf (Abbildung 4)
- 1.2 Grundlegende Angaben zur Geologie und Berechnung des Aquifervolumens
- 1.3 Brunnen- & Pumpenkonfiguration
- 1.4 Investitionskosten Brunnenbau
- 1.5 Betrieb & Wartung untertägiger Anlagenbestandteile
2. Investitionskosten Dichtwände
3. Wärmegesteungskosten untertägige Anlagenbestandteile

Diese Themenbereiche umfassen in übersichtlicher Weise alle wesentlichen Inputparameter sowie Berechnungsergebnisse. Von den Anwender*innen müssen lediglich wenige, grundlegende Daten bereitgestellt werden:

- Zeit der Heiz- und/oder Kühlperiode
- Speichereffizienz
- benötigter Heizenergiebedarf bzw. vorhandene Überschussenergie
- Temperaturspreizung
- COP der Wärmepumpe(n)
- Mächtigkeit des Grundwasserleiters und der Deckschicht
- Material des Grundwasserleiters*
- Effizienz der Tauchpumpen
- Stromkosten
- Instanthaltungsfaktor & kalkulatorischer Zinssatz
- Lebenszeit des Systems und der Tauchpumpen

Optional besteht die Möglichkeit, einige Materialeigenschaften (z. B. k_f -Wert, Porosität, Wärmekapazität) zu erfassen – sollten diese vorliegen. Im Standardfall greift das Tool automatisch auf Literaturwerte zurück.

Auf Grundlage der Eingangsgrößen und unter Zugriff auf hinterlegte Daten, werden alle für die Gesteungskostenberechnung relevanten Zielgrößen automatisiert ermittelt. Hierzu zählen beispielsweise:

- der Gesamtenergiebedarf pro Jahr
- das benötigte Aquifervolumen
- die benötigte Länge und Breite des Speichers
- die Anzahl der Brunnen (in Abhängigkeit von der Art des Lockergesteins)
- die Betriebs- und Wartungskosten der untertägigen Anlagenbestandteile
- die Investitionskosten für Brunnenbau und Dichtwände
- Die Farbkodierung der Eingabe- und Ausgabefelder steigert die Nutzer*innenfreundlichkeit. Fehlermeldungen bei falschen oder unplausiblen Eingaben garantieren sinnvolle Ergebnisse, auch bei der Verwendung des Tools durch fachunkundige Personen (Abbildung 4).

Bei den hinterlegten Daten handelt es sich um Angaben aus Fachliteratur, von Projektpartner*innen oder um Erfahrungswerte der JENA-GEOS-Ingenieurbüro GmbH aus dem laufenden Betrieb. Alle Daten und Informationen werden im Laufe des iterativen Entwicklungsprozesses kontinuierlich angepasst bzw. aktualisiert, sofern erforderlich.



Wärmebedarf		Angaben zwingend erforderlich! Werte sind vom TGA-Planer einzuholen.	
<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div> <p>Winter - Heizfall</p> <p>A_H zu beheizende Fläche <input type="text" value=""/> m²</p> <p>t_H Zeit Heizperiode <input type="text" value="3.624"/> h</p> <p>Hinweis: Maximal mögliche Jahresstundenzahl ($t_H + t_C = 8.760$ h) erreicht!</p> </div> <div> <p>Sommer - Beladen mit Überschussenergie oder Kühlfall</p> <p>A_C ggf. zu kühlende Fläche <input type="text" value=""/> m²</p> <p>t_C Zeit Kühlperiode <input type="text" value="5.136"/> h</p> </div> </div>			
s	Speichereffizienz	<input type="text" value="75,0%"/>	
Fall 1: Bedarf bekannt			
ED_H	benötigter Heizenergiebedarf	<input type="text" value="50.000"/> kWh	
ED_C	benötigter Überschuss / resultierender Kühlenergiebedarf	<input type="text" value="66.667"/> kWh	
Fall 2: Wärmeüberschuss bekannt			
ED_H	resultierende Heizenergie	<input type="text" value=""/>	
ED_C	vorhandene Überschussenergie	<input type="text" value=""/>	
ED_H	Heizenergiebedarf	<input type="text" value="50"/> MWh	
ED_C	Kühlenergiebedarf	<input type="text" value="67"/> MWh	
ΔQ_{Ges}	benötigte Gesamtwärmemenge	<input type="text" value="420.000"/> MJ	
DL	Durchläufe pro Halbjahr	<input type="text" value="1"/> (Ausgenommen Anlaufphase)	
ΔT	Temperaturspannung pro DL	<input type="text" value="32"/> K	
ΔT_{Ges}	Temperaturspannung Gesamt	<input type="text" value="32"/> K	
COP_{HP}	COP Wärmepumpe Heizen	<input type="text" value="4,0"/>	
COP_{HP}	COP Wärmepumpe Kühlen	<input type="text" value=""/>	
W_{PH}	Leistungszahl Wärmepumpe Heizen	<input type="text" value="75%"/>	
W_{PC}	Leistungszahl Wärmepumpe Kühlen	<input type="text" value="freie Kühlung"/>	
V_H	benötigtes GW-Volumen Heizen	<input type="text" value="1.017"/> m ³ /HJ	
V_C	benötigtes GW-Volumen Kühlen	<input type="text" value="1.807"/> m ³ /HJ	
$V_{H/DL}$	benötigtes GW-Volumen Heizen je DL	<input type="text" value="1.017"/> m ³ /DL	
$V_{C/DL}$	benötigtes GW-Volumen Kühlen je DL	<input type="text" value="1.807"/> m ³ /DL	
		Durchflusswirksames Porenvolumen nur unwesentlich größer! (s. 1.2 Geologie.)	
		Durchflusswirksames Porenvolumen zu gering! (s. 1.2 Geologie.) (Berechnungen nach Schüppler et al., 2019)	

Abbildung 4 Eingabe-/Ausgabemaske „Grundlegende Angaben zum Wärmebedarf“. Orange – Eingabefelder, grün – Berechnungsergebnisse. Gesteungskostentool Version 15, Stand 11.11.2022.

3.3 Wirtschaftlichkeit, Optimierung Anlagendesign und Potenzial-Abfrage- tool (GIS)

3.3.1 Übergeordnete Wirtschaftlichkeitsanalyse auf Basis probabilistischer Methoden

Zielstellung des Arbeitspaketes war es, auf Grundlage eines Gesteungskostentools eine übergeordnete Wirtschaftlichkeitsanalyse unter Berücksichtigung der Berechnung der Wärmegestehungskosten des GeoHeatStorage durchzuführen. Es erfolgte zunächst eine Validierung der Unsicherheiten der Eingangsgrößen (Zuarbeit Projektpartner), wobei die Temperaturverteilung und -entwicklung im Speicher besonders im Fokus standen. Grundlage hierfür bildeten unterschiedliche Speichergeometrien bzw. die Ergebnisse aus dem Arbeitspaket 2.1.1.3 (prinzipielles Anlagendesign) sowie die Spezialtiefbauverfahren und die übertägige Anlagentechnik.

Das Gesteungskostentool arbeitet für die Berechnung der Kosten mit der Kapitalwertmethode gemäß Abbildung 6. Somit ergaben sich als Eingangsgrößen zur Gesteungskostenberechnung die Investitionskosten des Aquiferspeichers, die laufenden Kosten, welche sich aus bedarfs- und betriebsbezogenen Ausgaben zusammensetzen, sowie die jährlich produzierte Wärmemenge des Speichers. Diese Größen hängen von Ausgangsgrößen bzw. Eingabeparameter ab und stehen zum Teil in Wechselbeziehung zueinander. Abbildung 5 gibt einen Überblick über die Eingangsgrößen der Kostenberechnung. Aufgrund der Komplexität der Beziehungen der Eingangsgrößen Investitionskosten und laufende Kosten, ihrer jeweiligen Eingangswerte sowie der Eingabeparameter zueinander, sind diese in zwei separaten Schemata dargestellt (Abbildung 6 und Abbildung 7).

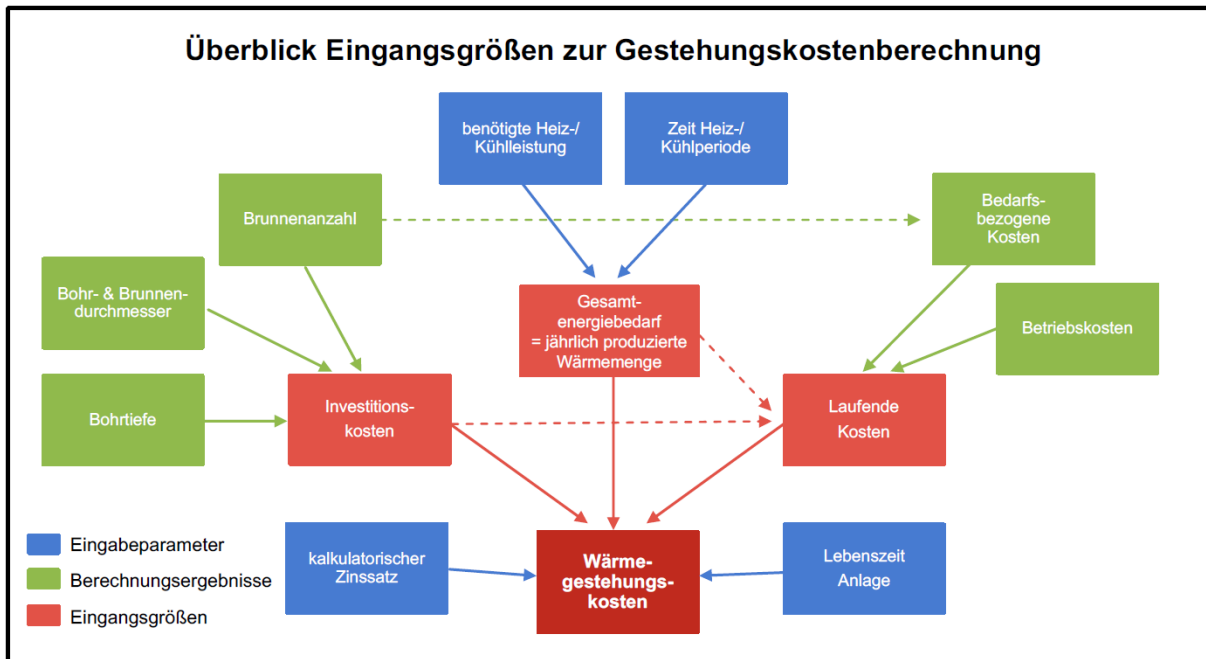


Abbildung 5 Übersichtsschema zur Bestimmung der Gesteungskosten: Eingangsgrößen der Gesteungskostenberechnung (hellrot, blau), Werte aus denen sie berechnet werden (grün, blau) sowie ein Teil der Eingabeparameter (blau)

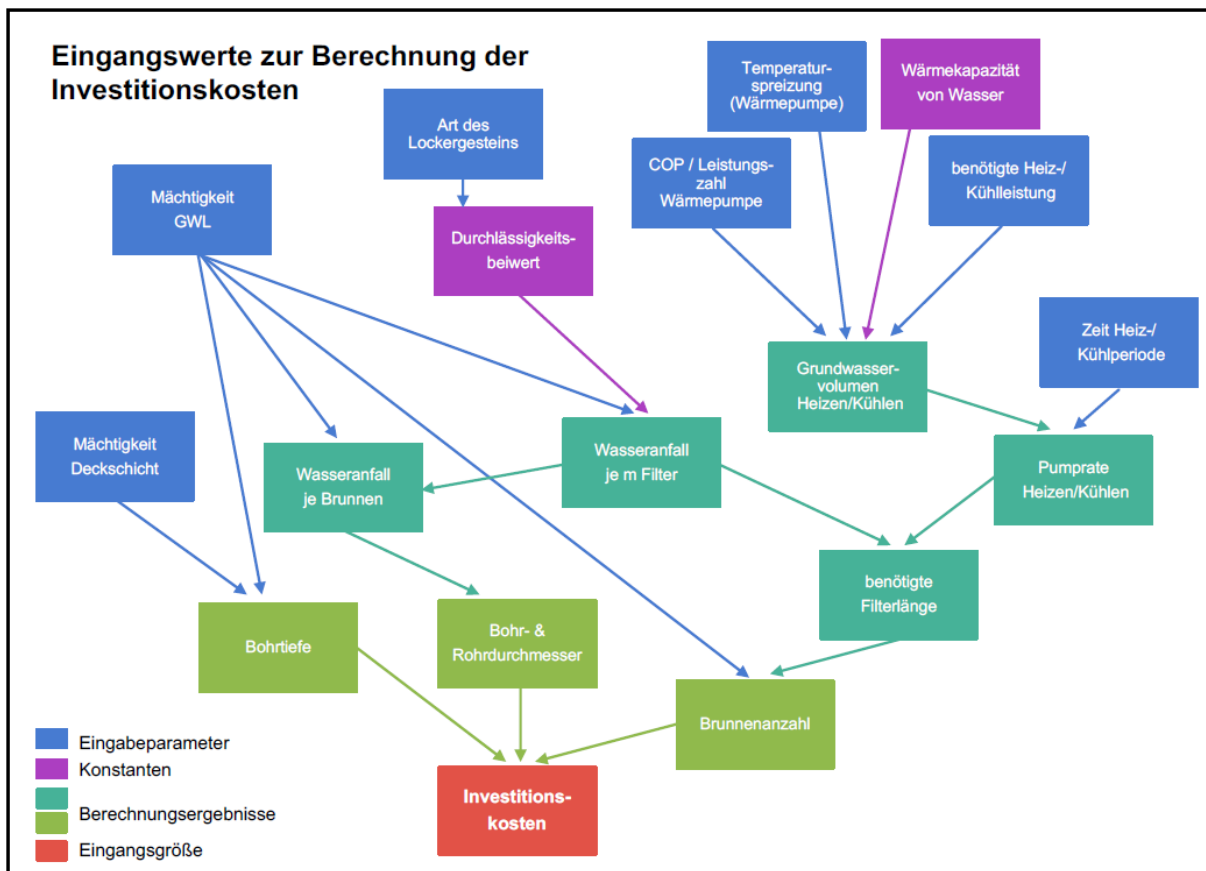


Abbildung 6 Übersichtsschema der Eingangswerte einer Investitionskostenberechnung für die Wärmegestehungskostenberechnung eines Aquiferspeichers: Eingabeparameter (blau), Konstanten (violett), Berechnungsergebnisse (türkis, grün), Eingangsgröße (rot)



Im Anschluss wurde mittels der Software optiSLang eine parametrische Sensitivitätsanalyse, Zuverlässigkeits- und Robustheitsbewertung mithilfe stochastischer Analyse durchgeführt (Abbildung 8). Der vorhandene Simulationsprozess (Gesteungskostentool) wurde mittels eines grafischen Editors über ASCII-Dateien angeschlossen und einer parametrischen Sensitivitätsstudie und Optimierung unterzogen.

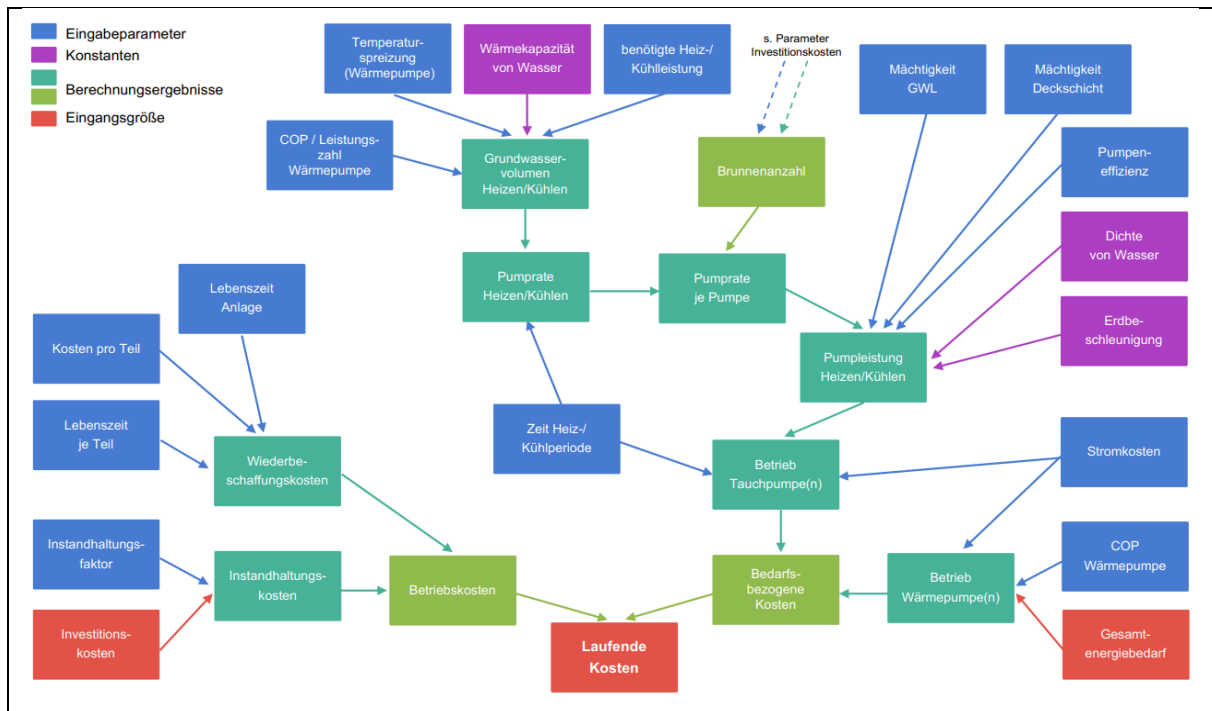


Abbildung 7 Übersichtsschema der Eingangswerte einer Berechnung laufender Kosten für die Wärmegesteungskostenberechnung eines Aquiferspeichers: Eingabeparameter (blau), Konstanten (violett), Berechnungsergebnisse (türkis, grün), Eingangsgröße (rot)

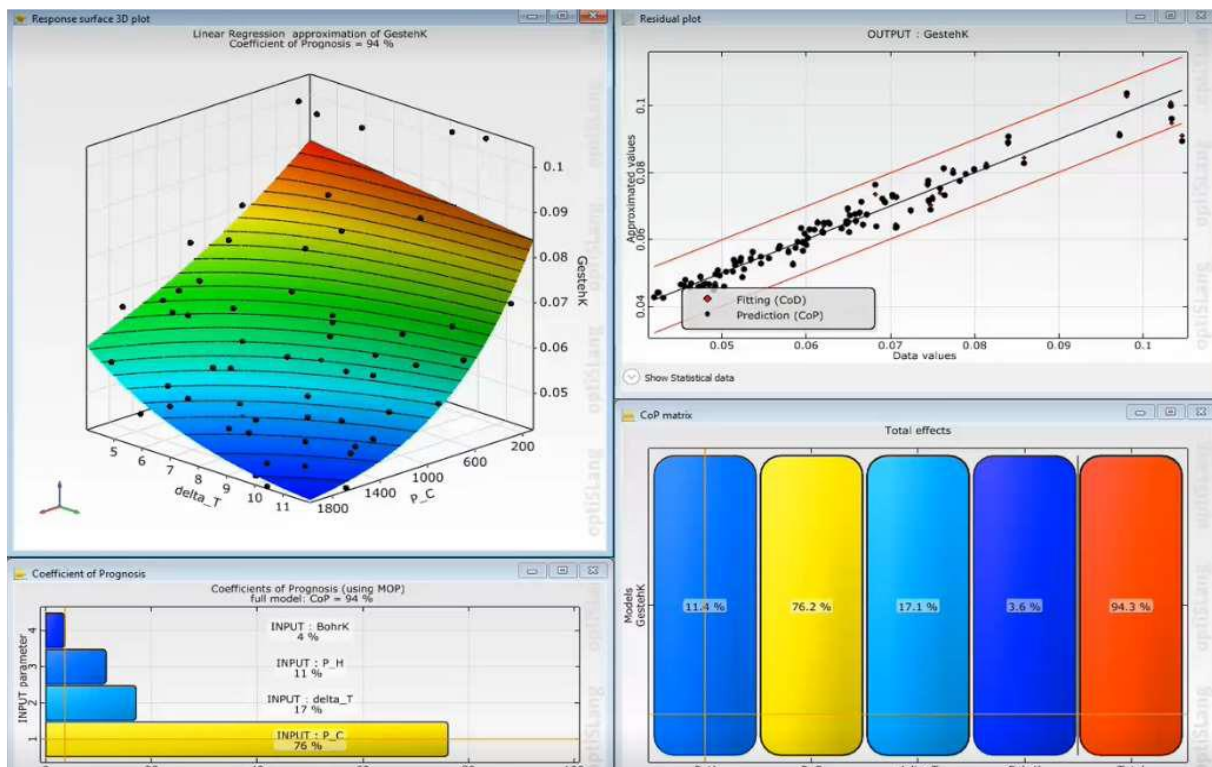


Abbildung 8 Probabilistische optiSLang-Analyse der Gesteungskosten



Im Ergebnis der Anwendung probabilistischer Methoden ist nach wie vor das Spezialtiefbauverfahren das Element am GeoHeatStorage, welches den weitaus größten Einfluss auf die Gesteungskosten hat. Geologische Parameter wie z. B. Porosität und Permeabilität haben im Vergleich hierzu einen untergeordneten Einfluss. Neben der Dichtwand hat die Aquifermächtigkeit einen entscheidenden Einfluss auf die Gesteungskosten. Letzteres resultiert aus der Abhängigkeit zwischen Aquifermächtigkeit und Dichtwand: Je mächtiger der Aquifer, desto tieferreichender muss die Dichtwand hergestellt werden, wodurch wiederum aufgrund u. a. höheren Materialbedarfs und längeren Bauzeiten die Baukosten steigen.

3.3.2 Methode zur Optimierung des Anlagendesigns

Wichtigster geologischer Eingabeparameter ist neben der Mächtigkeit des GWL (h_{GWL}) und der Deckschicht (h_{top}) die Art des Lockergesteins. Aus dieser lassen sich einige wichtige Rechengrößen des Tools ableiten, wie der Durchlässigkeitsbeiwert (k_f), Gesamt- und effektiver Porenanteil (n_P und n_{Peff}) sowie die volumetrische Wärmekapazität (c_s) des Lockergesteins. Dies erfolgt automatisiert durch Abgleich mit hinterlegten Literaturwerten ([4]; [10]). Gleichzeitig bietet das Tool die Möglichkeit zur Eingabe von Laborwerten. Für die Berechnung des benötigten Speichervolumens des GHS (V_A) ist die Berechnung der volumetrischen Wärmekapazität des Aquifers (ergibt sich aus Gestein und Grundwasser) anhand der genannten Literatur- oder Laborwerte notwendig. Die Auslegung des GHS gestaltet sich aber wesentlich komplexer. Da das Wasser innerhalb des GHS mehrfach im Laufe einer Saison ausgetauscht werden soll, werden zusätzlich die benötigten GW-Volumina zum Heizen und Kühlen pro Durchlauf (DL) berechnet. Diese dürfen das effektive, also durchflusswirksame Porenvolumen (V_{Peff}) innerhalb des GHS nicht übersteigen, welches sich aus der Multiplikation des effektiven Porenanteils n_{Peff} mit dem Speichervolumen V_A ergibt [4]. V_A setzt sich aus dem Volumen des Lockergesteins und dem Volumen des Wassers zusammen. Demzufolge muss die Wärmekapazität des Wassers durch die Wärmekapazität des Aquifers ersetzt werden:

$$V_A = \frac{(ED_H \cdot \varepsilon_{\text{HP-H}} + ED_C \cdot \varepsilon_{\text{HP-C}}) \cdot 3.600}{c_a \cdot \Delta T}$$

Das Speichervolumen wird genutzt, um diese mittels der Gesamttiefe (h_{GWL} plus h_{top}) und des Seitenverhältnisses (Länge a und Breite b) des Speichers zu ermitteln. Abbildung 9 zeigt das Schema zum iterativen und zum Teil automatisierten Designoptimierung auf Grundlage der Zielgröße „Gesteungskosten“ des GHS. Zusätzlich sind die Ergebnisse aus TP 2.2, der geothermischen Finite-Elemente-Simulation im Hinblick auf die Speichereffektivität unter Berücksichtigung unterschiedlicher (hydro-)geologischer Parameter eingeflossen.

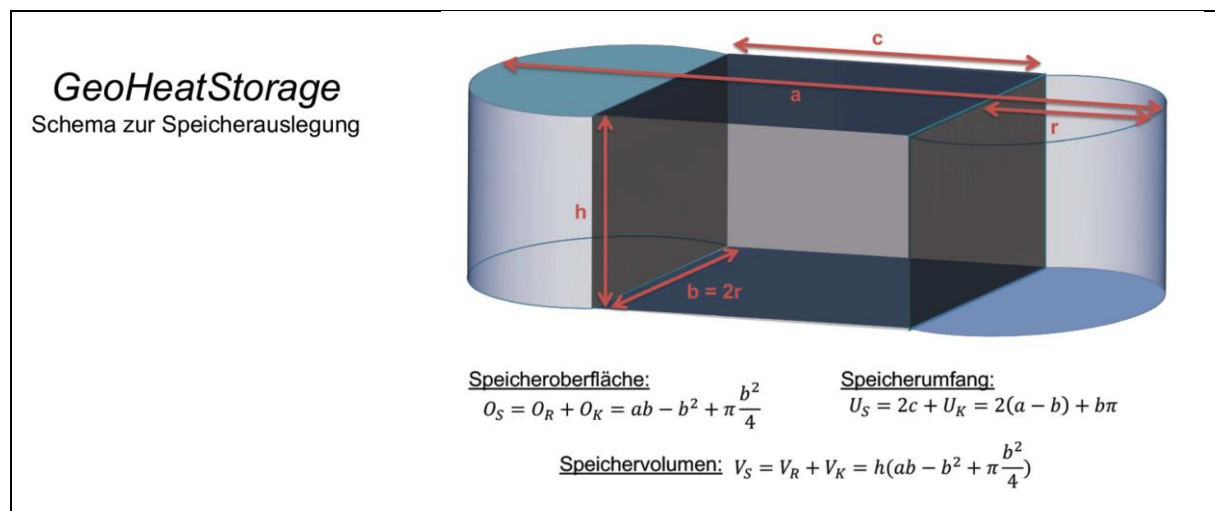


Abbildung 9 Schema zur unterirdischen Speicherauslegung des GeoHeatStorage (nicht maßstabsgetreu)



Die Berechnung der benötigten Filterlänge und der Anzahl der Brunnen erfolgt in Abhängigkeit vom Lockergestein. Der Wasseranfall je Meter bildet die Grundlage zur Berechnung der benötigten Filterlänge LH bzw. LC (in m) und somit der Anzahl der warmen und kalten Brunnen:

$$L_{H/C} = \frac{q_{H/C}}{Q} \quad \text{mit} \quad q_{H/C} = \frac{V_{H/C}}{t_{H/C}}$$

Wobei q_H bzw. q_C die Pumprate zum Heizen bzw. Kühlen ist und t_H und t_C die Zeit der Heiz- und Kühlperiode. Die Brunnenanzahl ergibt sich als Quotient aus Filterlänge und Mächtigkeit des Aquifers. Zur späteren Ermittlung der bedarfsbezogenen Kosten wird die benötigte Pumpleistung in kW zum Heizen PPH bzw. Kühlen PPC wie folgt berechnet (Schüppler et al., 2019):

$$P_{PH/C} = \frac{q_{H/C} \cdot \rho \cdot g \cdot (h_{GWL} + h_{top})}{3,6 \cdot 10^6 \cdot \eta_P}$$

3.3.3 Weiterentwicklung des GIS zum Potential-Abfrage-Tool

Voraussetzung für das Abfragetool ist eine QGIS 3.8-Version. Neuere Versionen haben Probleme mit den Verschneidungsalgorithmen und funktionieren derzeit nicht. Das Plugin wird lokal im QGIS-Ordner für Plugins entpackt und damit automatisch beim nächsten Start von QGIS angezeigt. Das Plugin findet sich in QGIS in der Funktion „Erweiterungen“ unter der Bezeichnung *smood-Aquifere*.

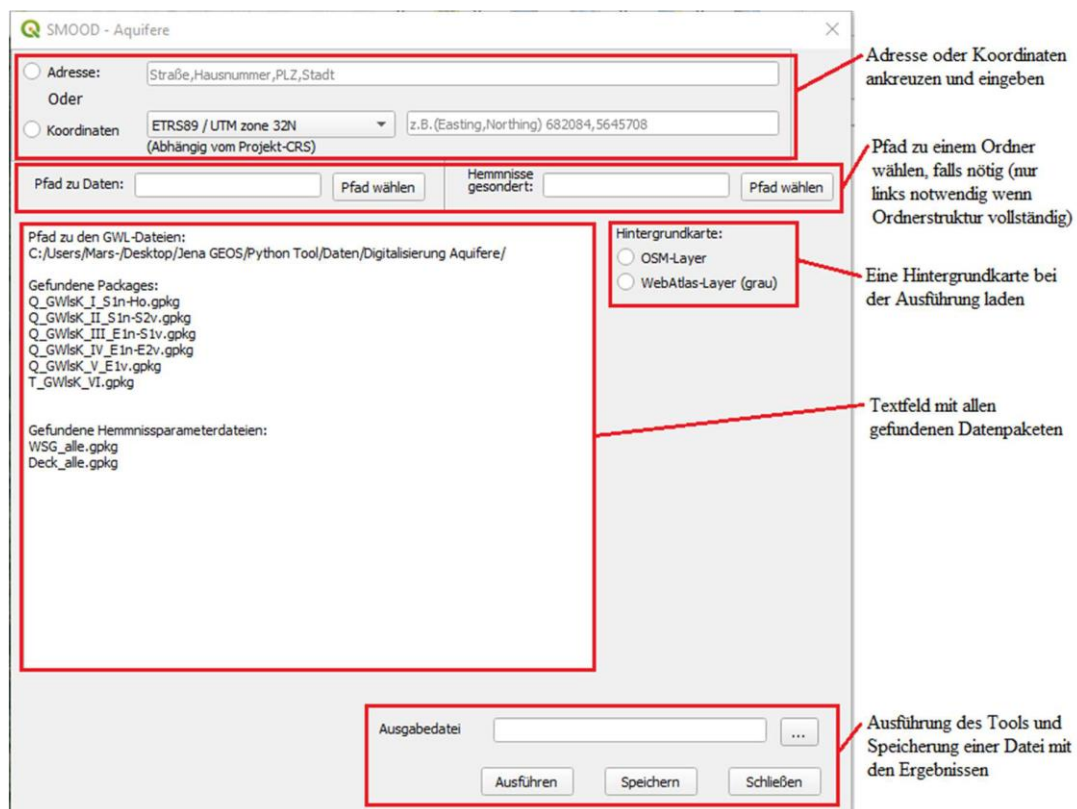


Abbildung 10 Bedienoberfläche des smood-Aquifer-Abfragetools als QGIS-Erweiterung

Abbildung 10 zeigt das finale User Interface (UI) des Abfragetools in QGIS. Die Standortabfrage lässt sich via Adresse oder Koordinaten starten; optional können benutzerdefinierte Pfade zu den Abfrage-Datenbanken angegeben werden. Im mittleren Textfeld werden, zur Übersicht welche Daten abgefragt werden, alle gefundenen Datensätze angezeigt. Die Abfrage erfolgt automatisiert im GIS (Zoom auf Standort und Anzeige der Datengrundlage). Zur besseren Darstellung der Ergebnisse im GIS kann die Art der Hintergrundkarte gewählt werden. Es stehen die freien OpenStreetMap-Karten sowie der WebAtlas des Geodatenzentrums



des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie zur Wahl. Die Ergebnisse der Abfrage werden, wenn ein entsprechender Pfad angegeben wird, auch in der Datei *.csv-Datei ausgegeben.

Es gibt einige Parameter, die festgeschrieben sind (z. B. die Attributnamen der Layer) und nicht über das UI angegeben bzw. geändert werden können. Im Python-Script sind diese zusammen mit Hinweisen zu Programmiercode dennoch einsehbar, wofür die Funktion *Layer laden* ein gutes Beispiel darstellt. An diesen Stellen ist der Kommentar *#hardcoded* zu finden, wenn nötig mit Spezifizierung. Im obigen Beispiel sind es die Verzeichnisnamen für die Daten „Digitalisierung Aquifere“, „WSG“ & „Deckschicht“, die hier festgeschrieben werden.

3.4 Demonstrationsvorhaben und Dienstleistungsprodukt

3.4.1 Vorbereitung eines Demonstrationsvorhabens

Innerhalb des Projektes war das smood-Konsortium in Verhandlung mit der Stadt Jena über die Realisierung eines „smood-Quartiers“. Abbildung 11 zeigt das betreffende Quartier in Jena Ost, das eine Fläche von ca. 36 ha umfasst. Der Weg zum „smoodQuartier“ sollte über ein Integriertes Quartierskonzept nach KfW 432 erfolgen.

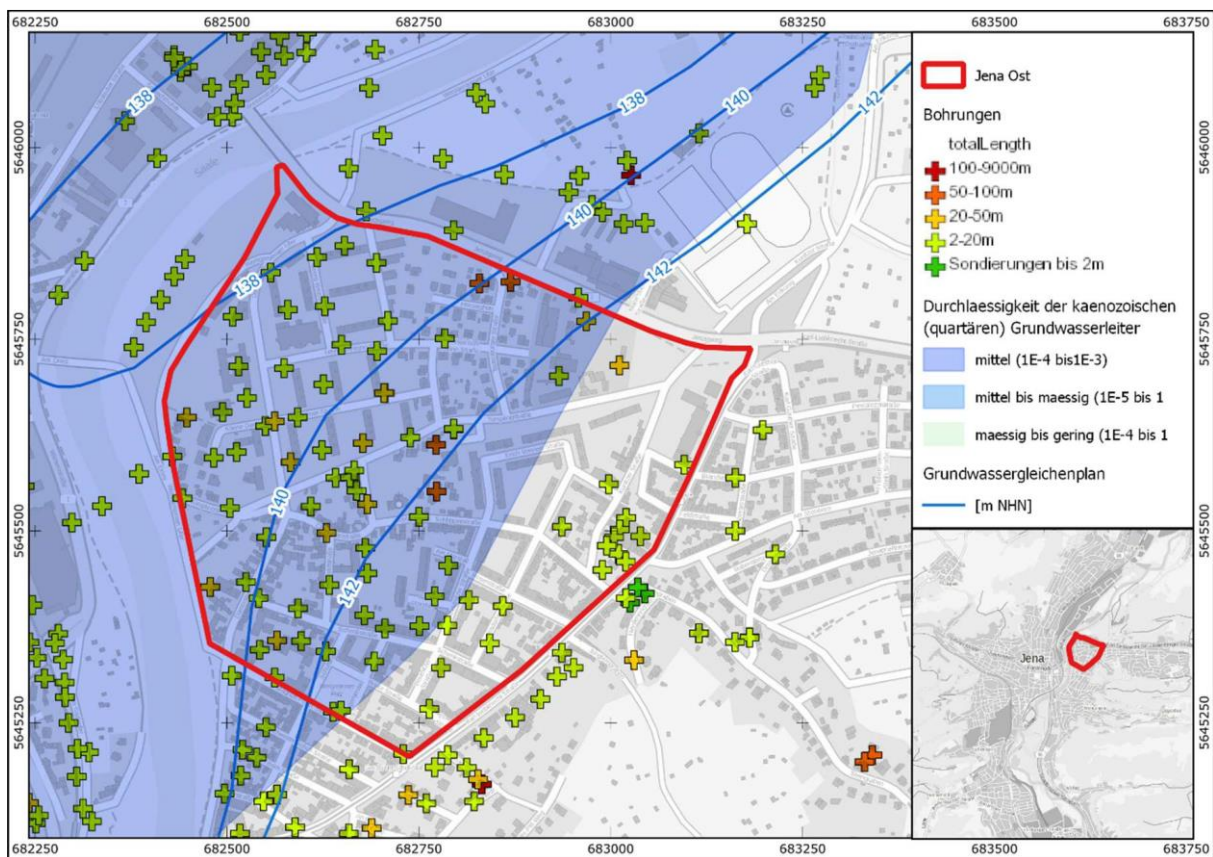


Abbildung 11 Lageplan mit Bohrungen & Durchlässigkeit der quartären Kiese im Bereich des geplanten smood-Quartiers Jena-Ost

Die geologische Standortbewertung beinhaltet die Entwicklung eines Mindest-Untersuchungsumfanges zu den notwendigen Parametern, der Aufschlussdichte und den geostatistischen Zusammenhängen. Die erforderliche Aufschlussdichte muss dabei projektspezifisch in Abhängigkeit von der Größe und der Geometrie des Untersuchungsgebietes sowie unter Berücksichtigung der lokalen geologischen Ausprägung festgelegt werden. Zur Mindest-Dokumentation für die behördliche Genehmigung einer GeoHeatStorage-Anlage wurden auf der Grundlage von Erfahrungswerten und vor dem Hintergrund insbesondere wasserrechtlicher Belange zunächst folgende Aspekte erfasst:



- GIS-basierte Erfassung der Speicherdimensionen
- umfasstes Grundwasservolumen
- Bebauung und Bepflanzung
- Temperaturentwicklung und hydrochemische Eigenschaften im Speicher
- Abstandsdokumentation zu Grundstücksgrenzen, Gebäuden und Medienleitungen
- Dichtheitsprüfung der Dichtwand und der natürlichen Sperrschicht im Liegenden des Speichers mittels Pumpversuchen
- Hydrodynamische Auswirkungen des Speichers auf das Grundwasser (Aufstau, etc.)
- Abklärung Schutzgebiete (Trinkwasser-, Heilquellen-, Natur- und Landschaftsschutzgebiete, FFH-Gebiete, u. a.)

Für ein Demonstrationsvorhaben in Jena-Ost liegen die geologischen Standortdaten und deren vorläufige Bewertung vor. Die bisher eingesehenen Daten lassen auf eine weitgehend flächige Verbreitung von quartären Kiesen mit einer Mächtigkeit von etwa 2 m schließen (Abbildung 10). Die vermuteten Porositäten und Durchlässigkeiten entsprechen den generellen Anforderungen an einen GeoHeatStorage. Nach der Einsicht in alle Bohrungsdaten wird sich im weiteren Projektverlauf zeigen, ob das Modellquartier Jena-Ost auch für das Teilprojekt GeoHeatStorage geeignet ist oder anhand eines alternativen Beispiels die Planung für ein Demonstrationsvorhaben vorgenommen wird.

3.4.2 Definition eines prototypischen Anlagenkonzeptes

Ein standardisierbares Anlagenkonzept ermöglicht zusätzliche Entwicklungsleistungen und das Angebot von marktkonformen Dienstleistungen. Es beruht auf einem mehrstufigen Zusammenhangsmodells, welches zur Realisierung eines wirtschaftlich nutzbaren GeoHeatStorage die Kompetenzen der smood-Projektpartner auf effektive Weise zusammenführt. Das Zusammenhangsmodell zur Definition eines standardisierbaren Anlagenkonzeptes basiert im ersten Schritt auf der **Standortauswahl** bzw. -bewertung mithilfe des GIS-gestützten Python-Abfragetools und unter Einbezug des Gesteungskostentools (JENA-GEOS). Die Anwendung des **Kostentools** schließt dabei die Anwendung von Ergebnissen ein, die mithilfe der Software optiSLang (inkl. parametrischer Sensitivitätsanalysen) zum Zwecke der Systemoptimierung generiert wurden. Die so entwickelten Kennwerte werden von der **TGA-Planung** (HKL) verarbeitet. Die Ergebnisse der nachgeschalteten **thermodynamischen Simulation** (IAB Weimar gGmbH) mittels der Software FEFLOW werden (ggf.) in einem iterativen Prozess mit der TGA-Planung weiter optimiert. Die Einbindung des Anlagenkonzeptes in das smood-Gesamtkonzept bzw. in VP 1 (smoodPLAN) stellt in seiner Komplexität eine besondere Herausforderung dar.

3.5 Management und Organisation des Bündnisses des WK – Public Relations (Beziehungen im Bündnis und nach außen)

3.5.1 Beziehung im Bündnis

Generelles:

Von der Bündnisleitung wird das Zusammenwirken im Bündnis generell als äußerst positiv bewertet. Das Konsortium hat einen eigenen *Spirit* entwickelt ('smoodies'), der es leichter gemacht hat, Probleme zu überwinden.

Organisation von Maßnahmen zur Stärkung des Zusammenhaltes innerhalb des WK:

Die bereits etwa 3 Jahre vor Förderbeginn aufgebauten Beziehungen innerhalb des Bündnisses wurden gezielt weiterentwickelt. Vor Beginn der Pandemie waren hier vor allem Treffen außerhalb der eigentlichen Arbeitsaufgaben von großer Wichtigkeit. Seitens der Bündnispartner wurden fast alle Bündnispartner an ihren Standorten besucht, zudem wurde eine Wertschätzung gegenüber den Bündnispartnern bei wichtigen Ereignissen erwiesen (z. B. Grundsteinlegung bei IKTS, Instituts-Neubau bei IOSB-AST, Feierlichkeiten der EnergieWerkStadt, Vorbereitungsabend zum Kick-Off „The Night Before“ usw.). Der Umstieg auf digitale Formate



während der Pandemie konnte diese Aktivitäten nicht ersetzen, sodass es der mentalen Stärke des Verbundes zu danken war, dass der Zusammenhalt andauerte.

Überwachung der Einhaltung der WK-Ziele; Aufbau- und Ablauforganisation; Evaluierung und Weiterentwicklung etablierter sowie funktionierender Strukturen und Arbeitsweisen:

Das Bündnis hat mit dem ThEEN e.V. und BIFAS Jena ein externes Projektmanagement mit der Steuerung und dem Controlling des Wachstumskerns beauftragt. Zudem sollte dieses Projektmanagement die Bildung einer Verwertungsgesellschaft vorbereiten. Die Bündnisleitung wurde mit Vertretungen redundant besetzt, was sich gerade in der Zeit der Pandemie als vorteilhaft erwies.

Beratungen der Bündnisleitung mit dem PM fanden monatlich statt. Alle Verbundprojekte hatten vorher Bericht zum Stand der Arbeit zuzuarbeiten. Die Bündnisleitung wertete kritisch aus und organisierte Maßnahmen bei eingetretenen Projektrückständen. Maßstab bildete die Erreichung von Meilensteinen, im Flow des Controlling gekennzeichnet mit Signalfarben grün/gelb/rot. Stichprobenhaft erfolgten Hospitationen des PM bei Schnittstellenprojekten. Die Evaluierung und Weiterentwicklung etablierter sowie funktionierender Strukturen und Arbeitsweisen wurde im engeren Kreis der beiden Bündnissprecher mit der Leiterin des externen Projektmanagements diskutiert.

Meilensteine aus Sicht der Organisationsentwicklung:

In nachfolgender Zusammenstellung sind Veranstaltungen aufgeführt, die sich sowohl als Meilensteine aus Sicht der Organisationsentwicklung im Hinblick auf die Stärkung der Motivation und des Teamgeistes für die Umsetzung der Bündnisvision erwiesen hatten, als auch von großer Bedeutung für die Außenwirkung des WK waren:

Tabelle 4 Meilensteine der Organisationsentwicklung (innen) und der Außenwirkung des WK

Datum	Ereignis	Meilensteine	
		nach innen	nach außen
18.6.2019	Vorabend ‚The night before‘	X	
19.6.2019	und ‚Kick-Off-Meeting‘ im Klimapavillon in Jena	X	X
24.6.2019	smood Vorträge zur Brownfield Conference in Pittsburgh		X
29.1.2020	(interner) smood® Workshop mit anspruchsvollem Schnittstellen-Programm (Präsenz, Bauhaus-Universität)	X	
17.11.2020	(interner) smood® Workshop (digital)	X	
25.01.2021	Gründung des smood® e.V.	X	
02.08.2021	Empfang des Nachhaltigkeits-Awards, Jena	X	X
07.10.2021	smood® - Konferenz (aus eigener Initiative), imaginata Jena	X	X
29.11.2021	smood® - Verwertungsworkshop	X	
Januar 2022	gemeinsame Reise nach Dubai zum smoodEXPONAT im Pavillon ‚Campus Germany‘ zur Weltausstellung 2021/22	X	X
09.06.2022	von smood® mit-initiierte und organisierte Konferenz ‚Unsere Zukunft im Quartier‘, imaginata Jena	X	X
07.07.2022	smoodSOMMERFEST auf dem Bergplateau des Kaitsch bei Weimar	X	
07.12.2022	smood® Abschlusskonferenz	X	X

Die turnusmäßigen Projekt- und Strategietreffen sind in dieser Aufstellung nicht enthalten.

Konfliktmanagement:

Mit einem frühzeitigen Erkennen von Konflikten und einer moderatorischen Einwirkung auf dieselben konnte die Bündnisleitung im Verein mit dem externen Projektmanagement Konflikte



harmonisieren. Solche entstanden insbesondere aufgrund einer pandemiebedingten Unwucht im Progress. Die KMU hatten es hier deutlich schwerer, da sie neben personellen Ausfällen bei der FuE-Tätigkeit auch und vor allem das unternehmerische Tagesgeschäft abzusichern hatten. In einem Falle (Alumina Systems, VP 4) führte dies zum Ausscheiden eines Partners. Die Übertragung der FuE-Inhalte auf die Verbundpartner konnte nur auf einer Vertrauensbasis im Bündnis-Interesse realisiert werden.

3.5.2 Beziehungen nach außen

Die Beziehungen nach außen wurden mit hohem Aufwand und der Motivation gestaltet, frühzeitig Wege für die spätere Verwertung zu ebnen. Die Aktionen waren äußerst vielfältig; Tabelle 4 spiegelt nur einen Bruchteil wider. Als unternehmerischer Bündnissprecher war Dr. Rolselt an erster Stelle bei der Organisation der Öffentlichkeitsarbeit (Erstellung und Aktualisierung der einheitlichen smood-Präsentation für alle Partner; Pflege der Homepage, Auftritte auf Tagungen / Konferenzen zum energetischen Stadtumbau sowie der Betreuung externer Projektpartner). Von anhaltender Wirkung für den WK waren die Kooperationen zu Partnerprojekten (WIR!-Projekte wie Open Osterland, AIX-Net-WWR, Initiative „Building the city of tomorrow“ des BMBF, ZORRO, Netzwerke wie URMIT / ZIM) und zu Vereinen wie Open District Hub, EnergieAvant-Garde Anhalt e.V., IBA Internationale Bauausstellung Thüringen, C.A.R.M.E.N. e.V.) und Unternehmen wie z. B. Innovation City Bottrop, PwC Düsseldorf, VONOVIA Bochum u.a.

Die Auszeichnung von smood mit dem Deutschen Award für Nachhaltigkeitsprojekte 2021, vor allem aber die Auswahl und Platzierung von smood im Deutschen Pavillon 'Campus Germany' zur Weltausstellung in Dubai haben weit über die Grenzen Thüringens hinaus und international Aufmerksamkeit erregt. Sie haben auch nach innen zu einer Festigung des Konsortiums und zu einem Stolz auf die Marke 'smood' geführt.

3.5.3 Abschlussphase Wachstumskern-Förderung

Der Zeitpunkt der Abschlusskonferenz im Dezember 2022 erwies sich als äußerst günstig. Die Möglichkeit, ‚fertige‘ Ergebnisse zu präsentieren, verlieh dem Bündnis zum Projektende noch einmal einen enormen Schub. Die Veranstaltung selbst im Jenaer ZEISS-Planetarium kann man getrost als spektakulär, äußerst gelungen und als Steilvorlage für die Verwertung bezeichnen. Die Botschaften zur Eröffnung von Kanzleramtsminister Carsten Schneider, die Ausführungen von Energieministerin Anja Siegesmund sowie der Vortrag von dena-Chef Andreas Kuhlmann verliehen der Veranstaltung zusätzliche Bedeutung.

Die Kontakte aus der Abschlusskonferenz wurden durch den smood® e.V. weiter gepflegt; es entwickelten sich daraus die Akquise von 2 smood-Modellquartieren, die in den Jahren 2023/24 als exzellente Option gelten, die Prototypen zur Marktreife zu entwickeln. Das gemeinsame Erlebnis der Abschlusskonferenz stärkte vor einem möglichen 'Auseinandergehen' noch einmal den Zusammenhalt des Konsortiums und gab der Verwertungsgesellschaft smood® e.V. entsprechende Impulse.

4 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

Das FuE-Vorhaben GeoHeatStorage birgt aufgrund der zahlreichen Eingangsgrößen, die die Wirtschaftlichkeit und Verwertbarkeit der Technologie bestimmen, ein deutlich erhöhtes wirtschaftliches Risiko für die beteiligten Unternehmen und Forschungseinrichtungen. Das KMU JENA-GEOS verfügt über kein eigenes Forschungsbudget. Die Marktposition zur Sicherung des Unternehmens und seiner Arbeitsplätze kann jedoch nur gehalten bzw. ausgebaut werden, wenn das Unternehmen in der Lage ist, potenziellen Kunden innovative Lösungen anzubieten, die einen Wettbewerbsvorsprung gegenüber Mitbewerbern darstellen. Aus diesen Gründen hätte die Entwicklung des GeoHeatStorage ohne die Förderung nicht erfolgen können. Aufgrund der geleisteten Eigenanteile und der hohen Motivation der beteiligten Mitarbeiter schätzen wir die Projektarbeit als notwendig und angemessen ein.



5 Nutzen und Verwertbarkeit

Die Beschleunigung der urbanen Energiewende durch die aktuelle Bundesregierung mit vielen Gesetzes- und Förderinitiativen von den Skalierungen des Gebäudes (GWG) über das Quartier bis zur Größe der Stadt (kommunale Wärmeplanung) haben die Nachfrage nach Dienstleistungen und Technologien in diesen Marktsegmenten signifikant erhöht – das spüren alle in smood® beteiligten KMU an ihrem Auftragsbestand.

Der Krieg in der Ukraine hat die Situation weiter spürbar verschärft: Kommunen bzw. kommunale Unternehmen wie Stadtwerke und die Privatwirtschaft suchen vor allem nach Alternativen der fossilen Gasversorgung, Wohnungsunternehmen nach mehr Energieeffizienz, kleine Kommunen bis hinab zu Dörfern nach hohen Selbstversorgungsgraden mit erneuerbaren Energien, regionalem/lokalen Wirtschaften und Resilienz gegenüber äußeren Einflüssen.

Die beschriebenen Tendenzen treffen am stärksten auf die privatwirtschaftlichen Unternehmen zu, die die fossile Energieabhängigkeit zumindest in Teilen auflösen wollen. In diesem Zusammenhang hat die bereits seit Langem propagierte Vision klimaneutraler Gewerbegebiete (die zumeist an mangelnder Bereitschaft zum Commitment der ansässigen Firmen scheiterte) eine echte Umsetzungschance. Der smood®-Verbund hat bereits darauf reagiert und zur Abschlusskonferenz den Begriff smoodINDUSTRY verbreitet. Tatsächlich unterscheiden sich Gewerbegebiete von Wohnquartieren aus Sicht einer systemischen Energieversorgung im Wesentlichen in Skalierungsfragen, verschiedenen Varianten der Sektorenkopplung und unterschiedlichen Quellen (u. a. mit eigenerzeugter Prozesswärme). Hinzu kommen für die klimaneutralen Gewerbegebiete andere Schwerpunktsetzungen bei genehmigungsrechtlichen Dingen. Vor allem sind kaum Fragen der Bürgerakzeptanz und der Warmmieten zur berücksichtigen. Hier eröffnet sich smood® einen neuen Markt.

Auch für den GeoHeatStorage gab es erste Anfragen; hier fehlt allerdings potenziellen Interessenten viel an fachlichem (geologischen) Verständnis bzw. Vorstellungsvermögen. Aktuell führt JENA-GEOS Gespräche mit den Stadtwerken Leipzig.

Die JENA-GEOS registriert aktuell eine signifikante Zunahme der Nachfrage nach herkömmlichen Aquiferspeichern. Dies erhöht auch die Aussicht auf den Bau eines GeoHeatStorage-Demonstrators, an dem mit den Projektergebnissen Optimierungen in Bezug auf Auslegung, Betrieb und Einbindung in eine moderne Sektorenkopplung erfolgen kann.

Wir rechnen mit einer Marktreife der Technologieentwicklung in 1 bis 2 Jahren. Die Erteilung des beantragten Patents „Verfahren zur großskaligen, unterirdischen saisonalen Wärme- und Kälteenergiespeicherung“ (DPMA Amtliches Aktenkennzeichen 10 2023 101 535.4) wird noch in diesem Jahr erwartet.

Als Bestandteil der Produktfamilie „smood®“, die bereits einen hohen Bekanntheitsgrad erreicht hat, wird auch der GeoHeatStorage von der eingetragenen Wortmarke profitieren.

6 Während des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt bei anderen Stellen

Es gibt aktuell keine weiteren Vorhaben oder Projekte, die einen ähnlichen Ansatz verfolgen wie das des GeoHeatStorage. Als in-situ-behältergebundenes Untergrundbauwerk genießt der GeoHeatStorage immer noch ein Alleinstellungsmerkmal.

Generell ist Bewegung bei den Anwendungen von konventionellen Aquiferspeichern gekommen. Während beispielsweise in den Niederlanden über 2.000 derartige Anlagen existieren, verfügt Deutschland aktuell lediglich über 3 in Betrieb befindliche (unter dem Bundestag, in Rostock und in Bonn). Allein JENA-GEOS hat im aktuellen Auftragsbestand 6 Planungen und Machbarkeitsstudien (für das Städtische Klinikum Karlsruhe und mehrere im Raum Leipzig).

Mit dem Aufruf des BMBF „Möglichkeiten und Grenzen thermischer Energiespeicherung in Aquiferen“ im Rahmen des Fachprogramms „Geoforschung für Nachhaltigkeit (GEO:N) vom



8. Juli 2021 begannen im II. Halbjahr 2022 mehrere Verbundprojekte. (Teil-)ergebnisse werden auch für eine weitere Vervollkommnung des GeoHeatStorage von Nutzen sein.

7 Erfolge und geplante Veröffentlichungen

Mit Veröffentlichungen hat sich JENA-GEOS auf wirtschaftsnahen Zeitschriften mit der Zielrichtung der Verwertung konzentriert. Hierzu gehören Publikationen in den VDI-Nachrichten, der Ingenieurszeitung und dem Mitteldeutschen Wirtschaftsmagazin ‚ARGOS‘.

Zu erwähnen ist auch die Studie ‚aquistore‘ [11] für die Metropolregion Mitteldeutschland, in der die JENA-GEOS als Projektleiter eines mitteldeutschen Expertenteams die Anwendung der Aquiferspeicher-Technologie für diesen Raum untersucht hat. In dieser Studie spielt auch der GeoHeatStorage eine Rolle und wurde auf zahlreichen Fachveranstaltungen und Konferenzen kommuniziert.

Eine unmittelbare Dissemination des GeoHeatStorage im Rahmen der Forschung und Entwicklung erfolgt nicht, da keine Forschungseinrichtung am Verbundvorhaben beteiligt war. Jedoch wird von der 4 insgesamt an smood® beteiligten Forschungseinrichtungen der GeoHeatStorage im Gesamt-Zusammenhang immer kommuniziert.

8 Quellen

- [1] Baehr, H. D. and Kabelac, S. 2016. *Thermodynamik*. Springer Berlin / Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- [2] Bauer, M., Freeden, W., Jacobi, H., and Neu, T., Eds. 2014. *Handbuch Tiefe Geothermie*. Springer Berlin / Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- [3] Cermak, V. and Rybach, L. 1982. Thermal properties: Thermal conductivity and specific heat of minerals and rocks. In *Zahlenwerte und Funktionen aus Naturwissenschaft und Technik: Neue Serie. = Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology: New Series*, G. Angenheister, K.-H. Hellwege, V. Cermak and H. Landolt, Eds. Springer Verlag, Berlin, 305–343.
- [4] Hölting, B. and Coldewey, W. G. 2009. *Hydrogeologie. Einführung in die allgemeine und angewandte Hydrogeologie ; 90 Tabellen*. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg.
- [5] 1987. *Hydrogeologisches Kartenwerk der Deutschen Demokratischen Republik 1 : 50 000. - Nutzerichtlinie-*. Hydrogeologische Grundkarte und Karte der hydrogeologischen Kennwerte, Halle.
- [6] Konstantin, P. 2017. *Praxisbuch Energiewirtschaft: Energieumwandlung, -transport und -beschaffung, Übertragungsnetzausbau und Kernenergieausstieg*. VDI-Buch. Springer Vieweg, Berlin [Heidelberg].
- [7] Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik (LIAG), Ed. 2016. *Tiefe Geothermie. Grundlagen und Nutzungsmöglichkeiten in Deutschland*. Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik (LIAG), Hannover.
- [8] Linstrom, P. 1997. *NIST Chemistry WebBook, NIST Standard Reference Database 69*. DOI=10.18434/T4D303.
- [9] Schön, J. 2011. *Physical properties of rocks. A workbook*. Handbook of petroleum exploration and production 8. Elsevier, Oxford.
- [10] VDI-Gesellschaft Energie und Umwelt. 2010. *Thermische Nutzung des Untergrundes. Grundlagen, Genehmigungen, Umweltaspekte*. VDI-Richtlinien, VDI 4640 Blatt 1.
- [11] Roselt, K. & A. Papsdorf (Redaktion), B. Felgentreff, J. Hopf, E. Kothe, D. Landgraf, M. Meisel, J. Schmidt, M. Voigt: aquistore: Adaption von Technologien saisonaler geogener Wärmespeicher auf die Aquifere der Innovationsregion Mitteldeutschland. – Band 1 (Studie) 131 S., 50 Abb., 8 Tab. Band 2 (Atlas) 14 S. – Jena & Leipzig, Dezember 2021