

Energieforschungsprogramm

Publizierbarer Endbericht

Programmsteuerung:

Klima- und Energiefonds

Programmabwicklung:

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG)

Endbericht

erstellt am

15/01/2024

Projekttitle: Kavernenspeicher - Kavernenspeicher als Großwärmespeicher

Projektnummer: FO999888414

Energieforschungsprogramm - 7. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Ausschreibung	7. Ausschreibung Energieforschungsprogramm
Projektstart	08/01/2022
Projektende	15/10/2024
Gesamtprojektdauer (in Monaten)	21 Monate
ProjektnehmerIn (Institution)	Fachhochschule Oberösterreich Forschungs- und Entwicklungs GmbH
AnsprechpartnerIn	DDI Dr. sc. Sophie Messerklinger
Postadresse	Roseggerstraße 15, 4600 Wels, Austria
Telefon	Tel.: +43 5 0804 10
Fax	Fax: +43 5 0804 11900
E-mail	Sophie.messerklinger@fh-wels.at
Website	https://www.fh-ooe.at/

Kavernenspeicher

Kavernenspeicher als Großwärmespeicher

AutorInnen:

DDI Dr. sc. Sophie Messerklinger /
Fachhochschule Oberösterreich Forschungs- und Entwicklungs GmbH
Dipl. Bau-Ing. Dr. sc. Erich Saurer /
SKAVA Consulting ZT-GmbH, Salzburg
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.-Ing. Thomas Marcher /
Institut für Felsmechanik und Tunnelbau, Technische Universität Graz

1 Inhaltsverzeichnis

1	Inhaltsverzeichnis	4
2	Ausgangssituation.....	6
3	Arbeitspakete im Projekt und deren Ergebnisse.....	7
3.1	Arbeitspaket 1: Spezifikation der Rahmenbedingungen für Großwärmespeicher in Fernwärmenetzen	7
3.2	Arbeitspaket 2: Felsmechanische Kavernenmodellierung	11
3.3	Arbeitspaket 3: Kavernen - Speicherpreis je kWh	11
3.4	Arbeitspaket 4: Modellierung der Temperatursausbreitung im Berg.....	13
3.5	Arbeitspaket 5: Abschlussworkshop und Abschlussberichtserstellung	19
4	Ausblick und Empfehlungen.....	20
5	Literaturverzeichnis.....	20
6	Kontakt.....	21

Energieforschungsprogramm - 7. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

2 Ausgangssituation

Großwärmespeicher spielen zukünftig eine Schlüsselrolle in Fernwärmesystemen. Sie ermöglichen eine breite Integration von erneuerbaren solaren Energiequellen und industrieller Abwärme, weil sie den Erzeugern und Verbrauchern die erforderliche Flexibilität durch die Pufferwärmespeicherung zur Verfügung stellen. Damit tragen sie maßgebend zur Integration nachhaltiger Energiequellen in die Wärmeversorgung und zur Erreichung der Energie- und Klimaziele bei.

Im Projekt „**KAVERNENSPEICHER**“ wurde untersucht, Felskavernen, **unter Berücksichtigung der speziellen Anforderungen an Großwärmespeicher in Fernwärmenetzen, wirtschaftlich sinnvoll zur Zwischenspeicherung** und saisonalen Speicherung **von Wärme im urbanen Raum einzusetzen**.

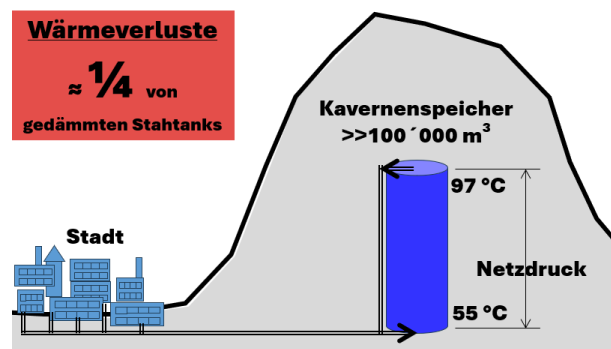


Abbildung 1: Prinzipskizze der Kavernenspeicher.

Gerade die erneuerbare solare Energiequelle bedarf in unseren Breiten einer saisonalen Zwischenspeicherung. Auch die Nutzung von industrieller Abwärme benötigt einen Zwischenspeicher, um die Schwankungen zwischen Angebot und Nachfrage auszugleichen. Die Verwendung von Wasser als Speichermedium hat unter anderem den Vorteil, dass das Speichermedium kostengünstig und in ausreichendem Masse lokal verfügbar und somit ressourcenschonend ist. Die Aufbewahrung des Speichermediums Wasser in Felskavernen hat für den Standort Österreich eine Reihe von technischen und wirtschaftlichen Vorteilen:

- Vom **bautechnischen Standpunkt** aus ermöglicht die Integration des Speichers in den Untergrund, z.B. in Form von Felskavernen, eine Mitaktivierung des umliegenden Gebirges zur Kraftabtragung und erlaubt aufgrund der damit eingesparten Baustoffe für Tragkonstruktion und Auskleidung ein ressourcenschonendes Tragwerk.
- Vom **bauphysikalischen Standpunkt** aus kann der die Kaverne umschließende Fels zur Wärmespeicherung mit aktiviert werden. Inwieweit Dämmschichten im Kavernenausbau zur Beschränkung der Wärmeverluste erforderlich sind, wurde auch im Rahmen dieses Sondierungsprojektes untersucht.
- Vom **städtebaulichen Standpunkt** aus ist für die Errichtung dieser Infrastrukturanlage keine Baulandreserve erforderlich, da der Speicher in bestehende Berge / den Untergrund integriert wird. In den meisten österreichischen Landeshauptstädten befinden sich Stadtberge oder Felsformationen im

Untergrund, die eine Errichtung von großvolumigen Kavernen zentral im Stadtgebiet erlauben.

- Vom **wirtschaftlichen Standpunkt** aus sind österreichische Ingenieurbüros und Bauunternehmen u.a. auch durch die Entwicklung der österreichischen Tunnelbaumethode, international mit führend im Fels- und Untertagebau tätig. Zahlreiche Ingenieur- und Bauleistung im Tunnel- und Stollenbau werden im Ausland erbracht. Gerade für international tätige österreichische Planungs- und Bauunternehmen ist der Untertagebau ein maßgebliches Exportprodukt und ein Kavernenspeicher kann ein weiteres Produkt in dieser Palette darstellen.
- Vom **volkswirtschaftlichen Standpunkt** aus haben diese Untergrundbauwerke den Vorteil, dass deren Lebensdauer 100 Jahre und mehr beträgt und so, wie auch am Beispiel der vielen oft 80 bis 100 Jahre alten Wasserkraftwerksanlagen mit großen Erd- und Untertagebauwerken, die derzeit den größten Anteil an der inländischen Stromproduktion haben, diese langlebigen Infrastrukturanlagen sich nachhaltig positiv auf die volkswirtschaftliche Entwicklung auswirken.
- Vom **gesellschaftlichen Standpunkt** aus ermöglicht ein wirtschaftlicher Großwärmespeicher mit entsprechender Einbindung in die Fernwärmenetze, dass unterschiedlichste Klein und Kleinsterzeugern und Verbrauchern diesen Wärmespeicher als Zwischenspeicher nutzen können und so jeder Einzelne ressourcenschonend, durch die Einsparung unzähliger Kleinstwärmespeicher, Teil des erneuerbaren Wärmeenergiesystems werden kann.

Diese Technologie der Speicherkavernen kann somit aufgrund (i) der geologischen Gegebenheiten im Land mit zentral gelegenen Bergen guter Felsqualität, (ii) dem vorhandenem Wissen in Fels- und Untertagebau mit international tätigen und führenden Ingenieurbüros und universitären Forschungseinrichtungen (iii) der **ressourcenschonenden Anlage in Bezug auf Speichermedium und Speicherbehälter** sowie die potentielle Einbindung jedes Einzelnen in das Wärmespeichersystem als ein Baustein **im Grand Challenge – der Wärmeenergiehende** als derzeit großer gesellschaftlicher Herausforderung bilden und für Österreich durch die Entwicklung von neuen Technologien und Anlagen die internationale Wettbewerbs-fähigkeit stärken.

3 Arbeitspakete im Projekt und deren Ergebnisse

Das Projektziel, die Anwendung von Felskavernen als Großwärmespeicher in Fernwärmenetzen, wurde schrittweise anhand der folgenden fünf Projektteilziele bzw. Arbeitspakete analysiert:

3.1 Arbeitspaket 1: Spezifikation der Rahmenbedingungen für Großwärmespeicher in Fernwärmenetzen

Im Rahmen eines Kickoff-brainstorming Meetings trafen sich alle beteiligten Projektpartner und die Vertreter der beiden Fernwärmenetzbetreiber (Linz AG und Salzburg AG) zum Wissensaustausch.

Dabei werden Randbedingungen wie erforderliche Volumina, Betriebsdrücke, Temperaturspreizungen, Be- und Entladezyklen, Betriebswassereigenschaften, Felseigenschaften, Speichergeometrie und insbesondere erforderliche Speicherhöhen zur Schichtspeicherung und Speicherhöhenlagen für den Gegendruck im Netz diskutiert. Relevante Bandbreiten und Lastfälle wurden festgelegt. Ein Auszug ist in der nachfolgenden Tabelle 1 zusammengefasst. Diese bildete die Grundlage für die Arbeitspakete 2 bis 4. Es wurde explizit auf die konkreten Bedürfnisse von Fernwärmenetzbetreiber eingegangen mit dem Ziel, bei den Betrachtungen in den nachfolgenden Paketen auf realitätsnahe Randbedingungen aufzubauen und die Ergebnisse dieser Forschung gut anwendbar und verwertbar zu machen.

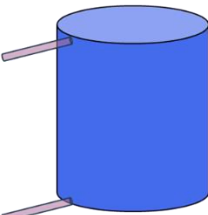
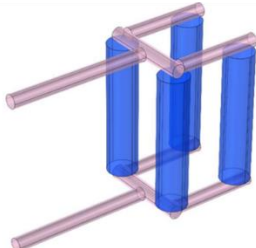
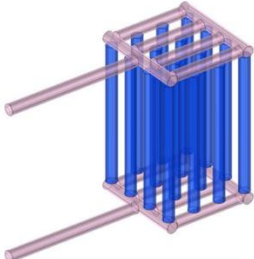
Tabelle 1: Spezifikation der Rahmenbedingungen für Großwärmespeicher in Fernwärmenetzen

Spezielle Anforderungen:	Maßnahmen
Speichervolumen: 30'000 m³ bis 200'000m³ und mehr je nach Lage im Netz; zusammenhängend oder einzeln	Es werden rund 80'000 m³ bis 100'000 m³ pro Speicher angestrebt.
Kosten für Netzzuleitung zum geplanten Standort sind mit rund 3'000 € / lfm teuer.	Kurze Zu- und Ableitungsleitung zum bestehenden Netz -> zentrale Lagen.
Wärmeverluste minimieren	Mind. 100 m Überdeckung angestrebt → idealer Standort: Erhebung mit steilen Flanken für geringen Zugangsstollen und große Überdeckung.
Wärmetauscher sind wartungsintensiv	Eine Wartung im gefüllten und gewärmten Wasserspeicher ist schwierig bzw. teuer, - wartungsintensive Bauteile reduzieren - direkte Anbindung an Fernwärmewassersystem - Nachteil: große Mengen an entsalztem Wasser sind bei Erstbefüllung erforderlich.
Druckniveau der Fernwärmeleitung ist durch bestehendes Netz gegeben.	Höhenlage der Felshohlräume im Gebirge ist somit fixiert.
Bauhöhe >60 m für Gegendruck und um kein „Druckgefäß“ zu werden	Schachtförmige Bauwerke bzw. Spiraltunnel über >60 m Höhe.
Die Temperaturspreizung liegt bei ca. 50 °C bis 65 °C und 97°C Maximaltemperatur.	Baustoffe insb. Auskleidung muss dauerhaft diesem Temperaturniveau standhalten. Dies gilt insb. für eventuelle Auskleidungen.
Warmes und aufbereitetes Fernwärmewasser wird mit 8 €/m³ angesetzt	Wasserverluste können teuer werden: - Geringe Wasserverluste - dichte Auskleidung - Membrane

Darauf aufbauend wurden Kavernengeometrien entwickelt, die einerseits diese Randbedingungen bestmöglich erfüllen und andererseits baubetrieblich und felsmechanisch vorteilhaft bzw. günstig in der Herstellung sind. Je nach Standortgegebenheiten wurden in Summe vier Geometrien identifiziert, die in Tabelle 2 zusammengefasst sind. Der kompakte große Speicher mit rund 40 m Durchmesser und im Minimum 60 m Höhe für Standorte mit guter Felsqualität und beengten Platzverhältnissen. Der Speicher mit großen Schächten von je 18 m Durchmesser und 80 m Höhe für guten Fels und Standorten mit ausreichend Platz kann dieser Speicher beliebig multipliziert und im Parallelbetrieb errichtet werden. Der

Speicher mit „kleinen“ Schächten von 8 m Durchmesser und 100 m Höhe die maschinell im Raise-Drill Verfahren halbautomatisiert errichtet werden. Und schließlich der Spiraltunnel als geeigneter Tunnelachse der in gutem Festgestein bei Spiraldurchmesser von größer ca. 200 m mit einer offenen Gripper-Tunnelbohrmaschine aufgeföhren werden kann.

Tabelle 2: Spezifikation der Rahmenbedingungen für Großwärmespeicher in Fernwärmenetzen

1 großer Schacht: Ø 40 m; H: 60m; V _{ges} : 75'400 m ³	4 große Schächte Ø 18 m; H: 80m; V _{ges} : 81'430 m ³	16 kleine Schächte Ø 8 m; H: 100m; V _{ges} : 80'400 m ³	Spiraltunnel: Ø _{tunnel} 8 m; Ø _{Spirale} 200 m; V _{ges} : 126'500 m ³
			
Konventioneller Schachtbau: zyklischer Sprengvortrieb mit Ver- und Entsorgung nach oben	Konventioneller Schachtbau: zyklischer Sprengvortrieb von oben; Felssicherung; Schutterung über Zielbohrung	Schachtbau in Raise-Drill-verfahren: Schachtdurchmesser durch Baumethode und Felsqualität eingeschränkt; Standfestes Gebirge erforderlich dann teilautomatisiertes Herstellungsverfahren.	Gripper TBM: Günstigste TBM Variante im kompakten Fels. TBM Mindestradius >100 m

Schließlich wurden für die beiden beteiligten Fernwärmenetzbetreiber Standorte in ihrem Netzgebiet identifiziert, die aufgrund der in Tabelle 1 beschriebenen Randbedingungen gut in das bestehende Netz passen. Die vier Standorte für das Fernwärmenetz in der Stadt Salzburg und Umgebung sind in Abbildung 1 dargestellt, gemeinsam mit dem bestehenden Fernwärmenetzplan. Die drei Standorte entlang des östlichen Bergrückens befinden sich in einem Bergzug mit massigem Kalk- und Dolomitstein von gute Felsqualität. Der südlichste Standort liegt etwas außerhalb der Stadt, günstig für die Baustellen Ver- und Entsorgung an der Autobahn gelegen und gleichzeitig nahe an einer der größeren Anlagen aus denen derzeit bereits industrielle Abwärme in das Fernwärmenetz eingespeist wird.

Energieforschungsprogramm - 7. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

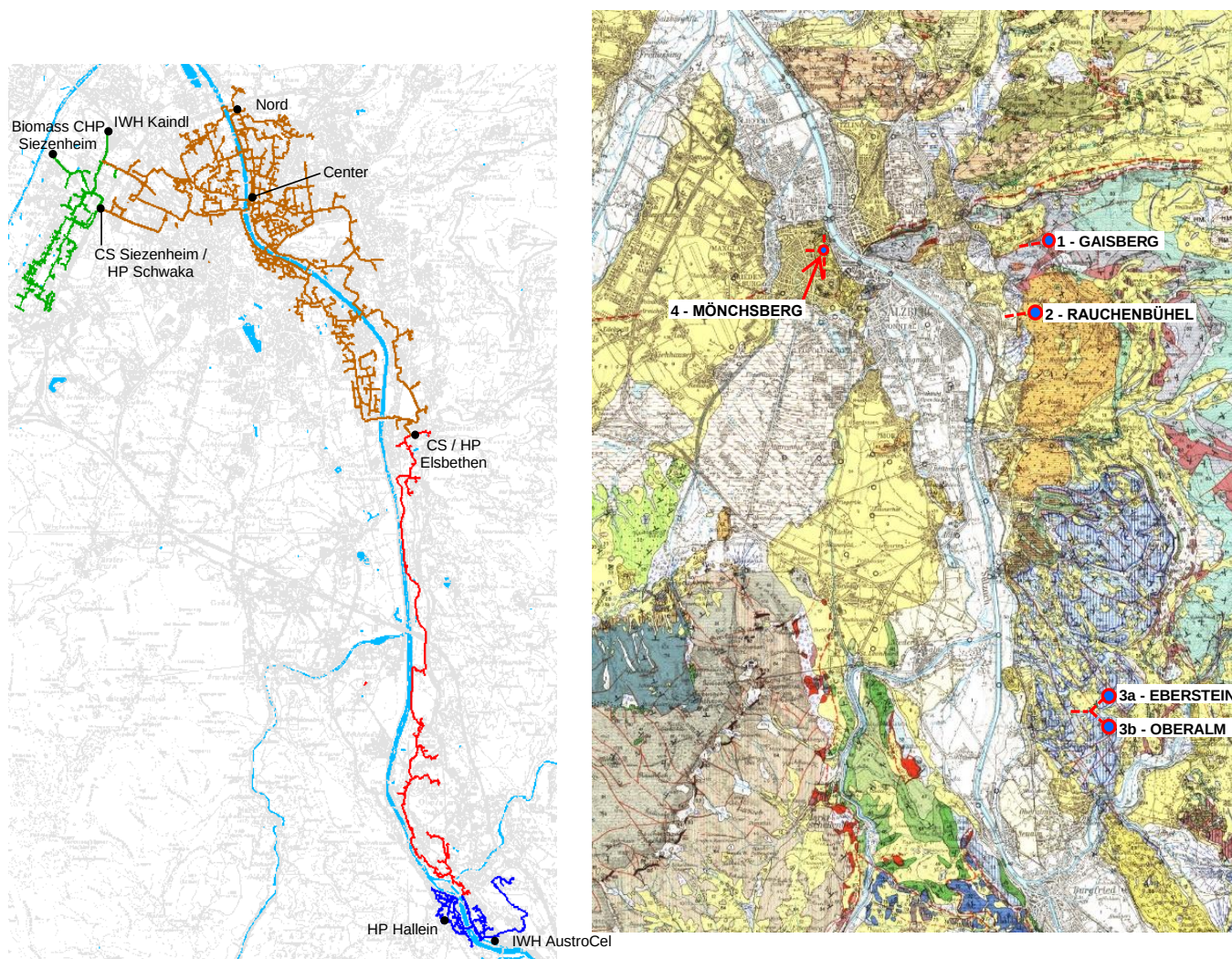


Abbildung 2: Links: Netzplan des Fernwärmenetzes der Salzburg Ag in der Stadt Salzburg und Umgebung; (b) Geologische Karte mit den vier identifizierten Standorten für Großwärmespeicher im Netzgebiet.

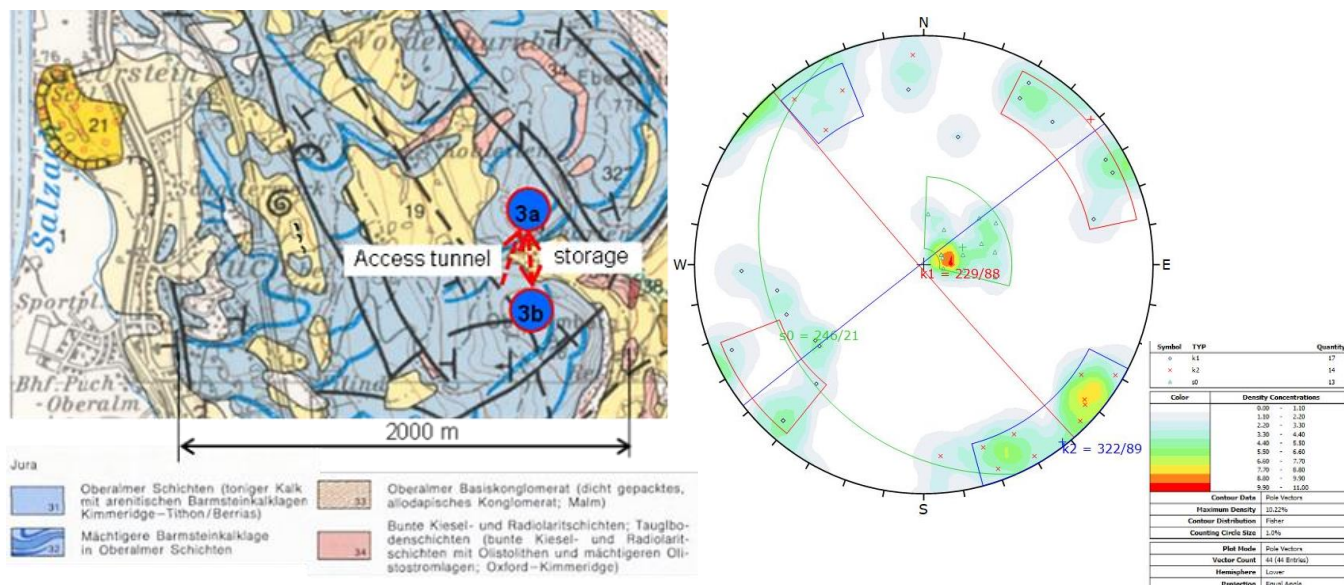


Abbildung 3: Geologische Beschreibung des Standortes 3 in Salzburg.

3.2 Arbeitspaket 2: Felsmechanische Kavernenmodellierung

Für alle 7 identifizierten Standorte (4 in Salzburg und 3 in Linz) wurden die Felseigenschaften definiert und darauf aufbauend je Standort für die vier Hohlraumgeometrien die felsmechanischen Sicherungen für das Hohlraum berechnet. Diese Betrachtung erfolgte in zwei Schritten. Im ersten Schritt wurden die Sicherungsmaßnahmen anhand von Blockkörperbetrachtungen bestimmt. Im zweiten Schritt wurden anhand eines numerischen FE-Modells die zu erwartenden Verformungen im Hohlraum simuliert. Ein typisches Ergebnis ist in Abbildung 4 dargestellt.

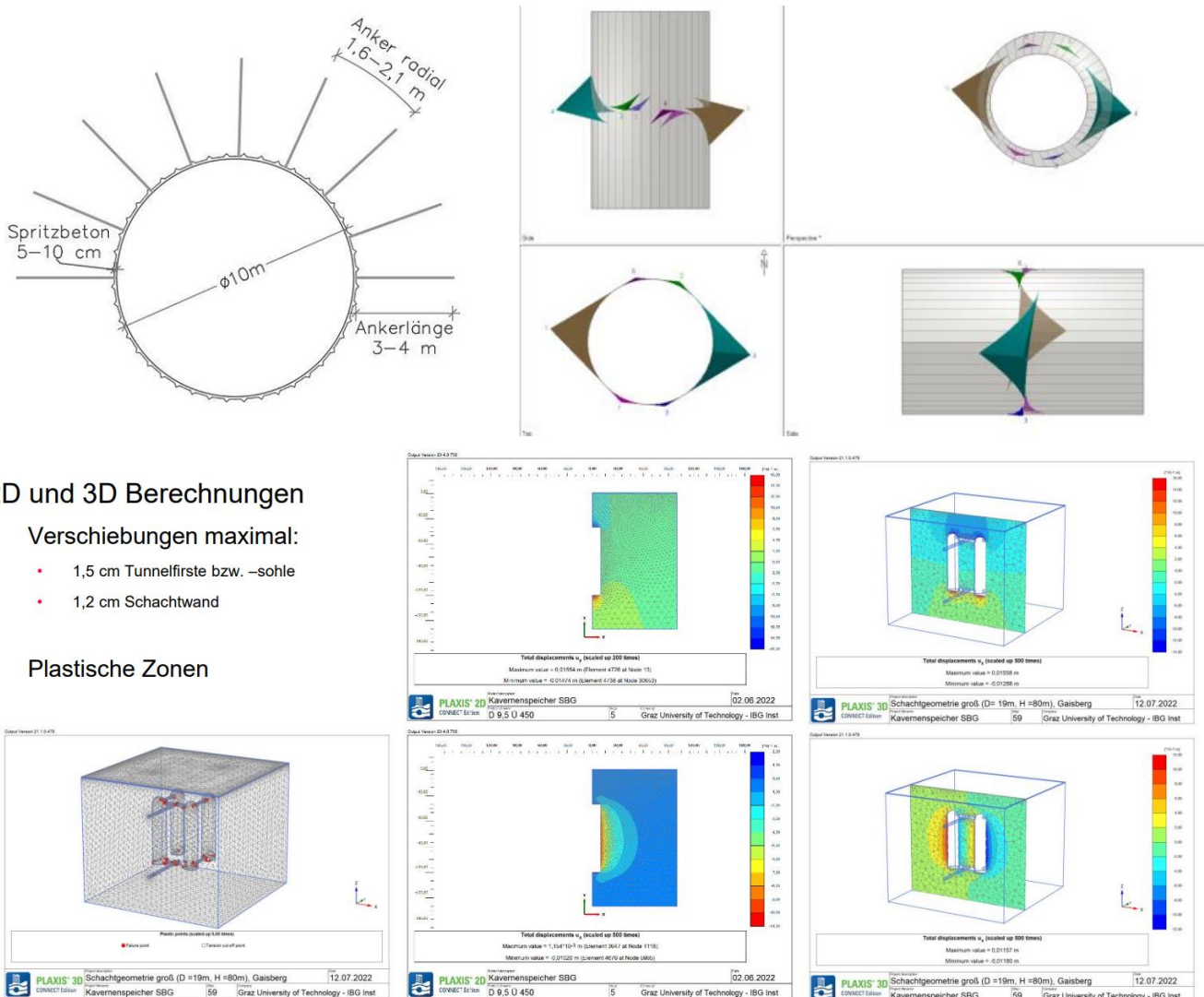


Abbildung 4: Felsmechanische Kavernenmodellierung.

3.3 Arbeitspaket 3: Kavernen - Speicherpreis je kWh

Der Speicherpreis je kWh ist schließlich die Vergleichsgröße, um das Kavernen-Großwärmespeicher-System mit anderen Großwärmespeichern zu vergleichen. Um diesen Vergleich möglichst realitätsnah anstellen zu können, wurden die Kosten basierend auf der felsmechanischen Kavernenmodellierung (AP 2) und den Wärmeverlustberechnungen (AP 4) berechnet. Als Baukosten wurden u.a. (i) der Ausbruch

des Felshohlraumes inkl. Felssicherung sowie allen erforderlichen Nebenanlagen wie Erschließungs- und Lüftungstunnel etc. und (ii) die wasserdichte Auskleidung der Kaverne mit Dichtung und Stahlbeton sowie (iii) die Wärmeübergabeanlagen berücksichtigt. Die Ergebnisse für drei Geometrien ist in Tabelle 3 zusammengefasst.

Die Kostenanalyse der Bauverfahrens hat ergeben, dass bei Volumina von >400'000 m³ mit Baukosten von ca. 150 bis 170 €/m³ Speichervolumen zu rechnen ist. Die Zuleitungskosten und technische Ausrüstungen für die Wärmeeinleitung und Entnahme wurden als Pauschale basierend auf Angaben der Kooperierenden Fernwärmenetzbetreiber Salzburg AG und Linz AG angesetzt.

Tabelle 3: Kostenschätzung Stand 11/2022

		4 große Schächte V = 81'430 m ³	16 kleine Schächte V = 80'425 m ³	Spiraltunnel V = 262'454 m ³
Kavernenaushub	€	3 134 080	2 534 027	16 183 952
Felssicherung	€	1 719 080	3 216 991	9 465 216
Oberflächenabdichtung	€	1 176 212	1 608 495	5 048 115
Technische Ausrüstung	€	368 447	270 000	1 634 723
Erstfüllung (Entsalzenes Wasser mit 97°C)	€	651 441	643 398	2 099 630
Zufahrtstunnel Länge 690 m Ø 7 m	€	3 000 777	1 420 769	-
SUMME Baukosten	€	10 050 037	9 693 680	34 431 636
Baukosten per m ³	[€/m ³]	123	121	131
Planungskosten	€	502 502	413 646	1 634 600
Umweltmaßnahmen	€	500 000	500 000	500 000
Anschluß zum Fernwärmenetz	€	1 000 000	1 000 000	1 000 000
Gesamtkosten	€	12 052 538	11 607 326	37 566 236
Gesamtkosten pro m ³	[€/m ³]	148	144	143
Amortisation				
Jährliche Wärmeverluste	[kWh/m ³]	16,30	21,50	39,70
Finanzierungskosten (0,5%)	[€/a]	60 262,69	58 036,63	179 133,03
Unterhaltskosten	[€/a]	100 000,00	100 000,00	100 000,00
Wärmeladung: 2-Mal/Jahr	[GWh]	7,93	7,80	25,57
Wärmeverluste / Jahr	[GWh]	1,33	1,73	10,42
Verbleibende Wärmemenge	[GWh]	6,61	6,07	15,15

Zur Betrachtung der Wirtschaftlichkeit sind auch die Wärmeverluste aus dem Speicher finanziell zu bewerten. Deshalb wurden im Arbeitspaket 4 die Wärmeverluste aus den Kavernenspeichern für die im Arbeitspaket 1 ermittelten Temperaturgradienten und Wärmeleiteigenschaften des Felses mittels numerischer Modellsimulation bestimmt. Um beurteilen zu können, ob mit dieser Bauweise als Kavernenspeicher ein wirtschaftlicher Betrieb möglich sein kann wurden für den Wärmebezug / die Wärmeproduktion und die Wärmeabgabe Preisspannen von 0,02 bis 0,06 €/kWh und 0,10 bis 0,20 €/kWh angenommen, die zum Projektzeitraum 2022 realistisch wäre. Damit konnte ein Speicherpreis von rund 0,10 €/kWh bei 25 Jahren Anlagenamortisationsdauer berechnet (Tabelle 4).

Der Speicherpreis je kWh, ist eine gute Vergleichsmöglichkeit zwischen verschiedenen Großwärmespeichersysteme. In dieser Berechnung wurden Berücksichtigung: (a) die Herstellungskosten für den Hohlraum inkl. Erschließung; (b) einer Pauschale für den technischen Ausbau zur Be- und Entladung des Speichers; (c) die Kosten für die Wärmeverluste im Betrieb (d) die Unterhaltskosten und (e) die Finanzierungskosten. Die größte Kostenkomponente, die Herstellungskosten für den Hohlraum,

wurde zur Plausibilitätskontrolle mit drei Methoden berechnet. Alle Berechnungen für alle drei Speichergeometrien ergaben einen Speicherpreis von rund 0.10 €/kWh mit einem Schwankungsbereich von ca. $\pm 10\%$ je nach Modellannahme. Die Berechnungen sind im Detail im Paper Messerklinger, S., Smaadahl, M. und Saurer, E. (2023) beschrieben.

Tabelle 4: Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für die Kavernengeometrie von 4 großen Schächten - Stand 11/2022.

4 große Schächte DM 18 m	Verkaufspreis der Wärmeenergie [€/kWh]		
	€ 0,10	€ 0,15	€ 0,20
Wärmeeinkaufspreis [€/kWh]	jährlicher Gewinn [€]		
0,02	341 770	672 132	1 002 494
0,06	24 388	354 750	685 112
	Amortisationszeit [Jahre]		
0,02	35	18	12
0,06	494	34	18
Speicherpreis pro kWh für 25 Jahre Amortisationsdauer			€ 0,097

3.4 Arbeitspaket 4: Modellierung der Temperatursausbreitung im Berg

Die Modellierung der Temperatursausbreitung im Berg war einerseits für die wirtschaftliche Bewertung der Wärmeverluste über die Betriebsdauer und deren Berücksichtigung im Speicherpreis erforderlich, andererseits war das Modell, und die Berechnung diverser Lastfälle, auch sehr aufschlussreich für das bessere Verständnis der Interaktion zwischen Wärmespeicherkaverne und umgebenden Felsuntergrund.

Die numerische Modellierung erfolgte mittels COMSOL Multiphysics. Dazu wurden im FEM die Kavernenmodelle erstellt. Exemplarisch ist das Modell mit 4 großen Schächten in Abbildung 5 als 3D Ansicht dargestellt. Für das Speichermedium Wasser wurden drei unterschiedliche Temperaturszenarien über das Jahr und über die Speicherhöhe simuliert (Tabelle 5).

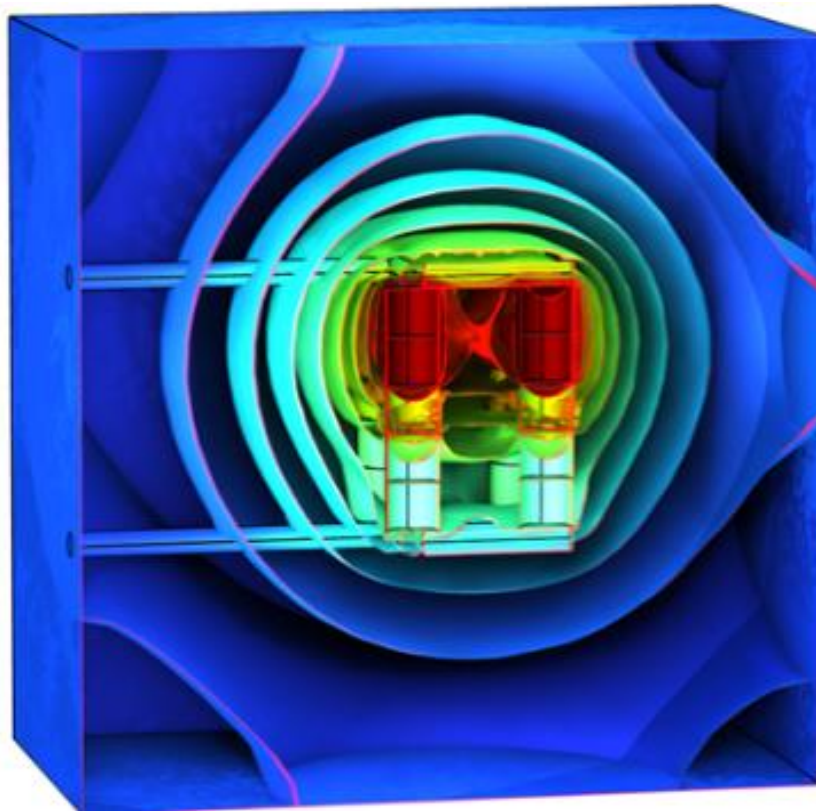
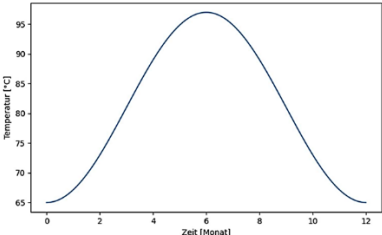
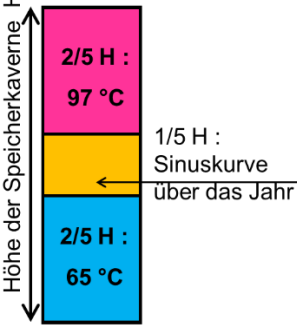


Abbildung 5: COMSOL Multiphysics Modell für 4 große Schächte mit der berechneten Temperaturverteilung nach 100 Betriebsjahren bei 97°C (Szenario 3).

Als Temperaturszenario 1 wurde angenommen, dass die Temperatur in der gesamten wassergefüllten Kaverne das ganze Jahr über alle Betriebsjahre konstant 97°C beträgt. Das entspricht dem Maximalszenarium für die Verluste. Im Temperaturszenario 2 wurde über das Jahr ein sinusförmiger Temperaturverlauf zwischen der minimalen Temperatur von 65°C und der maximalen Temperatur von 97°C angesetzt. Dieses Szenario repräsentiert einen Be- und Entladezyklus pro Jahr. Im Temperaturszenario 3 wurde eine Schichtspeicherung simuliert indem der Speicher in fünf Teile geteilt wurde. Die oberen 2/5tel wurden mit 97°C simuliert und die unteren 2/5tel mit 65°C. Im mittleren 1/5tel wurde die Sinusförmige Temperaturänderung zwischen 65°C und 97°C wie in Szenario 2 angesetzt.

Tabelle 5: Simulierte Temperaturszenarien im Kavernenspeicher.

Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
Maximalszenario Konstant 97°C Maximalszenario für: Wärmeausbreitung und Wärmeentzug	Vereinfachte Simulation vom Speicherbetrieb 65°C – 97°C – 65°C Winter – Sommer – Winter 	Schichtspeicherung 

Im numerischen COMSOL multiphysics Modell wurde die Temperatursausbreitung im Fels modelliert, wobei dem Fels unterschiedliche Wärmeleitfähigkeiten zwischen 2.2 und 3.6 W/(m*K) zugewiesen wurden. Aus den Temperaturänderungen der Elemente über eine gewisse Zeiteinheit (Jahre) wurden die Energieverluste aus der Speicherkaverne berechnet (siehe auch Messerklinger & Smaadahl, 2024).

In Abbildung 6 sind diese Ergebnisse für die drei Kavernengeometrien und das Temperaturszenario 1 (Maximalszenario) über 100 Betriebsjahre dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass nach den Anfangsverlusten für die Aktivierung des Gebirges sich nach ca. 20 Jahren ein annähernd linearer Wärmeverlust über die Zeit einstellt.

Für eine bessere Vergleichbarkeit und um auch die Anfangsverluste mitzuberücksichtigen, wurden die Wärmeverluste als Mittelwert über 100 Betriebsjahre berechnet. Diese sind in den Tabellen 6 bis 8 für die Temperaturszenarien 1 bis 3 jeweils für die drei Kavernengeometrien aufgelistet. Die Ergebnisse zeigen, dass die Größten Wärmeverluste für die Spiraltunnelgeometrie zu erwarten sind, weil dabei das Verhältnis Kavernenoberfläche zu Kavernenvolumen ungünstig ist und große Felsvolumen zwischen den einzelnen Tunnel liegen. Je kompakter die Kavernengeometrien sind und umso weniger Fels als aufzuwärmende Masse zwischen den Speichern liegt, desto geringer sind die berechneten Wärmeverluste. Die geringsten Wärmeverluste wurden für die 4 großen Schächte und Temperaturszenario 3 – Schichtspeicherung – berechnet, mit 15.30 W/(m*K) bis 22.39 W/(m*K) für die Wärmeleitkoeffizienten des Felses von 2.2 bis 3.6 W/(m*K).

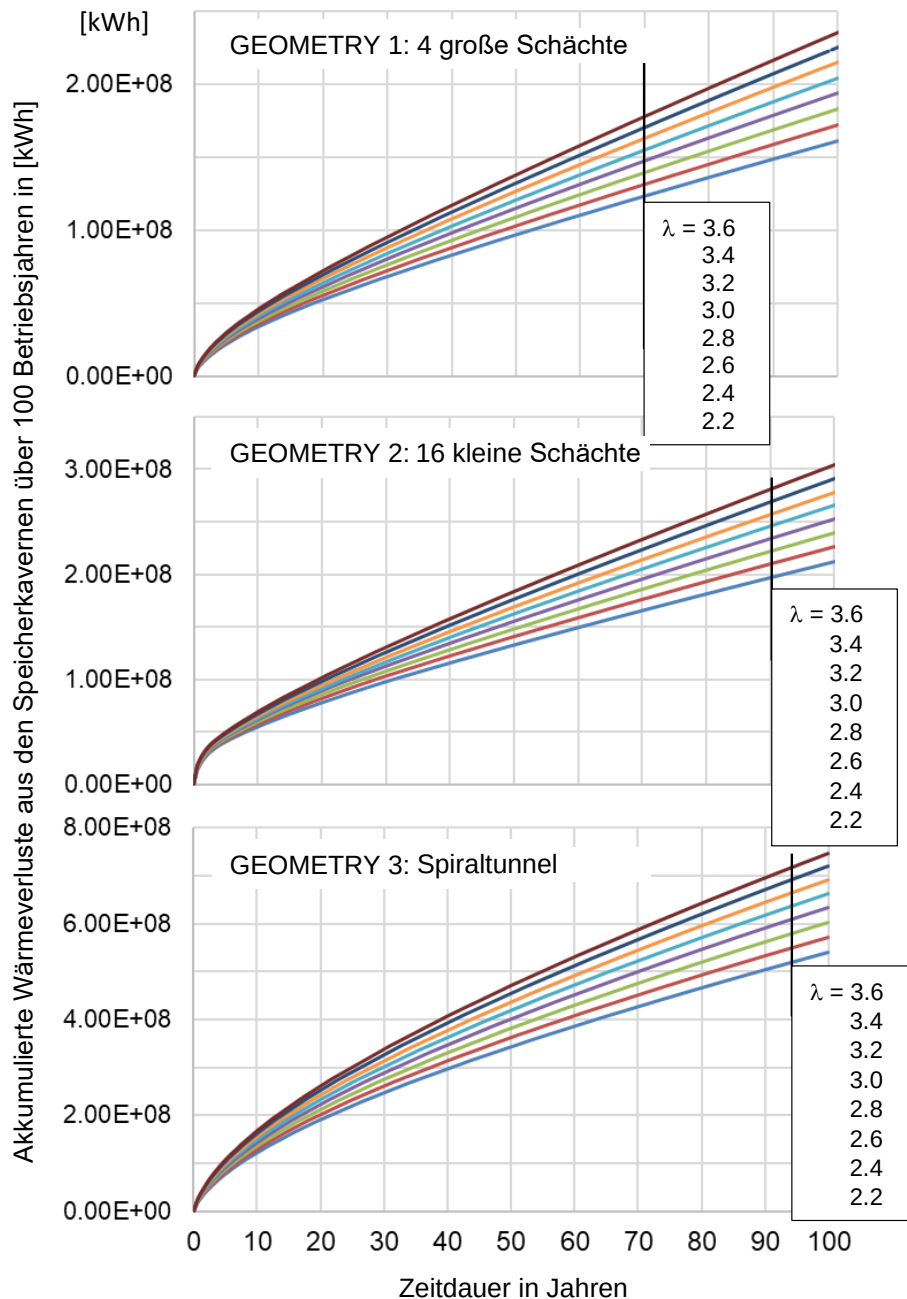


Abbildung 6: Wärmeverluste für Temperaturszenario 1 akkumuliert über 100 Betriebsjahren für unterschiedliche Wärmeleitkoeffizienten λ für das umgebende Gebirge.

Diese Wärmeverluste aus dem Kavernenspeicher wurden mit Wärmeverlusten aus den derzeit verwendeten gedämmten Stahltank verglichen. Das Beispiel des gedämmten Stahltanks der Linz AG mit 34'500 m³ Nutzinhalt und 97°C Betriebstemperatur hat eine Heizleistung von rund 250 kW. Das ergibt Wärmeverluste von rund 63.5 kWh/(m³&Jahr) die rund das drei bis vierfache betragen. Diese Differenz in den Wärmeverlusten wurde auch monetär über das Jahr betrachtet.

Energieforschungsprogramm - 7. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Tabelle 6: Mittlere Wärmeenergieverluste aus den Kavernenspeicher für Temperaturszenario 1 über 100 Betriebsjahren.

Wärmeleitfähigkeit λ	Geometrie 1: 4 große Schächte	Geometrie 2: 16 kleine Schächte	Geometrie 3: Spiral tunnel
W/(m*K)	kWh/m³	kWh/m³	kWh/m³
2.2	19.79	26.43	42.77
2.4	21.14	28.12	45.27
2.6	22.47	29.77	47.71
2.8	23.79	31.42	50.09
3.0	25.10	33.01	52.36
3.2	26.40	34.63	54.69
3.4	27.69	36.23	56.88
3.6	28.95	37.82	59.09

Tabelle 7: Mittlere Wärmeenergieverluste aus den Kavernenspeicher für Temperaturszenario 2 über 100 Betriebsjahren.

Wärmeleitfähigkeit λ	Geometrie 1: 4 große Schächte	Geometrie 2: 16 kleine Schächte	Geometrie 3: Spiral tunnel
W/(m*K)	kWh/m³	kWh/m³	kWh/m³
2.2	16.29	21.55	34.94
2.4	17.39	22.94	36.97
2.6	18.43	24.30	38.95
2.8	19.49	25.63	40.88
3.0	20.56	26.95	42.78
3.2	21.65	28.27	44.72
3.4	22.67	29.57	46.55
3.6	23.93	30.88	48.38

Tabelle 8: Mittlere Wärmeenergieverluste aus den Kavernenspeicher für Temperaturszenario 3 über 100 Betriebsjahren.

Wärmeleitfähigkeit λ	Geometrie 1: 4 große Schächte	Geometrie 2: 16 kleine Schächte	Geometrie 3: Spiral tunnel
W/(m*K)	kWh/m³	kWh/m³	kWh/m³
2.2	15.30	20.21	37.47
2.4	16.34	21.51	39.67
2.6	17.37	22.80	41.85
2.8	18.38	24.04	43.92
3.0	19.41	25.31	46.03
3.2	20.39	26.53	48.04
3.4	21.41	27.73	50.00
3.6	22.39	28.97	51.85

Zusätzlich wurden Wärmeverlustberechnungen auch für gedämmte Kavernen und Temperaturszenario 1 durchgeführt (Tabelle 9). Dabei wurden Schichten von variabler Dicke am Interface Kavernenwasser und des umgebenden Festgesteins angesetzt. Der Dämmschicht wurde eine Wärmeleitfähigkeit von 0.04 W/(m*K) zugewiesen. Wie aus Tabelle 9 ersichtlich, können mit der Anordnung von Wärmedämmungen die Wärmeverluste aus den Kavernenspeichern nochmals deutlich reduziert werden. Dies ist besonders für eine längerfristige Speicherung von Wärmeenergie, über mehrere Wochen oder Monate, interessant.

Tabelle 9: Mittlere Wärmeenergieverluste aus den Kavernenspeicher für Temperaturszenario 1 über 100 Betriebsjahren bei Anordnung von Wärmedämmschichten.

Dicke der Wärmedämmschicht	Geometrie 1: 4 große Schächte		Geometrie 2: 16 kleine Schächte		Geometrie 3: Spiral tunnel	
m	kWh/m³	%	kWh/m³	%	kWh/m³	%
0	19.8	0	26.5	0	42.8	0
0.01	19.3	2.3	25.7	2.8	41.6	2.8
0.02	18.8	5.0	25.1	5.1	40.3	5.8
0.05	17.4	12.0	23.7	10.6	36.9	13.8
0.075	16.5	16.8	22.5	14.8	34.5	19.3
0.1	15.7	20.7	21.6	18.2	32.4	24.2
0.15	14.2	28.1	20.1	24.0	28.9	32.5
0.2	13.1	34.0	18.8	28.8	26.0	39.2
0.4	10.0	49.7	15.2	42.5	18.5	56.7
0.5	8.9	54.9	13.9	47.5	16.2	62.1

Auch der Effekt der Skalierung der Anlage wurde im Rahmen der numerischen Modellierungen untersucht. Es wurden Raster von 2 x 2 bis 4 x 4 großen Schächten mit Temperaturszenario 3 simuliert. Das System und die Ergebnisse sind in Abbildung 7 und Tabelle 10 dargestellt. Die Berechnungsergebnisse zeigen, dass die Wärmeverluste mit der zunehmenden Anzahl an Speicherkavernen nochmals deutlich sinken.



Abbildung 7: Skizze der Raster.

Tabelle 10: Wärmeenergieverluste aus den Kavernenspeicher für Temperaturszenario 3 bei der Anordnung der großen Schächte in Rastern von 2 x 2 bis 4 x 4 Kavernen.

Anzahl der Kavernen	Gesamtvolumen [m ³]	Gesamte Wärmeverluste [GWh]	Wärmeverluste per m ³ Speichervolumen [kWh/m ³ &year]
Eine Kaverne	20'358	46.44	22.81
2 x 2	81'430	126.54	15.54
3 x 3	183'218	225.36	12.30
4 x 4	325'720	353.73	10.86

Zusammenfassung:

Die Simulationen zeigten:

- Die kompakten Speicher mit gedungenen Geometrien haben die geringeren Wärmeverluste.
- Die Verluste in den ersten 10 bis 20 Betriebsjahren sind am größten, weil das Gebirge „aufgewärmt“ wird, dann bekommt man einen „Wärmepuffer“ im Fels rund um den Speicher und die Wärmeverluste nehmen stark ab.
- Bei einer Mittelung der Verluste über 100 Betriebsjahre hat sich gezeigt, dass die Wärmeverluste pro Jahr um rund 25%-40% geringer sind als beim Vergleichsspeicher Stahltank der Linz AG
- Die Simulationen haben auch gezeigt, dass der „Wärmepuffer“ im Fels rund um den Speicher eine stille Reserve darstellt, die bei einem langfristigen Ausfall der Wärmeproduktion teilweise rückgewonnen werden kann.

3.5 Arbeitspaket 5: Abschlussworkshop und Abschlussberichtserstellung

Im Abschlussworkshop trafen sich alle beteiligten Projektpartner und die Vertreter der beiden Fernwärmenetzbetreiber zum Austausch über die neuen Erkenntnisse über die Kavernenspeicher zur Anwendung als Großwärmespeicher. Es werden die Ergebnisse bewertet, potenzielle Anwendungsstandorte studiert und erforderliche weiteren Forschungsthemen zur Optimierung des Systems definiert.

Zusammenfassend wurde festgestellt, dass Großwärmespeicher in Felskavernen eine gute Option für den urbanen Raum darstellen, weil sie unter anderem:

- Kein zusätzliches Bauland benötigen,
- Große Volumina (>100'000 m³ ... bis >400'000 m³) einfach errichtet werden können und
- Die Wärmeverluste bereits ohne Wärmedämmung der Kavernen wesentlich geringer sind als bei den heute verwendeten Stahltanks.

Ein wesentlicher Vorteil der Kavernenspeicher im Fels ist: (a) dass die Temperatur des Felses über den Jahresverlauf gesehen relativ konstant ist, und deshalb gerade in den Wintermonaten geringere Temperaturgradienten zwischen Speicher und umgebendem Felsen vorliegen und (b) dass sich die Temperatur im umgebenden Fels über die Betriebsjahre kontinuierlich erhöht und somit die Temperaturgradienten und die daraus folgenden Verluste aus dem Speicher immer geringer werden.

4 Ausblick und Empfehlungen

Im Abschlussworkshop am 18.07.2023 trafen sich beteiligten Projektpartner und Vertreter der Linz AG zum Austausch über die neuen Erkenntnisse über die Kavernenspeicher zur Anwendung als Großwärmespeicher. Es wurden die Ergebnisse bewertet, potenzielle Anwendungsstandorte studiert und erforderliche weiteren Forschungsthemen zur Optimierung des Systems definiert.

Insbesondere diskutiert wurden:

- Abdichtungsmethoden des Speichers.
- Kosten der Speichererrichtung: Um die Baukosten enger eingrenzen zu können sind insbesondere die geologischen Verhältnisse und das Bauprogramm mit Bauverfahren, Materiallogistik, Befüllprogramm, etc. noch weiter zu bearbeiten:

5 Literaturverzeichnis

Messerklinger, S. und Smaadahl, M. (2022). „Kavernen als Großwärmespeicher in Fernwärmenetzen“ 11. GEOTECHNIK FACHTAGUNG: Geotechnische Herausforderungen in der Tiefen und Oberflächennahen Geothermie. 25. November 2022, Rapperswil CH.

Messerklinger, S., Smaadahl, M. and Saurer, E. (2023). „Shafts and spiral tunnels for large heat storages – an economic study on ideal Geometries“ World Tunnel Congress (WTC2023), Athen. May 15th-18th.

Messerklinger, S., Smaadahl, M., Pötsch, D., Rabaiotti, C. and Saurer, E. “Large rock caverns for heat storage in district heating networks – A comparative study for the city of Salzburg” 15th ISRM Congress 2023 & 72nd Geomechanics Colloquium. Schubert & Kluckner (eds.), Oct. 19th-14th 2023, Salzburg, p. 2746-2751.

Zelzer, S., Geisler, T. and Marcher, T. (2023). „A guidance for the optimal site location of Cavern Thermal Energy Storage (CTES)”. 15th ISRM Congress 2023 & 72nd Geomechanics Colloquium. Schubert & Kluckner (eds.), Oct. 9th-14th 2023, Salzburg, p. 2801-2806.

Messerklinger, S. und Smaadahl, M. (2024). Large thermal heat Storages in rock caverns – Numerical Simulation of heat losses to the surrounding Rock for three Cavern Geometries. Journal Geomechanik und Tunnelbau - Geomechanics and Tunnelling. Accepted.

Messerklinger, S. und Smaadahl, M. (2024). Kavernen als Wärmespeicher – Randbedingungen und Herausforderungen. 38. Christian Veder Kolloquium, 04. und 05. April 2024, Graz.

6 Kontaktdaten

FH-Prof. DDI Dr. sc. Sophie Messerklinger
Fachhochschule Oberösterreich Forschungs-und Entwicklungs GmbH
Adresse: Stelzhamerstraße 23, 4600 Wels
Tel.: +43 5 0804 10; Fax: +43 5 0804 11900
Email: Sophie.messerklinger@fh-wels.at
<https://www.fh-ooe.at>

Dipl. Bau-Ing. Dr. sc. Erich Saurer
SKAVA Consulting ZT-GmbH, Salzburg
Adresse: Bayerhamerstraße 57, 5020 Salzburg
Tel.: +43 660 50 80 367
Email: es@skava.at
<https://skava.at>

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.-Ing. Thomas Marcher /
Institut für Felsmechanik und Tunnelbau, Technische Universität Graz
Rechbauerstraße 12, A-8010 Graz
Tel.: +43 (0) 316 / 873 – 8114; Fax.: +43 (0) 316 / 873 – 8618
Email: thomas.marcher@tugraz.at
<https://www.tugraz.at/institute/fmt/home>