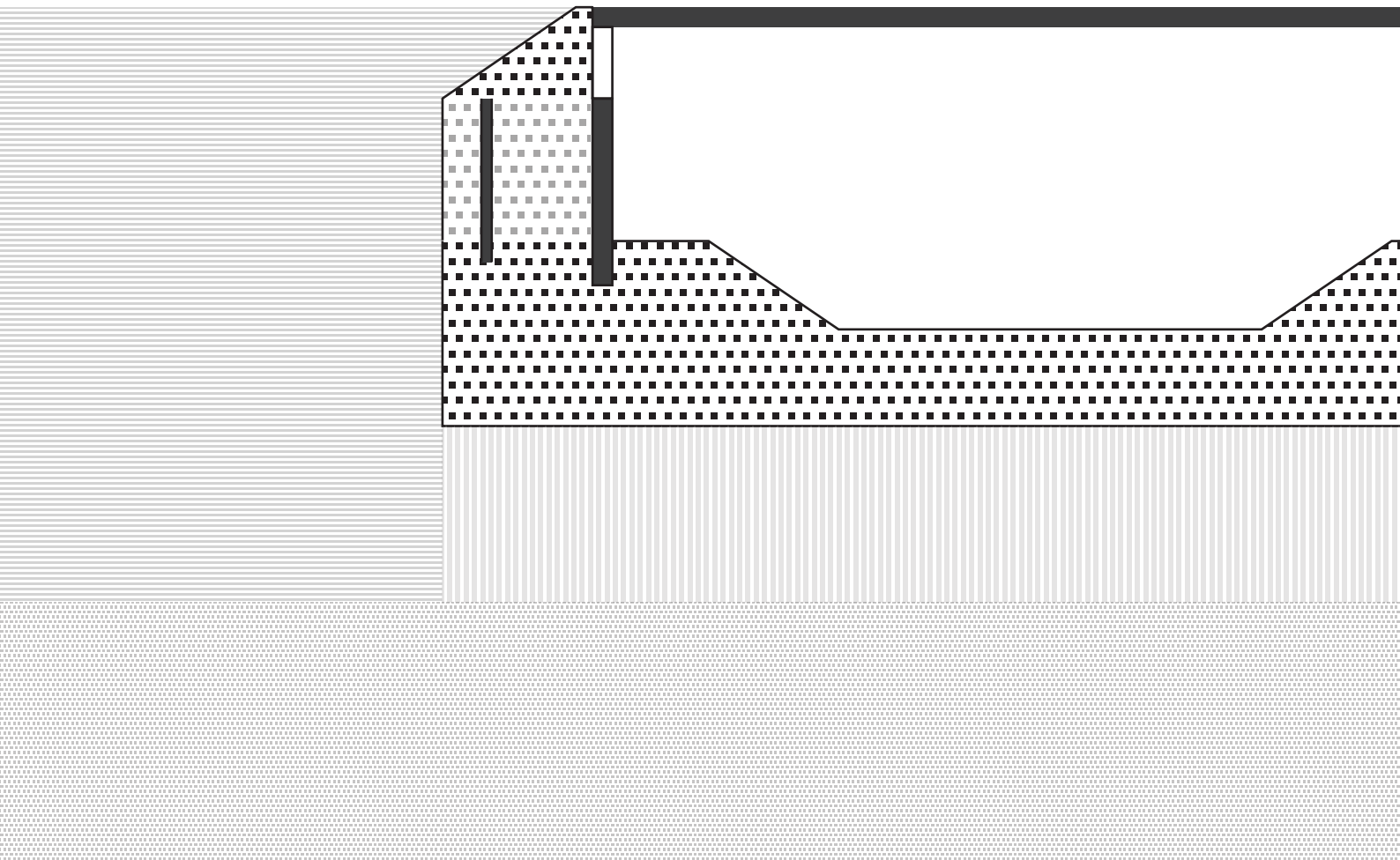




Saisonale Speicher zur Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energien für Distrikte



Ausschreibung	3. Ausschreibung Energieforschungsprogramm
Projektstart	01/01/2017
Projektende	31/08/2021
Gesamtprojektdauer	44 Monate
Projektkoordinator	AEE – Institut für Nachhaltige Technologien
Ansprechpartner	Wim van Helden
Adresse	Feldgasse 19, 8200 Gleisdorf
Telefon	+43 (0)3112 5886
Fax	+43 (0)3112 5886 18
E-Mail	w.vanhelden@aee.at
Website	www.aee-intec.at

Dieses Projekt wird vom Klima- und Energiefonds im Rahmen des Energieforschungsprogramms 2016 gefördert.

Saisonale Speicher zur Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energien für Distrikte

Autoren

AEE INTEC

Wim van Helden, Ingo Leusbrock, Keith O'Donovan,
Michael Reisenbichler, Thomas Riegler, Samuel Knabl
Gernot M. Wallner, Lukas Peham, Robert Pugstaller
Christoph Muser, Petra Drucker
Maria Moser
Fabian Ochs, Alice Tosatto, Abdulrahman Dahash,
Michele Bianchi-Janetti

JKU Linz

ste.p ZT GmbH

SOLID Solar Energy Systems GmbH

Universität Innsbruck

Unterstützt durch

AGRU Kunststofftechnik GmbH

Bilfinger VAM Anlagentechnik GmbH

Gabriel-Chemie Gesellschaft m.b.H.

Geologie und Grundwasser GmbH

GVT Verfahrenstechnik GmbH

Lenzing Plastics GmbH & Co KG

Metawell

PlanEnergi

PORR Bau GmbH Tiefbau

Salzburg AG

Smart Minerals GmbH

Solites

Wien Energie

David Nitsche
Christian Hofer
Jürgen Link, Andreas Höllebauer
Genia Giuliani
Wolfgang Samhaber
Michael Grabmann, Andreas Brandstätter
Martin Paula
Per Alex Sørensen
Felix Kutscha-Lissberg, Peter Kremnitzer
Thomas Herbst
Gerald Maier, Martin Peyerl
Dirk Mangold, Thomas Schmidt
Ernst Höckner

Editor

AEE INTEC

Carina Seidnitzer Gallien

Design & Layout

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	6
1 Einleitung	8
2 Großwärmespeicher - LTES	10
2.1 Großwärmespeicher und Marktentwicklung in der Fernwärme	10
2.2 Wie und wo können LTES eingesetzt werden?	12
2.3 Rahmenbedingungen für den Einsatz von LTES	14
3 Baukonzepte von LTES	17
3.1 Spezielle Tiefbautechniken für LTES	17
3.1.1 Schlitzwand (Schlitzgrabenwand)	17
3.1.2 Überlappende Bohrpfahlwand	18
3.2 LTES Baukonzepte	19
3.2.1 Flacher Beckenspeicher	19
3.2.2 Hybrider Beckenspeicher / Beckenspeicher mit Böschung –tiefer Beckenspeicher	19
3.2.3 Hybrider Behälterspeicher – verankerte Schlitzwand (quadratischer Grundriss) mit geböschtem Aushub	20
3.2.4 Behälterspeicher – verankerte Schlitzwand (quadratischer Grundriss)	20
3.2.5 Zylindrischer Behälterspeicher (zylindrischer Schlitzwandschacht)	20
3.2.6 Baukonzepte im Überblick	22
3.3 Abdeckungskonzepte	23
3.3.1 Schwimmende Abdeckung	23
3.3.2 Eingetauchte Abdeckung	23
3.3.3 Selbsttragende Abdeckung	24
3.3.4 Mockup – druckfeste Wärmedämmung	24
3.4 Wandaufbauten	25
3.4.1 Innenliegende Wärmedämmung	26
3.4.2 Außenliegende Wärmedämmung - Dämmbohrpfahlwand	26
3.4.3 Mock-up Dämmbohrpfahlwand	27
4 Systemanalyse und Fallstudien	28
4.1 Ansätze zur Bewertung auf Systemebene und zur techno-ökonomischen Analyse	28
4.2 Fallstudie Stadt A: Mittelgroßes Fernwärmenetz	31
4.3 Fallstudie Stadt B: Kleines Fernwärmenetz	32
5 Effizienz und Baukosten eines LTES	34
5.1 C ₃ T – Baukostenberechnungs-Tool	34
5.1.1 Eingabedaten	34
5.1.2 Ausgabedaten	36
5.2 Bewertungsergebnisse der Fallstudie: Stadt A	38
5.3 Bewertungsergebnisse der Fallstudie: Stadt B	41
6 Materialentwicklungen	45
6.1 Entwicklung von Abdichtungsmaterialien	45
6.2 Alterungsverhalten von Betonmaterialien	47
6.3 Entwicklung von Polymer/Metall-Hybridlaminaten mit Gasbarriereigenschaften	49

7 Einfluss von Auslegungsparametern auf die Speichereffizienz.....	50
7.1 Realisierung des numerischen Modells für Großwärmespeicher	51
7.2 Detaillierte Simulationsergebnisse	52
7.2.1 Einfluss des Erdreichs.....	52
7.2.2 Einfluss bei größerem Speichervolumen.....	54
7.2.3 Einfluss der Speichergeometrie	55
7.2.4 Einfluss der Wärmedämmqualität.....	56
8 Betrieb und Instandhaltung	58
8.1 Tests in der Inbetriebnahme und Anlaufphase	58
8.2 Monitoring	59
9 Zusammenfassung und Ausblick.....	62
10 Literaturverzeichnis	64
11 Anhang.....	65
12 Kontakt	72

Kurzfassung

Die Überbrückung des Unterschiedes zwischen Wärmeerzeugung und Wärmebedarf in den Sommer- bzw. Wintermonaten und die Steigerung der Flexibilität in Wärmenetzen sind zentrale Fragen für die zukünftige Fernwärmeversorgung und somit der Wärmewende. Hierbei spielen großmaßstäbliche und saisonale thermische Energiespeicher eine äußerst wichtige Rolle. Obwohl sich diese Technologien erst in der Entwicklungsphase befinden, wurden bereits Großwärmespeicher in Dänemark, zur saisonalen Speicherung von Wärmeenergie und zur Erhöhung der Flexibilität des Stromnetzes mithilfe von Power-to-Heat-Anlagen, umgesetzt. Großwärmespeicher (LTES¹) sind eine notwendige Ergänzung in Fernwärmesystemen, um das langfristige Ziel von 100 % Prozent erneuerbarer Energie zu erreichen. Die Herausforderung für das dreijährige Leitprojekt *gigaTES*, das vom österreichischen Klima- und Energiefonds gefördert wurde, bestand in der Entwicklung von Material- und Baukonzepten, der Evaluierung der Effizienz von Großwärmespeichern und deren Wechselwirkungen mit der Umwelt sowie der Untersuchung der Integrationsmöglichkeiten von Großwärmespeichern in Fernwärmesystemen in ganz Österreich.

Dies geschah mit einem Team aus Unternehmen entlang der gesamten Wertschöpfungskette für Großwärmespeicher sowie mit nationalen und internationalen Forschungsinstituten. Ziel war es, alle diese Grundlagen für einen nächsten Schritt zu erarbeiten: ein erstes Demonstrationsprojekt.

Die bereits bestehenden Großwärmespeicher, die sich hauptsächlich in Dänemark befinden, bildeten die Grundlage für das Forschungsprojekt und erweisen sich mit spezifischen Investitionskosten von nur 30 € pro Kubikmeter Wasseräquivalent als eine sehr anspruchsvolle Ausgangsbasis, die es zu optimieren gilt. Das ist umso schwieriger, da die Rahmenbedingungen in Österreich anspruchsvoller sind: In einem urbanen Umfeld können große Speichervolumina nur dann realisiert werden, wenn tief gebaut wird, um den Flächenverbrauch zu minimieren. Hinzu kommen hydrogeologische Herausforderungen wie Grundwasserströmung und Vorschriften zur Wasserqualität, die eine Wärmedämmung oder Abschirmung vom Grundwasser notwendig machen und die Kosten in die Höhe treiben. Diese schwierigen Rahmenbedingungen wurden bei den neu entwickelten *gigaTES*-Baukonzepten berücksichtigt. Ein neues, patentiertes Verfahren zur Anbringung eines wärmeisolierenden unterirdischen Speicherringes wurde entwickelt und im kleinen Maßstab getestet. Hinsichtlich der Wichtigkeit der Abdeckung, die durch die geforderte Kombination von Wärmedämmung, Wasserdichtigkeit, Wasserdampfdichtigkeit und Tragfähigkeit die teuerste Komponente darstellt, wurden zwei neue, patentierte Konzepte entwickelt, die eine zusätzliche Nutzung der Oberfläche ermöglichen.

Ein neuartiges Kunststoffabdichtungsmaterial wurde für die Auskleidung von Großwärmespeicher entwickelt, wobei gezielte Tests gezeigt haben, dass bei höheren Temperaturen eine Verdoppelung der Lebensdauer im Vergleich zu bestehenden Materialien für Kunststoffabdichtungen zu erwarten ist.

Im Rahmen des Projekts wurden auch eine Reihe von numerischen Simulationsmodellen entwickelt, mit denen die Funktionsweise optimiert und die Integration des Speichers in ein Fernwärmesystem bewertet werden kann. Parameter, die zur Optimierung herangezogen wurden, sind die Wechselwirkung des thermischen Energiespeichers mit dem umgebenden Erdreich und der Grundwasserströmung, der Einfluss verschiedener Konzepte auf die Wär-

¹ Bitte beachten Sie, dass wir in dieser Publikation die Abkürzung **LTES** - Large Thermal Energy Storage - für die im Projekt entwickelten Speicherkonzepte verwenden, wobei es sich teilweise um unterirdische Erdbeckenspeicher oder unterirdische Tankspeicher oder Kombinationen davon handelt.

medämmung sowohl innerhalb als auch außerhalb des Speichers, das thermodynamische Verhalten des Wassers im Speicher und damit die Speichereffizienz sowie die dynamische, mehrjährige Wechselwirkung des Speichers mit dem Fernwärmesystem.

Die Planung, Auslegung und der Bau eines Großwärmespeichers wird durch eine Vielzahl von Rahmenbedingungen und Einflussfaktoren eingeschränkt. Diese Rahmenbedingungen wurden gesammelt und mit den Aspekten in der Inbetriebnahme und dem Betrieb des Speichers in einem sehr praxisnahen Leitfaden für alle, die über die Realisierung eines thermischen Großspeichers in einem Fernwärmesystem nachdenken, zusammengefasst.

Die Modellierung der Speichereffizienz wurde in das Baukostentool integriert, das die Kosten aller Komponenten, Materialien und Bauprozesse aus der aktuellen Baupraxis enthält, um eine Kostenoptimierung für einen Großwärmespeicher in einem gegebenen Fernwärmesystem zu berechnen. In diesem Bericht werden zwei Fallstudien für eine technisch-wirtschaftliche Analyse skizziert, und die daraus resultierenden Speichergestehungskosten berechnet, welche bereits auf einem guten Preisniveau liegen, aber nicht so niedrig wie bei den umgesetzten dänischen Speichersystemen sind. Dies ist nachvollziehbar, da die Anforderungen an den Bau eines Großwärmespeichers unter mitteleuropäischen Rahmenbedingungen sehr komplex sind.

Das Ziel des gigaTES-Projekts war es, die Demonstration eines Großwärmespeichers für die Fernwärme in Österreich anzuregen. Dieses Ziel wurde erreicht. Es wurde ausreichend Wissen erarbeitet, um einen Speicher und seine Integration in größeren Systemen zu planen, auszulegen und zu testen. Die Herausforderung besteht darin, ein Optimum zwischen den Risiken einer Demonstration und den Kosten für einen Großwärmespeicher zu finden. Die Demonstration müsste Antworten auf Fragen geben, die im Rahmen des Projekts entstanden sind: Was sind die besten und kostengünstigsten Konstruktionsmethoden für die entworfenen gigaTES-Konzepte? Wie ist das langfristige mechanische Verhalten eines gigaTES-Speichers im Untergrund? Was ist die beste Bauweise für eine vertikale Wandabdichtung? Wie verhalten sich die neu entwickelten Materialien in der Praxis? Diese Fragen lassen sich am besten in einem oder mehreren, kleineren Demonstrationsprojekten beantworten. Damit werden auch wertvolle praktische Erfahrungen gesammelt, die die Risiken und Kosten nachfolgender Generationen von größeren Wärmespeichern senken.

Auch international hat das gigaTES-Projekt eine Richtung zur Entwicklung von Großwärmespeichern vorgegeben. In einer Reihe von Ländern, z. B. in Dänemark, Deutschland, den Niederlanden und Polen, werden derzeit Pläne ausgearbeitet, die durch eine koordinierte europäische Zusammenarbeit definitiv gefördert und beschleunigt werden könnten. Darüber hinaus verstärken die verschärften europäischen Ziele zur Reduzierung der CO₂-Emissionen die Notwendigkeit einer raschen Umsetzung von erneuerbaren Wärmequellen in Kombination mit thermischen Energiespeichern, auch im großen Maßstab. Daher werden in den nächsten Jahren, neue Demonstrationsprojekte, neue Konzepte und Integrationsmethoden sowie neue Werkzeuge und Ausrüstungen für Großwärmespeicher entwickelt und umgesetzt werden.

1 Einleitung

Eine Dekarbonisierung des Energiesystems mit 100 % erneuerbarem Anteil, ist nur durch das Zusammenspiel der verschiedenen Energietechnologien möglich. Dies gilt auch für die erneuerbaren Wärmeerzeuger, die eingesetzt werden, um Häuser, Büros und Industrien mit Warmwasser, Raumheizung, industrieller Wärme und Kälte zu versorgen. Voraussetzung dafür ist, dass das Energiesystem mit Speichertechnologien ausgestattet ist, die die Lücke zwischen Angebot und Nachfrage kurz-, mittel- und langfristig schließen und die Flexibilität des Sektors durch die Möglichkeit der Sektorkopplung erhöhen. Während die derzeitigen Speicher ein Volumen von bis zu 200.000 Kubikmetern fassen, benötigen mittlere und große Städte Speicher mit einer Kapazität von mehreren Millionen Kubikmetern. Die aktuellen thermischen Großspeicher verwenden Wasser als Speichermedium, das aufgrund der Einfachheit und geringen Kosten die am häufigsten eingesetzte Technologie ist. Der Großteil der bestehenden Großwärmespeicher wurde in Dänemark realisiert, meist in Verbindung mit kommunalen Fernwärmesystemen. Das Zusammenspiel eines tiefen Grundwasserspiegels und Böden, die meist aus Sand oder leichtem Untergrund/Gestein bestehen, mit niedrigen Grundstückspreisen, ermöglicht in Dänemark die Umsetzung von Großwärmespeichern zu relativ geringen Kosten.

Die Situation in Österreich und Mitteleuropa ist anders. Hier erfordern niedrige Grundwasserspiegel, anspruchsvolle Bodenbeschaffenheit und Fernwärmesysteme in dicht besiedelten Gebieten mit hohen Grundstückspreisen, neuartige Baukonzepte und Materiallösungen für Großwärmespeicher.

Die Erfahrungen aus dänischen und deutschen Speicherprojekten lieferten die wichtigsten F&E-Fragen für das Konsortium. Um die Kosten der Speicher niedrig zu halten, sollte der Betriebstemperaturbereich höher sein und der benötigte Flächenverbrauch minimiert werden, während die Wärmeverluste und der Einfluss auf die Grundwassertemperatur so minimal wie möglich zu halten sind. Daher werden Liner-Materialien benötigt, die höheren Speichertemperaturen standhalten und eine längere Lebensdauer haben. Es sollen Tiefbaukonzepte mit Wärmedämmfunktionalität entwickelt werden sowie Konzepte für den Deckel, die wasser- und wasserdampfdicht, gut gedämmt sowie stabil genug sind, um eine wirtschaftliche Nutzung der Oberfläche zu ermöglichen. Darüber hinaus sind Großwärmespeicher optimal in das städtische Umfeld und in das Fernwärmesystem zu integrieren, und es sollen geeignete Instrumente zur Optimierung von Konzepten, Effizienz und Kosten zur Verfügung stehen.

Aus diesen F&E-Fragen wurden die Hauptziele des gigaTES Projekts formuliert: neuartige Baukonzepte zu entwerfen, neue Materialien zu entwickeln, die Rahmenbedingungen zu bestimmen, die das Speicherkonzept und seine Effizienz in einem Fernwärmesystem technisch und wirtschaftlich beeinflussen, und die Effizienz von Konstruktion, dem Speicher selbst und mit seiner Umgebung sowie mit dem Fernwärmesystem numerisch zu simulieren. All diese Punkte bilden die übergeordnete Zielsetzung, die Umsetzung von großen thermischen Energiespeichern in österreichischen Fernwärmesystemen zu fördern und die Entwicklung in Europa voranzutreiben.

Das gigaTES-Projektteam bestand aus 18 Organisationen aus Industrie, F&E und Energieversorgern, die gemeinsam die gesamte Wertschöpfungskette für Planung, Bau, Integration und Betrieb von großen thermischen Energiespeichern (LTES) abdecken.

Mit dieser Veröffentlichung werden die Ergebnisse des *gigaTES*-Projekts in kompakter Form beschrieben. Sie bietet all jenen, die vor der Herausforderung stehen, einen Großwärmespeicher in ein Fernwärmesystem zu implementieren, eine erste Orientierung über Konzepte, Materialien, Integrationsmöglichkeiten, Effizienz und Kosten. Die Publikation ist wie folgt aufgebaut.

In **Kapitel 2** werden Technologien zur Speicherung großer Wärmemengen vorgestellt und deren Integrationsmöglichkeiten sowie Rahmenbedingungen für eine effektive Auslegung und Umsetzung genannt. In **Kapitel 3** werden die im Projekt *gigaTES* entwickelten Baukonzepte für einen Großwärmespeicher unter österreichischen Bedingungen skizziert. Anschließend wird in **Kapitel 4** die Grundlage für die Auswahl eines geeigneten Speicherkonzepts mithilfe von zwei Fallstudien beschrieben, einschließlich der techno-ökonomischen Analyse und Bewertung.

Im Rahmen des Projekts wurde ein Kostenberechnungstool entwickelt. Mit diesem Tool können die Kostenschätzungen für verschiedene Speicherkonzepte für eine bestimmte Anwendung ermittelt werden. Wie dies für die beiden exemplarischen Fallstudien geschehen kann, wird in **Kapitel 5** dargestellt, sowie eine detaillierte Aufschlüsselung der technisch-wirtschaftlichen Gesamtergebnisse der beiden Fallstudien gegeben. **Kapitel 6** betrachtet die im Rahmen des Projekts entwickelten Materialien, und **Kapitel 7** erklärt die entwickelten numerischen Simulationswerkzeuge zur Bestimmung des Einflusses einer Reihe von Konstruktionsparametern auf die Effizienz eines LTES. Abschließend, fasst **Kapitel 8** die Aspekte, die bei der Einrichtung und dem Betrieb eines LTES in Bezug auf Inbetriebnahme, Monitoring und Wartung wichtig sind, zusammen.

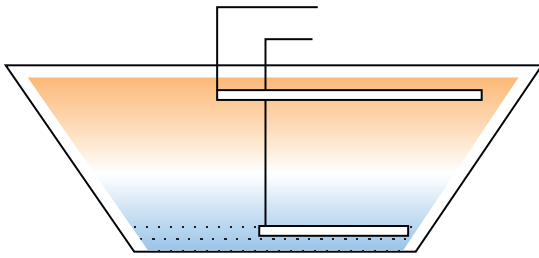
2 Großwärmespeicher

Thermische Speicher als Teil von Fernwärmenetzen sind eine bewährte Lösung zur Überbrückung der zeitlichen Verschiebung zwischen Angebot und Nachfrage und können in Zukunft einen wesentlichen Beitrag zum Ausbau der erneuerbaren Energien in Fernwärmenetzen leisten. Während kleinere Lösungen - sowohl in Bezug auf die thermische Effizienz als auch auf die zeitliche Verschiebung - weit verbreitet sind, sind große thermische Energiespeichersysteme noch selten. Neben der saisonalen Wärmespeicherung von z.B. Solarthermie können Großspeicher entweder als saisonale, kurzfristige oder multifunktionale Wärmespeicher betrieben werden, die eine flexible Speicherung von unterschiedlichsten Wärmequellen ermöglichen, wie z.B. industrielle Abwärme, Geothermie und Power-to-Heat. Eine erfolgreiche Entwicklung von breit einsetzbaren Großspeicherkonzepten und eine zeitnahe Markteinführung ist ein wesentlicher Baustein für unsere zukünftige Wärmeversorgung.

2.1 Großwärmespeicher und Marktentwicklung in der Fernwärme

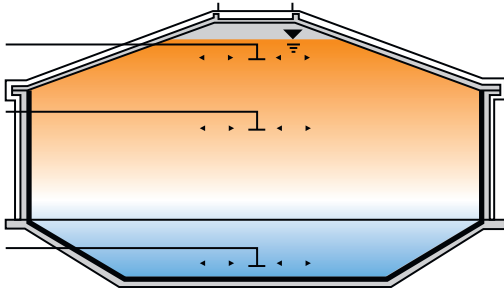
Saisonale thermische Energiespeicher (TES) für Fernwärmesysteme wurden in den letzten 35 Jahren umfassend untersucht. Es gibt vier Grundtypen von großen, saisonalen Wärmespeichern: Erdbeckenspeicher (PTES), Tankspeicher (TTES), Bohrlochwärmespeicher (BTES) und Aquiferwärmespeicher (ATES), die in Tabelle 1 mit ihren Vor- und Nachteilen dargestellt sind. Die Entscheidung für ein bestimmtes Konzept hängt stark von den lokalen Rahmenbedingungen ab, die a) durch die geologischen und hydrologischen Verhältnisse des jeweiligen Standortes und b) durch das individuelle Fernwärmesystem sowie das Temperaturniveau gegeben sind. Während PTES (in Dänemark) und vor allem TTES für die Fernwärmeanwendung zum Stand der Technik zählen, ist die Anwendung von tiefen ATES bisher noch nicht weit verbreitet. Im letzten Jahrzehnt wurde die Speicherung von Wärmeenergie in großen Speicherbecken in Dänemark wirtschaftlich und technisch umgesetzt, siehe dazu [1] und [2].

Tabelle 1: Überblick der Vor- und Nachteile von Technologien für Großwärmespeicher [3]



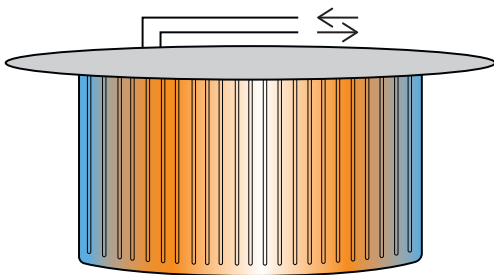
Erdbeckenspeicher (PTES)

- + akzeptable Baukosten
- + mittlere (Kies-Wasser) bis hohe (Wasser) Wärmekapazität
- + nahezu unbegrenzte Größe
- + Thermische Schichtung
- (+) Betriebseigenschaften (mittlere Lade-/Entladekapazität bei Kies-Wasser)
- (-) komplizierte und teure Abdeckung für Wasser
- begrenzte Freiheit bei der Konstruktion (Neigungswinkel)
- Wartung/Reparatur schwierig oder nicht möglich



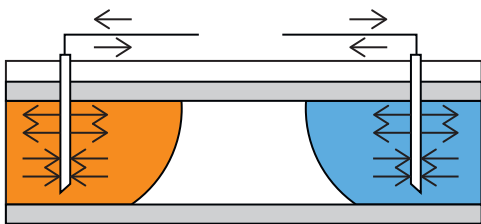
Tankspeicher (TTES)

- + hohe Wärmekapazität (Wasser)
- + gute Betriebseigenschaften (hohe Lade-/Entladekapazität, kann als Pufferspeicher verwendet werden)
- + Freiheit in der Konstruktion (Geometrie)
- + Thermische Schichtung
- (+) Wartung/Reparatur
- (-) begrenzte Größe (< 100.000 m³)
- (-) Primärenergiebedarf
- hohe Baukosten



Bohrlochwärmespeicher (BTES)

- + niedrige Baukosten
- + leicht erweiterbar
- geringe Wärmekapazität
- Betriebseigenschaften (geringe Lade-/Entladekapazität, Wärmepumpe empfohlen)
- eingeschränkte Standortwahl
- keine Wärmedämmung an den Seiten und am Boden möglich
- Wartung/Reparatur schwierig oder nicht möglich



Aquiferwärmespeicher (ATES)

- + sehr niedrige Baukosten
- (+) mittlere Wärmekapazität
- geringe thermische Kapazität
- (-) Betriebseigenschaften (geringe/mittlere Lade-/Entladekapazität, Wärmepumpe empfohlen)
- Standortwahl sehr eingeschränkt
- keine Wärmedämmung möglich, relativ hohe Wärmeverluste

Aktuelle Situation von Fernwärmesystemen

In Dänemark ist die Integration von großen thermischen Energiespeichern ein wesentlicher Bestandteil der Wärmeversorgung von Fernwärmenetzen. Im Gegensatz dazu sind in Österreich derzeit nur kleine TES in die Fernwärmenetze integriert. 14 % des gesamten Wärmebedarfs (22,4 TWh/a), das entspricht 7,4 % des gesamten österreichischen Energiebedarfs für Strom, Industrie und Verkehr, werden in Österreich durch Fernwärme gedeckt [4].

Es wird erwartet, dass der Endenergiebedarf für Raumheizung und Warmwasserbereitung in Österreich von derzeit etwa 100 TWh/a auf 78 TWh/a im Jahr 2025 sinkt, wenn man das aktuelle Strategieszenario zugrunde legt. Wenn man nur Versorgungsgebiete mit einer Wärmedichte von mehr als 10 GWh/km² (basierend auf einem Anschlussgrad von 90 %) als geeignet für die Fernwärmeversorgung betrachtet, ergibt sich ein zusätzliches Potenzial für

Fernwärmeversorgung von 63 TWh/a [5]. Der Großteil der in Betrieb befindlichen Fernwärmenetze besteht aus 2.000 kleinen und mittleren Fernwärmenetzen, die etwa 70 % der gesamten Fernwärmeerzeugung ausmachen. Bei den restlichen 30 % handelt es sich um groß angelegte, städtische Fernwärmenetze in Wien und den größeren österreichischen Städten wie Graz und Linz. Die wichtigsten Energiequellen sind Erdgas, Siedlungsabfälle, Biomasse und industrielle Abwärme. Diese Netze werden in der Regel mit Temperaturen von 80-130°C betrieben und stellen Wärmenetze der 2. und 3. Generation dar. Die kommende Energiestrategie für 2030 unterstützt die großflächige Einführung der Fernwärme. Die Versorgungsunternehmen erwarten daher jährliche Wachstumsraten von etwa 2 % [5] der gelieferten Wärme, was innerhalb von zehn Jahren zu einem Anstieg von etwa 5 TWh führen wird. Aktuelle Herausforderungen sind die Absenkung der Vorlauftemperaturen und die Integration von erneuerbaren Energien und industrieller Abwärme. Große thermische Energiespeicher können hier die Rentabilität der Fernwärmenetze erhöhen, indem sie saisonale Speicherkapazität für reichlich vorhandene Wärme aus erneuerbaren Energien (z. B. Solarthermie) oder industrieller Abwärme im Sommer bereitstellen, und unterstützen somit entscheidend die Dekarbonisierung unserer Wärmeversorgung. Darüber hinaus kann die Wärmespeicherung zu zusätzlichen Pufferkapazitäten bei Last- und Nachfrageschwankungen führen. Eine multifunktionale Strategie von großen thermischen Energiespeichern in Kombination mit anderen Technologien wie Wärmepumpen oder erneuerbaren Energien und der Nutzung flexibler Energieerzeugungspotenziale ist daher für Energie- und Fernwärmeversorgungsunternehmen von großem Interesse. Derzeit werden in Österreich thermische Großspeicher in Form von Tankspeichern hauptsächlich zum Last-/Bedarfsausgleich und zur kurzfristigen Speicherung von Überschusswärme eingesetzt. Praktische Erfahrungen mit saisonalen oder unterirdischen Speichertechnologien sowie mit der Einbindung noch größerer Speichereinheiten in Fernwärmenetze liegen in Österreich derzeit nicht vor.

2.2 Wie und wo können LTES eingesetzt werden?

Große thermische Energiespeicher bieten die Möglichkeit, die zeitliche Lücke zwischen Wärmebedarf und -angebot zu schließen. Von den vier in Abschnitt 2.1 beschriebenen Basistechnologien für thermische Großspeicher kombinieren sowohl PTES als auch TTES prinzipiell eine große Speicherkapazität mit hohen Lade- und Entladeleistungen: Große Volumina können große Energiemengen speichern und sowohl als Kurzzeit- als auch als saisonaler Speicher mit hohen Lade- und Entladeleistungen bis zu mehreren 100 MW dienen. Außerdem können sie höhere Temperaturen speichern und bieten somit grundsätzlich höhere Speicherdichten.

PTES- und TTES-Technologien werden als Ausgangspunkt für den gigaTES-Großwärmespeicher (LTES) verwendet. In dieser Publikation werden LTES als Wasserspeicher mit einem Volumen von mehr als 50.000 m³ definiert, die hauptsächlich unterirdisch gebaut werden und Wärme mit Temperaturen bis zu 95 °C speichern können. Somit eignen sich LTES für die Speicherung von überschüssiger Wärme aus verschiedenen Quellen mit konstantem Versorgungsprofil wie Geothermie und Müllverbrennung oder mit wechselnden und sogar stark fluktuierenden Profilen wie Solarthermie oder industrieller Abwärme (siehe Abbildung 1). Darüber hinaus ist die Integration von Power-to-Heat-Anwendungen wie Wärmepumpen mit LTES möglich, die im Vergleich zu anderen TES-Optionen ein hervorragendes Verhältnis zwischen Kosten und thermischer Speicherkapazität bieten.

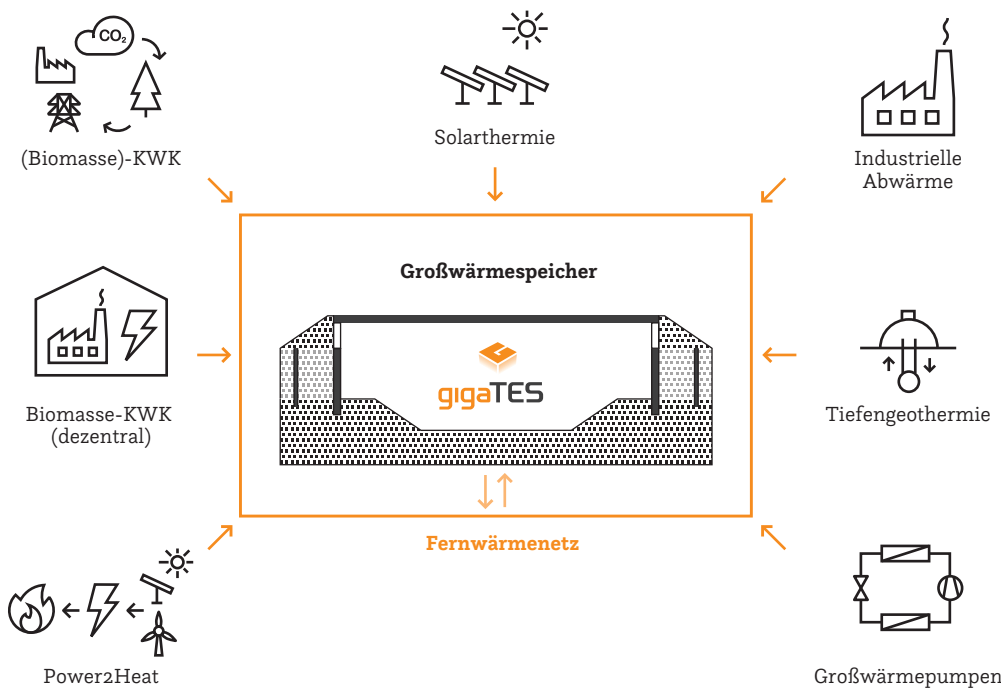


Abbildung 1: Großwärmespeicher als Schlüsseltechnologie in Fernwärmesystemen, die die weitere Nutzung fluktuierender, erneuerbarer Energiequellen ermöglicht und dem Fernwärmenetz sowie dem Stromnetz durch Power-to-Heat Flexibilität verleiht.

Eine saisonale Anwendung eines LTES und dessen Auswirkungen auf die Wärmeversorgung sind in Abbildung 2 dargestellt. Unter der Annahme eines Versorgungsportfolios, das aus Grundlastversorgern wie Geothermie, Müllverbrennung und einem daraus resultierenden Wärmeüberschuss im Sommer sowie Solarthermie besteht, kann dieser Wärmeüberschuss in Zeiten hoher Nachfrage, bei Überschreitung bestehender Spitzenlastkapazitäten und bei wirtschaftlichem Nutzen eingesetzt werden.

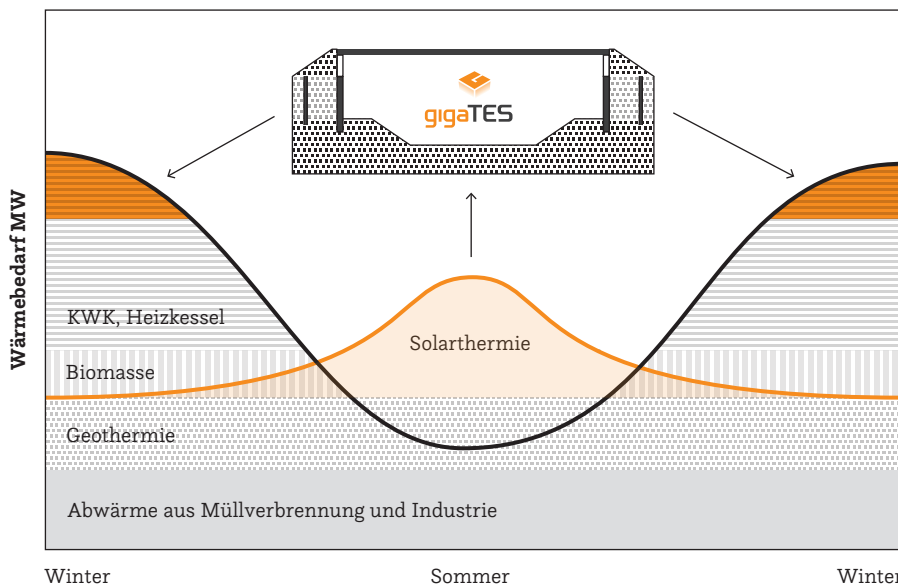


Abbildung 2: Beispiel einer Integration eines Großwärmespeichers mit einem breiten Versorgungsportfolio

LTES-Konzepte, wie sie in gigaTES entwickelt wurden, weisen höhere spezifische Kosten als die dänischen PTES-Anlagen auf (siehe Abbildung 3). Dies ist verständlich, da die österreichischen Rahmenbedingungen anspruchsvoller sind (z. B. Systemtemperaturniveau, (hydro-)geologische Anforderungen). GigaTES Wärmespeicher stehen erst am Anfang ihres technologischen Entwicklungspfad, da noch eine Reihe von Herausforderungen zu bewältigen sind.

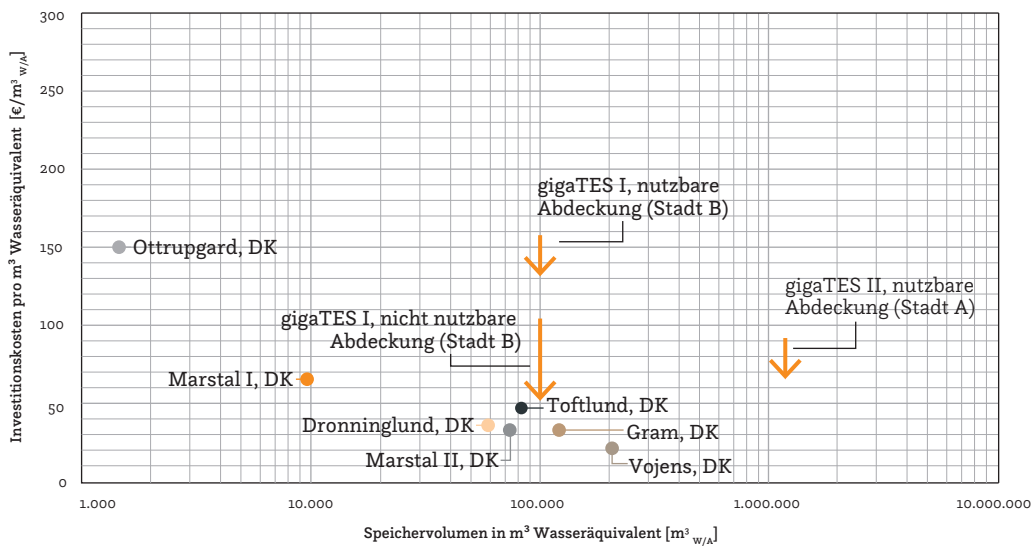


Abbildung 3: Spezifische Speicherinvestitionskosten von PTES-Demonstrationsanlagen in Dänemark (ohne MwSt.) [aus [6]]. Die Kosten sind stark von den spezifischen regionalen Rahmenbedingungen abhängig. Die spezifischen Kosten für LTES, die im Rahmen des gigaTES-Projekts entwickelt wurden, sind in der Abbildung hinzugefügt. (siehe Abschnitt 5.2 und 5.3) Diese Kosten sind noch stärker von den lokalen Gegebenheiten und von der gewählten Bautechnologie, der gewünschten Qualität (Lebensdauer) und der Anwendung des Speichers abhängig. Der Kostenbereich (gekennzeichnet durch die Länge des Pfeils) beruht auf ersten Bewertungen für Pilotprojekte und wird bei Marktreife weiter gesenkt (gekennzeichnet durch den Pfeil nach unten).

2.3 Rahmenbedingungen für den Einsatz von LTES

Wie und wann LTES eingesetzt und realisiert werden, hängt von einer Vielzahl von Rahmenbedingungen ab, die sowohl technische Aspekte wie Betriebsparameter des verbundenen Fernwärmesystems (z.B. Systemtemperaturen) oder (hydro-)geologische Eigenschaften (z.B. Grundwasservorkommen, Flächenverfügbarkeit und Grundstückskosten) als auch organisatorische und administrative Aspekte wie z.B. lokale Planungsvorschriften umfassen. Mehr als hundert Rahmenbedingungen (siehe Abbildung 4) und Einflussfaktoren (siehe Abbildung 5) für einen LTES wurden im Rahmen von gigaTES identifiziert und kategorisiert, siehe Anhang D. Rahmenbedingungen sind in diesem Zusammenhang die durch die tatsächlichen örtlichen Gegebenheiten vorgegebenen Bedingungen, die bei der Projektplanung nicht beeinflusst werden können und daher als vorgegebene Größen verwendet werden müssen. Als Einflussfaktoren werden hier neben den Rahmenbedingungen diejenigen Zustände bezeichnet, die durch eine bestimmte Entscheidung im Projektierungsprozess hervorgerufen werden. Sie müssen in den Planungsschritten berücksichtigt werden, können aber durch Entscheidungen im Planungsprozess aktiv verändert werden. Sowohl Rahmenbedingungen als auch Einflussfaktoren können sich auf die Speicherkennzahlen auswirken.

	Standort <ul style="list-style-type: none"> • Geologische und hydrogeologische Bedingungen • Standortbezogene Bedingungen • Ökologische Auflagen und Bedingungen
	Material <ul style="list-style-type: none"> • Einschränkung von Materialien
	Fernwärme <ul style="list-style-type: none"> • Eigenschaften und Integration in das Fernwärmenetz
	Behörden <ul style="list-style-type: none"> • Regional- & Raumplanung / Flächenverfügbarkeit • Gesetzliche Anforderungen & behördliche Genehmigungen

Abbildung 4: Kategorien der Rahmenbedingungen



Abbildung 5: Kategorien der Einflussfaktoren

In den einzelnen Phasen des Projekts sind unterschiedliche Rahmenbedingungen und Einflussfaktoren relevant. Abbildung 6 gibt einen Überblick über die Rahmenbedingungen und Einflussfaktoren während der Projektentwicklung:

Zu Beginn, in der Konzeptionierung, sind die relevantesten Rahmenbedingungen die Charakteristika des Fernwärmesystems wie Netztemperaturen oder Lastkurven (d.h. die Wärmeerzeugung und die Spitzenlast). Alle diese Eigenschaften haben Einfluss auf die vorgesehene Rolle des Speichers. Mit diesen Rahmenbedingungen und Einflussfaktoren findet die Standortwahl für den Speicher statt. Relevante Rahmenbedingungen sind in dieser Phase sowohl standortbezogene Aspekte als auch Rahmenbedingungen, die das Fernwärmesystem betreffen. Von Anfang an ist es wichtig, auch auf die behördlichen Rahmenbedingungen zu achten. Die Rolle des Speichers und die standortbezogenen Aspekte haben zusammen mit den Aspekten der öffentlichen Akzeptanz und der Umweltverträglichkeit Einfluss auf die Gestaltung des Speichers, folglich auf die bautechnischen Aspekte und die verwendeten Materialien. Die Gestaltung des Speichers hat einen großen Einfluss auf die Investitionskosten und damit auf die Wirtschaftlichkeit. Um mögliche Risiken während des Projekts zu erkennen und Kostentreiber zu identifizieren, ist die Analyse der Rahmenbedingungen und Einflussfaktoren zu Beginn des Projekts entscheidend.

	Auswahl des Standortes	Entwurf & Konstruktion	Inbetriebnahme & Betrieb
Einflussfaktoren	Vorgesehene Rolle des Speichers <ul style="list-style-type: none"> • Temperaturprofile • Lastprofile • Ladung / Entladung • Wärmequellen 	Entwurfs- und Konstruktionsaspekte <ul style="list-style-type: none"> • Tiefbautechnische Anforderungen und Überlegungen • Materialeigenschaften • Öffentliche Akzeptanz 	Betriebssicherheit und Wirtschaftlichkeit <ul style="list-style-type: none"> • Betrieb • Sicherheit und Wartung
Rahmenbedingungen	Integration ins Fernwärmenetz <ul style="list-style-type: none"> • Eigenschaften des FW-Systems • Temperaturprofile • Lastprofile • Abmessungen des Netzes • Ausbaupläne • (Hydro-)geologische Bedingungen 	Besonderheiten des Standorts <ul style="list-style-type: none"> • (Hydro-)geologische Bedingungen • Ökologische Bedingungen • Regional- & Raumplanung • Rechtliche Anforderungen 	

Abbildung 6: Überblick der Rahmenbedingungen und Einflussfaktoren während der Projektentwicklung

Einige Beispiele zeigen, wie diese Rahmenbedingungen die Machbarkeit einer LTES beeinflussen:

- Die hydrogeologischen Verhältnisse am Standort haben direkten Einfluss auf die Investitionskosten, da sie die baulichen Maßnahmen und damit die Kosten definieren; wirken sich aber auch indirekt auf die Geometrie der LTES und die notwendigen Anforderungen z.B. die Wärmedämmung aus (maximal verfügbare Fläche, maximal erreichbare Tiefe, etc.).

- Das angeschlossene Fernwärmenetz bestimmt die Betriebsweise und die Be-/Entladung der LTES und damit die Art des Speichersystems (Kurz- oder Langzeitspeicher). Die Systemtemperaturen haben keinen direkten Einfluss auf die maximale Speichertemperatur, können aber den potenziellen Bedarf an Nachheizung nach der Entladung aus dem Langzeitspeicher sowie die Wahl der Materialien, wie Kunststoffabdichtungsmaterial und Wärmedämmung, bestimmen.
- Die Verfügbarkeit und Finanzierung eines geeigneten Standorts in der Nähe einer FW-Leitung mit ausreichender Kapazität ist entscheidend.

3 Baukonzepte von LTES

Basierend auf bereits umgesetzten Speicherstrukturen in Schweden, Deutschland und Dänemark [6] wurden Baukonzepte entwickelt, mit denen deutlich größere Volumina realisiert werden können, um als Langzeitspeicher zu fungieren. Je näher ein Speicher an der Stadt positioniert ist, desto höher sind die Kosten für den erforderlichen Flächenbedarf und desto wichtiger ist die Nutzbarkeit der Oberfläche während des Betriebs des Speichers.

Aus diesen Anforderungen ergeben sich konzeptionelle Herausforderungen. Um einen möglichst geringen Flächenbedarf zu realisieren, ist eine tiefe Bauweise erforderlich damit das Grundwasser vor Überhitzung geschützt wird und Wärmeverluste vermieden werden. Für unterschiedliche geologische Gegebenheiten sind verschiedene Konstruktionsoptionen entwickelt worden, mit denen bei unterschiedlichen Flächenverfügbarkeiten diverse Volumina realisierbar sind.

Mit den entwickelten Baukonzepten können Lösungen für verschiedene Rahmenbedingungen an unterschiedlichen Standorten realisiert werden, wobei eine Anpassung an den jeweiligen Standort erfolgt. Zusätzlich wurden Konstruktionen für Speicherwände und -abdeckungen entwickelt, die den spezifischen Anforderungen eines LTES gerecht werden. Nachfolgend werden die eingesetzten speziellen tiefbautechnischen Methoden vorgestellt, die für die Umsetzung von LTES-Konstruktionen anwendbar sind. Anschließend erfolgt die Darstellung der möglichen Speicherstrukturen mit ihren Wandaufbauten und Grundwasserhaltungskonzepten. In den beiden letzten Abschnitten werden die verschiedenen Konzepte für die Abdeckung und Wandaufbauten sowie die durchgeführten Mock-Ups näher beschrieben.

3.1 Spezielle Tiefbautechniken für LTES

Für die Umsetzung von großen Volumina ist ein großer Flächenbedarf erforderlich. In einem dicht bebauten, städtischen Umfeld muss der Platzbedarf minimiert werden. Aus diesem Grund sind vertikale Wandbauweisen erforderlich. Zwei der wichtigsten Bauweisen für die Herstellung von vertikalen Baugrubenwänden werden hier kurz vorgestellt.

3.1.1 Schlitzwand (Schlitzgrabenwand)

Durch den Aushub des Bodens im Greifer- oder Fräsverfahren wird ein rechteckiger Schlitz in den Boden eingebracht und eine Stützsuspension, die hauptsächlich aus Wasser und Bentonit besteht, eingefüllt. In weiteren Schritten werden der Bewehrungskorb und eine Anschlussbohle zum angrenzenden Wandelement in den offenen Schlitz eingebaut und anschließend im Kontraktorverfahren mit Beton gefüllt. Durch das Aneinanderreihen der einzelnen Elemente und das Anbringen von speziellen Fugenbändern dazwischen entsteht eine statisch dichte Wand. (siehe Abbildung 7 und Abbildung 8)

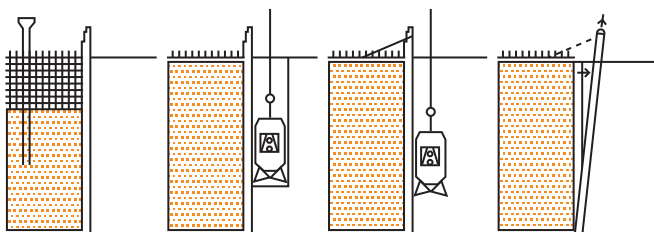


Abbildung 7: Herstellungsphasen einer Schlitzwand [7]



Abbildung 8: Fertige elliptische Schlitzwand - [©PORR]

3.1.2 Überlappende Bohrpfehlwand

Zur Baugrubensicherung können Großbohrpfähle als unterbrochene, zusammenhängende oder überschnittene Pfahlwände eingesetzt werden. Großbohrpfähle werden in der Regel vollverrohrt (siehe Abbildung 9) im Greifer- oder Drehbohrverfahren hergestellt. Nach dem Ausheben des Bohrlochs wird der Bewehrungskorb eingebaut und im Kontraktorverfahren mit Beton verfüllt. Wenn die Bodenverhältnisse es zulassen, können auch sogenannte Endlosschneckenpfähle hergestellt werden. Bei diesem Verfahren wird der Beton direkt über ein Kernrohr eingebracht, während die Endlosschnecke gezogen wird, woraufhin die Bewehrung in die frische Betonsäule geschoben wird.

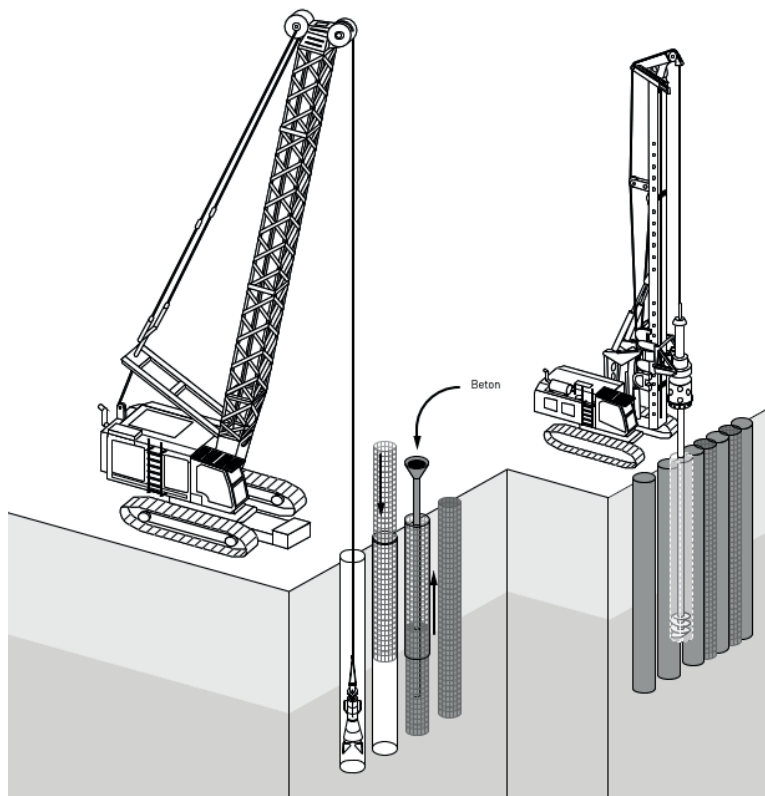


Abbildung 9: Herstellungsverfahren für eine Bohrpfehlwand. Links: vollständig verrohrt Greiferaushub. Rechts: durchgehende Schneckenpfähle. [7]

3.2 LTES Baukonzepte

Nachfolgend wird ein kurzer Überblick über bestehende und neue Bauarten für einen LTES gegeben. Zunächst wird die flache Baugrubenbauweise beschrieben, wie sie heute in Dänemark üblich ist. Dann werden vier neue Tiefspeicher-Bauarten dargestellt, die sich auch für Standorte mit Grundwasser eignen: ein hybrider Beckenspeicher / Beckenspeicher mit Böschung (oder tiefer Beckenspeicher), ein hybrider Behälterspeicher, ein tiefer Behälterspeicher und ein zylindrischer Behälterspeicher.

3.2.1 Flacher Beckenspeicher

Diese Bauweise (siehe Abbildung 10) wird derzeit hauptsächlich in Dänemark ausgeführt. Die Aushubtiefe des Speicherbeckens wird so gewählt, dass die Aushubsohle über dem Grundwasserspiegel liegt und das Aushubmaterial vor Ort als Dammschüttung verwendet werden kann. Das Baukonzept ist sehr einfach und kosteneffizient. Die Anpassung dieser Bauweise an größere Volumina ist jedoch aufgrund des sehr großen Flächenbedarfs nur begrenzt möglich, wie aus der nachstehenden Abbildung hervorgeht (Volumen $1,0 \text{ Mio. m}^3$ - Abmessungen $300 \times 300 \text{ m}$). Da die Kosten für eine wärmeisolierende schwimmende Abdeckung (siehe Kapitel 3.3) sehr hoch ausfallen können, erhöht die große Oberfläche auch die Gesamtkosten der Konstruktion. Außerdem führt das große Verhältnis von Oberfläche zu Volumen zu erhöhten Wärmeverlusten.

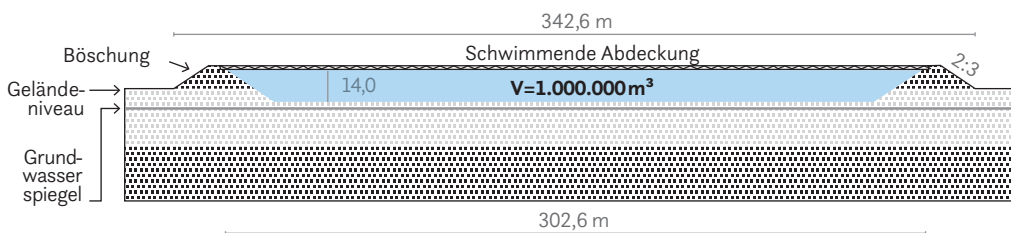


Abbildung 10: Schematische Darstellung eines flachen Beckenspeichers, Beispiel $1,0 \text{ Mio m}^3$ [step©]

3.2.2 Hybrider Beckenspeicher / Beckenspeicher mit Böschung – Tiefer Beckenspeicher

Die Kosten für eine schwimmende Abdeckung, die wärmeisoliert und vollständig zugänglich ist, sind sehr hoch. Um die Fläche der schwimmenden Abdeckung zu verringern, muss die Aushubtiefe vergrößert werden. Ein erster Schritt ist der Aushub einer geböschten Grube. Wenn Grundwasser vorhanden ist, kann eine umgebende Dichtwand oder eine Schlitzwand errichtet werden. Innerhalb dieses Abdichtungsringes wird das Grundwasser mit vertikalen Filterbrunnen niedrig gehalten. Um eine ordnungsgemäße Befestigung der Speicherdeckenkonstruktion an den Seitenwänden zu ermöglichen, muss der oberirdische Teil der Speicherwände senkrecht gebaut werden. Eine mögliche Konstruktion hierfür kann eine freitragende Stützwand sein. Diese wird mit dem Aushubmaterial aufgefüllt und somit das oberirdische Volumen des Speichers vergrößert, wie in Abbildung 11 zu sehen ist.

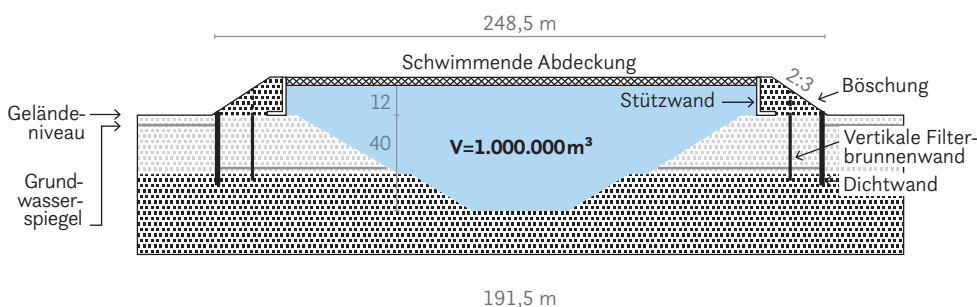


Abbildung 11: Schematische Darstellung eines hybriden Beckenspeichers / tiefer Beckenspeicher mit Dichtwand, Beispiel $1,0 \text{ Mio m}^3$ [step©]

3.2.3 Hybrider Behälterspeicher – Verankerte Schlitzwand (quadratischer Grundriss) mit geböschtem Aushub

Durch die Herstellung vertikaler Speicherwände kann die Fläche weiter verkleinert werden (siehe Abbildung 12). Die vertikalen Speicherwände werden nachdem oben beschriebenen Schlitzwandverfahren errichtet. Um das Grundwasser abzusperren, müssen die Schlitzwände bis in das Aquiclude geführt werden. Im Zuge des Aushubs werden die Schlitzwände mit Erdankern rückverankert, damit sie den Erddruck für die Bauphase bis zur Befüllung des Speichers aufnehmen können. Die umgebende Dichtwand muss einen ausreichenden Abstand zur Schlitzwand haben, um nicht von den Ankern durchdrungen zu werden. Im unteren Bereich kann die Baugrube durch einen geböschten Aushub weiter vertieft werden.

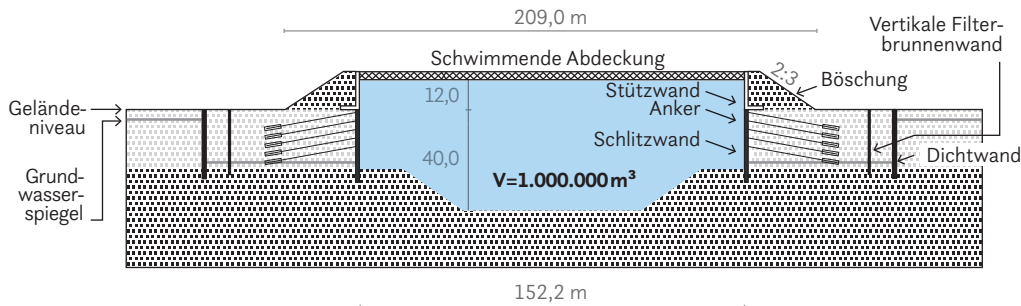


Abbildung 12: Schematische Darstellung eines hybriden Behälterspeichers, Beispiel 1,0 Mio m³ [step©]

3.2.4 Behälterspeicher – Verankerte Schlitzwand (quadratischer Grundriss)

Das optimale Verhältnis zwischen Aushubvolumen und Oberfläche kann erreicht werden, wenn die Speicherwände senkrecht bis zur Aushubsohle reichen. Die Herstellungsgenauigkeit von Schlitzwänden begrenzt jedoch die Tiefe auf ca. 50 m. Diese Bauweise (siehe Abbildung 13) hat auch hohe technische Anforderungen durch die Verankerungen und die zusätzlich zu errichtende Dichtwand bei vorhandenem Grundwasser.

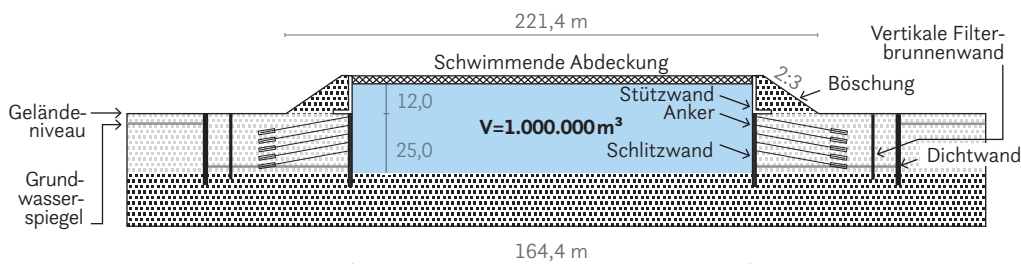


Abbildung 13: Schematische Darstellung eines Behälterspeichers mit verankerter Schlitzwand, Beispiel 1,0 Mio m³ [step©]

3.2.5 Zylindrischer Behälterspeicher (zylindrischer Schlitzwandschacht)

Ein kreisrunder (oder elliptischer) Schlitzwandschacht kann ohne zusätzliche Aussteifungselemente gebaut werden, da die Erddruckkräfte über den Druckring aufgenommen werden können. Der kreisförmige Grundriss wird durch eine polygonale Anordnung von Schlitzwandelementen approximiert. Diese Konstruktion wurde bereits bis zu einem Schachtdurchmesser von 50 m gebaut. Der maximale Durchmesser für solche Schächte ist auf 65 m begrenzt, da bei größeren Durchmessern der Druckring nur sehr schwierig realisiert werden kann. Bei einer maximalen Tiefe von etwa 50 m ist das Volumen dann auf etwa 200.000 m³ begrenzt. In Abbildung 14 ist ein Speicher mit einem Volumen von 100.00 m³ dargestellt. Für die Abdeckung des Speichers sind sowohl eine Schwimmende als auch eine Selbsttragende möglich. Dachkonstruktionen mit einer Spannweite von 65 m sind Stand der Technik und können auch so ausgeführt werden, dass eine geringe Nutzlast möglich ist.

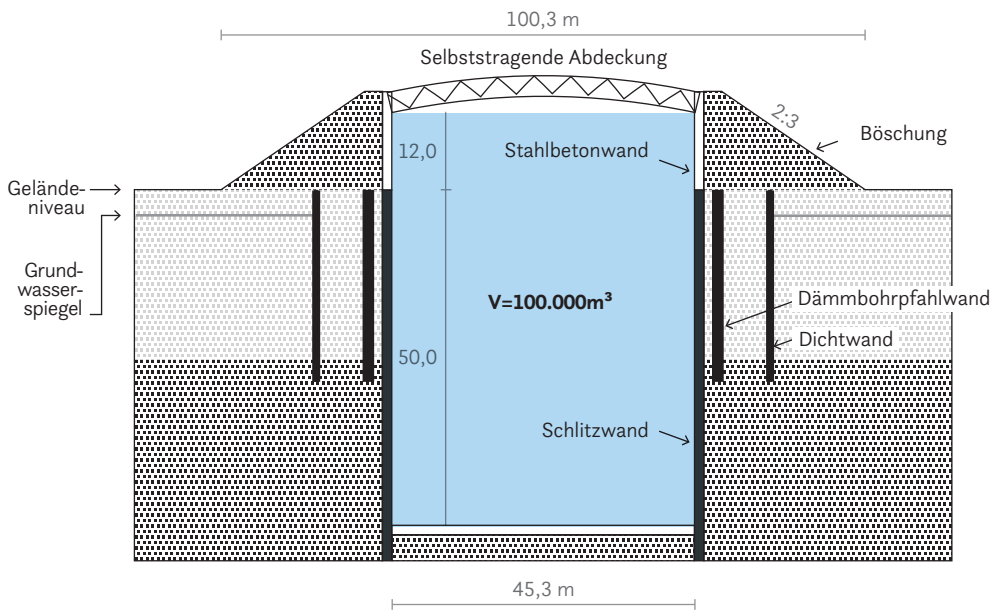


Abbildung 14: Schematische Darstellung eines zylindrischen Behälterspeichers mit selbsttragender Abdeckung, Beispiel 100.000 m^3 [step©]

3.2.6 Baukonzepte im Überblick

Die nachfolgende Tabelle gibt einen Überblick über die allgemeinen und speziellen bautechnischen Eigenschaften der 5 verschiedenen Baukonzepte.

Überblick der Baukonzepte		Flacher Beckenspeicher	Hybrider Beckenspeicher	Hybrider Behälterspeicher	Behälter-speicher	Zylindrischer Beckenspeicher
		Aushub über dem Grundwasser	Becken mit Böschung – Tiefes Becken	Verankerte Schlitzwand mit Sockelböschungen	Verankerte Schlitzwand	Zylindrischer Schlitzwand-schacht
Allgemeine Eigenschaften	Flächenbedarf	sehr hoch (Aushubtiefe, Tiefe des Grundwassers)	hoch (Aushubtiefe, Volumen, Böschungswinkel)	mäßig (Aushubtiefe, Volumen, Geologie, Tiefe des Grundwasserspiegels)	gering (Aushubtiefe, Volumen, Geologie, Tiefe des Grundwasserspiegels)	sehr gering (Speichertiefe)
	Baukosten	gering für Tiefbauarbeiten, hoch für Deckelkonstruktion	mäßig für Tiefbauarbeiten, mäßig für Deckelkonstruktion	hoch für Spezialtiefbauarbeiten, mäßig für Deckelkonstruktion	hoch für Spezialtiefbauarbeiten, gering für Deckelkonstruktion	hoch (hoher Spezialtiefbautechnischer Aufwand bei rel. kleinem Volumen)
	max. Speichervolumen	unbegrenzt	unbegrenzt	unbegrenzt	unbegrenzt	begrenzt auf 200.000m³ , für größere Volumina sind mehrere Tanks erforderlich
	Speichertiefenbeschränkung	Grundwasserspiegel	unbegrenzt	50 m (Schlitzwand)	50 m (Schlitzwand)	50 m (Schlitzwand)
Bautechnische Eigenschaften		flaches Becken mit geböschten Wänden und oberirdisch-geböschtem Erddamm bis zu 15 m	tiefes Becken mit geböschten Wänden mit Bermen und oberirdisch-vertikaler Stützmauerkonstruktion	Kombination aus verankerten oder ausgesteiften, vertikalen Wänden und oberirdisch-vertikaler Stützmauerkonstruktion	tiefer Behälter mit verankerten oder ausgesteiften, vertikalen Wänden und oberirdisch-vertikaler Stützmauerkonstruktion	zylindrischer Behälter als Druckringkonstruktion mit nicht verankerten oder ausgesteiften, vertikalen Wänden und oberirdisch-vertikaler Stützmauerkonstruktion bis 65 m
Schlitzwand		keine	erforderlich (bei vorhandenem Grundwasser)	erforderlich (bei vorhandenem Grundwasser)	erforderlich (bei vorhandenem Grundwasser)	erforderlich (bei vorhandenem Grundwasser)
Aushubaufwand (abhängig von der Aushubtiefe)		gering	gering	mäßig	hoch	hoch
Spezialtiefbau (abhängig von der Aushubtiefe)		keiner	gering	mäßig	hoch	hoch
Aufwand zur Abdeckung (abhängig von der Deckfläche)		sehr gering	sehr hoch	mäßig	gering	gering (optional selbsttragende Abdeckung)
Isolierung		In der Regel nur Abdeckung gedämmt	Abdeckung gedämmt, isolierende Dämmbohrpfahlwand	Dämmung der Böschung möglich	Abdeckung gedämmt, isolierende Dämmbohrpfahlwand	Abdeckung gedämmt, isolierende Dämmbohrpfahlwand
Aufwand für Liner-Arbeiten		gering schräge Baugrubenwand	gering schräge Baugrubenwand	mäßig	hoch vertikale Behälterwand	hoch vertikale Behälterwand
Aufwand für den Rückbau		gering nur Nachfüllung	gering nur Nachfüllung	mäßig Abbau und Nachfüllung	mäßig Abbau und Nachfüllung	mäßig Abbau und Nachfüllung

3.3 Abdeckungskonzepte

Die Gestaltung der Abdeckfläche hat einen erheblichen Einfluss auf die Wärmeverluste. Aus diesem Grund stellt die Wärmedämmung der Oberfläche eine wesentliche Anforderung an die Konstruktion der Abdeckung. Eine weitere wichtige Anforderung ist die Nutzbarkeit der Abdeckung während der Betriebsphase, sodass der hohe Flächenbedarf kompensiert wird. Dies kann eine Begehbarkeit für Fußgänger oder sogar eine Befahrbarkeit für leichten Verkehr sein. Mögliche Lösungen für die damit verbundenen, technischen Herausforderungen, wie die hohe Temperatur des Speichermediums, die Wasserstandsschwankungen, der Temperaturwechsel des Speichermediums und die dynamische Belastung, wurden für die folgenden drei Deckelkonstruktionen untersucht.

3.3.1 Schwimmende Abdeckung

Für die Konstruktion einer schwimmenden Abdeckung (siehe Abbildung 15) wurde ein modularer Aufbau gewählt. Die Module haben eine Größe von 4x4 m und werden vor Ort zusammengeschweißt. Diese Module sind aus rostfreiem Stahl gefertigt und haben jeweils 4 runde Schwimmkörper, die je nach der gewählten Nutzlast größer oder kleiner sein können. Die Wahl des Stahls hängt von der Temperatur des Speichermediums und der Wasserqualität ab. Die Schwimmer sind so dimensioniert, dass ein Hohlraum zwischen der Wasseroberfläche und der Unterseite des Deckels verbleibt. Dieser Hohlraum dient als Druckausgleich. Die Verbindung der Schwimmkörper erfolgt mit einer Schweißnaht. Für die Eckverbindung wird eine patentierte Schweißnaht verwendet, die es ermöglicht, die dynamischen Bewegungen aufgrund von Last- und Temperaturänderungen aufzunehmen. Es wurden Lösungen für eine druckfeste (z.B. Glasschaumschotter) und für eine nicht druckfeste Wärmedämmung (z.B. Steinwolle) entwickelt. Beide Konstruktionen können so ausgelegt werden, dass die gewünschte Nutzlast aufgenommen wird.

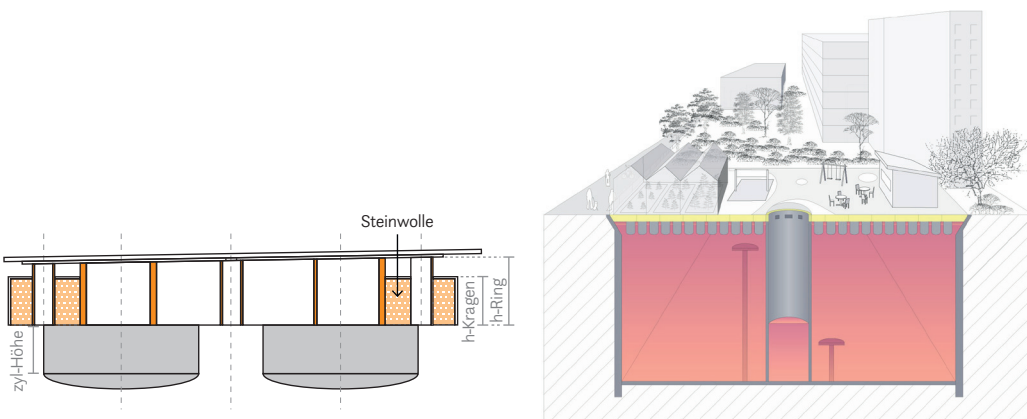


Abbildung 15: Schematische Darstellung der schwimmenden Abdeckung, links im Detail; rechts als Übersicht

3.3.2 Eingetauchte Abdeckung

Das Submerged-Cover-Konzept (SmC) ist das zweite im Rahmen des gigaTES-Projekts entwickelte Abdeckungskonzept. Details sind in [8] zu finden. Grundsätzlich trennt das SmC zwei Wasserreservoirs dicht voneinander ab, wodurch kein Wasseraustausch zwischen den beiden Wasserreservoirs stattfindet und das SmC nicht auftreiben kann. Das untere, heiße Reservoir ist das Speichermedium, während das obere Reservoir durch die Wärmedämmung des SmC „kalt“ bleibt. Um auftretende Wasserstandsschwankungen des Speichermediums zu kompensieren erfolgt eine bewegliche Gestaltung der Anschlusskonstruktionen der einzelnen Abdeckungsmodule und der Anbindung an die Speicherwand. Das SmC ist also keine statische Konstruktion, sondern erlaubt eine Höhenanpassung je nach betrieblichen Erfordernissen. Eine Herausforderung bei der Konstruktion sind die ECKausbildungen, wo Bewegungen in drei Richtungen aufgenommen werden müssen. Abbildung 16 zeigt eine vereinfachte Darstellung der wesentlichen Komponenten und eine beispielhafte perspektivische Ansicht.

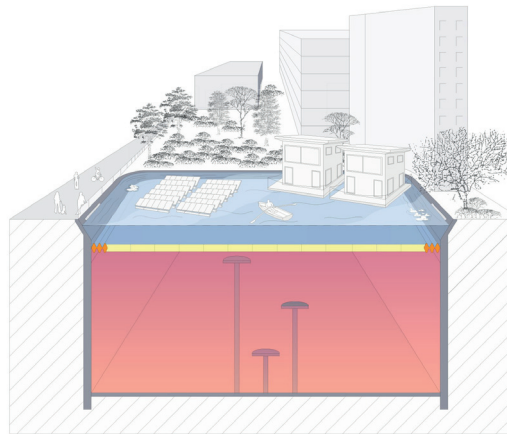
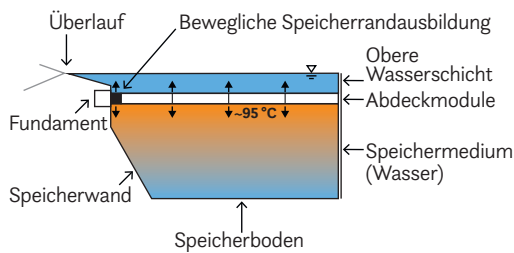


Abbildung 16: Schematische Darstellung des SmC-Konzepts mit Hauptkomponenten (links), perspektivische Ansicht (rechts) [8]

3.3.3 Selbsttragende Abdeckung

Auch mögliche Konstruktionen für eine selbsttragende Speicherabdeckung wurden untersucht [9]. Es wurden folgende Konstruktionen für einen runden Speicher (zylindrischer Schlitzwandschacht) sowie für eckige Speichergeometrien entworfen:

- Betonschale (rund) aus UHPC (Ultra-Hochleistungsbeton).
- Stahlraumfachwerk (rund), radial angeordnete Stahlträgersegmente
- Stahlfachwerk, quadratischer Grundriss

Die Berechnungen wurden für eine Spannweite von 65 m und für unterschiedliche Nutzlasten durchgeführt. Es zeigte sich, dass für eine Nutzlast von $3,5 \text{ kN/m}^2$ wirtschaftliche Lösungen gefunden werden können. Höhere Nutzlasten führen zu unwirtschaftlichen, sehr massiven bzw. stark überhöhten Konstruktionen, die die Nutzbarkeit stark einschränken. Abbildung 17 vermittelt einen Eindruck von einem selbsttragenden Stahlgerüst. Für den Einsatz als LTES-Abdeckung muss eine solche Konstruktion zusätzlich eine abgehängte Wärmedämmung erhalten.

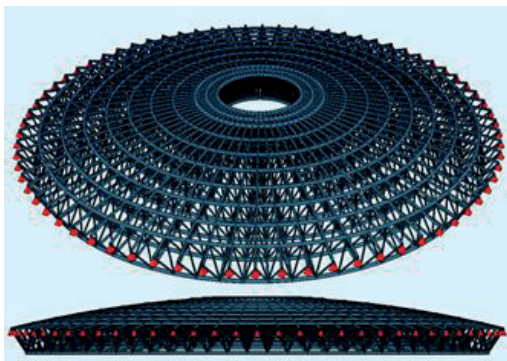


Abbildung 17: Selbsttragendes Stahlfachwerk [9] (links) Beispiel Stahlfachwerk Flughafen Hamburg (rechts)

3.3.4 Mockup – druckfeste Wärmedämmung

Im Hinblick auf die Untersuchung von druckfesten Wärmedämmungen für eine schwimmende Abdeckung war es notwendig, die tatsächliche Eignung von Dämmmaterialien unter realen Betriebsbedingungen genau zu untersuchen. Insbesondere das Vorhandensein von Restfeuchte (durch Niederschlag und Infiltrationen), die Richtung des Wärmestroms und der hohe Temperaturunterschied sind entscheidende Parameter, die bei der Materialauswahl zu berücksichtigen sind. Schaumglasschotter (SGS) ist aufgrund seiner geringen Dichte, der hohen Alterungsbeständigkeit und der niedrigen Wärmeleitfähigkeit ein geeignetes Material für diese Anwendung. Die poröse Beschaffenheit des Materials kann jedoch zu erhöhten Wärmeverlusten führen. Um die Frage nach dem tatsächlichen Verhalten von SGS unter feuchten Bedingungen und ungünstiger Wärmeübertragungsrichtung zu beantworten, wurde ein Mockup entworfen, gebaut und in einer Klimakammer aufgestellt. Das Mockup bestand aus kleinformatischen Modulen, die mit losem SGS gefüllt waren (siehe Abbildung

18). Um einen detaillierten Überblick über das Verhalten von SGS bei drei verschiedenen Verdichtungszuständen zu erhalten, wurden vier Mockups realisiert, wobei ein Mockup mit losem, unverdichtetem SGS als Referenz diente. Um die Betriebsbedingungen zu simulieren, die in einer TES-Abdeckung auftreten können, wurde eine Heizplatte unter der Unterseite des Gehäuses angebracht, um eine konstante Solltemperatur von 60°C zu gewährleisten.

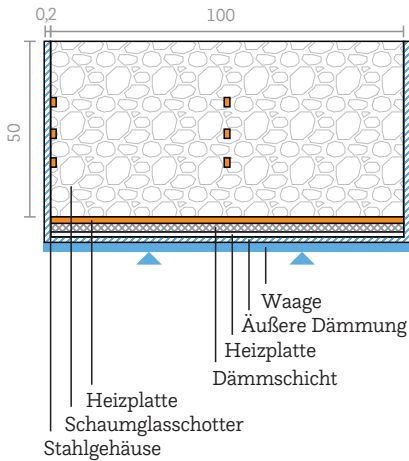


Abbildung 18: Schematischer Schnitt des Mockup-Aufbaus (Maße in [cm]). (links) Realisiertes Mockup (rechts)

Ziel des Tests war die Bestimmung der Zeit, die für die vollständige Verdampfung einer vordefinierten Wassermenge erforderlich ist, um den trockenen Zustand des Materials zu erreichen, sowie die Bewertung der tatsächlichen Dämmleistung des Moduls in Gegenwart eines negativen vertikalen Temperaturgradienten. Um den allmählichen Gewichtsverlust durch die Wasserverdunstung zu messen, wurden die Behälter auf eine Waage gestellt und die Massenabnahme wurde kontinuierlich gemessen. Die Ergebnisse zeigen, dass eine Erhöhung des Verdichtungsgrades (d.h. höhere Schüttdichten) zu einer besseren Dämmleistung im Vergleich zur unverdichteten Referenzprobe führt, was auf den geringeren konvektiven Wärmeübergang innerhalb der Schüttung zurückzuführen ist. Andererseits werden durch die geringere Konvektion der Massentransport und die Verdampfung reduziert, wodurch sich der Trocknungsprozess verlangsamt. Der Einsatz von Konvektionsbremsen ist eine mögliche Lösung zur Begrenzung des konvektiven Wärmeübergangs. Allerdings muss der Feuchtigkeitstransport gewährleistet sein, um eine vollständige Trocknung des Materials sicherzustellen. Daher müssten diese Sperren in der Lage sein, gleichzeitig den Feuchtigkeitstransport sicherzustellen und die Luftzirkulation, die die Konvektion antreibt, zu minimieren.

3.4 Wandaufbauten

Für die Speicherwand wurden im gigaTES Projekt verschiedene Bauweisen entwickelt. Grundsätzlich wird zwischen ungedämmter und gedämmter Wand und Boden unterschieden. Bei einer ungedämmten Speicherwand muss eine Abdichtung eingebaut werden, um sicherzustellen, dass keine Verluste des Speichermediums auftreten. Das Kunststoffabdichtungsmaterial richtet sich nach dem Temperaturprofil des Speichers und wird so gewählt, dass es eine Lebensdauer von mindestens 50 Jahren hat.

- HT-Hochtemperatur 90° - 60°C, Abdichtungsmaterial auf Edelstahlbasis
- LT-niedrige Temperatur 80° - 30°C, Abdichtungsmaterial auf Polymerbasis

Für die wärmegeämmte Außenwand wurden sowohl Konstruktionen mit interner Wärmedämmung als auch mit externer Wärmedämmung entwickelt.

3.4.1 Innenliegende Wärmedämmung

Im Rahmen des Projekts wurden zahlreiche Varianten für eine innenliegende Wärmedämmung untersucht und die Vor- und Nachteile der Konstruktionen gegenübergestellt. Eine besondere Herausforderung ergibt sich bei der Tiefbauvariante mit vertikalen Schlitzwänden. Nach der Freilegung (Aushub der Schlitzwand) ist die Oberfläche sehr uneben. Um diese Unebenheiten auszugleichen wird eine Vorsatzschale errichtet und der Zwischenraum mit einer Schüttdämmung ausgefüllt. Auf der glatten Oberfläche der Vorsatzschale kann der Liner aufgebracht werden. Je nach Temperaturprofil ist ein Kunststoffabdichtungsmaterial oder ein Edelstahlabdichtungsmaterial erforderlich. Eine solche Wandkonstruktion kann vor Ort hergestellt oder mit vorgefertigten Elementen errichtet werden. Es wurden auch verschiedene Herstellungsmethoden, wie die Verwendung von Klettergerüsten oder schwimmenden Montageinseln, untersucht. Die damit verbundenen Kostenschätzungen wurden als Grundlage für das Baukostenberechnungstool verwendet, siehe Abschnitt 5.1.

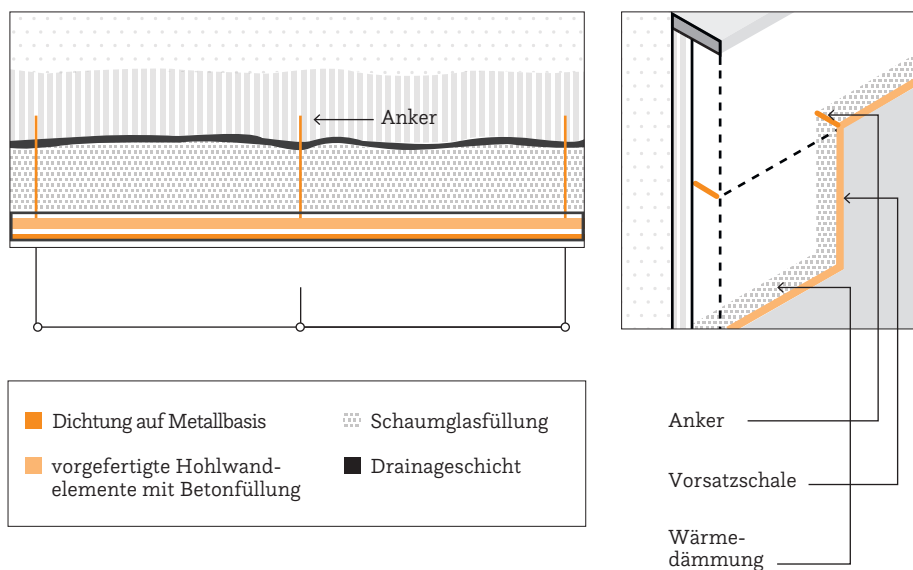


Abbildung 19: Konzept für die innenliegende Wärmedämmung (step©)

3.4.2 Außenliegende Wärmedämmung - Dämmbohrpfahlwand

Die Entwicklung einer außenliegenden Wärmedämmung basiert auf der Technik einer überschnittenen Bohrpfahlwand, siehe 3.1. Anstatt die Bohrpfähle mit Beton zu befüllen, werden sie mit Schaumglasschotter SGS befüllt. Das Ergebnis ist ein Bodenaustausch mit wärmedämmendem Material. Für dieses Herstellungsverfahren wurde ein Patent angemeldet [10].

In zwei Großversuchen sind die Herstellung, der Einbau und das thermische Verhalten einer Dämmbohrpfahlwand analysiert worden. Zudem wurden Modellversuche durchgeführt und mit Simulationen zum Wärmedämmverhalten des eingebauten Schaumglasschotters kombiniert.

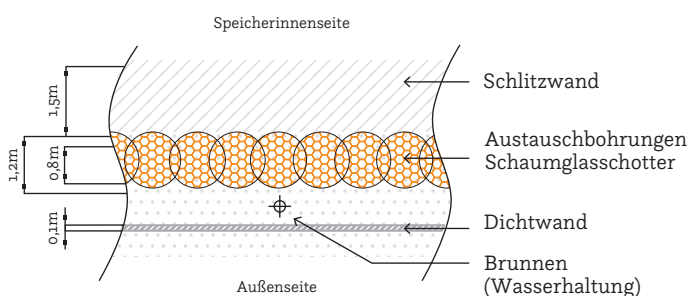


Abbildung 20: Schnitt horizontal Dämmbohrpfahlwand (links), Mockup Bohrpfahl mit SGS gefüllt – horizontal section [10] (rechts)

3.4.3 Mockup Dämmbohrpfahlwand

Für die neu entwickelte Lösung der Dämmbohrpfahlwand wurde ein Patent angemeldet. Das Konzept der Dämmbohrpfahlwand wurde sowohl mit Feldversuchen als auch mit Laborexperimenten und numerischen Simulationen überprüft.

Ein verkleinertes Modell eines Dämmbohrpfahls wurde im Labormaßstab gebaut und dazu verwendet, um das thermische Verhalten verschiedener Dämmstoffkonfigurationen (d.h. unverdichtet, verdichtet, mit verschiedenen Körnungen sowie mit Konvektionsbremsen) zu testen. Anschließend wurden Feldversuche auf einer Baustelle in Wien durchgeführt.

Abbildung 20 (links) zeigt die Baustelle, auf der die Tests durchgeführt wurden, und die Bohrmaschine, mit der die Pfähle hergestellt wurden. Es wurde die Dämmleistung (effektive Wärmeleitfähigkeit) der mit verdichtetem Schaumglasschotter gefüllten Bohrpfähle vor Ort mittels thermischer Sonden untersucht. Die Ergebnisse der Feldversuche wurden mithilfe numerischer Simulationen untermauert. Abbildung 21 (rechts) zeigt den achsensymmetrischen Temperaturverlauf der oberen 2 Meter eines der untersuchten, vom Erdreich umgebenen Dämmpfähle; eine Messsonde wurde vertikal entlang der Achse des Pfahls (in der Abbildung bei Radius 0 m) angebracht, um eine Wärmewelle (max. 90 °C) zu erzeugen, die sich auf das umgebende Erdreich ausbreitete, und um die Temperatur entlang der Höhe des Pfahls während des gesamten Tests zu messen.

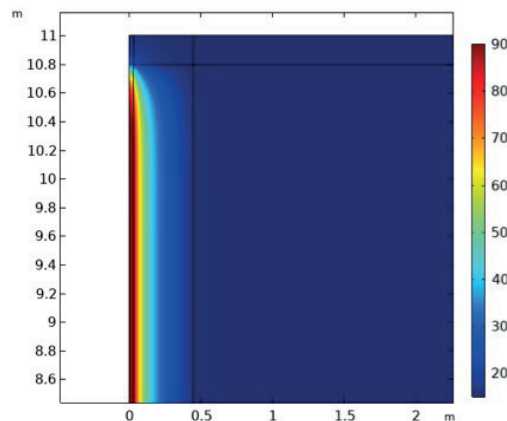


Abbildung 21: Verwendete Bohrmaschine für die Dämmbohrpfähle (©PORR) (links). Temperaturverlauf des achsensymmetrischen Modells eines der getesteten Dämmbohrpfähle während des Versuchs. (rechts)

Die Ergebnisse der Tests zeigten, dass aufgrund der porösen Beschaffenheit des Materials und auch abhängig von der Konfiguration der Dämmbohrpfähle (d.h. 3D-Wärmestromverteilung) ein nicht zu vernachlässigender Anteil der konvektiven Wärmeübertragung, deutlich die Dämmeigenschaften insbesondere im Falle mit unverdichtetem oder geringfügig verdichtetem Material verringert. Verdichteter Schaumglasschotter hingegen zeigte dank der Verringerung der Makro-Porosität eine bessere Dämmleistung. Der Feldversuch bestätigte die höhere Dämmleistung der Pfähle mit höherem Verdichtungsgrad, allerdings auf Kosten der Verwendung einer größeren Menge an Dämmmaterial.

4 Systemanalyse und Fallstudien

Zur Unterstützung der Investitionsentscheidung eines Saisonalspeichers wurde eine Methode zur techno-ökonomischen Bewertung eines LTES auf Systemebene in einem Fernwärmenetz entwickelt. Dazu werden im Folgenden zwei repräsentative Fallstudien vorgestellt, um zu demonstrieren, wie die Integration erneuerbarer Energien die Gesamteffizienz des Systems verbessern kann, indem der Anteil regenerativer Energiequellen im Netz deutlich erhöht wird. Fallstudie A hat einen Wärmeverbrauch eines kleinen Fernwärmesystems, in das ein 100.000 m³ großer LTES integriert wird, während Fallstudie B ein mittelgroßes Fernwärmesystem mit einem Speichervolumen von 1.200.000 m³ repräsentiert. Das primäre Ziel des LTES ist es, die Laufzeiten von fossilen Spitzenlastkesseln stark zu reduzieren und sie schließlich im Winter durch die Verlagerung von überschüssiger, z.B. solarthermischer und geothermischer Wärme aus dem Sommer zu ersetzen. Für jedes Fernwärmesystem werden zwei Varianten definiert, um sowohl Hochtemperatur- (Vorlauf/Rücklauf 90 °C/60 °C) als auch repräsentative Niedertemperatursysteme (60 °C/30 °C) und die Vorteile, die solche Systeme durch die Integration von LTES haben, zu zeigen. In diesem Kapitel werden die beiden Fallstudien, ihre relevanten Rahmenbedingungen und Integrationsaspekte beschrieben. Kapitel 5 gibt dann einen detaillierteren Überblick über die LTES-Effizienz und die Auswirkungen auf das Gesamtsystem.

4.1 Ansätze zur Bewertung auf Systemebene und zur techno-ökonomischen Analyse

Um das Potenzial der LTES-Technologien voll auszuschöpfen, ist eine angemessene Integration des Speichers sowie eine umfassende Planung und Abstimmung mit dem gesamten Energiesystem erforderlich. Dies lässt sich durch die Berücksichtigung aller relevanten Systemkomponenten mittels mehrjähriger dynamischer Systemsimulationen umsetzen. Das System besteht aus dem Wärmebedarf einer angrenzenden Stadt und einer Reihe von verschiedenen Wärmequellen, die alle an den Großwärmespeicher angeschlossen sind. In Abbildung 22 ist eine schematische Darstellung dieses Systems skizziert. Die Wärmebilanz des Systems wird über mehrere Jahre berechnet, bis keine zusätzliche Temperaturveränderung des Erdreichs um den thermischen Speicher mehr stattfindet. Simulationen auf Systemebene können auch dazu beitragen, die Auswirkungen unterschiedlicher Speicherkapazitäten und Regelungsstrategien (d. h. nur saisonale Speicherung oder multifunktionale Speicherung mit KWK-Optimierung) sowie die Interaktion zwischen dem Speicher und anderen Komponenten wie Wärmepumpen und Nachheizungsanlagen (die erforderlich sind, wenn die Netztemperaturen die Höchsttemperatur des Speichers überschreiten) zu untersuchen.

Die jährliche CO₂-Produktion und der Strombedarf für Wärmepumpen, sofern vorhanden, werden verfolgt und können als Optimierungsziele dienen. Die Zusammensetzung der verschiedenen Quellen sowie die Größe und Geometrie des LTES können nun so variiert werden, dass die Ergebnisse techno-ökonomisch und/oder ökologisch optimiert sind. Außerdem kann die Merit-Order geändert werden, d.h. die Reihenfolge, in der bei steigendem Wärmebedarf die verschiedenen Quellen eingeschaltet werden. So kann zum Beispiel zuerst die Quelle mit den niedrigsten Kosten und dann die Quelle mit den nächst niedrigeren Kosten verwendet werden.

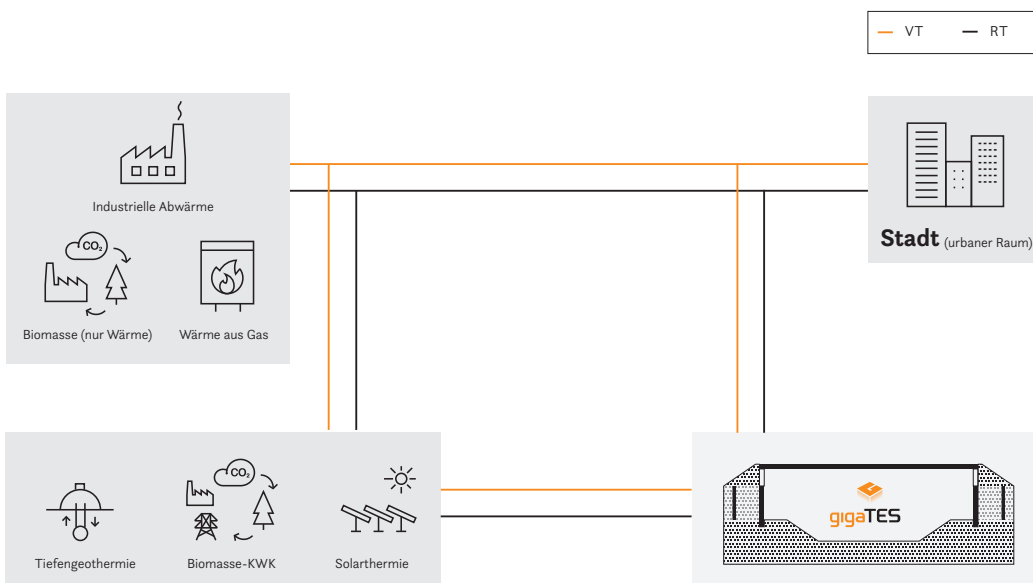


Abbildung 22:
Integrationskonzept
eines Großwärmespeichers

Im Rahmen des gigaTES-Projekts wurden eine Reihe von Simulationen auf Systemebene für definierte Fernwärmesysteme und Standorte durchgeführt, um die Auswirkungen des LTES auf die Systemeffizienz zu bewerten. Abbildung 23 gibt einen Überblick, welche relevanten Inputs für Analysen notwendig sind und wie diese in die Auswertung integriert wurden.

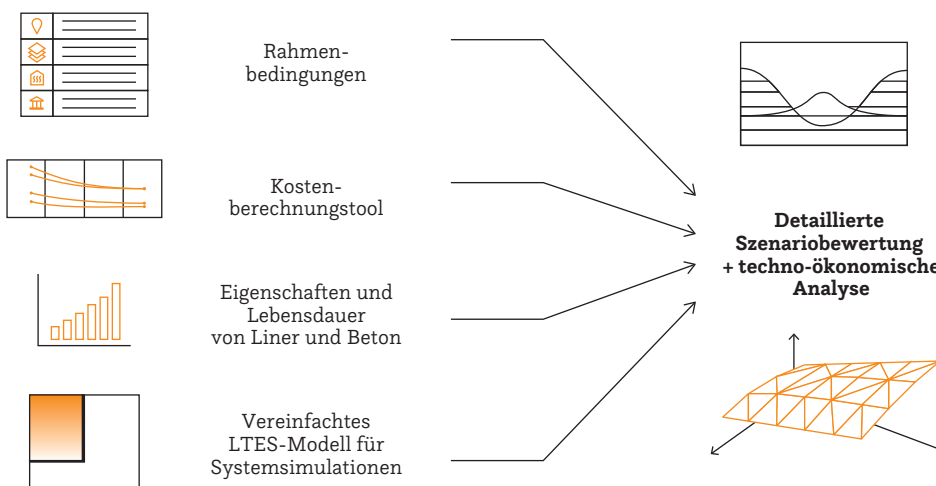


Abbildung 23:
Übersicht zur Auswertung
auf Systemebene
im gigaTES Projekt

Ein Ansatz zur Systemsimulation ist die Modellierung aller relevanten Systemkomponenten in z. B. TRNSYS, Matlab/Simulink oder Dymola, einer dynamischen Mehrdomänen-Simulationsumgebung. Dymola enthält viele Bibliotheken mit validierten Modellen von Systemkomponenten wie Rohren, Wärmetauschern, Wärmespeichern, Pumpen, Wärmepumpen, solarthermischen und anderen Heizungsanlagen. Ein geeignetes Modell für das LTES-System selbst wurde im Rahmen des Projekts entwickelt. Da das Modell in einem größeren System einzusetzen ist, sollte es eine gute Genauigkeit mit schnellen Berechnungszeiten verbinden. Die Hauptbestandteile des Modells bilden der Speicher selbst, die Fluiddomäne, und der umgebende Untergrund mit der Grundwasserströmung (siehe Abbildung 24). Die Struktur und eine kurze Beschreibung des Modells können aus [11] entnommen werden. Das Modell wurde auch mit realen Messdaten des PTES in Dronninglund (Dänemark) im Rahmen des Projekts validiert [11].

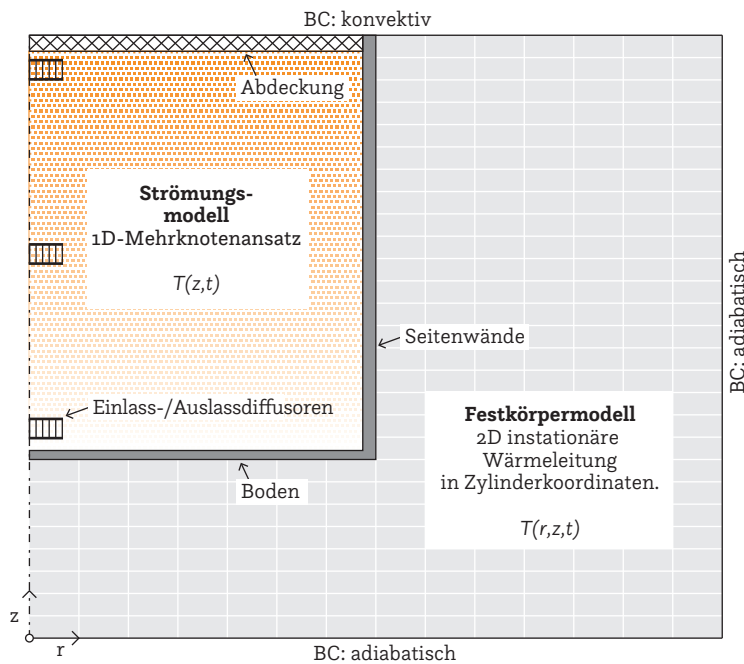


Abbildung 24: Schematische Darstellung des entwickelten vereinfachten LTES-Modells in Dymola [11]

Zur weiteren Beurteilung der Genauigkeit wurde das entwickelte Modell zusammen mit anderen LTES-Modellen unterschiedlicher Simulationsprogramme (z.B. COMSOL Multiphysics, TRNSYS und MATLAB/Simulink ²) in einem umfassenden Modellvergleich verwendet. Die Ergebnisse des Quervergleichs zeigten eine gute Übereinstimmung in Bezug auf geladene und entladene Energien, Speichertemperaturen und thermische Verluste zwischen den Modellen [12].

Das neuartige Dymola/Modelica-LTES-Modell schließt nicht nur die Lücke zwischen detaillierten Komponentensimulationen und Systemsimulationen, sondern ermöglicht durch den Modelica-Modellierungsansatz eine laufende Erweiterung des Modells, z.B. um andere Geometrien oder eine integrierte flexible Systemmodellierung.

Dementsprechend wurde das Modell im Rahmen von gigaTES für Systemsimulationen, techno-ökonomische Analysen und Parameterstudien von mehreren Fallstudien unterschiedlicher Standorte und Szenarien eingesetzt. Die Speicherregelungsstrategien für die Szenarien wurden entweder mit Hilfe von Regelungsbausteinen in Dymola oder durch vordefinierte Speicherbe- und -entladeprofile ermittelt, die sich aus den Rahmenbedingungen der untersuchten Szenarien ergeben.

Ein weiterer Ansatz, der im Rahmen des Projekts verwendet wurde, war die Ableitung und Bewertung von Lastprofilen für den LTES auf der Grundlage von Systemmodellen in EnergyPRO. Der in EnergyPRO integrierte MILP-Solver wird verwendet, um die kostenoptimale Wärmebedarfsreihenfolge in stündlichen Intervallen über ein bestimmtes Jahr zu bestimmen, wobei eine bestimmte Auswahl von Wärmequellen, Wärmebedarf und Preisen für Betrieb, Brennstoffe und CO₂-Emissionen angenommen wird. Da es nicht möglich ist, Speichertemperaturen und thermische Verluste innerhalb von EnergyPro zu modellieren, können diese Größen anschließend mit einem detaillierten Speichermodell (z.B. mit COMSOL) ausgewertet werden. Die entsprechenden thermischen Verluste werden dann in das Modell auf Systemebene in EnergyPro zurückgeführt, um die Gesamteffizienz des Systems zu bewerten.

² <https://www.mathworks.com/products/simulink.html>

4.2 Fallstudie Stadt A: Mittelgroßes Fernwärmenetz

Zur Demonstration der techno-ökonomischen und ökologischen Auswirkungen eines 1.200.000 m³ großen LTES wurde sowohl auf der Speicher- als auch auf der Systemebene ein typisches, österreichisches Fernwärmesystem ausgewählt und modelliert.

Das Versorgungsportfolio besteht aus Geothermie (12 MW), konstanter industrieller Abwärme (2 MW), Biomassekesseln (4,5 MW) und Biomasse-KWK (8 MW) sowie Gaskesseln (35 MW) für die Spitzenlastversorgung. Es werden zwei Betriebsvarianten verwendet: ein Hochtemperatureszenario (HT) mit 90 °C bzw. 60 °C Vor- und Rücklauftemperatur und ein Niedertemperatureszenario (LT) mit 60 °C bzw. 30 °C. Bei der Hochtemperaturvariante beträgt die Speichertemperatur maximal 90 °C, während sie bei der Niedertemperaturvariante maximal 80 °C beträgt. Tabelle 3 gibt einen Überblick über die wichtigsten Systemeigenschaften für die HT- und LT-Variante. Abbildung 25 zeigt die Wärmelastprofil für die HT-Variante mit LTES-Integration.

Eigenschaften	Stadt A (LT)	Stadt A (HT)
Wärmebedarf	239 GWh	239 GWh
Wärmeverluste	8 %	10 %
Wärmeerzeugung	258.12 GWh	262.9 GWh
Spitzenlast	64.6 MW	64.6 MW
Sommerlast	8.2 MW	8.2 MW
VT	60 °C	90 °C
RT	30 °C	60 °C

Tabelle 3:
Wesentliche Systemeigenschaften für Stadt A – LT und HT Szenarien

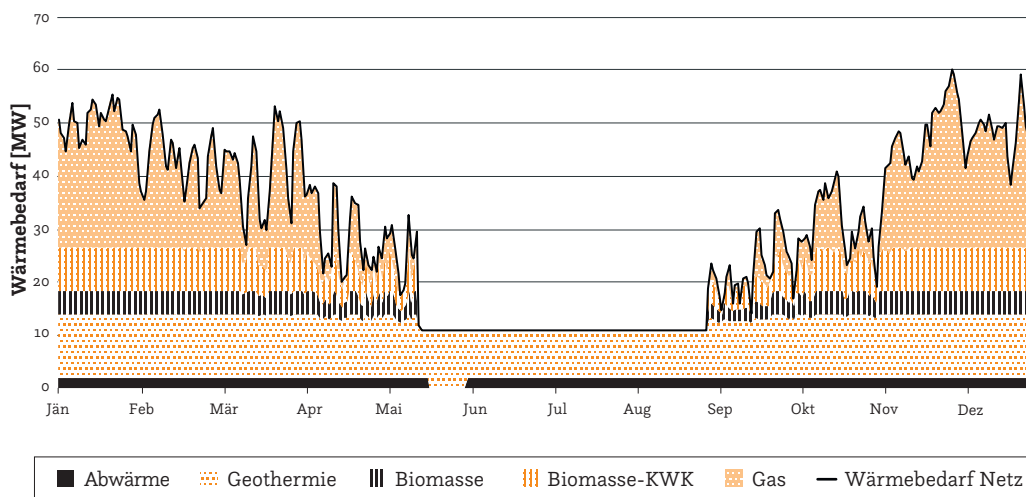


Abbildung 25: Jährliches Wärmebedarfsprofil – Stadt A (HT Szenario)

Etwa 32 % des Wärmebedarfs müssen mit Gaskesseln bereitgestellt werden (Spitzenlastabdeckung). Die Grundlast besteht aus Wärme von Geothermie und Abwärme, die Zwischenlasten werden durch Biomasse und Biomasse-KWK zur Verfügung gestellt.

Abbildung 26 gibt einen Überblick über die wichtigsten Systemkonzepte sowohl für die HT- als auch für die LT-Variante. In den Sommermonaten ist ein Überschuss an geothermischer Wärme vorhanden, die im LTES gespeichert werden kann. Zur weiteren Nutzung der verfügbaren Speicherkapazität wird eine solarthermische Anlage eingesetzt.

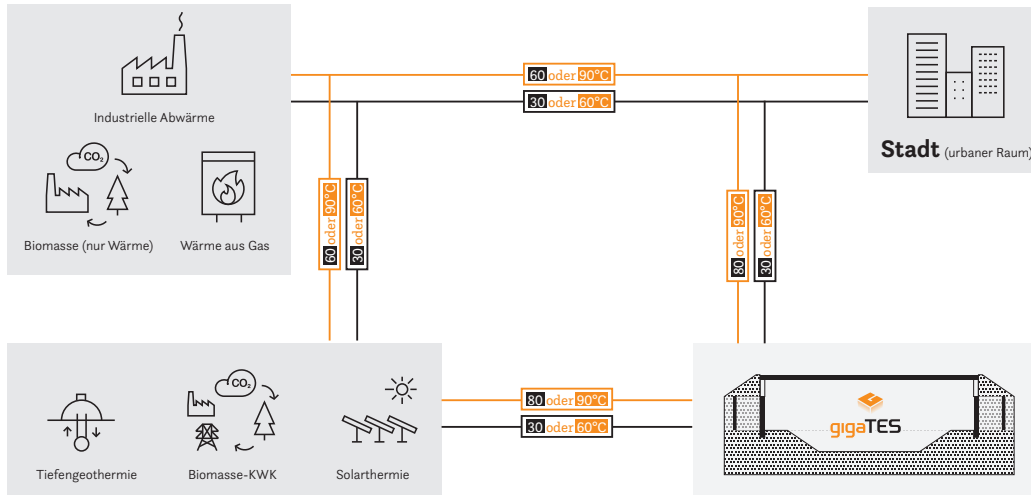
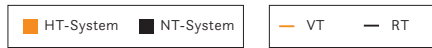


Abbildung 26: LTES Integrationskonzept Stadt A (HT und LT Szenario)

4.3 Fallstudie Stadt B: Kleines Fernwärmenetz

Es wurde auch ein kleines Fernwärmesystem für die Stadt B betrachtet, um die Auswirkungen eines 100.000 m³ großen LTES auf das Netz sowohl für Hoch- als auch für Niedertemperaturvarianten zu demonstrieren, wobei die wichtigsten Eigenschaften des Netzes in Tabelle 4 dargestellt sind. Das Versorgungsportfolio besteht aus Geothermie (0,4 MW), industrieller Abwärme (0,2 MW) und Biomasse-KWK (1,2 MW) sowie einem Gaskessel (2,5 MW) für die Spitzenlastabdeckung.

Eigenschaften	Stadt B (LT)	Stadt B (HT)
Wärmebedarf	15 GWh	15 GWh
Wärmeverluste	5 %	10 %
Wärmeerzeugung	15.75 GWh	16.5 GWh
Spitzenlast	4 MW	4 MW
Sommerlast	0.5 MW	0.5 MW
VT	60 °C	90 °C
RT	30 °C	60 °C

Tabelle 4: Wesentliche Systemmerkmale der Stadt B – LT und HT Szenarien

Die Wärmeerzeugung von Fallstudie B (ohne Einbeziehung des LTES) ist ähnlich wie in Stadt A nur mit geringerer Leistung (siehe Abbildung 27).

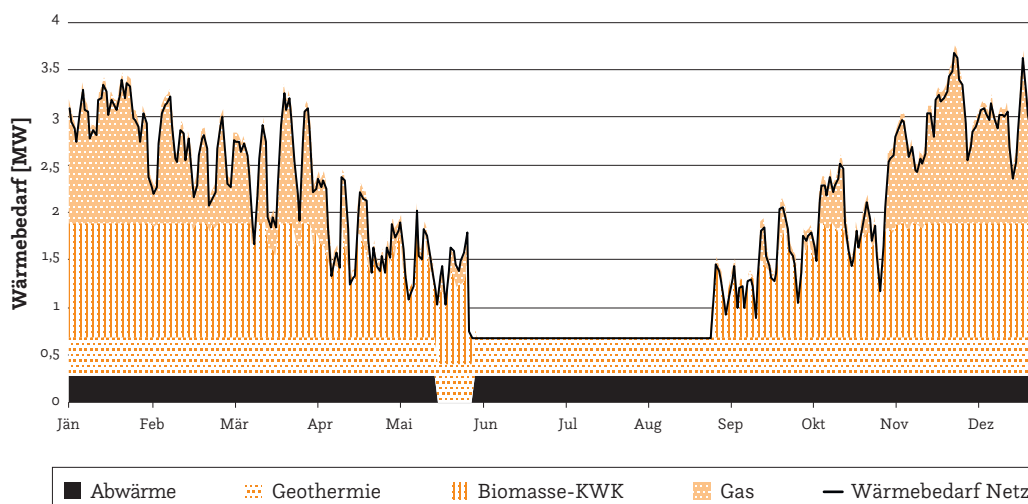


Abbildung 27: Jährliches Wärmebedarfsprofil – Stadt B (HT Szenario)

Etwa 27 % des Wärmebedarfs werden durch den Gaskessel bereitgestellt (Spitzenlastabdeckung), während Abwärme und Geothermie die Grundlast darstellen. Die Übergangslast wird durch das Biomasse-KWK abgedeckt. Abbildung 28 zeigt das Integrationskonzept sowohl für die HT- als auch für die LT-Variante des Systems. In den Sommermonaten gibt es einen Überschuss an solarthermischer Wärme, die im LTES gespeichert werden kann, sowie einen geringen Überschuss aus der Biomasse-KWK-Anlage, um dessen Betrieb zu optimieren.

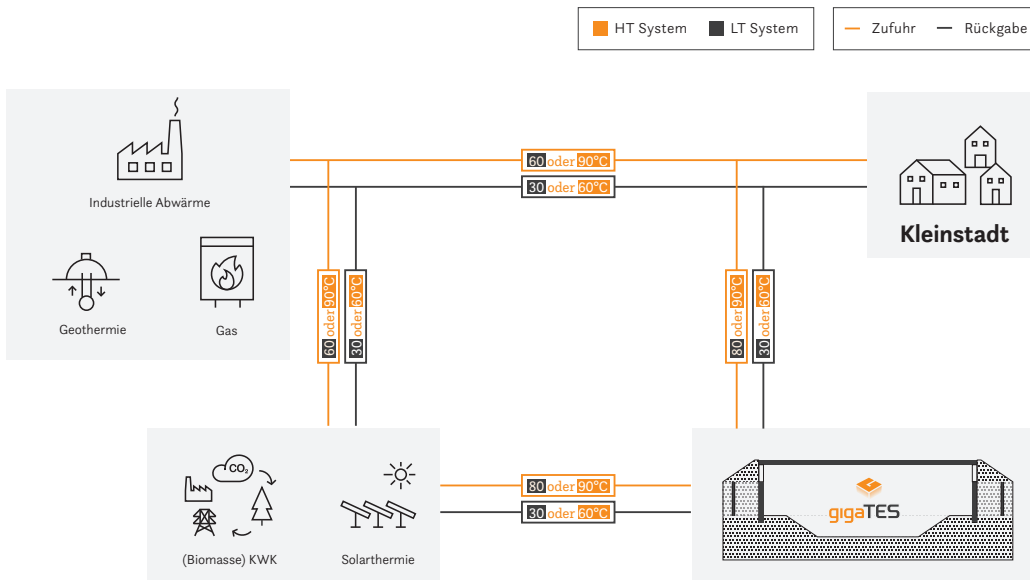


Abbildung 28: LTES Integrationskonzept Stadt B (HT und LT Szenario)

Die Ergebnisse zum Energieinhalt des Speichers sind für jeden der oben genannten Fälle (HT- und LT-Varianten) in Anhang A zu finden.

Die Auswahl des bestgeeigneten Speicherkonzepts, der Materialien und der Geometrie sowie deren Einfluss auf die thermischen Verluste und die Investitionskosten hängen stark von den Systemrahmenbedingungen ab. Das nächste Kapitel zeigt eine detailliertere Bestimmung der Effizienz und der Kosten von LTES in den beiden Städten A und B mithilfe des im Rahmen des Projekts entwickelten Baukostenberechnungstools.

5 Effizienz und Baukosten eines LTES

Mithilfe der in Kapitel 4 definierten Anwendungsbeispiele und der Konstruktionskonzepte aus Kapitel 3 kann das bestgeeignete Speicherkonzept unter bestimmten Rahmenbedingungen ausgewählt werden. Die Auswahl erfolgt auf Basis der Wirtschaftlichkeit des Konzepts, gemessen an den Kosten pro Speichereinheit. Das Baukostenberechnungstool (Construction Cost Calculation Tool, CCCT) dient zur Abschätzung der Investitionskosten eines LTES. Anschließend wird gezeigt, wie das Kostentool bei der Auswahl eines geeigneten und kosteneffizienten Speicherkonzepts für einen Anwendungsfall funktioniert. Für jedes Anwendungsszenario werden die geschätzten Investitionskosten und Speichergestehungskosten (LCOS) sowie die entsprechenden CO₂-Einsparungen und die technischen KPIs wie Speichereffizienz und Zyklenzahl dargestellt, um zu zeigen, unter welchen Rahmenbedingungen die entwickelten Speicherkonzepte am besten geeignet sind und wo Herausforderungen sowie Verbesserungspotenziale bestehen, sowohl hinsichtlich der Speicherauslegung als auch der Betriebsbedingungen des Fernwärmenetzes.

5.1 C₃T – Baukostenberechnungs-Tool

Das Baukostenberechnungstool (C₃T) ist ein Excel-Tool, das auf Erfahrungswerten basiert. Das Excel-Tool wurde entwickelt, um eine Abschätzung der zu erwartenden Baukosten für verschiedene Bauarten und Größen von thermischen Energiespeichern ableiten zu können. Eine Auswahl von verschiedenen Details zur Konstruktion, dem Flächenbedarf des Speichers, der Wärmedämmung, sowie der Ausführung von Wänden und Abdeckung ist möglich. Je nach Eingabeparameter gibt das Tool eine Schätzung der entstandenen Kosten ab und ermöglicht den Vergleich der ausgewählten Konstruktionstypen im Hinblick auf ihre Gesamtkosten und Kosteneffizienz.

5.1.1 Eingabedaten

In der Eingabemaske des Excel-Tools können **allgemeine Anforderungen** eingegeben werden (siehe Abbildung 29).

Eingabeparameter

- Angaben zum Baugelände
- Falls eine Dichtwand gewünscht wird, kann hier die Tiefe eingegeben werden.
- Als Temperaturprofil kann entweder HT 90 °C - 60 °C oder LT 80 °C - 30 °C gewählt werden.
- Für alle Bautypen mit aufgeschütteten Baugruben können die möglichen Böschungswinkel eingegeben werden.
- Bezüglich des geplanten Bauplatzes kann die Flächenwidmung gewählt werden. Mit der jeweiligen Widmung sind unterschiedliche Grundstückskosten verbunden. Weiters werden an dieser Stelle mögliche Bautypen bezüglich des verfügbaren Flächenverbrauchs ausgegeben.
- Für alle Bauarten außer dem flachen Beckenspeicher kann die gewünschte Böschungshöhe eingegeben werden.
- Die Anforderungen an die Tragfähigkeit der Abdeckkonstruktion können von „hoch“ (voll begehbar) bis „niedrig“ (nicht nutzbar) gewählt werden.
- Die Wärmedämmung kann für verschiedene Bereiche und verschiedene Materialien ausgewählt werden.
- Für einen direkten Vergleich können drei verschiedene Speichervolumina angegeben werden.

Eingabedaten für die unterschiedlichen Speicherkonstruktionen

version 22.07.2021	Grundwasserspiegel:	5.0 m	unter dem Grundwasserspiegel		
	Tiefe des Aquiclude:	15.0 m	unter dem Grundwasserspiegel		
	Entlastungsmaßnahmen für das Grundwasser im Aquiclude (unterhalb der Baugrube):				
	geschätztes Einzugsgebiet je Grundwasserbrunnen =	300 m ²			
	Dichtwand:				Temperaturreprofil
	Tiefe:	17.5m	unter dem Bodenniveau		Niedertemperatur 80° – 30°
Aufgeschütteter Erdaushub:	V2, V2, V1		V3		
mögl. Böschungswinkel:	Minimaler Böschungswinkel: 26.6°!		Böschungswinkel V3		
Baugrubentiefe ≤	15.0m	-> β =	33.7°	-> β =	26.6°
Baugrubentiefe >	15.0m	-> β =	30.5°	Böschung & Aushub	

Baugebiet

Flächenwidmung	3	1 = landwirtschaftliche Fläche 2 = Industrie und Gewerbeflächen 3 = Wohngebiet
verfügbare Grundstücksfläche (falls bekannt):	150,000 m ²	V1, V1a, V1b, V1c, V2a, V2b, V2c, V2.1a, V2.1b, V2.1c, V2.2a, V2.2b, V2.2c, V3a, V3b, V3c
		-> mögliche Bauformen:

Aufschüttung (über dem Gelände) (ausgenommen V3)

Dammhöhe: H=	15.0 m	Böschungswinkel = 2:3	33.7°
Breite der Dammkrone: B =	5.0 m	Aushubmaterial für die Böschung	
Freiboardhöhe: h=	1.0 m	unterhalb der Dammkrone	

Konstruktion der Abdeckung

Anforderungen an die Tragfähigkeit der Konstruktion:	3
1= gering: nicht nutzbares (nur zu Fuß begehbares) dänisches System	
2= hoch: voll begehbar (Nutzlast 3.5 kN/m ²)	
3= hoch: voll begehbar (Nutzlast 7.5 kN/m ²)	

Wandflächen für die Wärmedämmung

Auswahl: 1 = Ja, 0 = Keine Dämmung				
Abschnitt I:	o	über dem Boden (Böschung, Mauer und Dammgrundberme)		
Abschnitt II:	o	unterirdisch bis zur Tiefe	t= 15,0m	gw-level VA-steel PP
Abschnitt III:	o	in der Tiefe t, bis zur Bodenplatte	Material	nein ja
Abschnitt IV:	o	Bodenplatte		ja/nein

Vergleich der Speicherkonstruktionen (V1 muss ≤ 200.000m³)

Variante a	Variante b	Variante c
500.000 m ³	1.000.000 m ³	2.000.000 m ³

Jede Bauart wird in einem eigenen Datenblatt dargestellt. Für jeden Bautyp kommt eine vorberechnete Speichereffizienz zur Anwendung, die durch Volumen, Temperaturprofil, Aushubtiefe und Wärmedämmung auf Basis von Simulationen mit standardisierten saisonalen Lastprofilen berechnet wurde.

5.1.2 Ausgabedaten

Für jeden Bautyp wird ein eigenes Kostenberechnungsblatt erstellt (siehe Abbildung 30). Dort können individuelle Details zum Baukonzept hinzugefügt werden. In einem ersten Schritt erfolgt die Ermittlung der geometrischen Abmessungen und relevanten Massen der jeweiligen Konstruktion zur Berechnung der Kosten. In einem zweiten Schritt werden die Massen, mit Hilfe der in der Bauwirtschaft üblichen Einheitspreismethode, den Kosten zugeordnet. Dadurch werden die Gesamtbaukosten ermittelt. Die Einheitspreise beruhen auf Erfahrungswerten aus realisierten Projekten.

Bezogen auf das spezifische Volumen des Speichers ergeben sich die spezifischen Baukosten in €/m³. Unter Berücksichtigung der Speichereffizienz lassen sich auch die daraus resultierenden effektiven Baukosten in €/m³ ablesen.

Veränderbare Parameter

- Die Aushubtiefe kann für jedes Volumen individuell gewählt werden.
- Die Abmessungen der Bodenplatte (Betonplatte) sind individuell einzugeben.
- Die Abmessungen des oberirdischen Stützwandwinkels können an die örtlichen Gegebenheiten angepasst werden
- Der Wirkungsgrad wird aus einer separaten Datenbank ermittelt und bei der Berechnung der effektiven Kosten berücksichtigt. Er ist abhängig von der Bauart, dem Temperaturprofil, dem Volumen und der gewählten Wärmedämmung

Ausgabeparameter

- Die Hauptkostenbeiträge setzen sich nachfolgend zusammen:
 - Grundstückskosten
 - Gemeinkosten der Baustelle
 - Tiefbauarbeiten
 - Stahlbeton
 - Konstruktion
 - Erdarbeiten
 - Abdichtungsmaterial des Speichers
 - Abdeckung
- Die Gesamtkosten und die effektiven Kosten pro m³ Speichervolumen werden auch berechnet.
- Eine Grafik zeigt die prozentuelle Kostenaufteilung.

Variante 2	Tiefer Beckenspeicher (quadratischer Grundriss); kein Ausgleichsbehälter		
	Variante 2a	Variante 2b	Variante 2c
gesamtes Speichervolumen	500.000 m ³	1.000.000 m ³	2.000.000 m ³
Aushubtiefe (unter dem Geländeniveau)	20 m	30 m	40 m
Seitenlänge Speicherboden	61 m	71 m	92 m
Seitenlänge Speicheroberfläche	145 m	189 m	244 m
Breite der Dammgrundberme:	4.0 m	4.0 m	4.0 m

Abbildung 30: Beispiel Output-Datenblatt für einen bestimmten Bautyp (tiefer Beckenspeicher)

Tiefe der unteren Berme:	10.0 m	15.0 m	20.0 m
Untere Bermenbreite:	4.0 m	4.0 m	4.0 m
Dicke der Bodenplatte:	0.60 m		
Böschungsmauer (an der Dammkrone):			
Höhe (kompl., inkl. Fundierung): h1 =	15.0 m	Länge der Fundierung: L =	8.0 m
obere Wandbreite: b1 =	1.0 m	Höhe der Fundierung: h2 =	2.0 m
untere Wandbreite: b2 =	2.0 m		

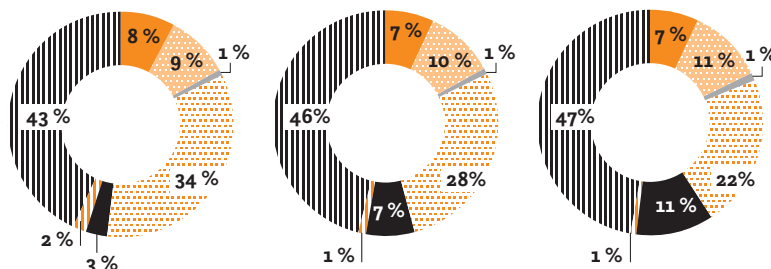
Wandkonstruktionsart pro Abschnitt:	oberirdisch (Böschung):	D - interne Wärmedämmung - PP	nicht gedämmt
	unterirdisch bis zur Tiefe t:	nur Abdichtung - PP vertikal	nicht gedämmt
	unter die Tiefe t:	nur Abdichtung - PP	nicht gedämmt
	Bodenplatte:	nur Abdichtung - PP	nicht gedämmt

Ergebnisse:

	Variante 2a	Variante 2b	Variante 2c
gesamtes Speichervolumen	500.000 m³	1.000.000 m³	2.000.000 m³
Speichereffizienz	69.32 %	74.02 %	78.72 %
effektives Speichervolumen	346.619 m³	740.242 m³	1.574.494 m³
oberirdisches Speichervolumen	293.953 m ³	500.968 m ³	833.850 m ³
Flächennutzung	40.362 m ²	60.106 m ²	90.030 m ²
Aushubmenge	206.047 m ³	499.032 m ³	1.166.150 m ³
Dammbau	163.253 m ³	207.073 m ³	261.410 m ³
Überschuss- / Fehlmaterial	42.793 m ³	291.959 m ³	904.740 m ³
Abdeckfläche	20.997 m ²	35.783 m ²	59.561 m ²
Wandoberfläche	25.191 m ²	37.527 m ²	55.231 m ²

Gesamte Baukosten	€ 49.718.190	€ 79.524.581	€ 129.604.875
relative Baukosten (gesamt)	99 €/m³	80 €/m³	65 €/m³
relative Baukosten (effektiv)	143 €/m³	107 €/m³	82 €/m³
Grundstückskosten	€ 4.036.173	€ 6.010.591	€ 9.003.037
Gemeinkosten der Baustelle	€ 4.428.610	€ 7.608.330	€ 13.682.127
Tiefbauarbeiten	€ 574.242	€ 713.670	€ 886.559
Stahlbetonbau	€ 16.835.000	€ 22.029.561	€ 28.875.181
Erdarbeiten	€ 1.681.649	€ 5.579.379	€ 14.817.897
Abdichtungsmaterial des Speichers	€ 829.897	€ 1.227.097	€ 1.826.402
Abdeckung	€ 21.332.620	€ 36.355.954	€ 60.513.672
nur Abdichtung am Boden	€ 74.182	€ 101.289	
nur Abdichtung an den Wänden	€ 328.457	€ 429.376	€ 554.515

- Grundstückskosten
- Gemeinkosten der Baustelle
- Tiefbauarbeiten
- Stahlbetonbau
- Erdarbeiten
- Abdichtungsmaterial des Speichers
- Abdeckung



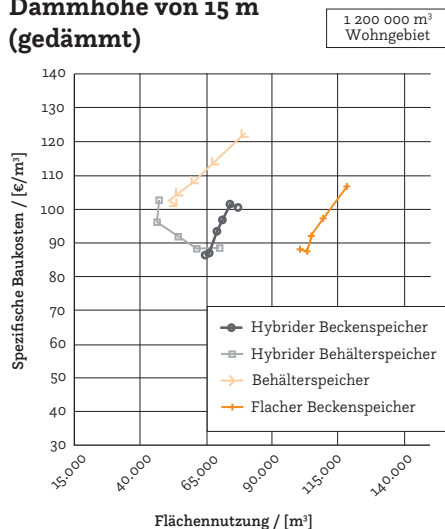
5.2 Bewertungsergebnisse der Fallstudie: Stadt A

Mit der ermittelten Speicherkapazität und den Lastprofilen wird im nächsten Schritt bewertet, welches Speicherkonzept für den jeweiligen Standort am wirtschaftlichsten ist. Für das Zielvolumen von 1.200.000 m³ wurde mithilfe des Kostentools eine Parameterstudie durchgeführt, um die spezifischen Investitionskosten und den entsprechenden Flächenverbrauch für alle betrachteten Speichergeometrien und unterschiedlichen Speichertiefen zu optimieren. Abbildung 31 gibt einen Überblick über die spezifischen Speicherkostenkurven für jedes Baukonzept bei Verwendung eines Edelstahl-Liners, einer vollständig zugänglichen Abdeckung sowohl bei gedämmter (Wärmedämmung des Deckels und Wärmedämmung der Wände bis zur Tiefe des Aquiclude) als auch bei nicht gedämmter (nur Wärmedämmung des Deckels) Variante. In allen Szenarien wurde die maximal zulässige Dammhöhe von 15 m gewählt, da diese aufgrund der maximalen Wiederverwendung des Bodenaushubs zu den geringsten Kosten führt. Nachfolgende Randbedingungen (siehe Tabelle 5) wurden in beiden Städten für den Flächenverbrauch und die hydrogeologischen Eigenschaften angenommen:

Randbedingungen	Wert	Anmerkung
Grundstückskosten	100 €/m ²	Wohngebiet/Inneres Stadtgebiet
Tiefe bis zum Grundwasser	5 m	
Tiefe bis zum Aquiclude	15 m	Dicke der Grundwasserschicht 10 m

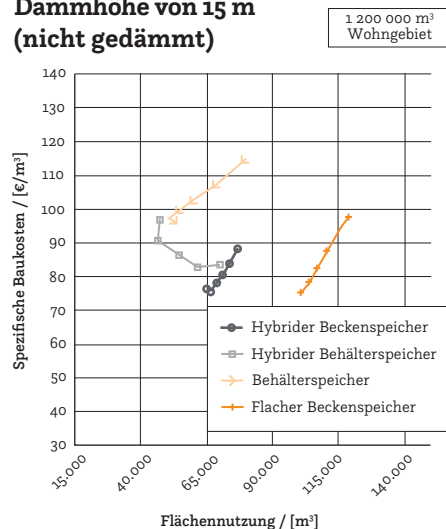
Tabelle 5: Randbedingungen des Standortes für Stadt A und Stadt B

Abdeckung 3: vollständig nutzbar Dammhöhe von 15 m (gedämmt)



Flacher Beckenspeicher; Dammhöhe wurde so gewählt, dass der Bodenaushub ausgeglichen ist

Abdeckung 3: vollständig nutzbar Dammhöhe von 15 m (nicht gedämmt)



Flacher Beckenspeicher; Dammhöhe wurde so gewählt, dass der Bodenaushub ausgeglichen ist

Abbildung 31: LTES-Kosten im Vergleich zur Flächennutzung - 1,2 Mio. m³, vollständig nutzbare Abdeckung, VA-Liner. Links: mit Wanddämmung bis zur Aquiclude-Tiefe (15 m), Rechts: ohne Wanddämmung (nur Deckel).

Der Vergleich zeigt, dass der Behälterspeicher mit Schlitzwand bei diesen Randbedingungen deutlich höhere Kosten verursacht als die anderen drei Geometrien – der flache Beckenspeicher liefert Kosten in der gleichen Größenordnung wie der hybride Beckenspeicher, allerdings bei deutlich höherem Flächenverbrauch. Es wurde festgestellt, dass der hybride Beckenspeicher und der hybride Behälterspeicher bei ihren jeweiligen kostenoptimalen Tiefen ähnliche Investitionskosten und einen ähnlichen Flächenverbrauch aufweisen. Der hybride Beckenspeicher wurde sowohl für die gedämmte als auch für die nicht gedämmte Variante ausgewählt, da diese die geringsten Gesamtinvestitionskosten aufwies. Der Kostenvorteil des hybriden Beckenspeichers gegenüber dem hybriden Behälterspeicher ist bei der nicht gedämmten Variante größer. Abbildung 32 zeigt die Speichereffizienz auf Systemebene in Abhängigkeit des Wärmemixes im Vergleich zum Referenzfall ohne LTES. Abbildung 33 stellt die geschätzten CO₂-Gesamtemissionen für das ausgewählte Baukonzept dar. Die angewandten Emissionsfaktoren sind in Anhang B zu finden.

Wärmebedarf Stadt A

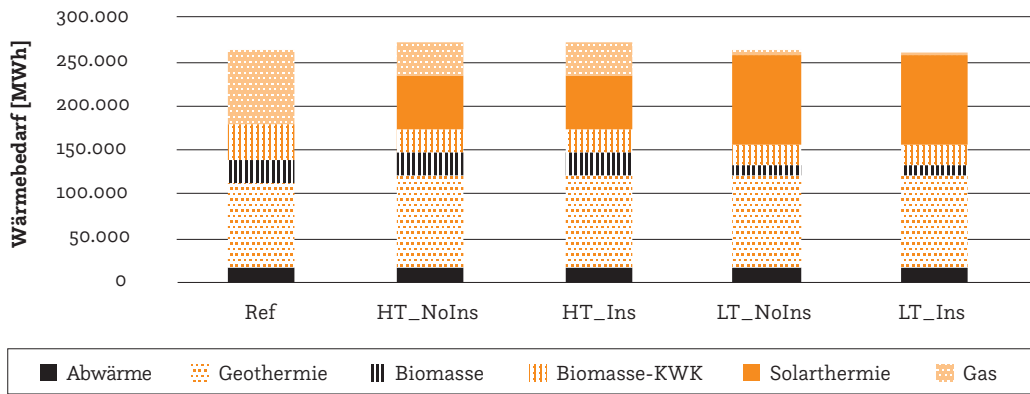


Abbildung 32: Vergleich der Wärmeerzeugung für HT- und LT-Systeme für gedämmte (Ins) und nicht gedämmte (NoIns) LTES - 1.200.000 m³

CO₂ Emissionsvergleich Stadt A

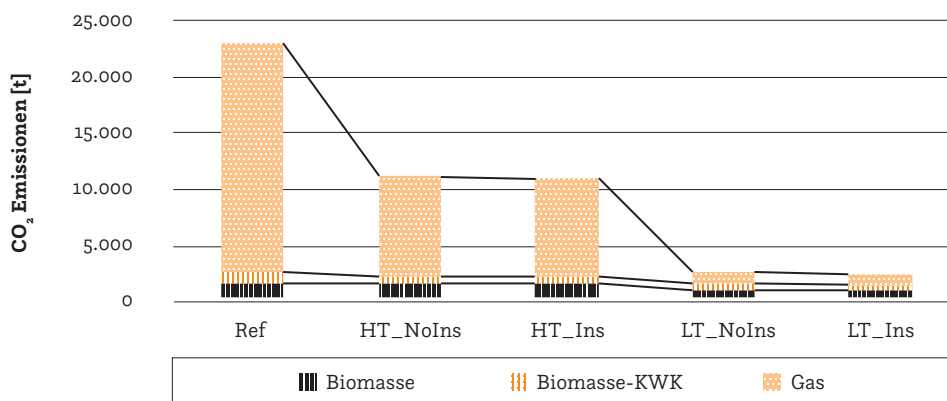


Abbildung 33: Vergleich der CO₂-Emissionen für HT- und LT-System für gedämmte und nicht gedämmte LTES - 1.200.000 m³

Die Integration des LTES in das HT-System ermöglichte eine Reduzierung des Gasanteils von 28 % auf 13 %, wobei die thermischen Verluste des Speichers berücksichtigt wurden. Bei diesem System war eine Nachheizung erforderlich, um die abgegebene Wärme auf der geforderten Vorlauftemperatur von 90 °C zu halten (etwa 20 % der gesamten Abnahme). Die Nachheizung wird mittels Biomasse bereitgestellt, wenn genügend Kapazität vorhanden ist, ansonsten kommen Gaskessel zum Einsatz. Die LT-Varianten erreichten einen wesentlich höheren Anteil an Solarthermie aufgrund der größeren effektiven Kapazität, wodurch der Gasanteil auf lediglich 0,2 % des gesamten Wärmebedarfs sank.

Um einen Überblick über die Gesamtkosten sowie spezifischen Kosten zu erhalten, zeigt Abbildung 34 eine Aufteilung für jede LTES-Variante.

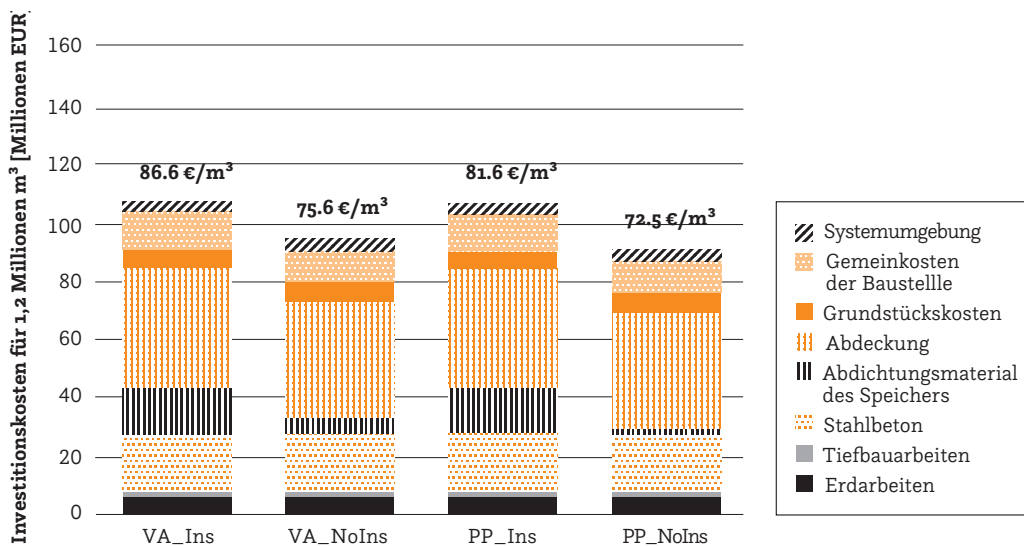


Abbildung 34: Vergleich der Investitionskosten - 1.200.000m³ LTES (hybrider Beckenspeicher, vollständig nutzbare Abdeckung). Zu jeder Variante sind die spezifischen Kosten angegeben.

Die im Rahmen des Projekts neu entwickelten PP-Liner haben eine geschätzte Lebensdauer von mehr als 50 Jahren mit Temperaturen von bis zu 80 °C und deutlich niedrigeren spezifischen Kosten als der Edelstahl-Liner; daher wurden PP-Liner für die LT-Fälle gewählt. Für die Hochtemperaturfälle wird erwartet, dass die Lebensdauer des PP-Liners auf 31-33 Jahre sinkt, weshalb der VA-Liner gewählt wurde, um ebenfalls eine vergleichbare Lebensdauer von 50 Jahren zu gewährleisten. Tabelle 6 enthält eine Projektion der wichtigsten Parameter zur Speichereffizienz, einschließlich der jeweiligen Speichergestehungskosten (LCOS) und Speichereffizienzen. Die Methodik zur Berechnung der LCOS ist in Anhang C dargestellt.

	HT_Ins	HT_NoIns	LT_Ins	LT_NoIns
LCOS	92.5 €/MWh	84.0 €/MWh	55.0 €/MWh	50.1 €/MWh
Speicherzyklen	1.45	1.42	1.36	1.35
Gespeicherte Energie	65 GWh	64.6 GWh	100.3 GWh	99.6 GWh
Entnommene Energie	59.43 GWh	58.136 GWh	94.8 GWh	94.2 GWh
Thermische Verluste	4.37 GWh	5.24 GWh	3.3 GWh	3.9 GWh
Energiedifferenz	1.2 GWh	1.2 GWh	2.16 GWh	1.52 GWh
Speicherwirkungsgrad ($\eta_{TES,sto}$)	89.5 %	87.4%	95.3 %	94.3 %

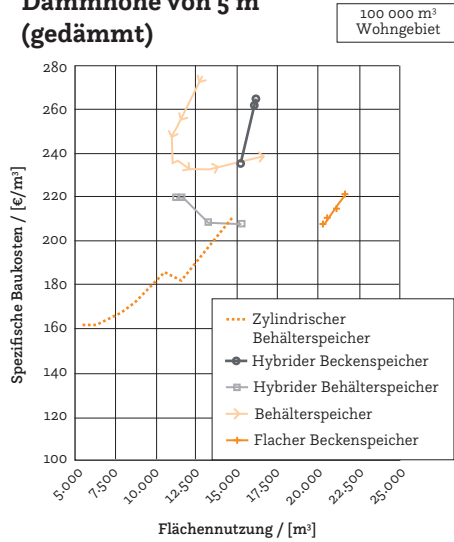
Tabelle 6: Wesentliche techno-ökonomische Speicherparameter für einen 1.200.000 m³ hybriden Beckenspeicher, voll nutzbare Abdeckung

Die LCOS sind für das HT-System mit ca. 92 €/MWh für das gedämmten Szenario deutlich höher als mit 55 €/MWh für die gedämmte LT-Anwendung. Im nicht gedämmten Fall ergibt sich eine Verringerung von etwa 8,5 €/MWh bzw. 5 €/MWh für das HT- bzw. LT-Szenario. Obwohl der Verzicht der Wärmedämmung zu Einsparungen führt, ist dieselbe notwendig um das Grundwasser vor Überhitzung zu schützen (siehe Abschnitt 7.2.4). Die Anzahl der Speicherzyklen spielt eine Schlüsselrolle bei den Speichergestehungskosten; in diesem Szenario wurde eine überwiegende saisonale Speicherung und keine kurzfristige Pufferung angedacht, sodass die erzielten Speicherzyklen nur im Bereich von 1,35-1,45 liegen; abhängig von den Wärmeverlusten und dem Temperaturniveau des Speichers. Für die HT-Fälle liegen die Speichergestehungskosten am oberen Ende der Spanne sodass eine weitere Optimierung der Materialkosten notwendig wird, um eine rein saisonale Speicheranwendung wirtschaftlich umzusetzen. Ein anderer Ansatz wäre, der Einsatz einer nicht nutzbaren Abdeckung, wie dies in einer Variante für Stadt B beschrieben wird.

5.3 Bewertungsergebnisse der Fallstudie: Stadt B

Das Kostentool wurde analog zur Unterstützung der Auswahl eines kostengünstigen Speicherkonzeptes für Stadt B auf Basis der gegebenen hydrogeologischen Rahmenbedingungen des Fernwärmesystems angewendet. Für kleinere Volumina im Bereich von 100.000 m³ wird auch ein zylindrischer Behälterspeicher als machbar erachtet und in den Vergleich mit einbezogen. Abbildung 35 zeigt die Parameterstudie mit gedämmten und nicht gedämmten LTES-Konstruktionen mit einem Edelstahl-Liner und einer vollständig nutzbaren Abdeckung für eine Reihe unterschiedlicher Speichertiefen, um den Einfluss auf die spezifischen Kosten und die Flächennutzung darzustellen. In allen Fällen zeigte eine Dammhöhe von 5 m das Kostenoptimum; bei einer Dammhöhe von mehr als 5 m müsste für den Bau des gesamten Damms noch Erdreich angeliefert werden.

**Abdeckung 3: vollständig nutzbar
(Behälter: selbsttragend)
Dammhöhe von 5 m
(gedämmt)**



**Abdeckung 3: vollständig nutzbar
(Behälter: selbsttragend)
Dammhöhe von 5 m
(nicht gedämmt)**

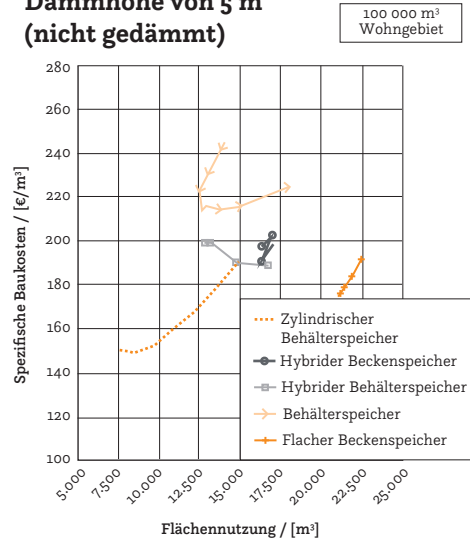


Abbildung 35: LTES-Kosten im Vergleich zur Flächennutzung - 100.000 m³, vollständig nutzbare Abdeckung, Edelstahl-Liner. Mit Wanddämmung bis zu einer Aquiclud-Tiefe von 15 m (links) und (rechts) ohne Wanddämmung (nur Deckel gedämmt)

Abbildung 36 und Abbildung 37 zeigen die Ergebnisse in Abhängigkeit des Wärmeversorgungsportfolios des FW-Systems und die CO₂-Emissionen sowohl für HT- als auch für LT-Systeme.

Wärmebedarf Stadt B

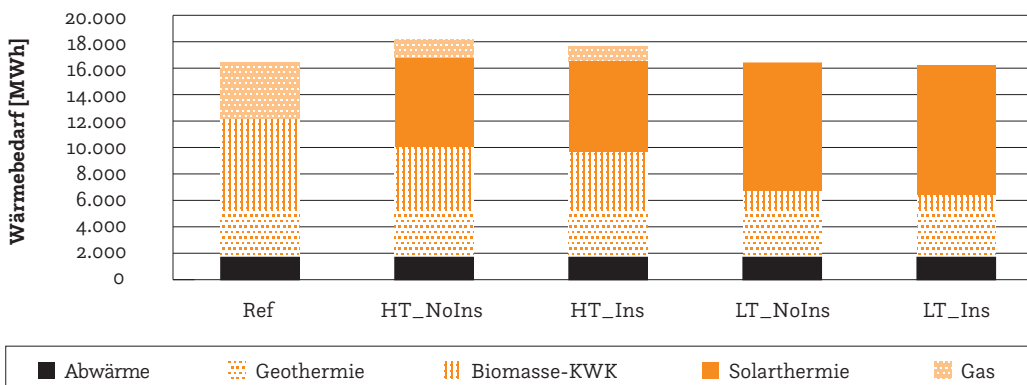


Abbildung 36: Vergleich der Wärmeerzeugung für HT- und LT-Systeme für gedämmte (Ins) und nicht gedämmte (NoIns) LTES - 100.000 m³

CO₂ Emissionsvergleich Stadt B

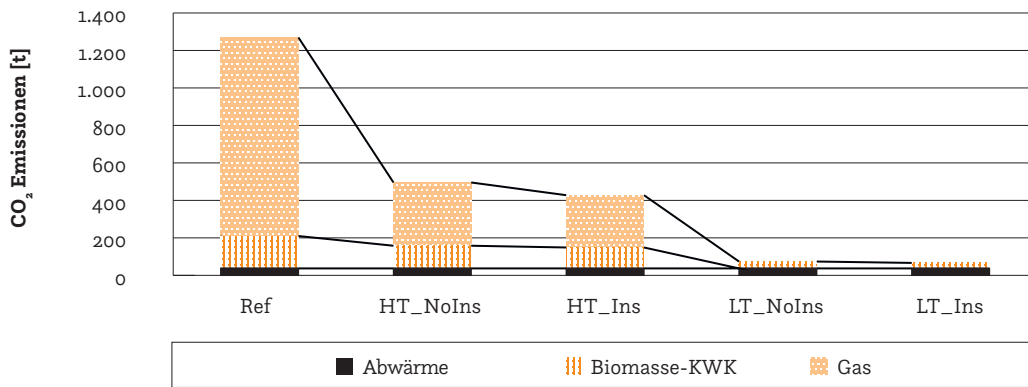


Abbildung 37:
Vergleich der CO₂-Emissionen für HT- und LT-Systeme für gedämmte und nicht gedämmte LTES - 100.000 m³

Die Vorteile des LT-Systems gegenüber dem HT-System sind auch hier deutlich sichtbar, wobei das LT-System eine Reduzierung von 28 % auf 0,2 % des gesamten Gaswärmeanteils im Vergleich zur Referenz erreicht, was einen vollständigen Verzicht des Gaskessels erlaubt. Die HT-Fälle mit einer geringeren effektiven Speicherkapazität und höheren Nachheizleistung schafften eine Reduzierung des Gasanteils auf etwa 8 %.

Um einen Überblick über die Kosten zu erhalten, zeigt Abbildung 38 eine Gliederung der geschätzten Investitionskosten für jede LTES-Variante.

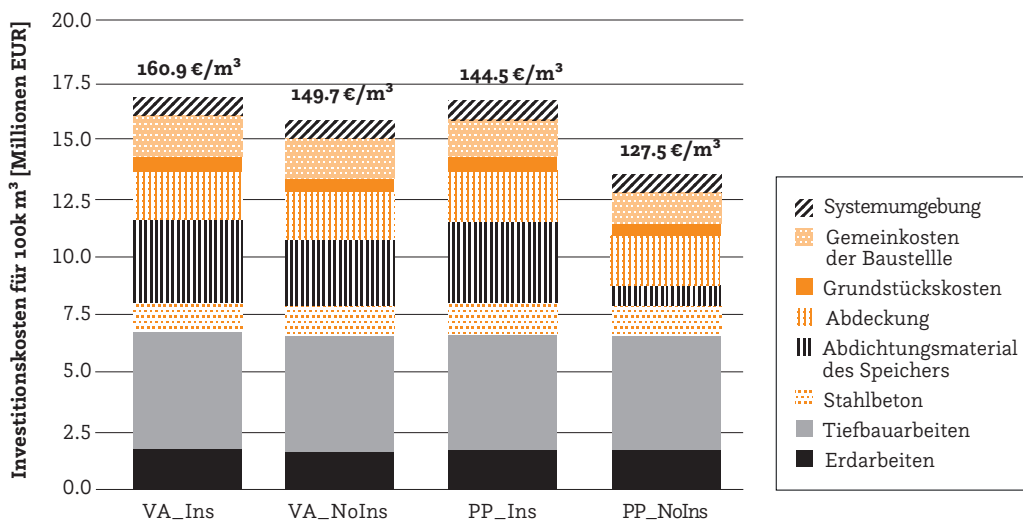


Abbildung 38.
Vergleich der Investitionskosten - 100.000 m³ LTES (zylindrischer Behälterspeicher, vollständig nutzbare Abdeckung). Zu jeder Variante sind die spezifischen Kosten angegeben.

Wie in Stadt A wurden Abdichtungsmaterialien aus Polypropylen für die LT-Szenarien und Edelstahl für HT-Szenarien gewählt, um bei vergleichbarer Speicherlebensdauer die LCOS-Werte darzustellen. Die hier berechneten spezifischen Investitionskosten sind deutlich höher als jene der Stadt A für große hybride Beckenspeicher. Die gedämmte Variante mit Edelstahlabdichtungsmaterial beträgt bei Stadt B ca. 160 €/m³ und somit mehr als das Doppelte der spezifischen Kosten im Vergleich zur Stadt A. Tabelle 7 zeigt die Ergebnisse der wichtigsten Parameter zur Speichereffizienz einschließlich der jeweiligen Speichergestehungskosten (LCOS).

	HT_Ins	HT_NoIns	LT_Ins	LT_NoIns
LCOS	138.6 €/MWh	138.7 €/MWh	90.6 €/MWh	79.3 €/MWh
Speicherzyklen	1.66	1.58	1.41	1.35
Gespeicherte Energie	6.6 GWh	6.5 GWh	8.8 GWh	8.65 GWh
Entnommene Energie	5.8 GWh	5.5 GWh	8.2 GWh	7.9 GWh
Thermische Verluste	0.66 GWh	0.877 GWh	0.477 GWh	0.713 GWh
Energiedifferenz	0.14 GWh	0.12 GWh	0.12 GWh	0.037 GWh
Speicherwirkungsgrad $\eta_{TES,sto}$	81 %	74.8 %	91.7 %	87.7 %

Tabelle 7: Wesentliche techno-ökonomische Speicherparameter für einen 100.000 m³ zylindrischen Behälterspeicher, voll nutzbare Abdeckung

Die hohen spezifischen Kosten spiegeln sich in den LCOS wider, wobei die HT-Fälle im Bereich von 139 €/MWh liegen. Die LT-Fälle sind aufgrund der Verwendung von PP-Linern und einer insgesamt höheren Wärmeabgabe aus dem Speicher über das Jahr deutlich kostengünstiger. Die Wirkungsgrade sind aufgrund des größeren Oberflächen-Volumen-Verhältnisses insgesamt niedriger als bei den 1.200.000 m³-Varianten. Dennoch ergibt das gewählte zylindrische Volumen mit einer Tiefe von bis zu 50 m einen beträchtlich hohen Wirkungsgrad, wobei die gedämmten Behälterspeicher im Bereich von 80 % bzw. 92 % für die HT- bzw. LT-Varianten liegen. Für eine befahrbare Überdachung mit saisonalem Betrieb ist die Konstruktion jedoch nicht wirtschaftlich. Ein Speicherkonzept mit geringeren Kosten durch eine nicht nutzbare Abdeckung wurde ebenfalls für die vier oben genannten Varianten analysiert. Der Vergleich aller Fälle für eine nicht befahrbare Abdeckung ergab, dass die flache Beckenbauweise mit einer vergleichbaren Neigung wie bei den bereits in Dänemark errichteten LTES die wirtschaftlichste Bauweise wäre, sofern der Aushub tiefer als der Grundwasserspiegel erfolgen kann, indem eine Trennwand und eine ausreichende Wandwärmedämmung im Bereich des Grundwassers vorgesehen ist. Mit diesen Zusätzen wurde die optimale Dimensionierung mit einer Tiefe von 22 m und einer Dammhöhe von 6 m für die flache Beckenbauweise gefunden. Abbildung 39 enthält eine Aufschlüsselung der Investitionskosten für jede Variante der Stadt B.

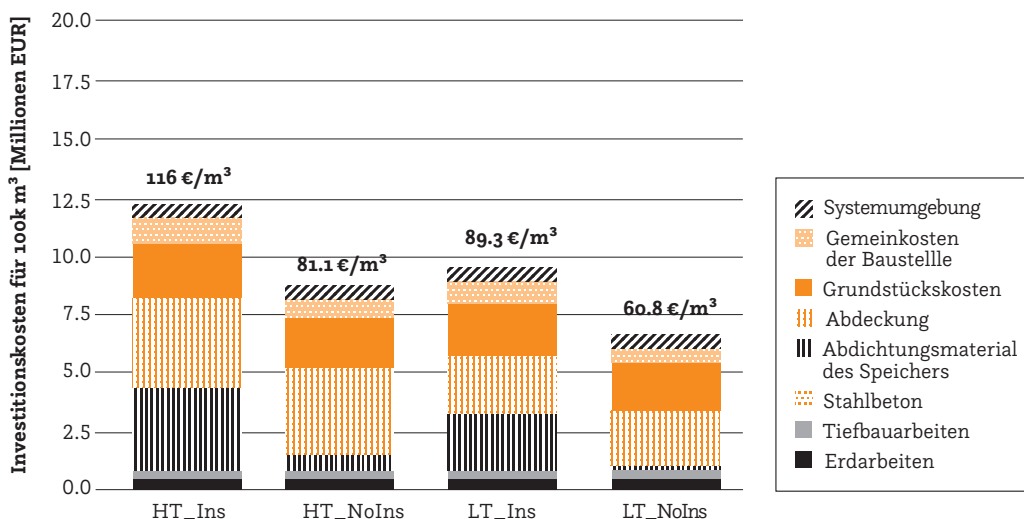


Abbildung 39: Vergleich der Investitionskosten - 100.000 m³ LTES (flacher Beckenspeicher, ohne nutzbare Abdeckung).

Die spezifischen Kosten sind bei den HT-Anwendungen immer noch vergleichsweise hoch, was vor allem auf die große Oberfläche zurückzuführen ist, die für Wärmedämmung und Abdichtungsmaterial benötigt wird. Hingegen können bei den LT-Varianten erhebliche Kosteneinsparungen für das Material zur Abdichtung sowie für die Wärmedämmung erzielt werden. Der nicht gedämmte Fall liegt in der Größenordnung von 61 €/m³ einschließlich Grundstückskauf.

Lässt man den Grundstückskauf und die Kosten für Peripherie (Wärmetauscher, Rohrleitungen, Wasserbeschaffung und -aufbereitung) außer Acht, liegen die spezifischen Kosten dieser Variante in der gleichen Größenordnung wie die realisierten dänischen LTES im Bereich von 100.000 m³ [6].

Tabelle 8 enthält einen Vergleich der jährlichen techno-ökonomischen Leistungswerte des LTES für die flache Beckenbauweise.

	HT_Ins	HT_NoIns	LT_Ins	LT_NoIns
LCOS	107.1 €/MWh	82.4 €/MWh	58.5 €/MWh	43.4 €/MWh
Speicherzyklen	1.61	1.52	1.39	1.34
Gespeicherte Energie	6.6 GWh	6.5 GWh	8.8 GWh	8.65 GWh
Entnommene Energie	5.6 GWh	5.3 GWh	8.1 GWh	7.8 GWh
Thermische Verluste	0.825 GWh	1.05 GWh	0.596 GWh	0.856 GWh
Energiedifferenz	0.175 GWh	0.15 GWh	0.1 GWh	0.0 GWh
Speicherwirkungsgrad ($\eta_{TES,sto}$)	76.3 %	69.7 %	89.7 %	85.2 %

Tabelle 8: Wesentliche techno-ökonomische Speicherparameter für einen 100.000 m³ flachen Beckenspeicher, ohne nutzbare Abdeckung

Im Allgemeinen sind die Wärmeverluste etwa 20-25 % höher als in den entsprechenden Fällen mit einem zylindrischen Behälterspeicher. Es sei darauf hingewiesen, dass die Wärmeverluste in der Praxis aufgrund des Einflusses des fließenden Grundwassers wesentlich höher sein können als die Simulationsergebnisse.

Außerdem ist zu beachten, dass die Erwärmung des Grundwassers durch unterirdische Bauwerke im Allgemeinen gesetzlich beschränkt und der maximal zulässige Temperaturanstieg begrenzt ist. Daher werden in der Praxis nur LTES-Varianten mit Wärmedämmung anwendbar sein, was die Möglichkeiten für kostengünstigere, nicht gedämmte Konzepte einschränkt. Bei der Betrachtung des Kostenniveaus für die hier gezeigten LTES-Varianten ist außerdem zu berücksichtigen, dass die Kosten auf Baumaterialien und -techniken für konventionelle Tiefbautechniken basieren. Sowohl die inhärenten Kostenunsicherheiten als auch das Kostensenkungspotenzial durch die Weiterentwicklung von Bautechniken und Bauverfahren sind hoch. Diese werden im Ausblick noch näher betrachtet.

6 Materialentwicklung

Zwei wichtige Komponenten für einen Großwärmespeicher sind das Abdichtungs- und das Wandmaterial. Für den Einsatz in einem LTES sollten die Materialien für diese Komponenten gegen Wasser und Wasserdampf bei hohen Temperaturen bis zu 95 °C beständig sein. Für die Auskleidung kommen entweder Kunststoffhalbzeuge oder rostfreier Stahl in Frage. Im Rahmen des Projekts wurden neuartige Kunststoffabdichtungsmaterialien erprobt und hinsichtlich ihrer Langzeitbeständigkeit kontinuierlich verbessert, während für Betonwandmaterialien erste Untersuchungen zum Langzeitverhalten unter Hochtemperatur- und Hochfeuchtigkeitsbedingungen durchgeführt wurden.

6.1 Entwicklung von Abdichtungsmaterialien

Gegenwärtig sind Polyethylen (PE) Abdichtungsmaterialien (Liner) für Beckenspeicher mit maximalen Betriebstemperaturen von bis zu 80 °C gut etabliert. Wie in einem vorausgegangenem Forschungsprojekt (SolPol-4/5) gezeigt wurde, ist die Haltbarkeit von PE-Dichtungsmaterialien in einem Temperaturbereich von 80 bis 95 °C mit Lebensdauerwerten unter 20 Jahren eher begrenzt. Im Rahmen des gigaTES-Projekts wurde daher der Schwerpunkt auf die Entwicklung neuartiger Polypropylen(PP)-Liner-Materialien gelegt, die eine höhere maximale Betriebstemperatur von bis zu 95 °C zulassen (d. h. +15 K im Vergleich zu etablierten PE-Linern). Dazu wurde ein handelsübliches Basismaterial mit fortschrittlichen Stabilisatorpaketen optimiert und Versuche zur Bestimmung des globalen Alterungsverhaltens in heißem Wasser und heißer Luft (Temperaturen: 65 bis 135 °C in 10-K-Schritten) durchgeführt. Für die beschleunigte Alterungscharakterisierung und die Vorhersage der Lebensdauer wurde eine Prüfmethode verwendet, die auf mikroskopisch kleinen Proben basiert. In Abbildung 39 wird die Lebensdauer des leistungsstärksten PP-HTR-Typs (hochtemperaturbeständiges Polypropylen) mit der des handelsüblichen PP-R (Polypropylen-Referenzmaterial, das in erster Linie für Heißwasserrohranwendungen verwendet wird) verglichen. Da die Einwirkung von heißer Luft viel kritischer war als die von heißem Wasser, werden die Daten für die Alterung in heißer Luft dargestellt. Die in Abbildung 40 dargestellten Zahlen wurden für 100µm große Mikroprüfkörper ermittelt, die durch CNC-Fräsen aus 2 mm dicken extrudierten Linern gewonnen wurden. Wie im vorangegangenen SolPol-2-Projekt nachgewiesen wurde, sind die Lebensdauern solcher PP-Typen bei einer Dicke von 100 µm etwa um den Faktor 2 niedriger als bei einer anwendungsrelevanten Linerstärke von 2 mm. Bei 115, 125 und 135 °C wurden für den optimierten PP-HTR-Typ im Vergleich zum PP-R-Referenzmaterial etwa doppelt so hohe Lebensdauern in Heißluft erreicht. Von hoher Relevanz sind die bei niedrigeren Temperaturen ermittelten Dauerhaftigkeitswerte. Die Alterungsversuche bei 95 und 105 °C sind noch nicht abgeschlossen. Bei diesen Temperaturen liegen die Lebensdauern der 100-µm-Mikroproben aus PP-HTR bei über 45.000 Stunden.

Material	95 °C	105 °C	115 °C	125 °C	135 °C
	Lebensdauer von 100 µm Mikroprüfkörper in trockener Luft [h]				
PP-R	32,000	22,000	14,500	6,800	3,300
PP-HTR	> 45,000	> 45,000	32,000	14,000	8,100

PP-HTR:

- >2x höhere Lebensdauer als PP-R
- noch besseres Verhalten in feuchter Luft (Faktor: 1,5x)
- einzigartiges Verhalten in heißem Wasser (bei 135 °C > 4x besser als in trockener Luft)

Abbildung 40: Lebensdauer von 100µm großen Mikroprüfkörper aus dem Referenzmaterial PP-R und dem optimierten Typ PP-HTR in Heißluft bei 95 bis 135 °C

Für die Lebensdauerbewertung wurden zwei Temperaturvarianten, zwei Wärmedämmungsvarianten und zwei Volumenvarianten (HT: 60-90 °C; LT: 35-80 °C; (un-)gedämmt, 100k vs. 1200k m³) betrachtet. Die in Abbildung 41 dargestellten Temperaturbelastungsprofile sind in einer numerischen Simulation auf Basis der Fallstudien berechnet worden. Die Temperaturprofile wurden in ein Programm zur Vorhersage der Lebensdauer integriert, dass die Ergebnisse der beschleunigten Alterungstests des PP-Liners verwendet. Für den PP-HTR-Liner wurden für die HT-Speichertypen Lebensdauern zwischen 31 und 35 Jahren ermittelt. Für gedämmte und größere Speicher (100 k vs. 1.200 k m³) ergaben sich geringfügig niedrigere Werte (<5 %). Die deutlich höhere Lebensdauer im Vergleich zum Referenzmaterial PP-R oder zu etablierten PE-Liner-Typen ist von hoher Relevanz, da viele Speicher, die sich derzeit in der Konzeption oder Entwicklung befinden, für hohe Temperaturbelastungsprofile bis zu 90 °C oder höher ausgelegt sind. Für etablierte Niedertemperatur-LTES mit Betriebstemperaturen im Bereich von 35 bis 80 °C lagen die Lebensdauerwerte des optimierten PP-HTR-Liners deutlich über 50 Jahren

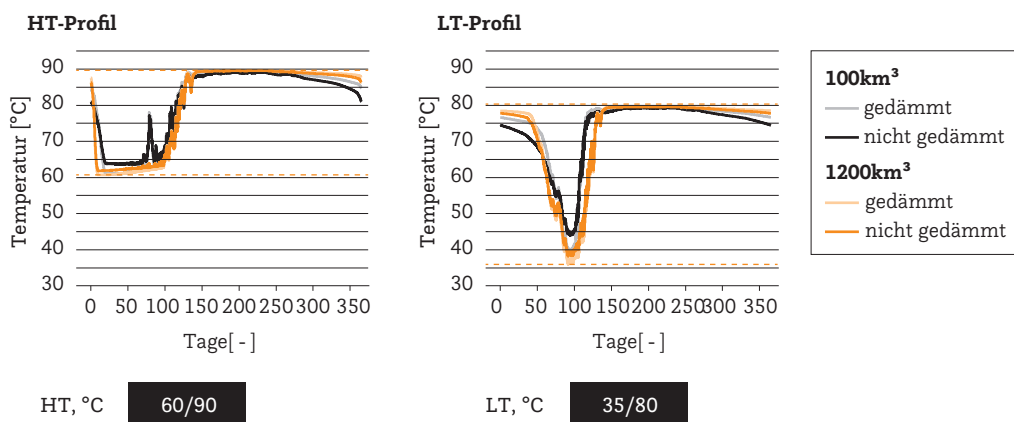


Abbildung 41: Jährliche Temperaturverteilungen für Hoch- und Niedertemperaturspeicher (HT; LT) unterschiedlicher Größe (100k und 1200k m³) und mit/ohne Wärmedämmung; diese Profile wurden für die Bewertung der Lebensdauer des Liners berücksichtigt

Da der Liner (zumindest während des Einbaus) ultraviolettem Licht ausgesetzt ist, wurden auch PP-Materialien mit unterschiedlichen UV-Schutzpigmenten und Stabilisatorpaketen untersucht. Besonderes Augenmerk wurde dabei auf die Bewitterung im Vergleich zum Heißluftalterungsverhalten gelegt. Die Ergebnisse zeigten deutlich, dass optimale Stabilisatorpakete unter Heißluftbedingungen bei künstlicher Bewitterung eine schlechtere Leistung aufweisen. Für das beste PP-HTR-Linermaterial war der Verzicht auf ein spezielles Pigment entscheidend. Auf der Grundlage dieser Ergebnisse hat der Rohstofflieferant eine PP-R-Referenztype auf den Markt gebracht, die sowohl eine gute Heißluft- als auch eine gute Witterungsbeständigkeit aufweist.

Neben der Entwicklung von Liner-Materialien wurden auch die Schweißtechniken und die Auswirkungen des Schweißens auf die Qualität der Liner-Materialien untersucht. Bewährte Verfahren zum Heißkeilschweißen wurden für neuartige PP-Liner analysiert, wobei die Heißkeiltemperatur variiert wurde (von 320 bis 410 °C). In Abbildung 42 ist der Ansatz für das Heißschweißen und die Vorbereitung von PP-Prüfkörpern in Mikrogröße für die Alterungsprüfung dargestellt.

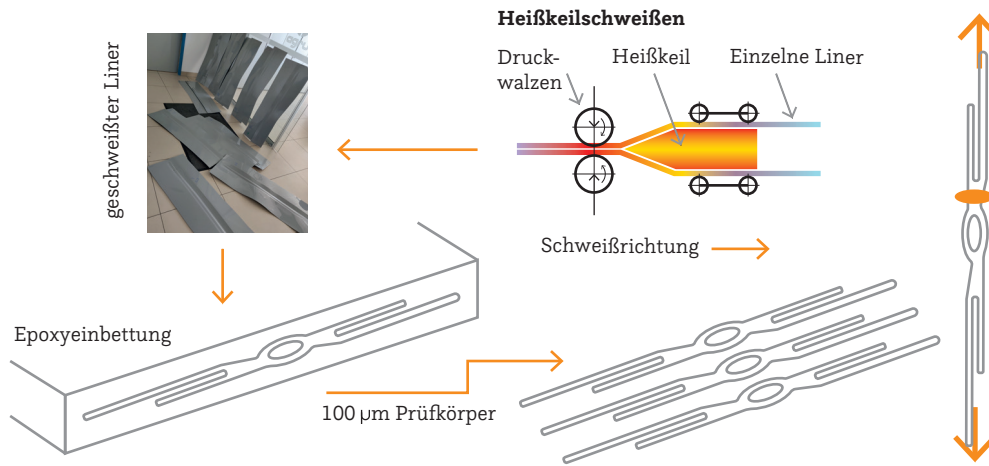


Abbildung 42: Verfahren zum Heißkeilschweißen von PP-Linern und Herstellung von Mikroprüfkörpern für Alterungstests.

Durch CNC-Fräsen wurden mikroskopisch kleine Späne aus geschweißten, in steife Epoxidblöcke eingebetteten Linern entnommen. Die geschnittenen Mikroprüfkörper wurden in Heißluft bei 95, 115 und 135 °C bis zu 12.000 Stunden lang gelagert. Die gealterten Proben wurden durch Infrarot-Transmissionsspektroskopie, Differential-Scanning-Kalorimetrie und Zugversuche charakterisiert. Die Alterungsindikatoren einschließlich Phenolindex, Oxidationstemperatur, Carbonylindex und Bruchdehnung wurden im Vergleich zu ungeschweißten Mikroproben bewertet. Das Heißkeilschweißen und die Keiltemperatur hatten einen vernachlässigbaren Einfluss auf diese Alterungsindikatoren (siehe Abbildung 43).

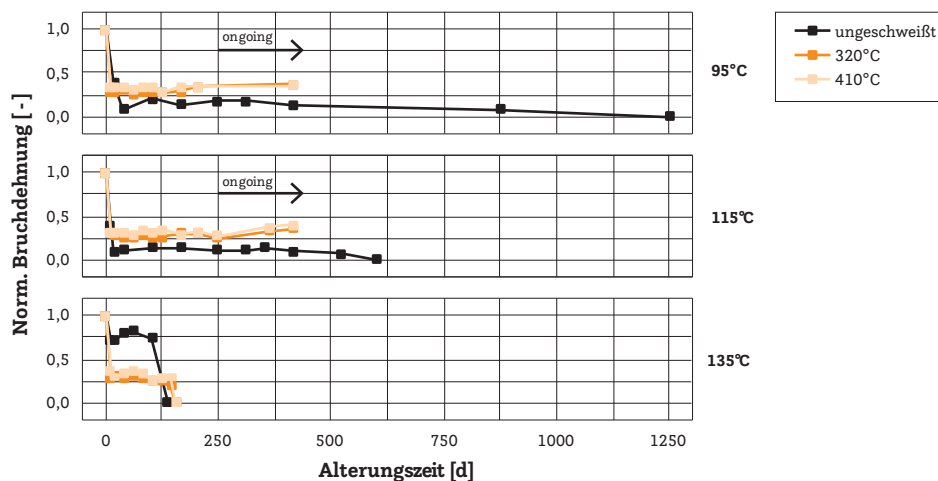


Abbildung 43: Normalisierte Bruchdehnung als Funktion der Alterungszeit von Mikroprüfkörpern aus ungeschweißten Innenschichten und aus PP-R, die bei einer Heißkeiltemperatur von 320 und 410 °C geschweißt wurden.

6.2 Alterungsverhalten von Betonmaterialien

Während Kunststoffabdichtungsmaterialien auf dem LTES-Markt gut etabliert sind und eine Leistungssteigerung ermöglichen, wurde bisher keine systematische Alterungscharakterisierung von Beton als potenzielles Abdichtungsmaterial durchgeführt. Daher wurden erstmals funktionale Betonsorten (z. B. wasserdichter Beton) und gut verarbeitbare Betonsorten (z. B. Schlitzwandbeton; Spritzbeton) auf ihr Langzeitverhalten in Heißwasser bei hohen Temperaturen (95 und 135 °C) untersucht. Dazu wurde ein Prüfaufbau auf Basis von Edelstahlautoklaven konzipiert und realisiert. Es wurden zylindrische Betonproben hergestellt und bis zu 6 Monate lang in heißem, unter Druck stehendem Wasser ausgesetzt. In Abbildung 44 ist das Konzept für die Langzeitprüfung von zylindrischen Betonproben in heißem Wasser dargestellt. Wie in Abbildung 45 zu sehen ist, war ein Anstieg der Druckfestigkeit nur bei wasserdichtem Beton zu erkennen. Spritz- und Schlitzwandbeton zeigten insbesondere bei 135 °C einen deutlichen Abfall der Druckfestigkeit. Bei 95 °C wurden für Spritzbeton Hinweise auf eine Degradation festgestellt.

Zur Erklärung des Druckfestigkeitsverlustes von Spritz- und Schlitzwandbeton ist eine detaillierte morphologische Analyse durchgeführt worden. Bei der Untersuchung von vakuumfluoreszierenden epoxyimprägnierten dünnen Betonscheiben wurde eine signifikant erhöhte Kapillarporosität für Spritz- und Schlitzwandbeton festgestellt, die bei 135 °C in heißem Wasser exponiert wurde. Weitere mikroskopische Phasenanalysen bestätigten die Bildung von sekundären Sulfatphasen (Anhydrit, Gips) bei 135 °C (nicht bei 95 °C) und eine signifikante Auflösung von Zementpartikeln bei 135 °C. Um die Hypothese der Veränderung der Phasenstabilität von hydratisiertem Zement mit steigender Lagertemperatur zu bewerten, wurde eine Mikro-Röntgenfluoreszenz-Analyse (μ XRF) durchgeführt. Für Spritz- und Schlitzwandbeton, die auf schwefelhaltigen Betonrezepturen basieren, wurde eine temperaturbedingte Abnahme des Schwefels im Zementstein und die Ausfällung von Sulfaten in den Poren festgestellt. Im Gegensatz dazu war der Schwefelabbau bei 135 °C von wasserdichtem Beton auf Basis von C_3A (Tricalciumaluminat) freiem Zement eher gering und unkritisch.

Testkonzept

Rezepturen:

- wasserdichter Beton
- Schlitzwandbeton
- Spritzbeton

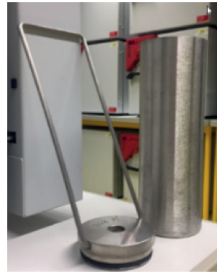
Proben:

- Zylinder:
d x h = 5cm



Alterungsbedingungen:

- Referenz 20 °C unter Wasser
- Heißwasser: 95 °C, 135 °C (~3 bar)
- in Autoklaven exponierte Zylinder
- intervalls: 1, 3, 6 Monate

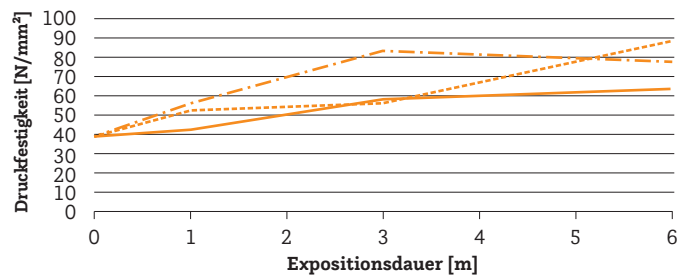


Eigenschaften:

- Druckfestigkeit
- morphologische Analyse
- Dünnschnitt



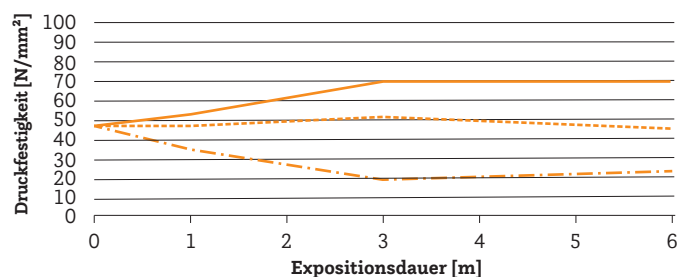
Abbildung 44: Konzept zur Langzeitprüfung von zylindrischen Betonprobekörpern in heißem Wasser.



Wasserdichter Beton
(CEM I 42,5 N C₃A-frei + AHWZ)

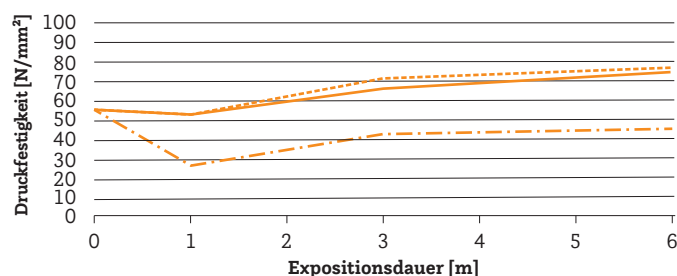
- 20°C ref
- - - 95°C water
- · - 135°C water+p

Abbildung 45: Druckfestigkeit von wasserdichtem, Spritz- und Schlitzwandbeton in Abhängigkeit von der Expositionsdauer in Wasser bei 20, 95 und 135°C.



Spritzbeton
(CEM I 52,5 R + AHWZ)

- 20°C ref
- - - 95°C water
- · - 135°C water+p



Schlitzwandbeton
(CEM II A-M 42,5N + AHWZ)

- 20°C ref
- - - 95°C water
- · - 135°C water+p

6.3 Entwicklung von Polymer/Metall-Hybridlaminaten mit Gasbarriereigenschaften

Ein Nachteil von polymeren Dichtungsmaterialien ist die temperaturabhängige Durchlässigkeit für Gase, die mit dem Verlust des Wärmeträgers Wasser oder der Anreicherung von Sauerstoff einhergeht. Aus diesem Grund wurden Polymer/Metall-Laminat entwickelt und anhand von Prüfkörpern untersucht. Es wurde ein Alterungs- und Permeationsprüfkonzept implementiert, das eine betriebsrelevante Bewertung von Barrierelaminaten im Kontakt mit heißem Wasser und Luft an der Oberfläche ermöglicht. Dazu wurden zwei Flansche mit CNC-gefrästen Taschen und einer Nut für einen Elastomerdichtring hergestellt. Zwischen den Flanschen wurden Proben von Barrierelaminaten platziert und in Heizöfen untersucht. Um die Permeationsrate zu ermitteln, wurden die Taschen auf der einen Seite mit einer definierten Masse Wasser und auf der anderen Seite mit trockenem Silikagel gefüllt. Nach der Exposition wurde die Masse des feuchten Kieselgels bestimmt. Außerdem wurden T-Peel-Tests und Bruchflächenanalysen durchgeführt.

Die abgeleitete Permeationsrate von $6 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot 24\text{h})$ für die PP-Liner-Materialien stand in guter Übereinstimmung mit den Ergebnissen der dänischen PTES. Für das Barrierelaminat wurde eine vernachlässigbare Permeationsrate mit Werten innerhalb der Messunsicherheit abgeleitet, was die Wirksamkeit der eingesetzten Barriereliner bestätigt. Für die Verklebung der Aluminium-Sperrschicht mit den äußeren Polyolefinschichten (PP oder PE) wurden ein Ethylen-Copolymer und ein Polyurethan-Klebstoff verwendet. Ein besseres Langzeitverhalten wurde für den Ethylen-Copolymer-Klebstoff mit chemischer Vernetzungsmöglichkeit in heiß-feuchter Umgebung festgestellt. Bei einer Expositionszeit von mehr als 6 Monaten bei 95°C wurde keine signifikante Verschlechterung der Barrierelaminat festgestellt. Schließlich wurden Vorversuche mit Natriumhydroxid in Wasser mit einem pH-Wert von 9,5 durchgeführt, die bisher vergleichbare Ergebnisse wie in heißem Wasser zeigten. Es sollte jedoch erwähnt werden, dass der NaOH-Gehalt innerhalb der ersten Tage der Exposition erheblich abnahm. Daher sollte in künftigen Studien ein offener Kreislauf entwickelt werden, der eine kontinuierliche Versorgung mit einem pH-Wert für Wasser von 9,5 ermöglicht. Darüber hinaus sollte ein besonderes Augenmerk auf die angemessene Gestaltung und Bewertung der langfristigen Leistung von Schweißnähten von Barrierelaminaten gelegt werden.

Konzept und Gerät für Permeations- und Alterungstests

- Exposition des Testaufbaus bei 95°C
- Diffusionsinduzierte Grenzflächendegradation
- Überwachung des Alterungsverhaltens bis zu 4300 Stunden

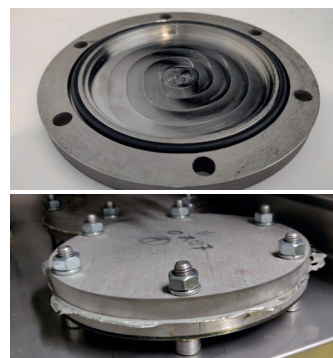
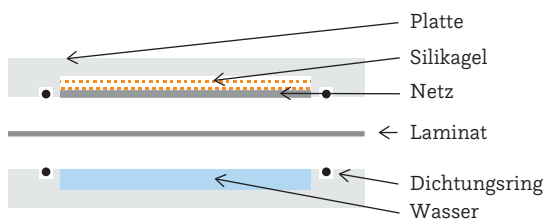


Abbildung 46: Schematische Darstellung und realisierte Prüfvorrichtung für die Alterungs- und Permeationsprüfung von Barrierelaminaten.

7 Einfluss von Auslegungsparametern auf die Speichereffizienz

Die Implementierung numerischer Modelle von Großwärmespeichern ist eine wichtige Alternative zu realen experimentellen Untersuchungen, da sie die Bewertung des Einflusses verschiedener Design- und Auslegungsaspekte sowie Rahmenbedingungen auf die Effizienz des Großwärmespeichers als Einzelkomponente sowie als Teil des Fernwärmesystems ermöglicht.

Wie in [12] und [3] dargestellt, ermöglicht eine Modellierung auf Speicherebene eine gründliche Analyse und Optimierung des Speichers selbst, während eine Modellierung auf Systemebene die Untersuchung der Integration, des Betriebs und der Optimierung des TES innerhalb des Fernwärmesystems unterstützt. Auf der ersten Ebene sind Werkzeuge wie COMSOL Multiphysics und ANSYS besonders effektiv, um die komplexen Wärme- (und Feuchte-) Übertragungsmechanismen innerhalb des TES selbst und zwischen dem TES und seiner Umgebung (mit fließendem Grundwasser) zu definieren. Auf der zweiten Ebene haben sich Werkzeuge wie TRNSYS, MATLAB/Simulink und Modelica-basierte Simulationswerkzeuge bei der Modellierung großer komplexer Systeme bewährt und ermöglichen die Definition der Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Komponenten (d.h. TES, Wärmequellen, Verbraucher) in unterschiedlichem Detailierungsgrad. Eine dritte Modellierungsebene lässt sich weiter bestimmen, wenn der Schwerpunkt der Analyse auf den gegenseitigen Wechselwirkungen zwischen dem Untergrund und dem TES liegt (siehe Abbildung 47). Dieser Modellierungsansatz auf der "hydrologischen Ebene" ist insbesondere in Bezug auf eine bevorstehende Umweltverträglichkeitsprüfungen für den Bau des TES von Bedeutung.

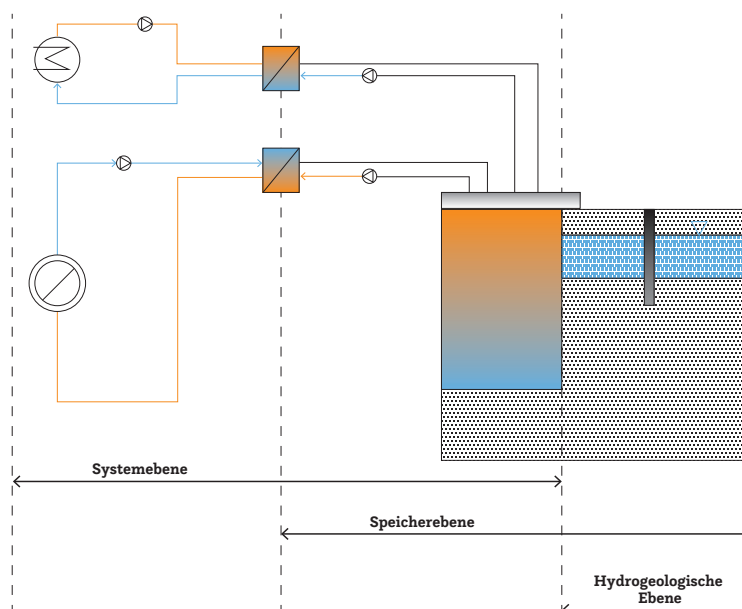


Abbildung 47: Darstellung der drei Modellierungsebenen [13]: die Systemebene, die Speicher- (oder Komponenten-) Ebene und die hydrogeologische Ebene.

Für die Bewertung der Effizienz von Großwärmespeichern gibt es in der Literatur zahlreiche Indikatoren oder Leistungskennzahlen (Key Performance Indicators, KPIs), die für die Entscheidungsfindung und den Vergleich verschiedener Speicherkonzepte besonders hilfreich sind.

Unter anderem ist der Entnahmewirkungsgrad eines Speichers besonders hilfreich bei der Bestimmung der Fähigkeit, die gespeicherte Energie zurückzugewinnen, und wird wie folgt definiert:

$$\eta_{TES,ent} = \frac{Q_{Entnahme}}{Q_{Speicherung}}$$

Ein weiterer Faktor ist der Speicherwirkungsgrad, der das Verhältnis zwischen der effektiven Speicherkapazität des Wärmespeichers und der maximalen, theoretischen Speicherkapazität angibt. Diese Kennzahl beschreibt die direkte Korrelation zwischen den jährlichen Wärmeverlusten und der für dieses Volumen berechneten maximalen Speicherkapazität:

$$\eta_{TES,sto} = 1 - \frac{Q_{Verluste}}{Q_{TES\ max.}}$$

Eine ausführliche Beschreibung der verschiedenen KPIs, die zur Bestimmung der Effizienz eines Wärmespeichers zur Verfügung stehen, wird in [14] gegeben. In diesem Kapitel wird die Speichereffizienz ($\eta_{TES,sto}$) verwendet, um die verschiedenen Speicherlösungen zu vergleichen, und als (η) definiert. Im Folgenden wird beispielhaft der Einfluss der wichtigsten Auslegungsparameter und Rahmenbedingungen für Großwärmespeicher mit Hilfe von Simulationsergebnissen des numerischen Modells untersucht.

7.1 Realisierung des numerischen Modells für Großwärmespeicher

Um das Verhalten von Großwärmespeicher zu erfassen und ihre Energieeffizienz zu bestimmen, wird ein numerischer Ansatz mit COMSOL Multiphysics aufgebaut. Das wichtigste Merkmal dieses Modells ist seine Fähigkeit, eine detaillierte geometrische Darstellung des Speichers und des umgebenden Erdreichs sowohl in 2D als auch in 3D zu liefern. Diese Eigenschaft ermöglicht die Anwendung verschiedener Geometrien von Behälter und Erdbecken sowie hybrider Behälter (als Kegel- oder Pyramidenstumpf) und die Umsetzung verschiedener Lösungen für die Wärmedämmung in Bezug auf Verteilung, Dicke und Qualität. Eine ausführliche Beschreibung zur Methodik und zur Umsetzung dieses Modells findet sich in [14], wo auch die Anwendung an einer realen Fallstudie (Dronninglund Erdbecken-Wärmespeicher, Dänemark) vorgestellt wird. Die Wasserdomäne wird durch eine 1D-Linienquelle abgebildet, die in vertikale Segmente mit einheitlicher Temperatur unterteilt ist (siehe Abbildung 48).

Ein weiteres wichtiges Merkmal des entwickelten Modells ist die Möglichkeit, multiphysikalische Aspekte einzubeziehen, wodurch die Berücksichtigung von Grundwasser (GW), die Untersuchung der gegenseitigen Beeinflussung von GW und Großwärmespeicher und die Definition der optimalen Gestaltung entsprechender baulicher Maßnahmen (d.h. Dichtwände – siehe dazu Kapitel 3) ermöglicht werden. Zu diesem Zweck wird das Erdreich, das den LTES umgibt, in Form von Finite Elementen (FE) diskretisiert. Die 2D-Darstellung ist bei achsensymmetrischen Verhältnissen des LTES und der Umgebung nützlich, während die Anwendung der 3D-Darstellung notwendig ist, wenn Asymmetrien vorhanden sind (z.B. LTES mit rechteckigem Querschnitt, Existenz von fließendem GW). Die Möglichkeit, das Modell von 2D auf 3D zu erweitern, ist ein wichtiger Vorteil, da 2D eine bemerkenswerte Verringerung des Rechenaufwands ermöglicht, während 3D ein tieferes Verständnis der asymmetrischen Aspekte gewährleistet, auch wenn dies mit einem deutlich höheren Rechenaufwand für die Simulation verbunden ist.

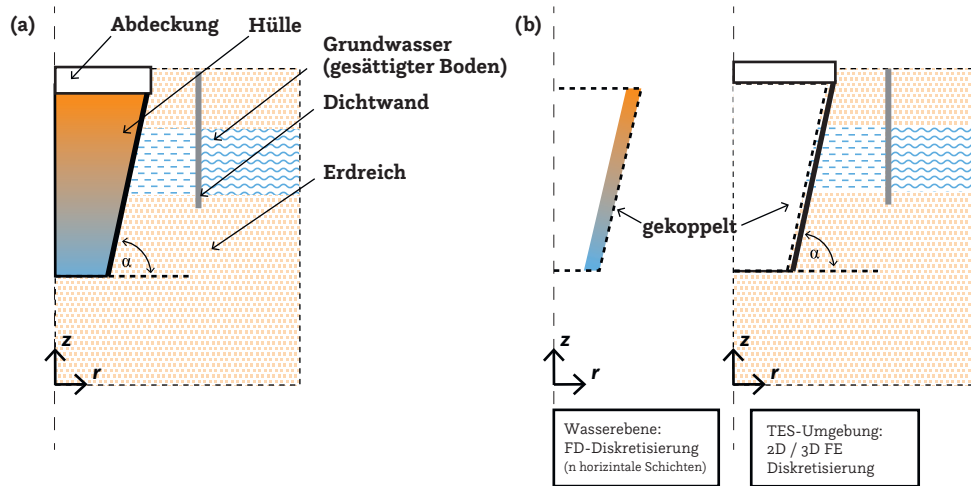


Abbildung 48: Schematik zum entwickelten COMSOL TES-Modell. (links) Unterscheidung der beiden untersuchten Domänen: der Wasserdomäne und Umgebung (Erdreich mit GW) (rechts)

Ein wichtiger Punkt bei der Planung eines Großwärmespeichers ist das Fernwärmesystem, in dem dieser betrieben werden soll. Um diese Systemaspekte auf Komponentenebene zu berücksichtigen und um einen detaillierteren Einblick in die Rolle des Großwärmespeichers im Fernwärmesystem zu erhalten wurden Lade- und Entladeprofile mit zwei verschiedenen Betriebstemperaturen (HT: hohe Temperatur, LT: niedrige Temperatur – siehe dazu Kapitel 4), einbezogen. COMSOL Multiphysics erweist sich bei der detaillierten Untersuchung des LTES als "Komponente" als sehr effektiv, jedoch erfordert die detaillierte Betrachtung der Integration eines Großwärmespeichers in ein Fernwärmesystem die Einführung weiterer Komponenten, d.h. Verbraucher, Wärmequellen und Back-up-Systeme, was zu einer erhöhten Komplexität des Modells führt. Letztendlich erweist sich das implementierte COMSOL-Modell als besonders effektiv bei der Beschreibung der Ebenen "Speicher" und "Hydrogeologie", wie in Abbildung 47 dargestellt. Im Folgenden wird ein beispielhafter Überblick über die Auswirkungen des Erdreichs und der LTES-Auslegungsparameter (wie Bauart, Größe, Geometrie, Wärmedämmung – siehe dazu Kapitel 3) auf die Speichereffizienz gegeben.

7.2 Detaillierte Simulationsergebnisse

In diesem Abschnitt wird ein Überblick über die Ergebnisse der detaillierten LTES-Simulationen gegeben. Insbesondere wird der Einfluss der Erdreischeigenschaften (d.h. das Vorhandensein von GW) auf die Speichereffizienz für verschiedene LTES-Baukonzepte bewertet. Die vorgestellten Ergebnisse und Diagramme sind aus [13] entnommen.

7.2.1 Einfluss des Erdreichs

Bei unterirdischen Großwärmespeichern gibt es eine große Kontaktfläche zwischen dem Wärmespeicher und dem umgebenden Erdreich, so dass die Wahl eines geeigneten Standorts von geologischen Faktoren abhängt (z.B. von den geologischen Bedingungen des Standorts, seinen thermophysikalischen Eigenschaften, allgemeinen hydrogeologischen und geomechanischen Eigenschaften).

Eine hohe Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs kann die Effizienz des Speichers stark beeinträchtigen und insbesondere ohne Einsatz von Wärmedämmung an den Seitenwänden zu einem ineffizienten Betrieb führen. Bei einer detaillierten Untersuchung der gegenseitigen Beeinflussung zwischen LTES und des umgebenden Erdreichs dürfen jedenfalls die Beschaffenheit des porösen Bodens und das Vorhandensein von (fließendem) GW nicht außer Acht gelassen werden. In den letzten Jahren haben viele Länder in Europa Vorschriften, techni-

sche Richtlinien und Empfehlungen zur thermischen Nutzung des Untergrunds eingeführt: Im Falle Österreichs ist die maximal zulässige GW-Temperatur auf 20 °C beschränkt, siehe [15]. LTES und GW beeinflussen sich gegenseitig, was zu einer geringeren GW-Qualität und zu einer geringeren Speichereffizienz führen kann. Diese Einflüsse können durch verschiedene bauliche Maßnahmen reduziert werden, wie z.B. durch den Bau einer sog. Dichtwand oder die Installation einer Wärmedämmung an der Seitenwand und ggf. am Boden.

Ein Beispiel zum Einfluss der GW-Strömung (mit der Fließgeschwindigkeit u_{GW}) auf die Speichereffizienz ist in Tabelle 9 dargestellt, welche die Wärmeverluste und den Speicherwirkungsgrad für ein Behältervolumen von 2.000.000 m³ in einem HT-Fernwärme-System zeigt. Bei den Simulationen wird für die ungestörte GW-Temperatur das Jahresmittel der Umgebungstemperatur angenommen. Die Ergebnisse liefern wichtige Erkenntnisse darüber, dass der größte Anstieg der Wärmeverluste an den Seitenwänden auftritt, wenn die GW-Strömung den LTES-Mantelbereich umgibt. Es ist ersichtlich, dass eine Zunahme der Grundwasserfließgeschwindigkeit zu einem deutlichen Anstieg der Wärmeverluste im Vergleich zu günstigen geologischen Bedingungen (d.h. ohne GW) und damit zu einer verringerten Speichereffizienz führt.

u_{GW} [m/s]	$Q_{Verluste}$ [GWh/a]				η / [%]
	Oberfläche	Seitenwand	Boden	Gesamt	
0 (no GW)	3.7	1.8	1	6.5	91
$2.5 \cdot 10^{-6}$	3.7	4.5	1.1	9.3	86.5
$7.5 \cdot 10^{-6}$	3.7	5.3	1.1	10.1	85.5

Tabelle 9: Zusammenfassung der thermischen Gesamtverluste und des entsprechenden Speicherwirkungsgrads für einen 2.000.000 m³ Behälterspeicher ohne Wärmedämmung an den Seitenwänden und am Boden und ohne Dichtwand bei unterschiedlichen Untergrundbedingungen (entnommen aus [13]).

In Abbildung 49 ist die Erdreichtemperatur für einen Behälterspeicher mit 2.000.000 m³ unter zwei verschiedenen GW-Bedingungen dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass die niedrigere GW-Fließgeschwindigkeit (a) zu einer höheren Temperatur in weiter entfernten Bereichen führt und einen Einfluss auf die Umgebung hat, da die Größe der Wärmefahne bei niedrigen Geschwindigkeiten stärker zunimmt.

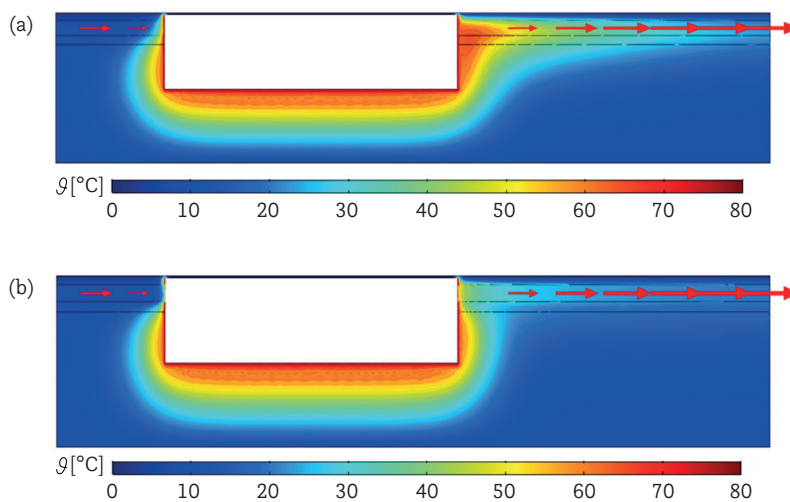


Abbildung 49: Temperaturprofil für einen 2.000.000 m³ Behälterspeicher in der Modellsymmetrieebene (y-z) von COMSOL Multiphysics nach 10 Jahren mit einer GW-Strömung: (a) $u_{GW} = 2,5 \times 10^{-6}$ m/s; (b) $u_{GW} = 2 \times 10^{-3}$ m/s (entnommen aus [13]).

Um die Wechselwirkung zwischen Wärmespeicher und Grundwasser zu begrenzen, können während des Speicherbaus verschiedene technische Verfahren angewendet werden. Die Verwendung einer vertikalen Dichtwand scheint besonders wirksam zu sein; ihre Lage muss jedoch auf der Grundlage der GW-Strömungseigenschaften genau festgelegt werden. Aus den Simulationsergebnissen lässt sich ableiten, wie mit zunehmendem Abstand der Dicht-

wände die Wärmeverluste abnehmen und dementsprechend auch die Temperatur des GW sinkt. Darüber hinaus nehmen die Wärmeverluste mit zunehmendem LTES-Volumen erheblich zu, so dass sich der Einfluss des Dichtwandabstands ändern könnte.

7.2.2 Einfluss bei größerem Speichervolumen

Die Vergrößerung des Speichervolumens führt zu einer Verbesserung der Effizienz, da das Oberflächen-Volumen-Verhältnis (SA/V) besser wird. Dieser Aspekt wird in Abbildung 50 verdeutlicht, in dem die Auswirkungen des Speichervolumens, der GW-Geschwindigkeit und des Abstands der Dichtwand (d_{cw}) auf den Speicherwirkungsgrad dargestellt werden. Die Simulationsergebnisse zeigen, dass sich die Speichereffizienz bei großen Volumina deutlich von ca., 70 % auf etwa 89 % erhöht. Der Abstand der Dichtwand hat insbesondere bei großen Fließgeschwindigkeiten und bei kleineren Speichervolumen einen hohen Einfluss.

Die Dichtwand ist auf jeden Fall auch bei größeren Volumina eine wichtige Maßnahme, um eine Überhitzung des Grundwassers zu verhindern. Abbildung 51 und Abbildung 52 zeigen die Auswirkungen des Abstands der Dichtwand in Bezug auf die thermischen Verluste und die Abstromtemperatur für die Volumina 100.000 m³ und 2.000.000 m³. Obwohl der vergrößerte Dichtwandabstand zu einer minimalen Verbesserung des Speicherwirkungsgrads führt, sind die Auswirkungen auf die Grundwassertemperatur an der Außenfläche der Dichtwand deutlich.

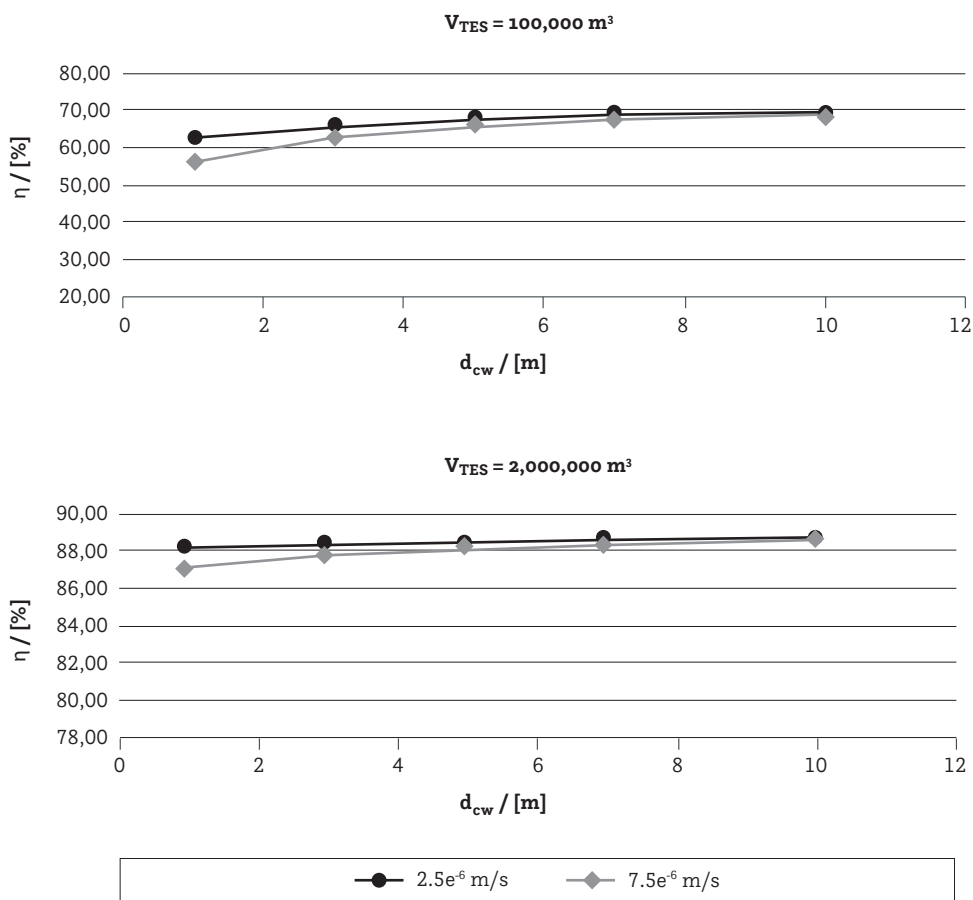


Abbildung 50: Speicherwirkungsgrad (nach 10 Jahren) für einen Behälterspeicher mit zwei unterschiedlichen Volumina (100.000 m³ und 2.000.000 m³) bei unterschiedlichen Grundwasserströmungsgeschwindigkeiten und Abständen der Dichtwand (d_{cw}) (entnommen aus [13]). (Anmerkung: i.d.R. werden Fließgeschwindigkeiten von kleiner 105 m/s vorliegen.)

Tank TES V= 100.000 m³

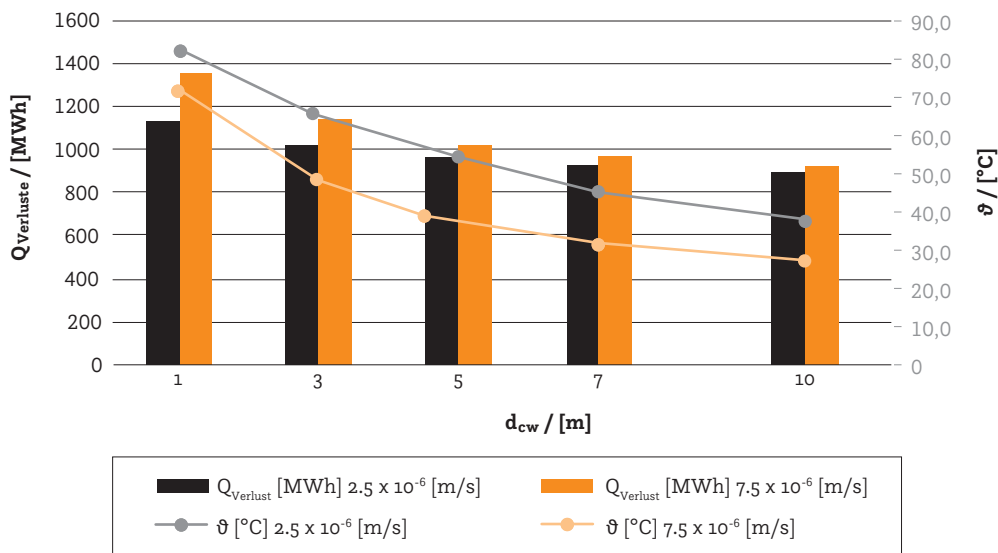


Abbildung 51: Wärmeverluste über Seitenwand und Boden eines Behälterspeichers von 100.000 m³ (Balken, primäre linke y-Achse) mit der entsprechenden Strömungstemperatur (Linien, sekundäre rechte y-Achse) bei unterschiedlichen Dichtwandabständen (aus [13] entnommen).

Tank TES V= 2.000.000 m³

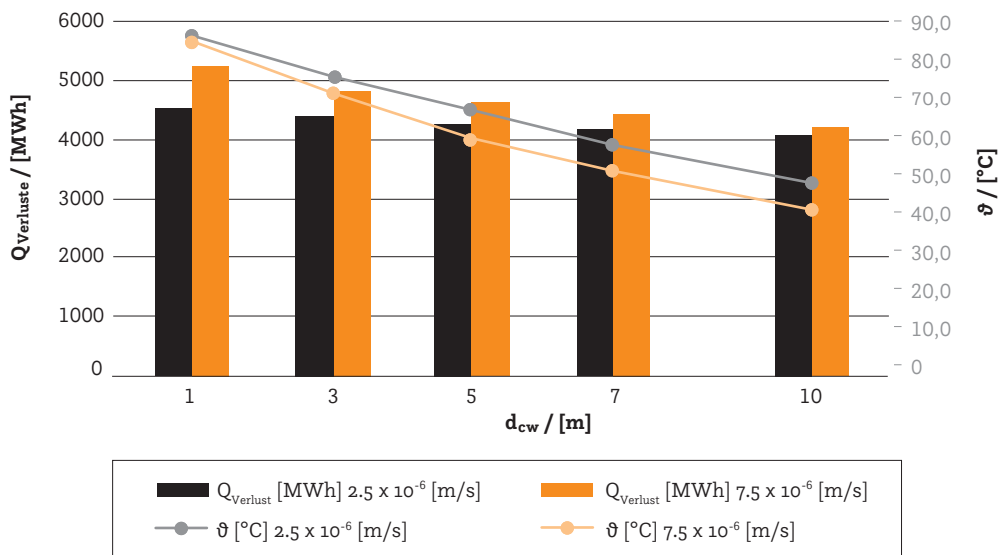


Abbildung 52: Wärmeverluste über Seitenwand und Boden eines Behälterspeichers von 2.000.000 m³ (Balken, primäre linke y-Achse) mit der entsprechenden Strömungstemperatur (Linien, sekundäre rechte y-Achse) bei unterschiedlichen Dichtwandabständen (aus [13] entnommen).

7.2.3 Einfluss der Speichergeometrie

Eine wichtige Überlegung für das Design von Großwärmespeicher bezieht sich auf die Geometrie des Speichers: eine allgemeine Empfehlung ist, ein kleines Oberflächen/Volumen(SA/V)-Verhältnis einzuhalten, wie bereits im vorhergehenden Absatz erwähnt. In diesem Zusammenhang zeigt Abbildung 53 einen Vergleich zwischen einem unterirdischen Behälterspeicher und einem flachen Erdbecken-Wärmespeicher (S-PIT) jeweils mit einem Volumen von 500.000 m³ in Bezug auf die thermischen Verluste und auf die GW-Temperatur bei einer Fließgeschwindigkeit von $2,5 \times 10^{-6}$ m/s. Die Ergebnisse zeigen, dass der flache Erdbecken-Wärmespeicher deutlich höhere thermische Verluste als der Behälterspeicher und folglich einen geringeren Speicherwirkungsgrad aufweist. Die GW-Temperatur bleibt beim flachen Erdbecken-Wärmespeicher deutlich niedriger als beim erdvergrabenen Behälterspeicher, dennoch wäre in beiden Fällen eine Dichtwand und ggf. Wärmedämmung notwendig um eine Übererwärmung des Grundwassers zu verhindern.

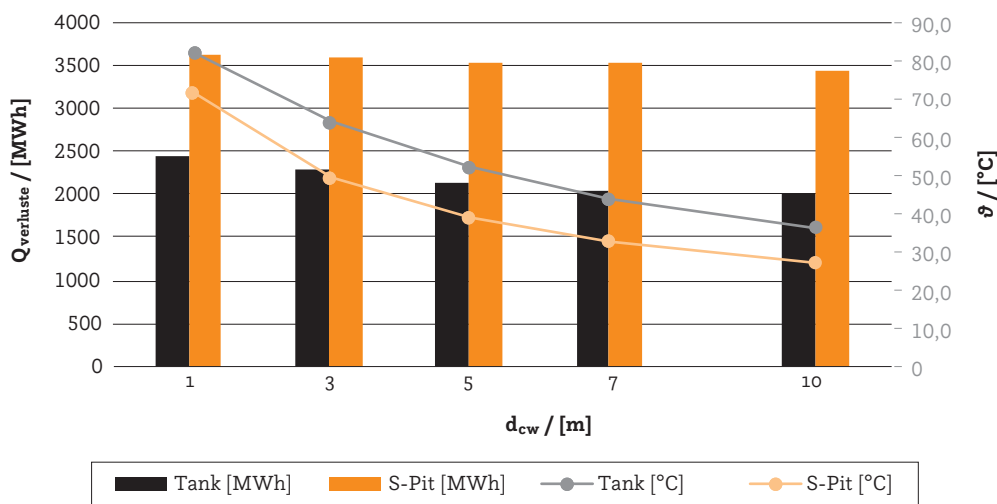


Abbildung 53: Wärmeverluste über Seitenwand und Boden bei einem 500.000 m³ LTES (Balken, primäre linke y-Achse) und die entsprechende Temperatur des Grundwassers (gemessen außen an der Dichtwand) (Linien, sekundäre rechte y-Achse) unter Berücksichtigung verschiedener Dichtwandabstände bei einer Grundwasserströmungsgeschwindigkeit von $2,5 \times 10^{-6}$ m/s (entnommen aus [13]).

7.2.4 Einfluss der Wärmedämmqualität

Neben der Dichtwand ist die Wärmedämmung eine wichtige Maßnahme zur Verringerung des Einflusses auf die Erdreichtemperaturen. Abbildung 54 veranschaulicht, dass die Anbringung einer Wärmedämmung (hier am Bsp. von 1 m Dicke mit einer Wärmeleitfähigkeit von $0,04 \text{ W}/(\text{m K})$) die Wärmeverluste eines Großwärmespeichers für den realistischen Bereich von GW-Geschwindigkeiten ($2,5 \times 10^{-6}$ m/s) deutlich verringert. Trotz einer beträchtlichen Reduktion liegt die GW-Temperatur immer noch über dem Grenzwert von 20 °C . Daher ist es wichtig, entweder den Abstand der Dichtwand oder die Qualität der Wärmedämmung zu erhöhen. In diesem Zusammenhang ist zu prüfen, ob es wirtschaftlich effizienter ist, die Dämmqualität zu verbessern oder den Dichtwandabstand zu vergrößern.

Es ist wichtig zu erwähnen, dass die erhöhte Qualität der Wärmedämmung, auch wenn sie nicht zu einer signifikanten Verbesserung der Speichereffizienz beiträgt, zu niedrigeren GW-Temperaturen im Vergleich zum Fall ohne Wärmedämmung führt (d.h. $U_{\text{side}} = 90 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$) und eine Wärmedämmung daher notwendig wäre, um den erforderlichen GW-Schutz zu gewährleisten.

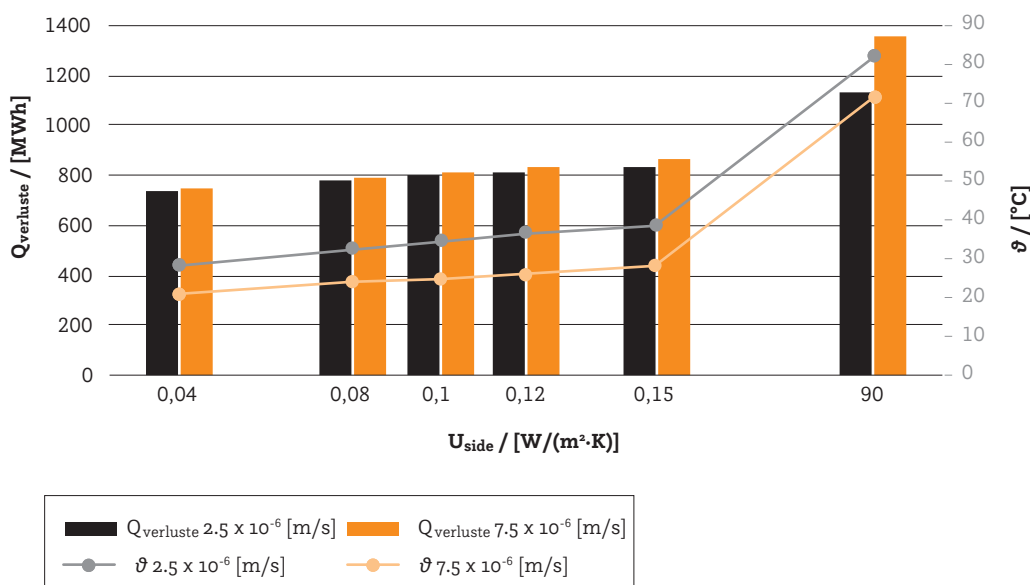


Abbildung 54: Wärmeverluste über Seitenwand und Boden eines Behälterspeichers von 100.000 m³ mit HT-Beladeprofil (Balken, primäre linke y-Achse) mit der entsprechende Strömungstemperatur gemessen an der Außenfläche der Dichtwand (Linien, sekundäre rechte y-Achse) bei einem Dichtwandabstand von $d_{cw} = 1 \text{ m}$ und $x_{\text{ins}} = 1 \text{ m}$ (aus [13] entnommen).

Es ist zu betonen, dass die Auswirkungen der Baukonzepte und der Rahmenbedingungen im Detail zu untersuchen sind. Auch wenn die Ergebnisse der vorangegangenen Abschnitte einen guten Anhaltspunkt für die möglichen Wechselwirkungen zwischen Großwärmespeicher und Erdreich darstellen. Es ist notwendig, in der Planungsphase eines LTES-Systems eine genaue Untersuchung unter Verwendung der tatsächlichen Standortbedingungen durchzuführen. Das implementierte detaillierte Modell auf Speicherebene ermöglicht eine umfassende Betrachtung der verschiedenen LTES-Auslegungsparameter und Erdreischeigenschaften und stellt eine nützliche Grundlage für mögliche Umweltverträglichkeitsprüfungen dar.

Die in den vorangegangenen Abschnitten dargestellten Ergebnisse zeigen, dass der Übergang von günstigen geologischen Bedingungen, ohne Grundwasser, zu ungünstigen, mit fließendem Grundwasser, zu höheren thermischen Verlusten des Großwärmespeichers und zu Erdreichtemperaturen führt, die den Grenzwert von 20°C überschreiten und damit die österreichischen Grundwasserqualitätsnormen verletzen würden. Es müssten mehrere wirksame bauliche Maßnahmen ergriffen werden, um den Anstieg der Wärmeverluste des LTES und der Grundwassertemperaturen zu verringern. In diesem Zusammenhang können Dichtwände zusammen mit einer Wärmedämmung in der äußeren Schicht des Großwärmespeichers eingesetzt werden, aber diese Maßnahmen müssen sehr sorgfältig geplant und unter Berücksichtigung der Eigenschaften des LTES optimiert werden.

8 Betrieb und Instandhaltung

Während des Betriebs muss sichergestellt werden, dass der Großwärmespeicher in einem angemessenen Zustand ist, um überschüssige Energie effizient zu speichern und so arbeitet, dass die Systemeffizienz maximiert wird. Monitoring, Wartung und Regelung des Speichers ist daher von großer Bedeutung, um eine optimale Speichereffizienz während der langen Betriebsphase zu gewährleisten. Die Monitoringaufgaben müssen kontinuierlich durchgeführt werden, um den korrekten Betrieb des Speichers zu gewährleisten und zu überprüfen. Die Wartungsaufgaben sind regelmäßig in bestimmten Abständen durchzuführen, um Probleme oder Ausfälle zu vermeiden. Da die Regelungsstrategie des Speichers von der Rolle des Speichers im Fernwärmesystem abhängt, ist diese systemspezifisch und kann in den allgemeinen Betrachtungen nicht weiter vertieft werden. Während der Inbetriebnahme gewährleisten Material- und Verarbeitungstests die ordnungsgemäße Ausführung des Bauvorhabens, weshalb sie ebenfalls am Anfang dieses Kapitels behandelt werden.

8.1 Tests in der Inbetriebnahme und Anlaufphase

Vor der Inbetriebnahme müssen Bauteil- und Verfahrensprüfungen durchgeführt werden. In Tabelle 10 sind die wesentlichen Prüf- und Bauschritte für einen Erdbeckenspeicher nach dem Stand der Technik oberhalb des Grundwasserspiegels zusammengestellt. Aspekte der Bauphase, wie z. B. das Ausheben der Grube, sind nicht berücksichtigt.

Bauphase	Komponente	Abdichtungsbahn	Abdichtungsbahn	Ein- und Auslässe		
	Prüfung / Test	Schweißnaht Dichtheitsprüfung (Abbildung 55)	Qualitätsprüfung	Dichtheit zwischen Abdichtungsbahn und Diffusoren prüfen (Abbildung 56)		
Füllprozess	Komponente	Erdbecken	Wasser	Wasser	Wasser	Wasser
	Prüfung / Test	Reinigung	Wasseraufbereitungsanlage, Umkehrosmose	Eisbildung verhindern	Verhindern von organischem Material und Schmutz	Wasserqualität prüfen
Abdeckung	Komponente	Deckel	Wärmedämmung	Wärmedämmung		
	Prüfung / Test	Beseitigung von Wasser auf der Abdeckung	Feuchtigkeit verhindern	Wenn nötig trocknen		
Laufende Phase	Komponente	Alle	Alle	Grundwasser		
	Prüfung / Test	Übereinstimmung mit Auftrag/Ausschreibung prüfen	Materialproben während des Baus entnehmen	Temperatur prüfen		

Tabelle 10: Prüf- und Konstruktionsschritte für flache Beckenspeicher oberhalb des Grundwasserspiegels



Abbildung 55:
Prüfung des Baseliners
auf Dichtheit in Høje
Taastrup (Quelle: Gquadrat)



Abbildung 56:
Diffusoranschluss
(links); Verlegung des
Liners in Høje Taastrup
(rechts) (Quelle: Gquadrat)

In Tabelle 11 sind die wesentlichen Prüf- und Bauschritte für die gigaTES-Baukonzepte angeführt:

Bauphase	Komponente	Dichtwand	Schlitzwand	Vertikale Filterwand	Wärmedämmung	Ein- und Auslässe
	Konstruktion/ Prüfung	<ul style="list-style-type: none"> • Erdreichsondierung • Dichtheit von Abdichtungsbahnen, Qualitätskontrolle • Dichtheit der Systemtrennwand 	<ul style="list-style-type: none"> • Baugrundsondierung • Dichtheit Betonmischung, Qualitätskontrolle • Dichtheit des Systems Schlitzwand 	Kontinuitätsprüfung Prüfung der Durchflussmenge	<ul style="list-style-type: none"> • CE-Kennzeichnung • Qualitätskontrolle 	<ul style="list-style-type: none"> • Dichtheitsprüfung bei Verbindung der Abdichtungsbahnen
Abdeckung	Komponente	Nicht nutzbar	Siehe oben			
	Konstruktion/ Prüfung	Voll nutzbar	Individuelle Montage auf dem Wasser / Vorfertigung am Land	Verhinderung der Feuchtigkeitsbildung in der Wärmedämmung		

Tabelle 11:
Tests während der
Bauphase

8.2 Monitoring

Die beste Möglichkeit, den ordnungsgemäßen Betrieb des Speichers zu überprüfen, ist die Überwachung verschiedener Systemparameter durch Sensoren. Mess- und Kontrollsysteme sind notwendig, um Fehlfunktionen rechtzeitig zu erkennen. Die Überwachung sollte sich laut [16] auf die folgenden drei Schwerpunkte konzentrieren:

1. Thermodynamisches Verhalten des Wärmespeichers selbst. Dazu gehört die Überprüfung der Temperaturentwicklung im TES.
2. Interaktion des Wärmespeichers mit dem System. Dies sollte durch Überprüfung der Wärmezufuhr und -abfuhr sowie der jährlichen Energiebilanz erfolgen.
3. Wechselwirkung des Wärmespeichers mit der Umgebung.

Außerdem müssen die Wasserqualität und die Konstruktion überwacht werden.

Ein detaillierterer Überblick über die Monitoringaspekte befindet sich in Anhang E.

Monitoring des thermodynamischen Verhaltens

Überwachung der Wassertemperatur

Im Inneren eines TES muss die Wassertemperatur überwacht werden, um die Temperaturschichtung im Speicher zu beobachten. Das gebräuchlichste Verfahren ist die Überwachung der Wassertemperatur in verschiedenen Höhen des Langzeitspeichers. Bei der Überwachung der Schichtung geht es auch darum, eine effiziente Nutzung des Speichers zu gewährleisten und sicherzustellen, dass die volle Speicherkapazität ausgenutzt wird, der Speicher vollständig entladen wird und die Höchsttemperatur für das Abdichtungsmaterial nicht überschritten wird.

Überwachung des Wasserstandes

Die Wassermenge im Langzeitspeicher muss aktiv überwacht werden, dies geschieht durch Wasserstandsensoren. Der Deckel bewegt sich in Abhängigkeit von der Wassertemperatur auf und ab, und es ist wichtig zu berechnen, wo die Wasseroberfläche voraussichtlich liegen wird, um den Wasserstand zu kontrollieren, und sicherzustellen, dass keine Leckagen auftreten oder ein bestimmter Grenzwert nicht überschritten wird.

Monitoring der Wechselwirkung des Wärmespeichers mit dem System

Überwachung der Wassertemperatur und des Volumenstroms

Temperatursensoren an allen Ein- und Auslassrohren sind notwendig, um zu entscheiden, ob der Speicher be- oder entladen werden kann und in welcher Höhe des Speichers. Um zu wissen, wie viel Wasser und Energie an jedem Ein- und Auslassrohr in den Speicher geladen bzw. aus ihm entladen wird, werden zusätzlich zu den Temperatursensoren bidirektionale Volumenstromsensoren installiert. Es wird empfohlen, für jedes Rohr einen Wärmemengenzähler zu installieren.

Monitoring der Wechselwirkung des Wärmespeichers mit der Umgebung

Dazu gehört die Überwachung der Erdreich- und Grundwassertemperatur sowie die Kontrolle der Wärmeverluste durch den Deckel und die Feuchte der Wärmedämmung. Zu Forschungszwecken kann die Erdreichtemperatur überwacht werden. Dies geschieht zum Beispiel in Marstal (Sunstore 4) mit fünf Sonden und Sensoren rund um den Speicher. Außerdem muss das Grundwasser überwacht werden, um eine Erwärmung über eine bestimmte kritische Temperatur zu erkennen. Die Überwachung der Grundwassertemperatur in der Umgebung des Erdbeckens kann auch ein geeignetes Mittel zur Erkennung von Leckagen sein, da in diesem Fall die Temperatur des Grundwassers erhöht ist. Wärmeverluste durch den Deckel können mit einem Wärmestrommessgerät gemessen werden. Feuchtigkeitssensoren dienen zur Messung des Feuchtegrades der Wärmedämmung. Auch visuelle Inspektionen des Deckels können eine Möglichkeit bieten.

Monitoring der Wasserqualität

Die Wasserqualität beeinflusst die Lebensdauer und Funktionalität aller Bauteile, die mit dem Speicherwasser in Berührung kommen. Es hat sich gezeigt, dass eine starke Verunreinigung von Schmutzpartikeln im Speicher zu bakterieller Korrosion von Stahlteilen und Verstopfung von Wärmetauschern führen kann. Deshalb müssen Wasserparameter wie Sauerstoffgehalt, pH-Wert und Salzgehalt überprüft werden. Um Anomalien wie z. B. Korrosion frühzeitig zu erkennen, sind Probenahmen des Wassers im Speicher erforderlich. Die Auswahl der verwendeten Materialien bestimmt die Anforderungen an das Speicherwasser.

Monitoring von Baugrund und unterirdischen Bauwerken

Die Kontrolle eines Bauwerks im Untergrund kann entscheidend sein, um Leckagen und Korrosionserscheinungen zu erkennen. Dies kann durch Taucherinspektionen erfolgen, wenn der Speicher abgekühlt ist. Eine Alternative für gigaTES sind Unterwasserdrohnen, die bei Temperaturen bis zu 80 °C inspizieren können. Eine elektrische Lecksuche im Bereich der freiliegenden Dichtungsbahnen ist ebenfalls möglich (siehe Abbildung 57).

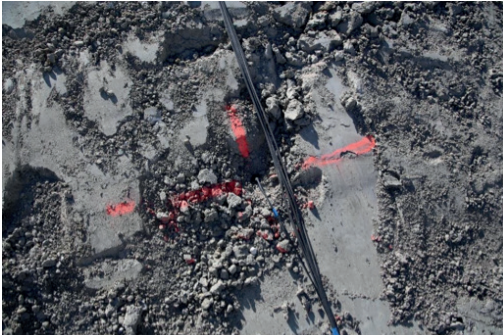


Abbildung 57: System zur Leckageerkennung für einen flachen Beckenspeicher in Høje Taastrup (Quelle: Gquadrat)

Inspektionen des Deckels

Die beiden Hauptprobleme im Zusammenhang mit der Abdeckung von modernen flachen Beckenspeichern sind die Luft unter der Abdeckung und das Risiko der Bildung von Wasserpfützen auf dem Deckel. Aufgrund der riesigen Oberfläche, die die Abdeckung eines Wärmespeichers im Giga-Maßstab hat, sind Möglichkeiten wie der Einsatz von Drohnen für visuelle Inspektionen in Betracht zu ziehen.

Wartung

Die zuvor genannten Monitoringaspekte müssen regelmäßig in verschiedenen Intervallen durchgeführt werden. Wird bei der Überwachung eine Störung oder Beschädigung des Speichers festgestellt, erfolgt eine Reparatur oder Wartung. Dennoch sollten einige Teile des Speichers regelmäßig gewartet werden. Dazu gehören: die Reinigung der Filter während des gesamten Speicherzyklus und des Vertikalschachtes.

9 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen des gigaTES-Projekts haben die Entwicklungen auf Konzept-, Material-, Komponenten- und Systemebene eine Reihe wertvoller Ergebnisse geliefert und stellen einen Meilenstein zur Umsetzung großer thermischer Energiespeicher (LTES) für erneuerbare Fernwärmesysteme dar. Auf der Ebene der Materialentwicklung wurde ein neuartiges Kunststoffabdichtungsmaterial entwickelt, und gezielte Tests haben gezeigt, dass im Vergleich zu bestehenden Liner-Materialien eine Verdoppelung der Lebensdauer unter höheren Temperaturbedingungen erwartet wird. Auf Komponentenebene, d. h. für die Abdeckungs- und Wandkonstruktionen, wurden neue Konzeptionen entwickelt, numerische Untersuchungen und Labortests durchgeführt sowie Modelle gebaut und getestet.

Der Bau eines LTES mit hoher Effizienz in einer urbanen Umgebung, mit minimalen Auswirkungen auf die Grundwassertemperatur, erfordert eine komplexere Bautechnik als bei Wärmespeicher die derzeit z.B. in Dänemark umgesetzt wurden. GigaTES war erfolgreich bei der Entwicklung einer Reihe von Baukonzepten, die diese Rahmenbedingungen einhalten. Eine neue patentierte Methode, bei der ein wärmeisolierender Erdreichring um den Speicher gelegt wird, wurde entwickelt und im Modellmaßstab getestet. Für die Abdeckung, die aufgrund der geforderten Kombination von Wärmedämmung, Wasserdichtheit, Wasserdampfdichtheit sowie Tragfähigkeit die teuerste Komponente darstellt, wurden zwei neue, patentierte Konzepte entwickelt, die zudem eine Nutzung der Speicherabdeckung ermöglichen, wo Baugrund zu hohen Kosten verfügbar ist.

Die Planung, Auslegung und der Bau eines großen thermischen Energiespeichers wird durch eine Vielzahl von Rahmenbedingungen eingeschränkt. Diese Rahmenbedingungen wurden gemeinsam mit den Aspekten, die bei der Inbetriebnahme und dem Betrieb des Speichers zu berücksichtigen sind in einem praxisnahen Leitfaden für jene, die die Realisierung eines LTES in einem Fernwärmesystem in Erwägung ziehen, zusammengefasst.

Der zentrale Punkt bei der Realisierung von Großwärmespeichern besteht in einer gründlichen Planung und Konzeption. Daher wurden im Rahmen des Projekts numerische Simulationen entwickelt, die es ermöglichen, die Funktionsweise des Großwärmespeichers in der gegebenen Umgebung zu optimieren, z. B. bei vorhandenem Grundwasser und bei der Integration des Speichers in erneuerbare Fernwärmesysteme. Das Design des LTES muss in Abhängigkeit von der Interaktion mit dem umgebenden Erdreich und der Grundwasserströmung optimiert werden. Der Einfluss verschiedener Konzepte zur internen oder externen Wärmedämmung der Speicherwand, das thermodynamische Verhalten des Wassers im Speicher und damit der energetische und exergetische Wirkungsgrad des Speichers, sowie die Wechselwirkung mit dem umgebenden Erdreich wurden mit Hilfe detaillierter Mehrjahressimulationen untersucht. Die Systemsimulationen zeigen die optimale Einbindung des Wärmespeichers in das Fernwärmesystem und sein dynamisches Verhalten. Die Modellierung der Systemeffizienz des Speichers wurde mit einem Baukostentool kombiniert, das die Kosten aller Komponenten, Materialien und Bauprozesse aus der aktuellen Baupraxis enthält, um eine Kostenoptimierung des Großwärmespeichers in einem gegebenen Fernwärmesystem zu ermöglichen. Es wurden zwei Fallstudien für eine vollständige Kostenberechnung herangezogen und die Speichergestehungskosten berechnet. Diese liegen bereits auf einem guten Niveau, aber nicht so niedrig wie bei den gebauten Großspeichern in Dänemark. Dies ist verständlich, da die Anforderungen an den Speicher unter mitteleuropäischen Bedingungen komplexer sind.

Das Ziel des *gigaTES*-Projektes war, die Demonstration eines Großwärmespeichers für Fernwärmenetze in Österreich voranzutreiben. Das Ziel wurde erreicht. Es wurde ausreichend Wissen für die Planung, den Bau und den Betrieb eines Großwärmespeichers entwickelt. Die Herausforderung besteht darin, ein Optimum zwischen den Risiken einer Demonstration und den Kosten für einen großen thermischen Energiespeicher zu finden. Die Demonstration soll Antworten auf Fragen geben, die im Rahmen des Projekts entstanden sind: Was sind die besten und kostengünstigsten Konstruktionsmethoden für die entworfenen *gigaTES*-Konzepte? Wie ist das langfristige mechanische Verhalten eines *gigaTES*-Speichers im Untergrund? Was sind die besten Bauweisen für Wärmedämmung und Abdichtungsmaterial? Wie verhalten sich die neu entwickelten Materialien in der Praxis? Diese Fragen lassen sich am besten zunächst in kleineren Pilotprojekten beantworten. Mit ihnen wird auch wertvolle, praktische Erfahrung gesammelt, die dazu beiträgt, die Risiken und Kosten für Nachfolgeprojekte von Wärmespeichern im großen Maßstab zu senken.

Auch international hat das *gigaTES*-Projekt eine neue Richtung für die Entwicklung von Großwärmespeichern vorgegeben. In einer Reihe von Ländern, z. B. in Dänemark, Deutschland, den Niederlanden, Serbien, dem Kosovo und Polen, werden derzeit Pläne zur Umsetzung erarbeitet. Diese Entwicklungen würden definitiv von einer europäischen Zusammenarbeit profitieren und beschleunigt werden. Darüber hinaus haben die strengeren nationalen und europäischen Vorgaben zur Senkung der CO₂-Emissionen die Notwendigkeit einer raschen Einführung von Großwärmespeichern, auch im großen Maßstab, erhöht. Daher wird es in den kommenden Jahren eine Reihe neuer Demonstrationsprojekte, neuer Konzepte und Integrationsmethoden sowie neuer Instrumente und Ausrüstungen für LTES geben.

10 Literaturverzeichnis

- [1] Jensen, M. (2014). Seasonal pit heat storages – Guidelines for materials & construction. (<http://task45.iea-shc.org/fact-sheets>, Hrsg.) SHC TECH SHEET 45.B.3.2.
- [2] Ulbjerg, F. (2015). Large scale solar heating and pit heat storage in vojens and gram. Solar district heating conference.
- [3] Dahash, A. Ochs, F., Janetti, M. B. Streicher, W. (2019). Advances in seasonal thermal energy storage for solar district heating applications: A critical review on large-scale hot-water tank and pit thermal energy storage systems. Applied Energy, vol. 239. 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.01.189.
- [4] Kranzl, L. Mueller, A. et al. (2015). Bewertung des Potentials fuer den Einstz der hocheffizienten KWK und effizienter Fernwaerme- und Fernkaelteversorgung. Vienna: Technical University of Vienna – EnergyEconomicsGroup, ECOFYS.
- [5] Federal Ministry of Science, Research and Economy (2015). Energiestatus Oesterreich 2015 - Entwicklung bis 2013.
- [6] Danish Energy Agency and Energinet, Technology Data – Energy Storage, 2018. https://ens.dk/sites/ens.dk/files/Analyser/technology_data_catalogue_for_energy_storage.pdf
- [7] PORR AG (2019). Tiefbau – Spezialtiefbau
- [8] Riegler, T. (2020). Giga-scale thermal energy storages – Conceptual development of multifunctional covers. Master Thesis. FH Joanneum - Construction Management and Engineering.
- [9] Knoth, T. (2020). Weitgespannte Dachtragsysteme für zylindrische Thermalspeicher in Schachtbauweise. Master Thesis. BOKU – Institute of Structural Engineering.
- [10] PORR AG, Patent Announcement.
- [11] Reisenbichler, R. O’Donovan, K. Ribas Tugores, C. Van Helden, W. Wotawa,F. Towards More Efficient Modeling and Simulation of Large-scale Thermal Energy Storages in Future Local and District Energy Systems, in: Proceedings of Building Simulation 2021: 17th Conference of IBPSA, International Building Performance Simulation Association, Bruges, BE, 2021.
- [12] Ochs, F. Dahash, A. Tosatto, A. Reisenbichler, M. O’Donovan, K. Gauthier, G. Kok Skov, C. Schmidt, T. Comprehensive Comparison of Different Models for Large-Scale Thermal Energy Storage, in: Proceedings of the 14th International Renewable Energy Storage Conference 2021 (IRES 2021), Atlantis Press, Düsseldorf, DE, 2021.
- [13] Dahash, A. Ochs, F. Giuliani, G. and Tosatto, A. Understanding the interaction between groundwater and large-scale underground hot-water tanks and pits, Sustain. Cities Soc., vol. 71, p. 102928, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.scs.2021.102928.
- [14] Dahash, A. Ochs, F. Tosatto, A. Streicher, W. Toward efficient numerical modeling and analysis of large-scale thermal energy storage for renewable district heating, Appl. Energy, vol. 279, 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.115840.
- [15] Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaftsverband, ÖWAV-Regelblatt 207: Thermische Nutzung des Grundwassers und des Untergrunds - Heizen und Kühlen (Thermal use of groundwater and underground - Heating and cooling). Austria, 2009.
- [16] Solites, Guideline for Seasonal Thermal Energy Storage Systems in the Built Environment, (2016). http://www.ectp.org/fileadmin/user_upload/documents/E2B/EINSTEIN/einstein-guidelines_stes-tanks-del-38.pdf (accessed September 20, 2019).

11 Anhang

Anhang A: Speicherladeprofil – Fallstudie A und B

Energieinhalt des Speichers – Stadt A

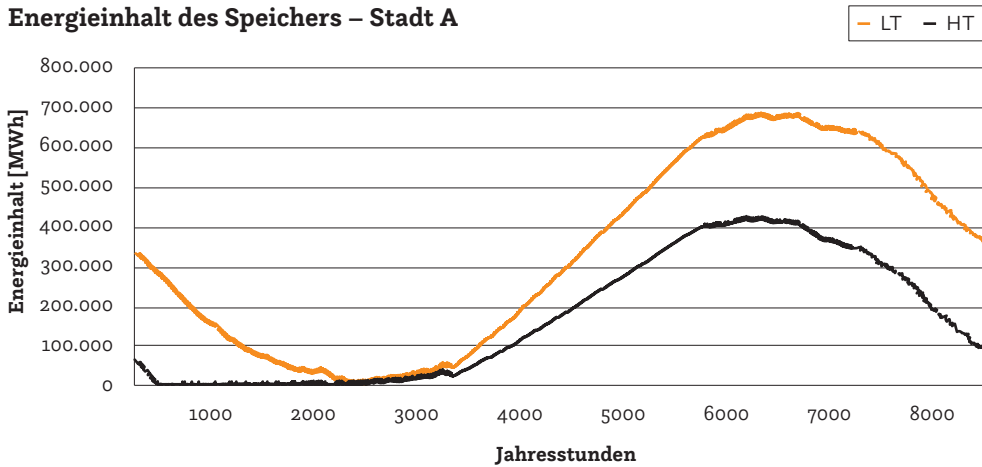


Abbildung 57: Energieinhalt des Speichers für LT und HT Variante für Fallstudie: Stadt A (1.200.000 m³)

Energieinhalt des Speichers – Stadt B

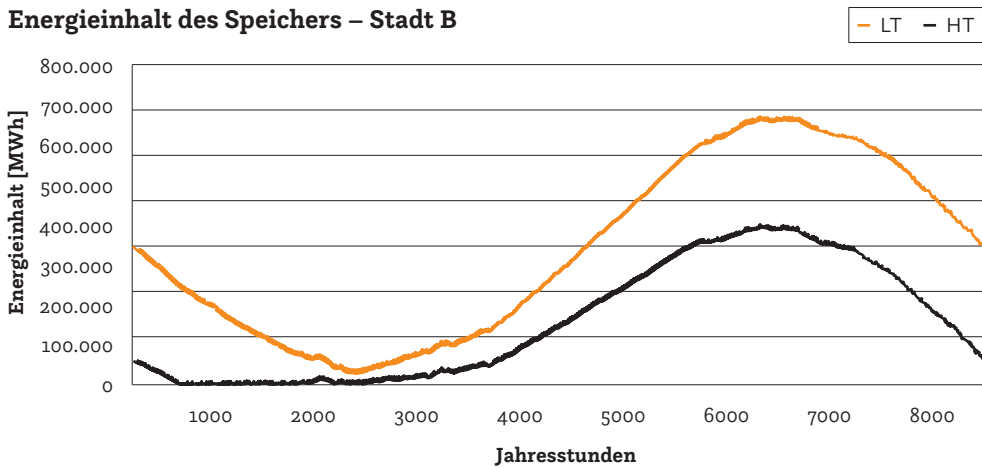


Abbildung 58: Energieinhalt des Speichers für LT und HT Variante für Fallstudie: Stadt B (100.000 m³)

Anhang B: CO₂ Emissionsfaktoren

Emissionsfaktoren	tCO ₂ /GWh _{th}
Gas	244
Biomasse	50
Abwärme	22
Solarthermie	0
Geothermie	0

Anhang C: Berechnung der Speichergestehungskosten (LCOS)

Für die Fallstudien wurde die LCOS-Berechnung nach der Annuitätenmethode durchgeführt, bei der jedes Jahr eine feste jährliche Zahlung über die gesamte Lebensdauer des Speichers angenommen wird, die wie folgt berechnet wird:

$$LCOS = \frac{CAPEX_{\text{yearly,LTES+periphery}} + OPEX_{\text{yearly}}}{E_{\text{discharged,yearly}}}$$

Die jährlichen Investitionen (CAPEX) werden auf der Grundlage der gesamten Investitionskosten ermittelt, die mit einem bestimmten Annuitätenfaktor multipliziert werden. Der Annuitätsfaktor wird wie folgt definiert:

$$\text{Annuitätenfaktor, } f = \frac{(1+r)^n}{r}$$

Dabei ist r der gegebene Zinssatz in % und n die Anzahl der Jahre für die zu erwartende Lebensdauer. Für beide Fallstudien wurde der Zinssatz r mit 4 % angenommen.

Die Lebensdauer des Speichers, n , wurde mit der Lebensdauer des Liners begründet. Die CAPEX umfassen die Investitionskosten für den LTES selbst sowie alle grundlegenden peripheren Geräte wie Wärmetauscher, Rohrleitungen und Pumpen. Es wurde davon ausgegangen, dass sich der LTES relativ nahe am Fernwärmenetz befindet, so dass die Kosten für die Rohrleitungen auf ein Minimum beschränkt bleiben. Die Kosten für die Wasserbeschaffung und -aufbereitung zur Befüllung des LTES sind ebenfalls in den Kosten für das periphere System enthalten, wobei die Gesamtkosten bei 2,5 €/m³ Wasser liegen.

Die Betriebskosten (OPEX) wurden mit 1,3 €/MWh Speicherkapazität pro Jahr (Deliverable 3.3 - HeatStore) + 1 % der CAPEX des peripheren Systems pro Jahr angesetzt - die Schätzungen sind hier sehr grob, da noch keine derartigen Speicher dieser Größenordnung oder Bauart in Betrieb sind und es sich hierbei um abgeleitete Werte aus bestehenden Speichern handelt (im Falle des 1.200.000 m³ Speichers).

Die Kosten für die zum Laden des Speichers verwendete Wärme sind in den LCOS-Berechnungen nicht enthalten.

Anhang D: Rahmenbedingungen für LTES

Kategorie		Rahmenbedingungen	Einheit	Beschreibung			
I Standort	A	Geologie und Hydrogeologie	Geologie	A1	geologisches Modell	Modell	Definition verschiedener lithologischer Einheiten (= Gesteinsarten), ihrer Ausdehnung und Homogenität sowie ihrer wesentlichen geotechnischen Parameter
			Hydrogeologie	A2	hydrogeologisches Modell	Modell	hydrogeologische Eigenschaften der verschiedenen lithologischen Einheiten (z. B. Dicke, Durchlässigkeit, Porosität, Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärmekapazität usw.) von Deckschicht, Aquifer und Aquiclude
		allgemeine Grundwasserhältnisse	A3	Anzahl der Aquifer	Anzahl		
			A4	begrenzt / unbegrenzt	c/u	Grundwasser steht unter Druck oder nicht	
			A5	Grundwasserstand	m	Mittelwert, Minimalwert, Maximalwert, einschließlich der Extremwerte, Abstand zwischen Oberfläche und Grundwasserspiegel	
			A6	Fließrichtung und Gefälle des Grundwassers			
			A7	Temperatur des Grundwassers	°C	tatsächliche Temperatur des Grundwassers	
			A8	chemische Beschaffenheit des Grundwassers			
			A9	vorhandene Verschmutzung	Ja / Nein	(geogen/anthropogen)	
		ungünstige hydrogeologische Parameter	A10	Versickerung in der Umgebung (möglich?)			
			A11	Gefahr des Anstiegs des Grundwasserspiegels	hoch/mittel/niedrig	Besteht die Gefahr eines Anstiegs des Grundwasserspiegels aufgrund von "Stauwirkungen"?	
			A12	Risiko einer Absenkung des Grundwasserspiegels stromabwärts vom Speicher	hoch/mittel/niedrig	Besteht die Gefahr einer Absenkung des Grundwasserspiegels flussabwärts des Speichers?	
			A13	Versickerung von Speicherwasser		Besteht die Gefahr einer Verunreinigung?	
	B	Standort	andere standortbezogene Bedingungen	B1	bestehende Verunreinigungen	Ja / Nein	Gibt es eine geogene oder anthropogene Versiegelung?
				B2	Wiederverwendung bestehender Strukturen	Ja / Nein	Besteht die Möglichkeit, bestehende Strukturen zu nutzen?
				B3	Kosten für Grundstücke	Euro/m ²	Wie hoch sind die Kosten für einen m ² Land?
				B4	nahe gelegene Deponie	Ja / Nein	Gibt es eine nahe gelegene Deponie für den Aushub?
	C	Umweltbedingungen	"Klima"	C1	Niederschlag	mm/a (l/(s*km ²))	im Laufe des Jahres
				C2	Verdunstung	mm/a (l/(s*km ²))	im Laufe des Jahres
				C3	Grundwasserneubildung	mm/a (l/(s*km ²))	im Laufe des Jahres
				C5	Außentemperatur	°C	im Laufe des Jahres
				C6	Relative Feuchtigkeit	%	im Laufe des Jahres
				C7	Windgeschwindigkeit	m/s	im Laufe des Jahres
				C8	Sonneneinstrahlung	W/m ²	im Laufe des Jahres

I Standort		C					
II Material		D					
III Fernwärmesystem		E					
Umweltbedingungen		Naturkatastrophen		C9	Erdbebengefahr	hoch/ mittel/ niedrig	Besteht die Gefahr von Erdbeben?
				C10	Hochwasser, Überschwemmungsgefahr	hoch/ mittel/ niedrig	HQ30, HQ100
				C11	Erdrutsch- und Lawinengefahr	hoch/ mittel/ niedrig	Besteht ein Risiko für Erdbeben und Lawinen?
				C12	Gefahr von hohem Grundwasser	hoch/ mittel/ niedrig	Besteht die Gefahr von Hochwasser?
				C13	Gefahr von Massenbewegungen	hoch/ mittel/ niedrig	Besteht die Gefahr vor Massenbewegungen?
Material Eigenschaften		Eigenschaften der Liner		D1	max. Temperatur des Liners	°C	die Höchsttemperatur, die die Dichtungsbahnen standhalten müssen, ohne dass sich die Lebenserwartung verkürzt
				D2	andere Einschränkungen des Liners		
				D3	Lebensdauer des Liners	Jahre	Lebensdauer in Bezug auf die maximale Temp.
				D4	Abmessungen des Liners	m	mögliche Länge, Breite und Dicke
				D5	Diffusionswiderstandsfaktor des Liners	-	Hygrothermische Eigenschaften der Liner
				D6	Korrosionsbeständigkeit des Liners	hoch/ mittel/ niedrig	im Falle von Liner auf Metallbasis & bei Wechselwirkung mit dem Grundwasser
		Eigenschaften des Betons		D7	Wärmeleitfähigkeit des Betons	W/mK	Hygrothermische Eigenschaften von Beton
				D8	Diffusionswiderstandsfaktor des Betons		Hygrothermische Eigenschaften von Beton
				D9	Feuchtigkeitsrückhaltekurve des Betons		Hygrothermische Eigenschaften von Beton
				D10	Wasserdampfdurchlässigkeit von Beton	m ² /s	Hygrothermische Eigenschaften von Beton
				D11	Lebensdauer des Betons	years	Lebensdauer in Bezug auf die maximale Temp.
				D12	Konstruktion der Abdeckung		
				D13	Wärmedämmung des Materials		
FW-Eigenschaften und Integration ins Netz		Eigenschaften des Fernwärmenetzes		E1	FW-Netzstruktur, Anzahl der Kunden usw.		unterschiedliche Temperaturniveaus, primäres/sekundäres Netz
				E2	max. Systemdruck	bar	Druck kann variabel sein, wenig relevant - Kosten
				E3	Kapazität der Transport- und Verteilungsleitungen	DN, Material, Dämmung, max. Kapazität, Gesamtleitung	des Netzes, aber hauptsächlich wichtig am Integrationspunkt
				E4	Topologie	linear, kreisförmig, Netz, ...	
				E5	Wärmedichte	Wärtemap, MWh/km ² .y	Wie weit ist die Wärmenachfrage im Netz gestreut? Nur relevant für zukünftige Ausbaupläne.

Merkmale zur Bereitstellung / des Verbrauchs	E6	Temperaturprofil im Winter / Sommer / Übergangszeit (Vor- und Rücklauf)	°C	Temperaturen des Fernwärmesystems im Laufe eines Jahres
	E7	Sommer- und Winterlastgangkurven	MW	Last des Heizungssystems im Jahresverlauf
	E8	Aktuelle Wärmequelle	CHP, Gasboiler, biomass,	Welche Wärmequellen werden im DH-System genutzt?
	E9	Aktueller (Spitzen-) Wärmebedarf / jährlicher Gesamtbedarf	MW, MWh	Spitzen im DH-Bedarf und jährlicher Gesamtbedarf
	E10	Flexibilität / Redundanzpläne		hängt hauptsächlich von den energie-wirtschaftlichen Aspekten ab - maximale Wärmeleistung für Spitzen in MW. auch N-1-Sicherheit ist hier wichtig TES ist flexibel, da es sowohl als Quelle als auch als Senke dienen kann - Geschäftsmodelle müssten in Betracht gezogen werden
	E11	Versorgungssicherheit		Verhältnis max. Nennlast/Kapazität installiert, Reservepumpen
Kosten	E12	aktuelle Wärmege-stehungskosten	Euro/MWh	
	E13	aktuelle Wärme-verkaufspreise	Euro/MWh	Tatsächlicher Wärmeverkaufspreis
Potenziale und Strategien	E14	Speicherkapazität für Wärme	MWh/y	Wie viel thermische Energie ist im FW-System verfügbar, die gespeichert werden muss?
	E17	Zukünftige Erweiterungs-/Dekarbonisierungspläne?	plan	Was sind die Zukunftspläne des FW-Systembetreibers?
	E18	Gegenwärtige Strategie für den Einsatz der Einheiten/Dispatch		
Speicherintegration	E19	Entfernung zum FW-Netz	m	Wie weit ist der Speicher vom FW-Netz entfernt
	E20	Hindernisse auf der Verbindungsleitung	motorways, rivers, train tracks, mountains	Gibt es Hindernisse auf der Verbindungsleitung?
	E21	Höhenunterschiede zwischen Speicher und Wärmenetz	m	Wie hoch ist die Differenz zwischen dem Netz und dem Speicher?
	E22	zusätzliche Wärmequellen etc. in der Nähe?		Gibt es zusätzliche Wärmequellen in der Nähe des Anschlusspunktes?
	E23	Temperaturniveau am Einspeisepunkt	°C	
		Kapazität des Netzes am Einspeisepunkt	MWh	Wie viel Energie kann in das Netz eingespeist werden?

IV Behörden	F	Regional- und Raumplanung / Flächenverfügbarkeit	F1	Wasserschutzgebiet / Schutzgebiet	ja/nein (ja mit Einschränkungen)	
			F2	Naturschutzgebiet	ja/nein (ja mit Einschränkungen)	
			F3	Hochwasserschutz/ Risikogebiet	ja/nein (ja mit Einschränkungen)	
			F4	Erholungsgebiet	ja/nein (ja mit Einschränkungen)	
			F5	Industriegebiet (in Zukunft)	ja/nein (ja mit Einschränkungen)	
			F6	Umwelt- und Schutzzone	ja/nein (ja mit Einschränkungen)	
			F8	Entfernung zum Straßennetz	m	näher an der bestehenden Infrastruktur, besser
			F9	Masterplan Energie	increase/decrease DHN penetration, ...	Was ist der Energie-Masterplan der Region?
			F10	Landnutzung und Planung		Widmung
			F11	Eigentumsverhältnisse		Ist das Grundstück durch mehrere Eigentümer geteilt?
			G	Rechtliche Anforderungen und öffentliche Genehmigungen	G1	Bau- und Planungsrecht
G2	Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP-G)				beinhaltet Bewertung der visuellen und landschaftsbezogenen Auswirkungen	
G3	ausländische Gesetze				Wasserschutzgebiet; Brunnen für Trinkwasser und andere Anwendungen; Erdwärmesonde; andere Anwendungen mit Rechten, die den Boden oder das Grundwasser in der Umgebung nutzen (Wasser-Wasserpumpen, Kühlung...);	
G4	bestehende Wasserrechte					

Anhang E: Monitoringaspekte³

Aspekt	Methode	Ziel	Intervall	Verpflichtend/vorteilhaft
Wassertemperatur	Vertikale Stränge/ Pfähle mit Temperatursensoren Sensoren in verschiedenen Höhen	Energieinhalt des Speichers berechnen; auf die Schichtung des Speichers achten; Temperaturbelastung des Liners beachten [1]	1-10 min	Verpflichtend
Erdreich-temperatur	Vertikale Temperatursonde Sensoren auf verschiedenen Höhen und in verschiedenen Abständen zum TES; für die Gesetzgebung ist nur ein Sensor vorgeschrieben	Hauptsächlich für die Forschung, in einigen Fällen auch für die Gesetzgebung relevant. Erkennung von Leckagen.	10 bis 60 min [1]	Verpflichtend/vorteilhaft
Wasserstand	Wasserstandsensoren, Ultraschall- oder kapazitive Füllstandssensoren, (geführte) Wellenradargeräte, hydrostatischer Druck	Füllstand bestimmen Anmerkung: Je nach Verfügbarkeit von Überlauf- und Ausgleichsspeichern [3]	10 bis 60 min [1]	Verpflichtend
Einlass- und Auslassleitungen Durchfluss	Volumenstromsensoren	Berechnung des zu erwartenden Wärmestroms	1-10 min	Verpflichtend
Einlass- und Auslassleitungen Temperaturen	Temperatursensoren	Regelstrategie und Wärmeleistung [2]	1-10 min	Verpflichtend
Wärmeverluste der Abdeckung	Wärmestrommessgerät	Berechnung der Wärmeverluste der Abdeckung und des Speicherwirkungsgrades	10 bis 60 min [1]	Vorteilhaft
Feuchtigkeit am Deckel	Feuchtigkeitssensoren am Deckel	Nasse Wärmedämmung erkennen	10 bis 60 min [1]	Vorteilhaft
Regen	Regensensor	Risiko von Wasser erkennen - Pfützen auf der Abdeckung	10 to 60 min [1]	Vorteilhaft
Abdeckung prüfen	Visuelle Überwachung	Probleme erkennen	Zumindest 1x pro Woche,	Verpflichtend/vorteilhaft
Baukonstruktion prüfen	Taucher, Unterwasserdrohnen	Probleme erkennen	Wenn erforderlich	Vorteilhaft
Säuregehalt des Wasser im TES prüfen	Probennahme	Korrosion vermeiden	Mindestens einmal im Jahr (je nach Wassermenge)	Verpflichtend/vorteilhaft
Sauerstoffgehalts des Wasser im TES prüfen	Probennahme	Lebensdauer der Liner verlängern etc.	Wird laufend in Høje Taastrup kontrolliert [2]	Vorteilhaft
Kontrolle der Bio-Rückstände	Probennahme	Geeignete Inhalte sicherstellen	Einmal pro Jahr	Vorteilhaft
Kontrolle der Wasserfördermenge eines Vertikalbrunnens	Volumenstromsensoren	Prüfen, ob der Brunnen gut funktioniert	Kontinuierlich	Vorteilhaft

³ [1] Solites, Remarks and Feedback from Solites during the creation of this document, (n.d.).

[2] PlanEnergi, P.A. Sorensen, Written Remarks and Feedback from PlanEnergi, (2019).

[3] Remarks and Feedback from Ste.p during creation of this document, (n.d.).

12 Kontakt

Projektleiter

Dr. Wim van Helden
w.vanhelden@aee.at
Telefon: +31 6 2014 3224

Institut

AEE – Institute for Sustainable Technologies (AEE INTEC)
Feldgasse 19, A-8200 Gleisdorf;
Telefon: +43 3112 5886 0
Fax: +43 3112 5886 18
www.aee-intec.at

Projektpartner

SOLID Solar Energy Systems
JKU Linz / Institute of Polymeric Materials and Testing
University of Innsbruck
Ingenieurbüro ste.p
AGRU Kunststofftechnik GmbH
Metawell
Bilfinger VAM Anlagentechnik GmbH
Geologie und Grundwasser GmbH
PORR Bau GmbH Tiefbau
Lenzing Plastics GmbH
PlanEnergi
Gabriel-Chemie Gesellschaft m.b.H.
Smart Minerals
Wien Energie
Solites
Salzburg AG
GVT

