



Projektbericht

Tief- und Hochbauarbeiten für einen Stülpmembranspeicher-Demonstrator

Anton Wolf

Fakultät: Maschinenbau und Versorgungstechnik

Vertiefungsrichtung Energietechnik

Betreut durch Prof. Dr-Ing Matthias Popp

Inhalt

1. Projektbeschreibung	1
1.1. Projektziele	2
1.2. Problemstellung	3
2. Auslegung	3
2.1. Baugrube	3
2.1.1. Baugrundanalyse	3
2.1.2. Baugrubenauslegung	4
2.2. Zylinder und Kolben.....	7
2.2.1. Variante 1: Betonkonstruktion.....	8
2.2.2. Variante 2: Stahlkonstruktion	8
2.3. Nutzung des Erdaushubes	9
3. Kostenschätzung	10
4. Fazit.....	11
5. Quellenverzeichnis.....	12

Abbildung 1: Grundaufbau des Speichers	2
Abbildung 2: Vorgabe der Speicherabmaße	2
Abbildung 3: Standort des Speichers	4
Abbildung 4: Freistehender Zylinder in der Grube	5
Abbildung 6: verschiedene Bohrfahlwände	5
Abbildung 5: Benötigter Freiraum um den Zylinder	5
Abbildung 7: Realbeispiel: Überschnittene Bohrfahlwand	6
Abbildung 8: Auslegung der Baugrube	7
Abbildung 9: Zylinderauslegung.....	7
Abbildung 10: Wärmespeicher der N-Ergie in Nürnberg während der Bauphase ^[2]	8
Abbildung 11: Zylinder und Kolben aus Stahl.....	9
Abbildung 12: Gesamtkonzept mit Ringwall	9
Abbildung 13: Sicherheitswirkung des Ringwalls	9

1. Projektbeschreibung

Bei dem Stülpmembranspeicher (Abbildung 1) handelt es sich um einen Speicher der Energie sowohl in Form von Wärme und potenzieller Energie speichert.

Vergl. Abbildung 1: Grundaufbau des Speichers.

Grundprinzip ist ein mit Wasser gefüllter Zylinder, in dem sich ein Bodenmasse-Kolben nach oben und unten bewegen kann. Der Kolben ist mit einer Stülpmembran an der Zylinderwand befestigt und diese trennt zudem den Zylinder in zwei Kammern auf. Eine oberhalb des Kolbens und eine unterhalb. Durch Pumpen von Wasser von der oberen in die untere Kammer erfolgt dort eine Druckerhöhung, die zu einem Anheben des Kolbens führt. Dies erfolgt bei Energieüberschuss im Stromnetz. Bei Stromdefizit kann der Kolben abgesenkt werden und die Energie kann mittels einer Turbine aus der Wasserströmung von der unteren in die obere Kammer entnommen werden.

Die Wärmenutzung erfolgt durch Einspeisung von warmem Wasser aus einem Fernwärmenetz in die obere Kammer des Kolbens. Durch den Dichteunterschied von warmen zu kaltem Wasser entsteht eine Schichtung des Wassers mit der wärmsten Schicht ganz oben im Zylinder. Da das Wasservolumen im Zylinder gleichbleiben soll, wird genauso viel kaltes Wasser am unteren Ende des Zylinders entnommen, wie warmes Wasser oben eingespeist wird. Um ein ungewolltes Absenken des Kolbens zu vermeiden, wird die gleiche Menge Wasser wie eingespeist wird von der oberen in die untere Kammer gepumpt. Bei Entnahme der Wärme funktioniert dieser Mechanismus in umgekehrter Reihenfolge. Das kalte Wasser wird am unteren Ende des Zylinders eingespeist, die gleiche Menge wird über eine Transferleitung von der unteren in die obere Kammer gepumpt und wieder die gleiche Menge wird am oberen Ende des Zylinders in das Fernwärmenetz eingespeist.

Die vollständige Auslegung wurde in 6 Teilbereiche aufgeteilt.

Im Nachfolgenden Bericht wird ausschließlich auf die Baulichen Aspekte für den Zylinder, Kolben und die allgemeine Grundstruktur eingegangen.

Die Maßnahmen zum Systemaufbau und Aggregate zur Stromspeicherung sowie Wärmebewirtschaftung behandelte Herr Rami Haidar^[7], die Platzierung und Einbau der Aggregate, Rohrleitungen und Strömungsführung Herr Julian Schmitt^[11], die Herstellung der Stülpmembran Herr Franz Lampe^[8], den Einbau und die Befestigung der Stülpmembran Herr Nikolai Neubauer^[10] und die Wärmedämmung und die Auslegung eines Solarkollektorfeldes zur Wärmeversorgung angeschlossener Wohngebäude Herr Peter Müller-Leimbach^[9].

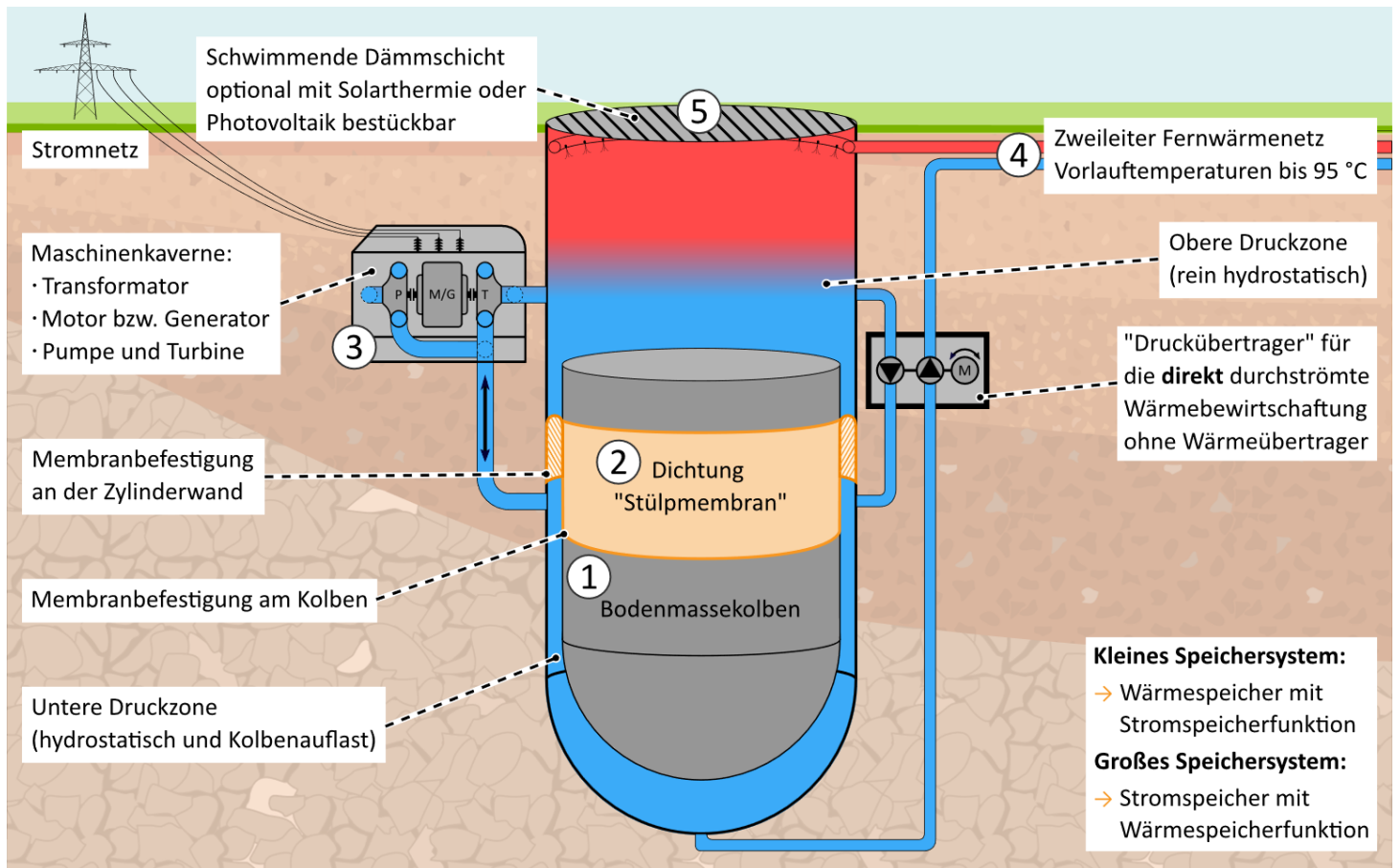


Abbildung 1: Grundaufbau des Speichers

1.1. Projektziele

Das Gesamtziel des Projektes ist die konzeptionelle Planung und Aufwandsabschätzung für den Bau eines Demonstratorobjektes mit kleinen Abmaßen in der Uchenhofer Straße 35 in Haßfurt. (vgl. Abbildung 2)

Die vorgegebenen Abmaße des Demonstrators sind:

Tabelle 1: Vorgabe der Speicherabmaße

Kolben	
Durchmesser	10 m
Höhe	10 m
Zylinder	
Spaltbreite*	0,26 m
Durchmesser	10,52 m
Höhe	20 m

*Bei der ursprünglichen Vorgabe war eine Spaltbreite von 0,2 m vorgesehen. Aufgrund von technischen Spezifikationen der Membran war dies jedoch nicht umsetzbar.

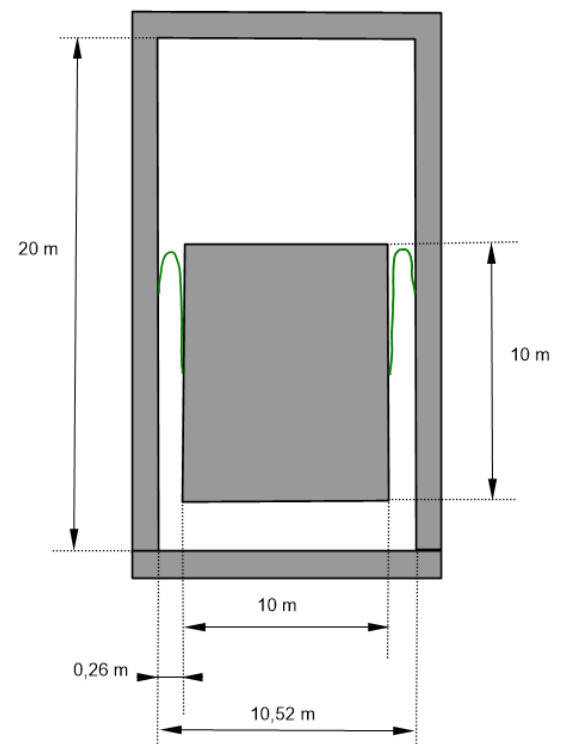


Abbildung 2: Vorgabe der Speicherabmaße

Ziel der hier beschriebenen Teilaufgabe ist die reale Kosten- und Aufwandeinschätzung für die Arbeiten zur Grabung des Zylinderschachtes und des Pumpenhauses, zur Fertigung der Zylinderwand und zur Herstellung des Bodenmassekolbens.

1.2. Problemstellung

Problemstellungen der baulichen Aspekte sind die Abmaße des ganzen Speichers. Trotz der geringeren Abmaße des Demonstratorobjektes ist es eine bauliche Herausforderung, einen 20 m tiefen Zylinder mit 10,52 m Durchmesser herzustellen. Des Weiteren soll der Kolben hergestellt und in den Zylinder eingebracht werden.

Aufgrund der Tiefe des Zylinders muss die Baugrube mit speziellen Techniken gefertigt werden. Dabei spielt die Untergrundbeschaffenheit eine entscheidende Rolle. Bei sehr festem und felsigem Untergrund ist das Ausheben aufwändig und teuer, jedoch kann das Loch bei ausreichend festem Untergrund direkt ausgehoben und mit Betonwänden stabilisiert werden. Bei lockerem Untergrund muss zuerst mit Bohrungen in einem Ring angeordnet die Beton-Stützwand hergestellt werden und dann kann der Untergrund im Inneren des Zylinders ausgehoben werden. Ist der Grundwasserspiegel höher als der Zylinderboden, muss vor den Baumaßnahmen eine Bohrung erfolgen und das Grundwasser muss lokal, um den Zylinder abgesenkt werden. Bei eventuellem Grundwasserdruck muss die Bodenplatte des Zylinders entsprechend ausgelegt werden.

2. Auslegung

Basierend auf den Vorgaben und der Problemstellung gliedert sich die Auslegung in zwei Teilbereiche. Die Auslegung der Baugrube und die Auslegung des Zylinders mit Kolben.

2.1. Baugrube

Bei modernen Großbauten wird generell nicht direkt in die Tiefe gebaut, sondern zuerst eine ausreichend große Baugrube ausgehoben und in dieser wird dann in die Höhe gebaut. Aufgrund der vorgesehenen Tiefe von 20 m ist es daher erforderlich, zuerst eine Analyse des Baugrundes am vorgesehenen Standort durchzuführen und darauf aufbauend dann eine Auslegung anzufertigen.

2.1.1. Baugrundanalyse

Der vorgesehene Standort des Speichers ist ein Feld bei Haßfurt mit der Adresse Uchenhofer Straße 35. (Vergl. Abbildung 3)



Abbildung 3: Standort des Speichers

Quelle: Bayernatlas

Im Rahmen der Studienarbeit wurde keine Bohrung an der vorgesehenen Stelle durchgeführt. Daher wurde in Verbindung mit der Bauingenieursfakultät der Technischen Hochschule Georg Simon Ohm eine Schätzung anhand der allgemeinen geologischen Begebenheiten und einer in der Nähe durchgeführten Bohrung angefertigt. Diese Schätzung hat die in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** beschriebene Bodenbeschaffenheit ergeben.

Tabelle 2: Schätzung des Baugrundes ^[1]

Tiefe [m]	Benennung
0 - 1,5	Mutterboden, Auffüllungen
1,5 - 6,0	Löss-Sand
6,0 - 8,0	Felsverwitterung, Ton steif
ab 8,0	Fels: Ton-/Sandstein

2.1.2. Baugrubenauslegung

In **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zu sehen ist, dass laut Schätzung ab 8 m Tiefe eine Felsschicht beginnt. Ein Graben durch solch eine Felsschicht ist nach technischem Stand möglich, jedoch sehr kostenintensiv je tiefer die Grabung werden soll. Um

die Kosten und den Bauaufwand zu minimieren, wurde sich für eine halb-versenkte Variante des Zylinders entschieden. (Vergl. Abbildung 4)

Wie in Abbildung 4 gezeigt, wurde sich des Weiteren für ein freistehendes Konzept entschieden. Somit ist ein Zugang zur Zylinderaußenwand über die gesamte Größe des Zylinders gegeben. Dies kann insbesondere für die Fertigung wichtig sein.

Um eine eventuelle Schalung für einen Betonzylinder anbringen zu können, wird um den Zylinder zusätzlich Platz für die Schalung und Bewegungsfreiraum eingeplant. Die Auslegung für den benötigten Freiraum ist in Abbildung 6 zu sehen.

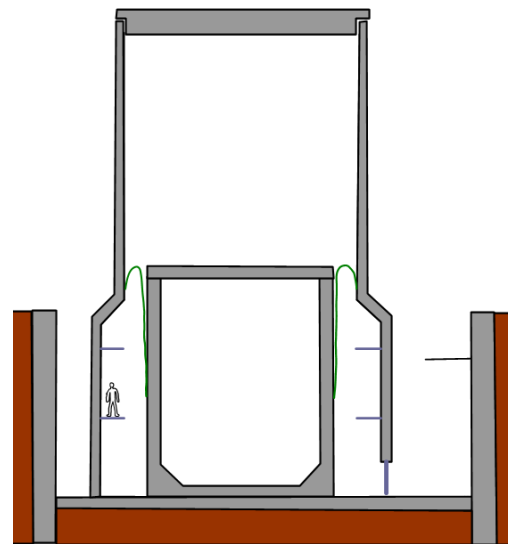


Abbildung 4: Freistehender Zylinder in der Grube

Der zusätzliche Platz um den Zylinder und eine eventuelle Unterbringung des Pumpenhauses in der Baugrube führen zu einer Vergrößerung der Grube.

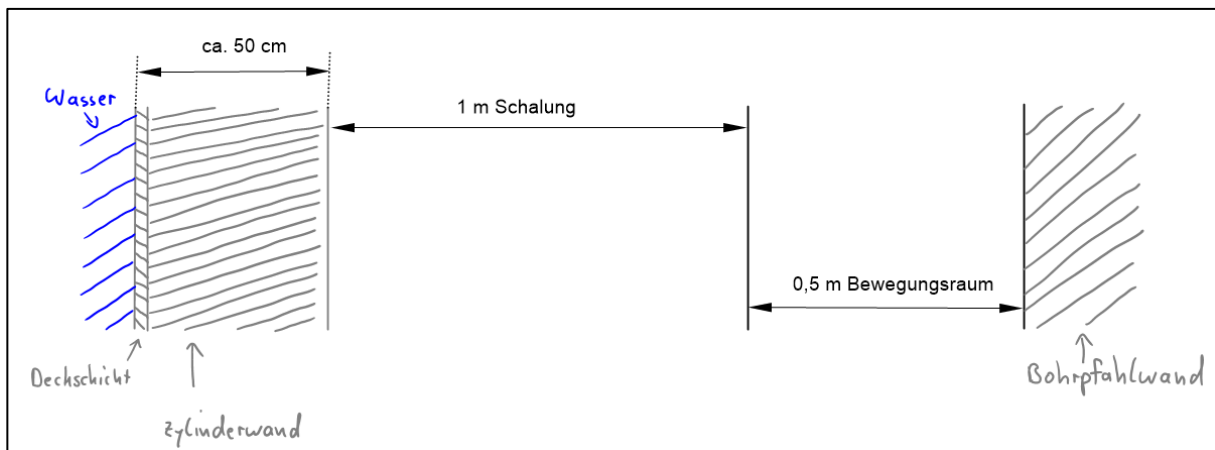


Abbildung 6: Benötigter Freiraum um den Zylinder

Zur Stabilisierung der Grubenwand wurde sich für eine gängige, überschnittene Bohrpfahlwand (vergl. Abbildung 5) entschieden. Eine überschnittene Bohrpfahlwand bietet den Vorteil, dass diese bei einer runden Baugrube als Druckring fungiert. Dadurch werden die vorherrschenden Erdkräfte über die gesamte Wand verteilt und es ist keine weitere Verankerung der Wand im Untergrund nötig.

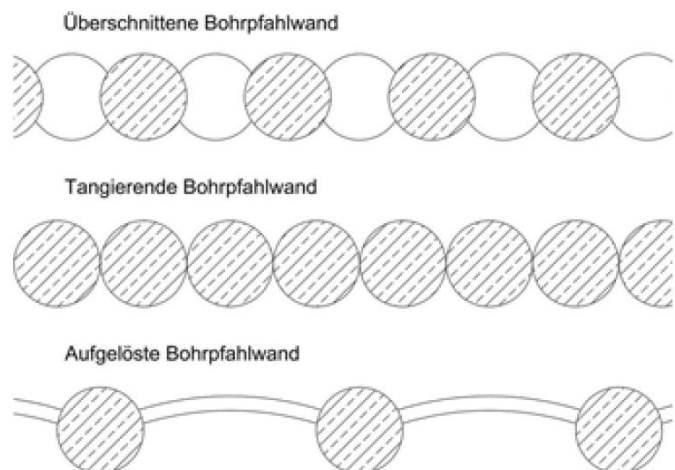


Abbildung 5: verschiedene Bohrpfahlwände

Ein Realbeispiel für die beschriebene Wand kann in Abbildung 7 gesehen werden.



Abbildung 7: Realbeispiel: Überschnittene Bohrpfehlwand ^[6]

Nach Erstellung der Bohrpfehlwand und dem Ausheben der Baugrube wird noch eine Bodenplatte aus Beton hergestellt. Wie diese genau ausgelegt werden muss, hängt zu großen Teilen von der tatsächlichen Untergrundbeschaffenheit ab und wurde bei der hier durchgeführten Auslegung als eine Betonplatte mit 0,5 m Dicke angenommen.

Mit den bisherigen Überlegungen wurden die Maße der Baugrube und die Positionierung des Zylinders auf die Werte in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** und Abbildung 8 festgelegt.

Tabelle 3: Maße der Baugrube

Innendurchmesser	19 m
Tiefe	8 m
Bohrpfahl-Durchmesser	90 cm
Dicke der Bodenplatte	0,5 m
Aushubvolumen	2860 m ³

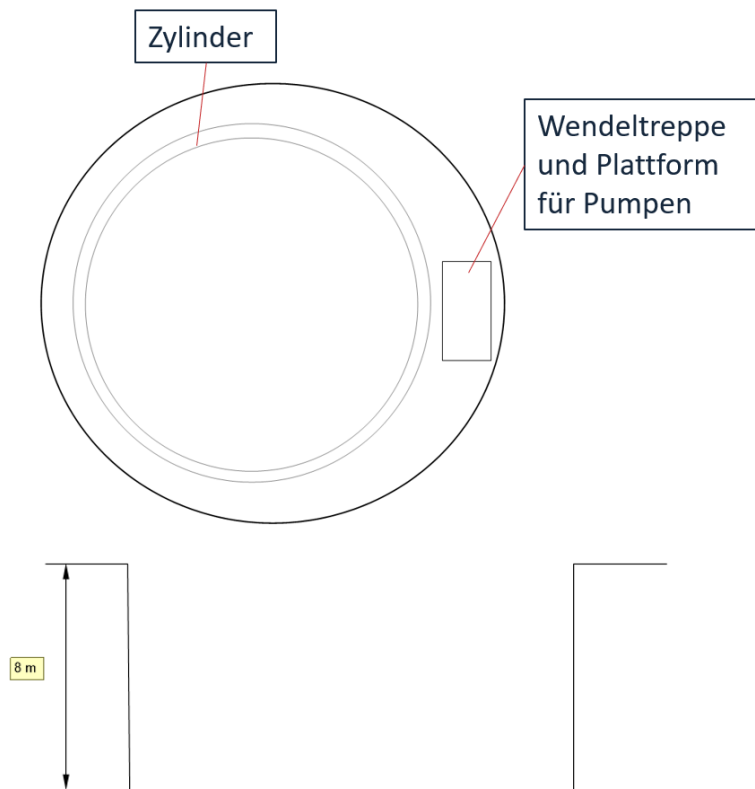


Abbildung 8: Auslegung der Baugrube

2.2. Zylinder und Kolben

Um dem Problem der Zugänglichkeit für die Fertigung des Kolbens und der Anbringung der Membran entgegenzuwirken, wurde eine Verbreiterung des Ringspaltes auf 1,5 m im unteren Bereich des Zylinders vorgesehen. Durch Einbringung von rundumlaufenden Plattformen im Spalt und Zugangsluke ist eine eventuelle Schalung für einen Betonkolben möglich und Platz zur Anbringung der Membran an Kolben und Zylinderwand ist gewährleistet. (s. Abbildung 9)

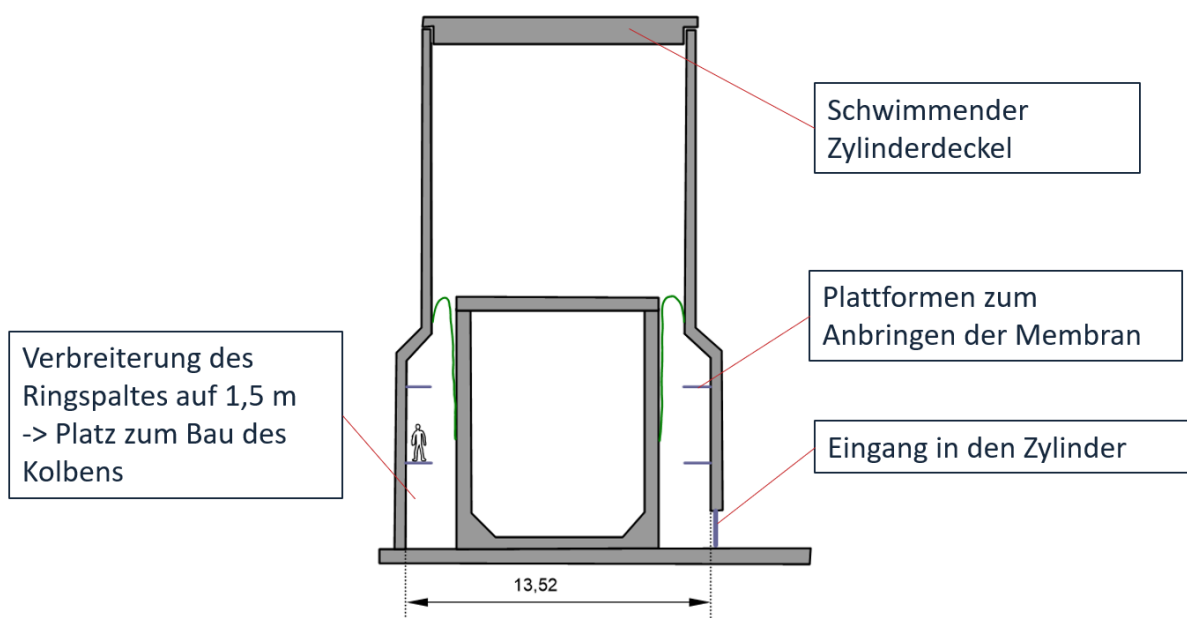


Abbildung 9: Zylinderauslegung

Der Zylinderdeckel wird als schwimmender Deckel ausgelegt, der keine feste Verbindung zur Zylinderwand hat. Die schwimmende Ausführung sorgt einerseits dafür, dass es zu keinen unerwünschten Druckspitzen im Speicher kommt und bei Aufbau einer Solarthermieanlage auf dem Deckel ist es möglich, diese immer nach aktuellem Sonnenstand auszurichten und somit die Effizienz der Anlage zu steigern.

Der Kolben wird hohl gefertigt und danach mit Bodenmasse aus dem Aushub der Baugrube befüllt.

2.2.1. Variante 1: Betonkonstruktion

Für den Bau des Kolbens und des Zylinders kann eine konventionelle Bauweise aus bewährtem Beton herangezogen werden. In **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zu sehen sind die Betonvolumina, die sich bei einer angenommenen Wanddicke von 0,5 m ergeben.

Tabelle 4: Betonvolumina für Zylinder und Kolben

Wanddicke	0,5 m
Betonvolumen Zylinder	Ca. 236 m ³
Betonvolumen Kolben	Ca. 155 m ³

Nachteil bei dieser Variante ist, dass für die Herstellung von Zylinder und Kolben Schalungen erforderlich sind. Wie in Kapitel 2.1.2 beschrieben muss dafür um den Zylinder herum Platz eingeplant werden. Dasselbe gilt für den Kolben, der direkt im Zylinder gefertigt werden soll. Mit der in Abbildung 9 dargestellten Ringspalt-Verbreiterung ist dieser Platz für den Kolben gegeben.

2.2.2. Variante 2: Stahlkonstruktion

Für die Auslegung macht es Sinn, ähnliche dimensionierte Projekte zu betrachten. So gibt es bereits Wärmespeicher mit sehr großen Wasservolumen, welche die des hier betrachteten Speichers deutlich übersteigen. Ein Beispiel dafür ist der Wärmespeicher der N-Ergie in Nürnberg (vergl. Abbildung 10). Dieser hat einen Durchmesser von 25,2 m, eine Höhe von 67,3 m und ein Gesamtvolumen von 33.600 m³ [3]. Da dieser Speicher aus Stahl gefertigt wurde, kommt eine ähnliche Konstruktion für den Stülpmembranspeicher ebenfalls in Frage.

Der Wärmespeicher der N-Ergie hat eine rein zylindrische Form. Daher konnte dieser mit einer speziellen Fertigungstechnik



Abbildung 10: Wärmespeicher der N-Ergie in Nürnberg während der Bauphase [2]

hergestellt werden. Zuerst wurde der Deckel am Boden gefertigt und dann die Mantelbleche „darunter“ geschoben, um diesen langsam in die Höhe zu heben.

Zu prüfen ist, ob dieses Verfahren genauso bei dem Stülpmembranspeicher angewendet werden kann. Aufgrund der in Abbildung 11 rot hervorgehobenen Querschnittsverengung ist dieser kein durchgängiger Zylinder.

Bei einer angenommenen Wandstärke von 1,5 cm in der oberen Hälfte des Zylinders und 2,5 cm in der unteren Hälfte, um die wachsende Druckbelastung durch das Wasser mit der Tiefe zu berücksichtigen, und einer Wandstärke des Kolbens von 2 cm, kommt man auf die in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** aufgelisteten Massen.

Tabelle 5: Stahlmassen für Zylinder und Kolben

Zylindermasse	Ca. 90 t
Kolbenmasse	Ca. 50 t

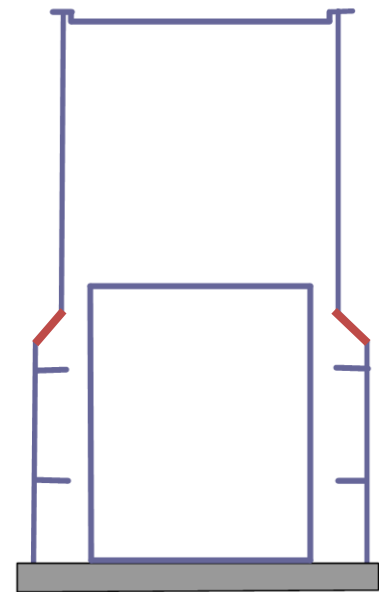


Abbildung 11: Zylinder und Kolben aus Stahl

Vorteil von dieser Variante ist, dass aufgrund der wegfallenden Schalung und geringerer Wandstärke weniger Platz um den Zylinder benötigt wird und somit die Baugrube kleiner ausgeführt werden kann. Jedoch sollte die geringe Wandstärke und gute Wärmeleitfähigkeit von Stahl in der Auslegung der Dämmung berücksichtigt werden.

2.3. Nutzung des Aushubs

Ein wichtiger Teilaspekt bei dem Konzept ist die Verwendung des Aushubes aus der Baugrube. Da die Kosten für den Abtransport und Deponierung von Bodenmasse zur Zeit der Konzeption (2023) im Vergleich zu den Baukosten sehr hoch sind, ist es wünschenswert den Aushub beim Bau komplett wiederzuverwenden.

Ein Teil des Aushubes wird verwendet, um den Kolben zu füllen. Der Rest kann dazu herangezogen werden, einen Ringwall um den Speicher anzulegen. (s. Abbildung 12)

Dieser erfüllt neben der Verwendung des Aushubes noch einen Sicherheitsaspekt. Bei einem eventuellen Versagen des Zylinders kann dieser das herausströmende Wasser, welches im schlimmsten Fall 80 °C oder höher sein kann, auffangen und in die Baugrube leiten. (s. Abbildung 13). Dort kann das Wasser auskühlen und sicher über ein Kanalsystem abgeleitet werden.

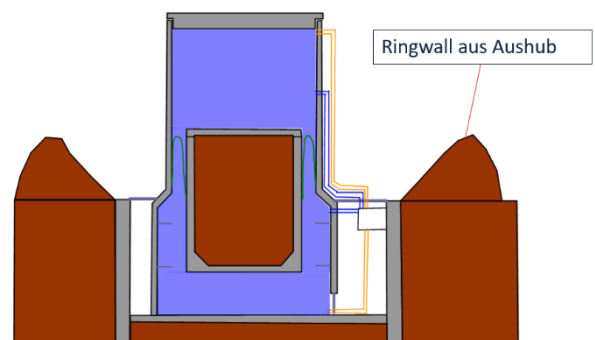


Abbildung 12: Gesamtkonzept mit Ringwall

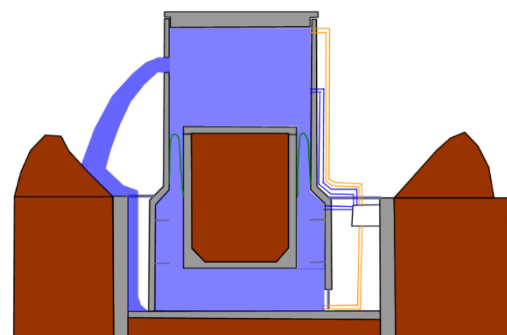


Abbildung 13: Sicherheitswirkung des Ringwalls

Diese Sicherheitswirkung ist insbesondere wichtig, da um das geplante Baugebiet des Speichers noch eine Neubau-Siedlung in Planung ist.

3. Kostenschätzung

Aufgrund der Neuartigkeit dieses Speicherkonzeptes und der Durchführung als Studienprojekt konnten nur Kostenabschätzungen zu Teilbereichen der Baumaßnahmen in Kooperation mit Baufirmen und der Bauingenieur-Fakultät der TH-Nürnberg erbracht werden.

Eine Kostenschätzung betrifft die Herstellung der Bohrpfahlwand (s. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**)

Tabelle 6: Kostenschätzung der Bohrpfahlwand ^[4]

Bohrpfahldicke	880 mm
Bohrpfahltiefe	10 – 11 m
Planung, Bohrschablone, Bewehrung, Pfahlkopfbalken	
Kostenschätzung	450.000 – 500.000 €
Kosten pro m Bohrpfahl	Ca. 45 – 50 €

Als Gesamtkonzept konnte nur eine Kostenabschätzung für die Variante aus Beton angefertigt werden. Die genauen Posten der Abschätzung können in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** betrachtet werden.

Tabelle 7: Kostenschätzung der Betonvariante ^[5]

Beton Bodenplatte inkl. Schalung Zylinder außen	
Beton Wände inkl. Schalung Zylinder außen	
Beton Deckel in FT Bauweise Zylinder außen	
Bewehrungsstahl Zylinder außen	
Beton Bodenplatte inkl. Schalung Kolben innen	
Beton Wände inkl. Schalung Kolben innen	
Auffüllung mit Erdreich Kolben innen	
Beton Deckel auf verfülltem Erdkörper Kolben innen	
Bewehrungsstahl Kolben innen	
Erdaushub der Baugrube und seitlicher Einbau des Erdaushubes innerhalb des Baugeländes als Wallschüttung	
Kostenschätzung	1.500.000 €

Somit kommt man nach den Schätzungen auf Kosten für die Rohbaumaßnahmen in Höhe von ca. **2.000.000 €**.

4. Fazit

Die Vorauslegung des Demonstrators hat gezeigt, dass ein Bau mit gängigen Methoden umsetzbar ist. Sowohl die Beton- als auch die Stahlvariante sind denkbare Konstruktionen für den Speicher. Für eine reelle Umsetzung des Projektes ist es jedoch erforderlich, eine Bohrung vor Ort durchzuführen, um die genauen Beschaffenheiten des Baugrundes zu kennen, da die Dimensionierung der Baugrube und die Auslegung der Bodenplatte zu großen Teilen davon abhängen. Des Weiteren sollten für eine detaillierte Auslegung der Baumaßnahmen die weiteren Teilaspekte des Projektes (z.B. die Auslegung der angebundenen Solarthermieanlage, Dicke der erforderlichen Dämmung, Höhe der Plattform für die Pumpen etc.) tiefer eingebunden werden.

Neben den technischen Aspekten ist eine genaue wirtschaftliche Betrachtung des Projektes für eine eventuelle Realisierung essenziell. Um Investoren für den Bau zu gewinnen ist eine deutlich detailliertere Kostenabschätzung nötig und eventuelle Fördermaßnahmen sollten ausgelotet werden.

Generell ist es nicht das Ziel des Demonstrators, wirtschaftlich zu arbeiten. Es handelt sich dabei um ein Vorschau- und „proof of concept“- Modell. Ein wirtschaftlicher Betrieb ist bei einer größeren Dimensionierung des Speichers möglich. Da jedoch die Baukosten bei einem größeren Speicher ebenfalls steigen, sollten die Investitionskosten im Vergleich zu dem Nutzen immer verglichen werden.

5. Quellenverzeichnis

- [1] Prof. Dr.-Ing. Bernd Plaßmann, Technische Hochschule Georg Simon Ohm, Fakultät Bauingenieurwesen
- [2] <https://www.foamglas.com/de-de/referenzprojekte/industry-de/n-ergie> [Zugriff im Juni 2023]
- [3] https://www.n-ergie.de/n-ergie/unternehmen/unsere-energie/kraftwerksstandort/!ut/p/z1/nZFNC4JAEIZ_jVdn8nPppmFiIVYg2I5Cw1ZBXVHLv5_RJUFWaW4zPO98vAMUYqB18ipY0he8Tsoxv1Lj5ns73NgB-gG6Clrm_kx0hyiOp0EkAlyiA12jx0Yaf8UW0V0A-Uf_W-ndXoBQMxtl6CiEUZoigH3qC0AgbEAfEyeWXPq4tldB6Cs5On35VadqoQBbbNH1mat_GzHct73TbeVUMJhGGTGOSsz-c4rCeckOe96iKckNFUYhjEWXnGqItJZb2qu2DI!/dz/d5/L2dBISEvZ0FBIS9nQSEh/ [Zugriff im August 2023]
- [4] Dr.-Ing. Patrik Wenzl, Leiter Abteilung Bautechnik (BT), BAUER AG, BAUER-Straße 1, 86529 Schrobenhausen
- [5] Prof. Dipl.-Ing. Roland Kraus Technische Hochschule Georg Simon Ohm, Fakultät Bauingenieurwesen in Verbindung mit KLEBL GmbH, Gößweinstraße 2, 92318 Neumarkt i.d.OPf.
- [6] <https://de.wikipedia.org/wiki/Bohrpfahlwand> [Zugriff Juni 2023]
- [7] Haidar, R (Dezember 2023), Systemaufbau und Aggregate zur Stromspeicherung und Wärmebewirtschaftung eines Stülpmembranspeichers, Von <https://doi.org/10.34646/thn/ohmdok-1241>
- [8] Lampe, F [Dezember 2023), Herstellung der Stülpmembran eines Stülpmembranspeichers, <https://doi.org/10.34646/thn/ohmdok-1244>
- [9] Müller-Leimbach, P (Dezember 2023), Auslegung & Betrachtung der Wirtschaftlichkeit eines Solarkollektorfeldes und einer Wärmedämmung für den Stülpmembranspeicher,
- [10] Neubauer, N (Dezember 2023), <https://doi.org/10.34646/thn/ohmdok-1246>
- [11] Schmitt, J (Dezember 2023), Platzierung und Einbau der Aggregate, Rohrleitungen und Strömungsführungen am Stülpmembranspeicher Demonstrator-System, <https://doi.org/10.34646/thn/ohmdok-1243>