

SUBSTANZ

Ausgabe 8/2021

Das URETEK Magazin für Architekten, Bauingenieure und Geologen

Ich sehe was,
das du nicht
siehst?!



Schwerpunktthema
Unterirdische
Infrastruktur

URETEK[®]
BEWAHREN, WAS UNS TRÄGT

ISSN 2625-0888

SCHWERPUNKT - UNTERIRDISCHE INFRASTRUKTUR

Wasserstoffkavernen im Steinsalz als Teil der Energiewende

Herausforderungen der Energiewende – In den nächsten Jahren und Jahrzehnten steht Deutschland vor Herausforderungen bezüglich einer funktionierenden Energieversorgung.

Die Bundesregierung strebt an, dass bis zum Jahr 2050 60 % des Bruttoenergieverbrauchs und 80 % des Bruttostromverbrauchs mit Erneuerbaren Energien abzudecken. Dabei sollen die fossilen Energieträger wie Erdöl, Erdgas und Kohle durch Wasserkraft, Solarenergie, Windenergie und Erwärme ersetzt werden. In der Zukunft wird

mit einem hohen Anteil an regenerativer Energieerzeugung durch Power-to-Gas gerechnet. In diesem Konzept soll überschüssiger Wind- und Solarstrom zur Wasserspaltung genutzt werden und den entstehenden Wasserstoff beispielsweise über Brennstoffzellen zurück in Strom zu verwandeln, in der Industrie zu verwenden oder auch in das bestehende Erdgasnetz einzuspeisen.

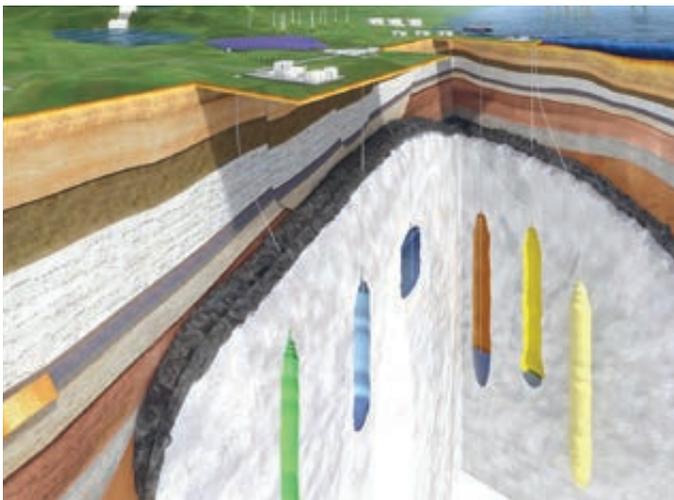


Bild 1: Salzstock mit Speicherkavernen. Quelle: DEEP.KBB

Kavernen in Steinsalz

Ein Aspekt, der in den letzten Jahren weiter erforscht wurde, ist das Gebiet der Speichermöglichkeit für den aus Erneuerbaren Energien hergestellten Wasserstoff. Hierzu bieten sich Kavernen in Salzstöcken oder -schichten an. Salzgestein hat sich bei der Speicherung von Öl und Erdgas seit Jahrzehnten als besonders geeignet erwiesen, da das Gestein für Flüssigkeiten und Gas impermeabel ist. Insbesondere der norddeutsche Raum bietet umfangreiche Vorkommen mächtiger Salinare des sogenannten Zechsteins, in denen sich die zylindrischen Hohlräume in den erforderlichen Dimensionen aussolen lassen. Dieser Solvorgang dauert mehrere Jahre, bis die endgültige Form der Kaverne errichtet ist.

Bild 1 zeigt schematisch den geologischen Aufbau eines Salzstocks (weiß) und die Anordnung von Speicherkavernen in diesem Salzstock.

Der höchste Punkt der Kaverne stellt gleichzeitig den tiefsten Punkt der Verrohrung dar. Dieser wird als letzter zementierter Rohrschuh bezeichnet und liegt bei Kavernen in Salzstöcken in Norddeutschland etwa in einer Tiefe von 1.000 bis 1.200 m. Die Kaverne selbst wird nicht mit Baumaterial gesichert, die Standsicherheit des Bauwerks wird durch den Innendruck in der Kaverne selbst und der ausgeprägten Kriechfähigkeit des Salzes abgesichert. Durch das Kriechen ist das Salz in der Lage, hohe Spannungsdifferenzen, die an der Kavernenwand entstehen, in weiter entfernte Gebirgsbereiche umzulagern. Bei einer Höhe der Kaverne von bis zu 500 m und einem Durchmesser von bis zu 80 m umfasst ein solches Bauwerk ein geometrisches Volumen von etwa 500.000 bis 1.000.000 m³. In einem Kavernenfeld werden mehrere Kavernen mit einem genügend großen Sicherheitsabstand zueinander erstellt.

Die gebirgsmechanische Dimensionierung unterirdischer Speicherbauwerke ist in Deutschland seit Jahrzehnten Stand der Technik. Wesentlicher Einsatzzweck von Kavernen in Salzgestein war bisher die Speicherung von Rohöl als Krisenbevorratung und Erdgas als Vorratsreserve, um jahreszeitliche Verbrauchsschwankungen auszugleichen. Für die große Anzahl der genutzten Salzkavernen liefert die jahrzehntelange Betriebspraxis umfangreiche Erfahrungen, die die Speicherung von flüssigen und gasförmigen Kohlenwasserstoffen betreffen.

Bild 2 zeigt die generellen gebirgsmechanisch festzulegenden Betriebsgrenzen.

Diese Betriebsgrenzen umfassen folgende Kenngrößen:

- Maximaler Kaverneninnendruck: Der Druck in einer Kaverne darf gegenüber dem herrschenden Gebirgsdruck nicht so groß werden, dass die Gefahr des Aufreißens besteht und damit die Dichtheit der Kaverne gefährdet ist
- Minimaler Kaverneninnendruck: Eine Gasspeicherkaverne kann nicht „leer“ gefahren werden, d.h. es herrscht immer ein gewisser Mindestdruck in der Kaverne. Dieser ist wichtig, damit die Kaverne über Jahrzehnte des Betriebes standsicher ist und die Kavernenwand konturtreu bleibt. Bemessen wird dabei die Beanspruchung des Salzes an der Wand.
- Gasentnahmerate: Um eine Infiltrationsrissbildung zu beschränken, darf das Gas nicht zu schnell aus einer Kaverne entnommen werden. Dieser Aspekt wurde in den letzten Jahren intensiv erforscht wird nachfolgend näher erläutert.

Thermodynamik in Salzkavernen

Die Liberalisierung des Gasmarktes konfrontierte die Speicher inzwischen mit erhöhten Anforderungen: Kurzzeitige Bedarfsschwankungen erfordern eine hohe Flexibilität. Die erhöhte Zahl der möglichen Umschläge bringt eine wesentlich stärkere Beanspruchung des die Kavernen umgebenden Salzgesteins mit sich. Diese neuen Anforderungen brachten nun mit sich, dass das gespeicherte Gas in den

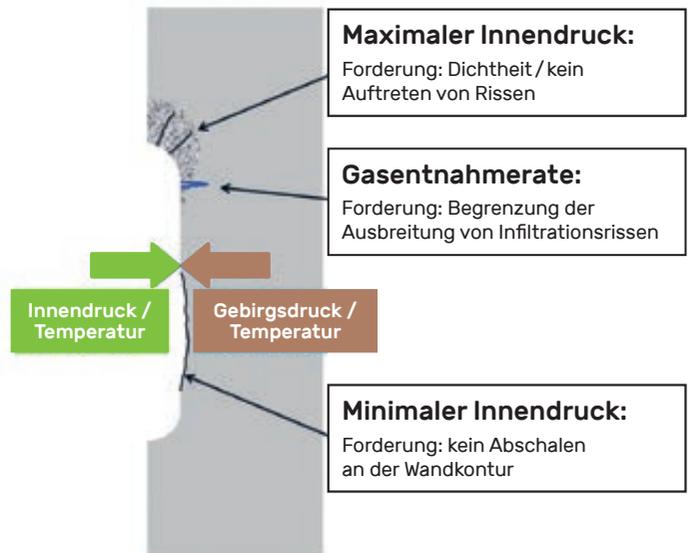


Bild 2: Gebirgsmechanische Betriebsgrenzen einer Gasspeicherkaverne. Quelle: Leibniz Universität Hannover, IGtH

Kavernen möglichst schnell verfügbar gemacht oder bei einem günstigen Preis möglichst schnell in die Kavernen eingelagert werden kann. Diese neue Nutzungsart führte dazu, dass im Gegensatz zur bisherigen gebirgsmechanischen Dimensionierung nun thermodynamische Prozesse in einer Erdgasspeicherkaverne berücksichtigt werden mussten. Entnimmt man Gas aus einer Kaverne, so kühlt sich dieses durch die Druckänderungsprozesse ab. Wird Gas mit einer höheren Entnahmerate entnommen, so ist der Temperaturabfall in der Kaverne entsprechend stärker. Befüllt man die Kaverne wiederum mit Erdgas, so kommt es zu einer deutlichen Erwärmung des Gases. Diese Temperaturänderungen müssen in einer gebirgsmechanischen Dimensionierung berücksichtigt werden, da sie zu Spannungsänderungen an der Salzwand der Kaverne führen.

Bild 3 zeigt exemplarisch einen Druck- und Temperaturverlauf in einer Gasspeicherkaverne.

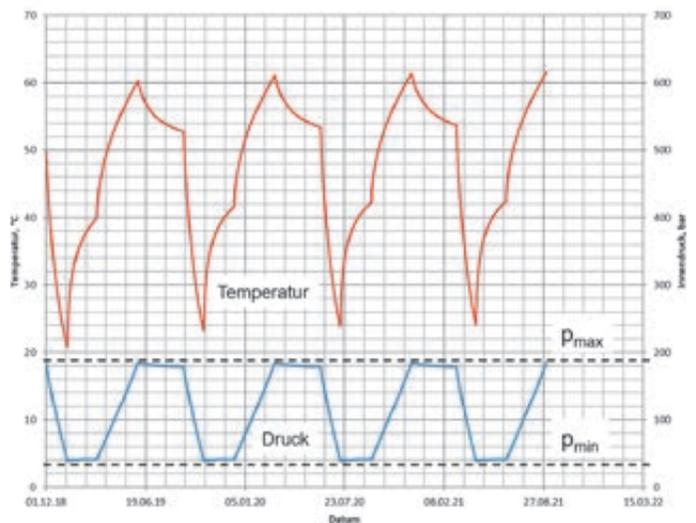


Bild 3: Simulation eines Druck- und Temperaturverlaufs in einer Erdgaskaverne. Quelle: Leibniz Universität Hannover, IGtH

In dieser Abbildung ist das Ergebnis einer thermodynamischen Berechnung einer Kaverne dargestellt. Die blaue Kurve stellt den angenommenen Druckverlauf zwischen Maximaldruck p_{max} und Minimaldruck p_{min} dar, die rote Kurve ist die auf der Grundlage des Druckverlaufs berechnete Temperatur. Zu erkennen ist dabei, dass in den Entnahmephase der Druck abfällt und sich das Gas um bis zu 30 °C abkühlt. In den Befüllphasen, erkennbar durch den Druckaufbau, steigt die Temperatur in der Kaverne wiederum an.

Signifikant ist auch die Beobachtung, dass in Phasen, wo kein Gas aus der Kaverne entnommen oder in die Kaverne eingespeist wird, eine ständige Temperaturänderung vorherrscht. Dies liegt daran, dass entweder das umgebende Salzgestein durch Wärmeflussprozesse das Gas aufheizt oder das Gas Wärme an das umgebende (kühlere) Salzgestein abgibt. Somit befindet sich das System Kaverne-Gebirge in einem ständigen dynamischen Temperaturänderungsprozess.

Die daraus resultierenden Spannungsänderungen werden auf der Grundlage der thermodynamischen sowie der mechanischen Prozesse berechnet und ingenieurmäßig bewertet. Der nicht zu vermeidende Infiltrationsrissprozess muss in der Ausbreitung begrenzt werden, d. h. die Entnahmerate darf einen bestimmten Wert während des Betriebs nicht überschreiten.

Salzkavernen für zukünftige Speicherung von Wasserstoff

Eine direkte Übertragbarkeit der Ergebnisse auf die abweichenden Anforderungen an Salzkavernen für die Speicherung von Wasserstoff ist nicht gegeben und bedarf intensiver Forschungsarbeiten. Auch veröffentlichte Betriebserfahrungen von existierenden Wasserstoffkavernen in England und den USA reichen nicht aus bzw. sind nicht verfügbar, um die Interaktion zwischen Salzgestein und Wasserstoff quantitativ zu bestimmen oder die Erkenntnisse auf andere Kavernen mit anderen Randbedingungen zu übertragen.

Die Betriebsszenarien bei der Speicherung Wasserstoff unterscheiden sich zukünftig vermutlich von denen der Erdgasspeicherung. Die anzunehmenden Lastfälle weichen von denen der Erdgasspeicherung ab und erfordern eine neue Bewertung der Spannungszustände in der Umgebung der Salzkaverne. Bei der Speicherung von Wasserstoff ist im Vergleich mit den heutzutage flexibel betriebenen Erdgasspeicherkavernen von noch kurzfristigeren Umschlagsintervallen auszugehen. Täglich angeforderte Ein- und Ausspeicheraten sind mit höheren Druckänderungsraten im Speicherbetrieb verbunden.

Wie bereits für die Erdgasspeicherkavernen erwähnt, bedeutet eine hohe Entnahmegeschwindigkeit einen starken Temperaturabfall und damit eine signifikante Verringerung der maßgebenden Spannungen an der Kavernenwand. Dieser sogenannte Bemessungs-lastfall ist für jede Kaverne standortspezifisch, entsprechend der

Teufe, Größe, Geometrie, des Verhältnisses Volumen zu thermisch wirksamer Oberfläche (V/O) sowie der Anforderungen der Kavernenbetreiber zu ermitteln.

Der Einfluss der Temperaturänderung auf Grund von Ein- oder Ausspeicherprozessen ist sowohl für Erdgas als auch für Wasserstoff maßgeblich, jedoch unterscheidet sich das Temperaturverhalten der beiden Medien auf Grund unterschiedlicher Dichten und Viskositäten, abweichender Kompressibilität und unterschiedlicher thermodynamischer Parameter deutlich.

Nur separate Temperaturberechnungen können die stoffspezifischen Eigenschaften angemessen erfassen und belastbare Ergebnisse liefern.

Forschungsarbeiten an Salzgestein

Internationale Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der Gebirgsmechanik zur Speicherung von Wasserstoff in Salzkavernen wurden bisher unter stark vereinfachten Annahmen durchgeführt.

Das Institut für Geotechnik an der Leibniz Universität Hannover hat in den letzten Jahren zahlreiche Forschungsvorhaben erfolgreich abgeschlossen, die sich intensiv mit der Speicherung von Wasserstoff in Salzkavernen beschäftigt haben.

In den Forschungsvorhaben InSpEE (Informationssystem Salz: Planungsgrundlagen, Auswahlkriterien und Potenzialabschätzung für die Errichtung von Salzkavernen zur Speicherung von Erneuerbaren Energien) und InSpEE-DS wurde untersucht, welches geologische Potential in Form von Salzlagerstätten in Deutschland existiert. Dieses Vorhaben wurde im Verbund mit den Partnern DEEP.KBB und der

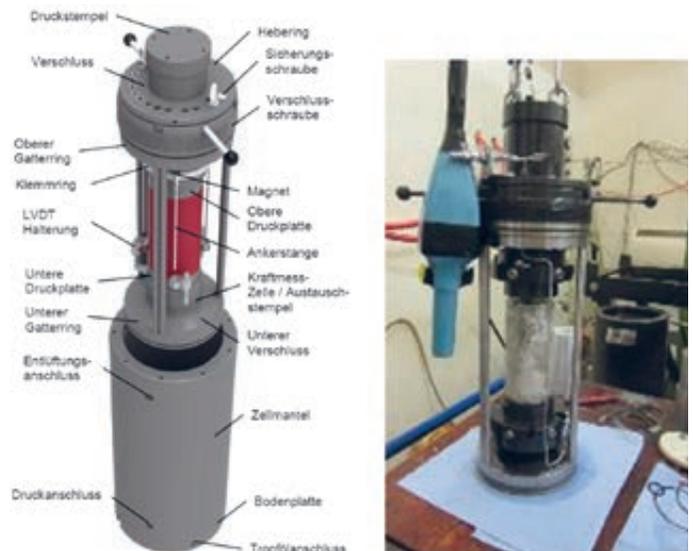


Bild 4: Aufbau der Prüfwelle. // Salzprüfkörper in der Prüfwelle. Quelle: Leibniz Universität Hannover, IGtH

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) durchgeführt. Das Ergebnis kann vereinfacht folgendermaßen zusammengefasst werden: In Deutschland gibt es genügend Salzstrukturen, um zukünftig eine große Anzahl von Kavernen zur Speicherung von Wasserstoff zu bauen!

Das Forschungsvorhaben La-thi-ga (Laboruntersuchungen von thermisch-induzierter und gasdruckgetriebener Rissbildung im Salzgestein) beschäftigte sich mit der Frage, ob die Rissprozesse, die an der Kavernenwand auftreten, unter bestimmten Bedingungen im Labor erzeugt werden können. Dazu wurden Salzprüfkörper mit unterschiedlichen Beanspruchungsbedingungen untersucht und die Rissprozesse detektiert. Die Salzprüfkörper sind innen hohl und können mit einem Innendruck durch Stickstoff belastet werden. Von außen herrscht allseitig ebenfalls ein Druck, der dem Spannungszustand aus dem Gebirge (z. B. in 1.000 m Tiefe) simulieren soll. In der Versuchsdurchführung wurden die Drücke dann so geregelt, dass der Spannungszustand im Prüfkörper in der Form herrscht wie beispielsweise während der Abkühlungsprozesse in einer realen Kaverne.

Das Ergebnis war, dass unter reproduzierbaren Randbedingungen Risse im Salz auftreten und somit unter wirtschaftlichen Bedingungen in einer Kaverne bei einer optimierten Fahrweise nicht zu vermeiden sind. Im Rahmen des Forschungsvorhabens RiSa (Ris-sausbreitung im Salzgestein) wurden die Erkenntnisse aus den Laboruntersuchungen für die Dimensionierung von Speicherkavernen umgesetzt. Dabei konnten die Ergebnisse unmittelbar in das bestehende Konzept für Erdgaskavernen genutzt werden und zukünftig bei der Speicherung von Wasserstoff.

Das bis 2024 laufende Forschungsvorhaben LARISSA baut auf den Erkenntnissen aus La-thi-ga und RiSa auf. Hierbei wird detailliert untersucht, welche Rissprozesse sich in Salzprüfkörpern unter welchen Randbedingungen ausbilden. Dazu werden Salzprüfkörper verschiedener Lokationen weltweit untersucht, da bezüglich der Materialeigenschaften von Steinsalz gilt: Salz ist nicht gleich Salz! Darüber hinaus wird mit assoziierten Partnern aus der Industrie erarbeitet, wie zukünftig realistische Speicherszenarien in Salzkavernen für Wasserstoff aussehen könnten. Hierbei wird beispielsweise berücksichtigt, welche Wasserstoffmengen mittels Elektrolyse in welcher Zeit erzeugt werden können.

Bild 4 zeigt den Versuchsaufbau im Labor mit dem zu beprobenden Salzprüfkörper.

Die Beanspruchung im Labor wird dann allseitig auf den Prüfkörper aufgebracht und anschließend so variiert, dass die auftretenden Spannungsdifferenzen nach der Theorie zu Infiltrationsrissprozessen im Prüfkörper führen müssten. Allerdings kann man die Risse zunächst nur indirekt über Acoustic Emission oder über die Druckänderungen beobachten. Visuell können die Risse erst nach Ausbau der Probe aus der Maschine dokumentiert werden.

Bild 5 zeigt einen Salzprüfkörper, der aufgrund der Beanspruchung horizontal verlaufende Infiltrationsrisse aufwies.



Bild 5: gerissener Salzprüfkörper. Quelle: Leibniz Universität Hannover, IGTH

Deutlich erkennbar ist, dass der Prüfkörper in diesem Versuch horizontal durchgerissen ist. Dies entsprach exakt der vorherigen Prognose.

Anwendung der Forschungsergebnisse zur Speicherung von Wasserstoff in Kavernen

Letztendlich muss eine Übertragung der theoretischen Grundlagen und der Rissprozesse im Labor in realen Salzkavernen überprüft werden. Hierzu werden in Deutschland einige Großversuche vorbereitet, die in den nächsten Jahren das Prozessverständnis bei der Herstellung und dem Betrieb von Wasserstoffkavernen erweitern werden. Der wichtigste Aspekt aus ingenieurmäßiger Sicht dabei ist, dass eine Salzkaverne für die Speicherung von Wasserstoff genauso gasdicht und standsicher ist, wie das die Erdgaskavernen seit Jahrzehnten sind.

Die bisherigen und künftigen Forschungsarbeiten zur Wasserstoffspeicherung in unterirdischen Salzkavernen werden einen maßgeblichen Teil dazu beitragen, dass die Herausforderung der Energie-wende in Deutschland gelingen wird.

Autor



Dr.-Ing. Dirk Zapf
Leibniz Universität Hannover
Institut für Geotechnik,
Abteilung Unterirdisches Bauen,
Hannover