



Fonds européen de développement régional (FEDER) Europäischer Fonds für regionale Entwicklung (EFRE)

Wasserstoffspeicherung im Oberrheingraben

Eine Potentialanalyse

Dr. Johannes Miocic Professur für Sedimentologie und Quartärforschung Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

RES-TMO Output 2.2.1: Klassifizierung und Kartierung der verschiedenen Sedimentgesteine der TMO als Energiespeicher in Bezug auf Speichereigenschaften, Lokalität, und geologischen Faktoren. Die resultierende dreidimensionale Karte zeigt die Nutzbarkeit der Sedimentgesteine der TMO für verschiedene Arten der Energiespeicherung auf. Eine Bewertung der Speicherstandorte nach Tauglichkeit ist enthalten.

RES-TMO Output 2.2.3: Übersicht über das Gesamtpotential der geologischen Energiespeicherung in der TMO und deren Rolle für die Versorgungssicherheit zukünftiger Energiesysteme. Detaillierte Übersicht über die verschiedenen geologischen Energiespeichermöglichkeiten in der TMO, Nutzbarkeit dieser sowie potentielle Einbindung dieser in die Versorgungssicherheit erneuerbarer Energiesysteme.

Freiburg im Breisgau

04.02.2021

Inhalt

1.	Einleitung	. 3					
2.	Geologische Wasserstoffspeicherung 3						
3.	Geologie des Oberrheingrabens4						
4.	Speicherpotenziale ORG 8						
4	4.1 Porenspeicher						
	4.1.1 Permotriassische Sandsteine	. 8					
4.1.2. Sandsteine des Unteren Tertiär1							
4	4.2 Salzkavernenspeicher13						
5.	. Empfehlungen						
Lite	Literatur						

1. Einleitung

Um die beschlossenen Klimaziele der Bundesregierung als auch der Europäischen Union für die Jahre 2030 und 2050 zu erreichen wird eine Energieerzeugung aus erneuerbaren Energien eine Schlüsselrolle spielen müssen (Deutscher Bundestag, 2019; European Council, 2014; European Parliament, 2020). Bei einer Energieversorgung aus 100% erneuerbaren, regional erzeugten Energien wird die Zwischenspeicherung von Energie für die Versorgungssicherheit wichtig (Mahlia et al., 2014). Neben der Möglichkeiten von Wasserkraftspeichern, Batteriespeichern, Druckluftspeichern, Wärmespeichern und Schwungmassespeichern wird Strom-zu-Gas-Speichern ein hohes Potential zugeschrieben (Blanco and Faaij, 2018; Götz et al., 2016). Bei dieser Technologie wird überschüssige Energie mithilfe von Elektrolyse in Gas (Wasserstoff, Methan) umgewandelt, welches dann bei Energiebedarf zur Energieerzeugung genutzt werden kann. Die Gase können sowohl in oberirdischen Druckcontainern als auch in unterirdischen Gesteinen zwischengespeichert werden. Um große Mengen an Energie zwischenzuspeichern sind große Gasvolumina von und hier sind geologische Speicher besser geeignet als oberirdische Nöten, Speichermedien. Im vorliegenden Bericht, welcher im Rahmen des INTERREG Projektes RES-TMO (www.res-tmo.com) erarbeitet wurde, wird auf die Möglichkeiten der geologischen Wasserstoffspeicherung im Oberrheingebiet eingegangen. Er basiert zum Großteil auf Daten des INTERREG Projektes GeORG(GeORG-project team, 2013), welches die Geologie des Oberrheingrabens (ORG) grenzübergreifend detailliert erarbeitet hat sowie die Potentiale von CO2 Speicherung im Oberrheingraben analysiert hat.

2. Geologische Wasserstoffspeicherung

Grundsätzlich gibt es zwei verschiedene Möglichkeiten Gase sicher im Untergrund zu speichern: (1) In künstlich angelegten Kavernen in Salzgesteinen, welche sich durch ihre sehr niedrige Durchlässigkeit auszeichnen. (2) Im Porenraum von Gesteinen mit einer hohen Porosität und Durchlässigkeit. Hier ist es elementar, dass diese Gesteine von einer Deckschicht aus undurchlässigem Gestein überdeckt werden (Barrierekomplex) damit die gespeicherten Gase nicht aus der Gesteinsschicht, in welcher sie zwischengespeichert werden, entweichen. Neben Aquiferen können auch erschöpfte Öl- und Gasreservoire als Porenspeicher genutzt werden. Bisher gibt es mit beiden Methoden, Kavernenspeicherung und Porenspeicherung, nur begrenzte Erfahrungen was die Speicherung von Wasserstoff betrifft. Beide Methoden werden allerdings seit Jahrzehnten im großen Umfang für die Zwischenspeicherung von Erdgas genutzt. Es ist anzumerken, dass Salzgesteine im Untergrund wesentlich weniger weit verbreitet sind als für Gasspeicherung nutzbare Porenspeicher.

Salzkavernen werden mithilfe einer Bohrung und zirkulierendem Wasser künstlich in Salzschichten oder Salzdomen erstellt. Dabei kann die Größe der Kaverne, in Abhängigkeit von den geologischen Gegebenheiten und zukünftigem Nutzen genau vorgegeben werden und reicht von einigen 10.000 m³ bis zu mehr als 1 Millionen m³. Durch die Bohrung wird das zu speichernde Gas eingelagert oder entnommen, sie kontrolliert also auch die maximalen Volumenströme und damit die bei Bedarf lieferbare Energiemenge. Bereits seit 1972 wird im Vereinigten Königreich erfolgreich und sicher Wasserstoff in Salzkavernen zwischengespeichert, seit den 1980er Jahren auch in den USA (Tarkowski, 2019).

Zur Wasserstoffspeicherung in Aquiferen gibt es derzeit nur größere Felduntersuchungen, unter anderem in Argentinien und Österreich, es ist aber noch kein aktiver Wasserstoffspeicher in Betrieb. Erfahrungen bei der Aquiferspeicherung von Stadtgas, das bei Kohlevergasung gewonnen wird und einen Wasserstoffanteil von etwa 50-60% hat, haben gezeigt, dass es bei einer solchen Speicherung zu Mineralreaktionen als auch mikrobieller Aktivität kommen kann (Heinemann et al., 2021; Tarkowski, 2019). Dies kann zum einen zur Entstehung von H₂S führen, zum anderen kann Wasserstoff aufgebraucht werden und Methan entstehen. Ersteres hat Implikationen für die Sicherheit des Speicherbetriebs, letzteres führt zu einem geringen Energiegehalt im Speicher, kann aber auch zur "Herstellung" von "grünem Methan" aus Wasserstoff und Kohlenstoffdioxid genutzt werden (Panfilov, 2010, www.underground-sun-conversion.com).

3. Geologie des Oberrheingrabens

Der Oberrheingraben ist Teil des känozoischen Rift Systems West- und Mitteleuropas. Der Graben hat eine Länge von etwa 300 km und eine Breite von etwa 40-50 km und die Grabenachse ist etwa SSW-NNE orientiert. Im Süden wird er vom Schweizer Jura und im Norden vom Rheinischen Massiv begrenzt. Die Grabenschulter im Westen wird von den Vogesen und dem Pfälzerwald, im Osten bilden der Schwarzwald und der Odenwald die Grabenbegrenzung. Die Entstehung des Grabens ist auf die alpine Orogenese zurückzuführen und die Hauptphase der Grabenbildung fand vom Eozän bis in das Oligozän, also vor etwa 45 bis 25 Millionen Jahre statt (Gever et al., 2011). Das mesozoische Deckgebirge ist im Grabeninneren unterschiedlich weit abgesunken und ist in Teilen des Grabens in Tiefen von mehr als 5000 m unter dem Meeresspiegel zu finden. Auf den Grabenschultern wurde das Deckgebirge zum Großteil abgetragen und das Grundgebirge freigelegt. Tertiäre und guartäre Sedimente bilden zum Teil mächtige Sedimentpakete von bis zu 4000 m Mächtigkeit im Grabeninneren. Tektonisch gesehen ist der Oberrheingraben eine komplexe Bruchzone, welche sowohl von ost-westlicher Dehnung als auch von linksseitiger Längsverschiebung betroffen ist. Eine Vielzahl von Störungen durchziehen den Graben, einige von ihnen sind mutmaßlich reaktivierte Grundgebirgsstrukturen während

andere wiederum auf die Grabenbildung selbst zurückzuführen sind. Durch die tektonischen Bewegungen liegt heute in komplexes Muster von tektonischen Blöcken und Schollen vor (Abb. 1).



Abbildung 1: Tektonische Übersichtkarte des Oberrheingebietes. Die starke Zergliederung in geologische Blöcke und Schollengebiete ist sehr deutlich zu erkennen. AusGeORG Fachlich-Technischer Abschlussbericht des Interreg-Projekts GeORG Teil 4 – Atlas.

Der geologische Aufbau des Oberrheingrabens umfasst mehrere stratigraphische Stockwerke (Abb. 2): über der tiefsten Einheit des Grundgebirges, welches aus metamorphen und magmatischen Gesteinen besteht, liegen teils mächtige Sedimente des Permokarbons. Darüber folgen im gesamten Oberrheingraben und zum Teil auch auf den

Grabenschultern, permische und mesozoische Sedimentgesteine des sogenannten Deckgebirges. Die jüngeren Einheiten des Mesozoikums (jüngeres Jura und Kreide) sind im Oberrheingrabengebiet nicht überliefert. Auf das Deckgebirge folgen Gesteine des Tertiärs welche die Grabenfüllung bilden. Die jüngsten Ablagerungen im Oberrheingraben stammen aus dem Jungtertiär (Pliozän) und Quartär, zwischen diesen Lockergesteinen und den anderen Gesteinen des Tertiärs befindet sich allerdings eine Schichtlücke von mehr als 10 Millionen Jahren. Eine genaue Beschreibung der einzelnen Schichtabfolgen findet sich im GeORG-Endbericht(GeORG-Projektteam, 2013) sowie in Geyer et al. (2011).

Innerhalb der stratigraphischen Stockwerke liegen mehrere Sedimentabfolgen vor, welche als Speicher-Barriere-Komplexe in Frage kommen. Diese Abfolgen bestehen (von den ältesten zu den jüngsten Schichten) aus(GeORG-Projektteam, 2013):

- Permokarbonische und Permotriassische Sandsteine (Porenspeicher) und Unterer und Mittlerer Muschelkalk (Barrierekomplex)
- Oberer Muschelkalk (Porenspeicher) und Keuper bis Unterjura (Barrierekomplex)
- Mittleres Mittel Jura (Hauptrogenstein) als Porenspeicher und Oberes Mittleres Jura (Barrierekomplex)
- Älteres Tertiär als sowohl Speicher- als auch Barrierekomplex. Hier liegen sowohl Porenspeicher als auch Salzstöcke vor.



Abbildung 2: Schichtenfolge im Oberrheingebietes. Die Speicher- und Barrierekomplexe sind auf der rechten Seite dargestellt. Aus GeORG Fachlich-Technischer Abschlussbericht Teil 1 (GeORG-Projektteam, 2013).

4. Speicherpotenziale ORG

4.1 Porenspeicher

Da bisher nur sehr wenig Erfahrungen mit der Speicherung von Gasen in karbonatischen Gesteinen besteht und diese Gesteine häufig über eine komplexe Porosität- und auch Permeabilitätsversteilung verfügen, werden im Folgenden nur die siliziklastischen Sandsteine des Perms und der Trias sowie des Tertiärs als Porenspeicher im ORG betrachtet.

4.1.1 Permotriassische Sandsteine

Permotriassische Sandsteine sind im ORG weit verbreitet und weisen eine Mächtigkeit von wenigen Metern im Süden bis zu mehr als 450 m im zentralen ORG auf (Abb. 3). Die Schichtenfolge bestehet hauptsächlich aus roten und bunten Sandsteinen mit eingeschalteten Ton- und Siltsteinen. Die mittel- bis grobsandigen Sandsteine werden von der Basis des Unteren Muschelkalkes überlagert, welcher durch Evaporite und Karbonate ausgeprägt ist. Diese bilden für die Sandsteine den Barrierekomplex. Die Sandsteine weisen zum Teil gute Porosität auf wie in Tabelle 1 aufgezeigt, allerdings sind die Permeabilitäten meist recht gering (Abb. 4), was auch auf die zum Teil hohe Versenkungstiefe von bis zu 5500 m zurückzuführen ist (Abb. 3). Höhere Reservoirqualitäten (hohe Permeabilität und Porosität) sind in im Wesentlichen auf das Vorhandensein von Klüften zurückzuführen (GeORG-project team, 2013). Entlang von Störungen kommt es zu Versätzen von mehr als 1000 m und die Sandsteine sind innerhalb einzelner Blöcke zum Teil stark verkippt.

	Anzahl	Minimum	Maximum	Median
	Proben			
Porosität (%)	254	1,4	24,2	9,51
Permeabilität	211	1 * 10 ⁻³	1524	2,33
(mD)				

Tabelle 1: Porositäten und Permeabilitäten von Buntsandsteinproben aus dem ORG (GeORG-project team, 2013).

Zwar ist Wasserstoffspeicherung in permotriassischen Sandsteinen im ORG grundsätzlich möglich, da die Gesteine eine (geringe) Reservoirqualität haben, von Deckgesteinen überlagert werden, und eine hohe Mächtigkeit aufweisen. Allerdings hat die niedrige Permeabilität für die Nutzung als Porenspeicher für Wasserstoff signifikante Auswirkungen, da in Reservoiren mit geringer Permeabilität eine schnelle Injektion als auch Produktion von Wasserstoff nicht oder nur bedingt möglich ist. Für die langfristige Speicherung von CO₂, an welche bei der Auswertung des geologischen Modelles während des GeoORG Projektes

vornehmlich gedacht wurde, sind geringe Permeabilitäten nicht so problematisch wie für Wasserstoffspeicherung, weshalb die permotriassischen Sandsteine in diesem Projekt als grundsätzlich geeignet für Gasspeicherung identifiziert wurden. Positiv für eine potentielle Wasserspeicherung ist die Verkippung der Schichten wodurch strukturelle Fallenstrukturen ausgebildet sind. Bei der Nutzung solcher Fallenstrukturen muss allerdings die Durchlässigkeit der Störungen genau untersucht werden, damit es zu keine Fluidverlust kommt. Die meist tiefe Tiefenlage der Sandsteine ist für Speicheroperationen grundsätzlich auch eher negativ, da mit Zunahme der Bohrtiefe auch die Kosten für die Injektions- und Förderbohrungen stark steigen.

Unter der Annahme, dass etwa 1% der geographischen Ausbreitung des Buntsandsteins (mit Barrierekomplex, schraffierte Fläche in Abbildung 3) für Wasserstoffspeicherung genutzt werden können, und die durchschnittliche Mächtigkeit dieses Reservoirs 200 m, die Porosität 9.51%, Temperatur 135°C, sowie Reservoirdruck 31.5 MPa betragen, dann kann ein Volumen von etwa 1.47*10⁹ m³ Wasserstoff gespeichert werden(Amid et al., 2016). Dies entspricht einer Energievon etwa 4412GWh, was in etwa 24 % der im Jahr 2019 in Baden-Württemberg erzeugten erneuerbaren Energien entspricht.



Abbildung 3: Links: Tiefenlage der Permotriassichen Sandsteine im ORG. In den schraffierten Bereichen liegt ein Barrierepotential vor. Rechts: Mächtigkeit der permotriassichen Sandsteine im ORG, Kontouren in 50m-Schritten. Nach GeORG-Projektteam, 2013.



Abbildung 4: Porosität und Permeabilitätsverteilung von Buntsandsteinproben aus dem ORG

4.1.2. Sandsteine des Unteren Tertiär

Im Älteren Oberrheingraben Tertiär kann aufgrund der vertikal und lateral wechselnden lithologischen Ausbildungen der Komplex der Pechelbronn Formation als Speicher und Barrierekomplex angesehen werden (GeORG-project team. 2013). DieseGesteinsformationen sind im fast gesamten ORG verbreitet (Abb. 6) und erreichen maximale Mächtigkeiten von bis zu 2300 m bei Karlsruhe. Die heutige Tiefenlage reicht von wenigen Metern zu bis zu 4800 m. Je nach Lage innerhalb des ORG und Alter ist die Pechelbronn Formation unterschiedlich ausgeprägt: Die Untere Pechelbronn Formation besteht vorwiegend aus wechselgelagertem Sand und Mergelsteinen, die Mittlere Pechelbronn-Formation besteht aus Tonmergelsteinen, zum Rand der Senkengebiete mit Dolomitsteinen, und die ObererePechelbronn-Formation hat Einschaltungen von fein bis grobkörnigen Sandsteinen in eine Wechsellagerung von dolomitischem Mergelstein und Tonmergelstein. In Subisdenzzentren vorwiegend graue Tonmergelsteine. Die Sandsteinlagen (v.a. Untere und OberePechelbronn Formation) könnten als Speichergestein geeignet sein, allerdings machen diese von der Gesamtmächtigkeit der Formation nur etwa 0,3 bis 1,1 % aus.Porositäten der Einheit schwankt sehr stark zwischen 0,2 und 45,4 %, mit einem Median bei 15.7 % (Abb. 5). Permeabilitäten reichen von 0,01 bis 5000 mD, mit einem Median von 27 mD. Es ist zu beachten, dass bei dem vorhanden Datensatz des GeORG Projektes die Lithofazies nicht mit einbezogen ist, so dass nicht klar ist welche dieser Gesteinsparameter für die Sandsteinlagen gelten. Es ist aber anzunehmen, dass die

Sandsteine aufgrund der Korngrößenverteilung eher am oberen Ende dieser Verteilungen liegen.

Zwar ist Wasserstoffspeicherung in den Sandsteinen des Älteren Tertiärs grundsätzlich möglich, allerdings ist dies sehr von den lokalen Gesteinsparametern, insbesondere dem Vorhandensein mächtiger Sandsteinpackete, abhängig und dies erfordert umfangreiche Vorerkundungsmaßnahmen. Interessanterweise betreibt terranets BW einen Porenspeicher für Erdgas in Tertiären Sandsteinen bei Sandhausen (in der Nähe von Heidelberg). Der Porenspeicher liegt in einer Tiefe von etwa 600 m und hat ein Arbeitsgasvolumen von 30 Mio. m³. Dieses Beispiel zeigt deutlich, dass die Speicherung von Gasen in den tertiären Sedimenten des ORG möglich ist.

Unter der Annahme, dass etwa 1% der geographischen Ausbreitung des Älteren Tertärs (mit Barrierekomplex, schraffierte Fläche in Abbildung 6) für Wasserstoffspeicherung genutzt werden können, und die durchschnittliche Mächtigkeit dieses Reservoirs 10 m, die Porosität 25%, Temperatur 50°C, sowie Reservoirdruck 10 MPa betragen, dann kann ein Volumen von etwa 1.4*10⁸ m³ Wasserstoff gespeichert werden (Amid et al., 2016). Dies entspricht einer Energie von etwa 419 GWh, was in etwa 2 % der im Jahr 2019 in Baden-Württemberg erzeugten erneuerbaren Energien entspricht.



Abbildung 5: Boxplots der PorositätenundPermeabilitäten im Älteren ORG Tertiär. Aus (GeORG-project team, 2013).



Abbildung 6: Verbeitung und Tiefenlage des Speicher- und Barrierekomplexes Älteres (Unteres) ORG Tertiär. In den weißen Flächen befindet sich der Komplex in einer Tiefe von weniger als 800 m, was für eine Wasserstoffspeicherung allerdings keine grundsätzliche Hürde darstellt.

4.2 Salzkavernenspeicher

Im südlichen Oberrheingraben kam es im späten Eozän und frühen Oligozän in Beckenstrukturen wie dem Dannemarie Becken und dem Kalisalzbecken zur Ausfällung von mehrerer 100er Meter mächtigen Steinsalzablagerungen, welche häufig mit Anhydrit, Gips und dolomitischen Mergelsteinen zwischengelagert sind (Hinsken et al., 2007). In einigen dieser Beckenstrukturen kam es während des Neogens zur Ausbildung von Salzdiapiren mit einer Mächtigkeit von bis zu 2000 m (Abb. 7; BRGM, 1977; Hinsken et al., 2007; Lagneau-Herenger, 1965). Diese Diapire kommen für Kavernenspeicherung von Wasserstoff in Frage, aber auch die flach-lagernden Salinar-Formationen können für kleinräumige Kavernen ökonomisch genutzt werden. Als Mindestmächtigkeit der Salzschichten wurde im Rahmen des Projektes InSpEE-DS, welches das Speicherpotential in Salzschichten Nord- und Mitteldeutschlands im Detail untersucht hat 70 m angegeben (InSPEE-DS, 2020).

Berechnung der potentiellen Kavernenvolumina wäre Für eine detaillierte ein hochauflösender seismischer Datensatz sowie ein gutes Verständnis des internen Aufbaues der Diapire notwendig, es liegt aber nur eine 2D Darstellung sowie ein Profil der Salzdiapire aus dem GeORG Projekt vor (Abb. 7 &8; GeORG-project team, 2013). Unter der Annahme, dass die Diapire intern homogen aufgebaut sind und aus Steinsalz bestehen (keine schwächeren Horizonte) kann eine Abschätzung des Kavernenspeicherpotentials durchgeführt werden. Als Basis werden Kavernen mit einem Volumen von etwa 700.000 m³ genutzt, diese haben eine Höhe von 180 m und einen Radius von 25 m. Um die geomechanische Stabilität des Diapirs nicht zu beinträchtigen müssen die Kavernen mindestens einen horizontalen Abstand von zwei Kavernendurchmessern (100 m) zueinander und zu Rand des Diapirs haben (Abb. 9). So können etwa 3200 Kavernen in den Salzdiapiren im ORG platziert werden (Abb.10). Bei einer Berücksichtigung der durch die Diapire verlaufenden Störungen (Abb. 7) würde diese Anzahl deutlich kleiner ausfallen, allerdings könnte die Höhe der Kavernen auf 350 m verdoppelt werden. Insgesamt könnte in Salzkavernen im ORG Wasserstoff mit einer Energie in der Größenordnung von einigen tausend GWh gespeichert werden (Tab. 2).

Höhe (m)	Radius (m)	Volumen (m ³)	Anzahl	Speicherpotential (GWh)
180	25	706.858	3200	6785
350	25	1.374.446	1000	4123

Tabelle 2: Wasserstoffspeicherpotential in Salzkavernen im ORG.



Abbildung 7: West-Ost Profil durch den ORG etwas nördlich von Bad Krozingen (siehe Abb. 8). Die Salzdiapire sind deutlich zu erkennen und erreichen eine Mächtigkeit von mehr als 1.5 km. Aus GeORG-project team (2013).



Abbildung 8: Lage der Salzdiapire im ORG. Die Profillinie kennzeichnet die Lage des Profils in Abbildung 7. Nach GeORG-Project team (2013).



Abbildung 9: Benötigter Salzzylinder für die Errichtung einer Kaverne. Aus (InSPEE-DS, 2020).



Abbildung 10: Kavernenpfeiler für Kavernen mit einem Durchmesser von 50 m in den Salzdiapiren des südlichen ORG.Insgesamt könnten maximal 3200 Kavernen erstellt werden.

5. Empfehlungen

Wie im Kapitel 4 dargelegt ist eine Speicherung von Wasserstoff in geologischen Einheiten des ORG grundsätzlich möglich und die Speicherung von Energie bis zu 11 TWh wäre umsetzbar. Während die Speicherung in Porenspeichern sehr stark von den lokalen geologischen Gegebenheiten abhängt und weiträumige detaillierte (Vor-) Untersuchungen benötigt, kann das Gebiete in welchem Salzkavernenspeicherung möglich ist räumlich gut eingegrenzt werden. Für eine zukünftige geologische Energiespeicherung im ORG wird daher folgende Reihenfolge empfohlen:

- 1. Salzkavernen in den Salzdiapiren des südlichen ORG (Bad Krozinge-Colmar-Wittenheim).
- 2. Salzkavernen in den Salzschichten im südlichen ORG (Wittelsheim-Staffelfelden)
- 3. Porenspeicher in Tertiären Sandsteinen (Randgebiete des ORG, auch im nördlichen OR (siehe existierende Gasspeicher)
- 4. Porenspeicher in den permotriassischen Sandsteinen des ORG

Für eine detaillierte Potentialanlyse der Salzdiapire und Salzschichten im südlichen ORG ist ein hochauflösendes 3D Modell nötig welches auf (neuen) hochauflösenden seismische Daten sowie bestehende Bohrungsdaten erstellt werden sollte. Ein solches Projekt sollte zusammen mit Partnern aus der Industrie (Energiekonzerne/Netzbetrieber, Salzkavernenhersteller (z.B. DEEP.KBB) sowie den entsprechenden geologischen Landesämtern angegangen werden.

Literatur

- Amid, A., Mignard, D., Wilkinson, M., 2016. Seasonal storage of hydrogen in a depleted natural gas reservoir. Int. J. Hydrog. Energy 41, 5549–5558. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.02.036
- Blanco, H., Faaij, A., 2018. A review at the role of storage in energy systems with a focus on Power to Gas and long-term storage. Renew. Sustain. Energy Rev. 81, 1049–1086. https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.07.062
- BRGM, 1977. Carte geologique de la France Neuf-BrisachObersaasheim.
- Deutscher Bundestag, 2019. Gesetz zur Einführung eines Bundes-Klimaschutzgesetzes und zur Änderung weiterer Vorschriften. BundesgesetzblattTeil I 2513.
- European Council, 2014. 2030 Climate and Energy Policy Framework.
- European Parliament, 2020. The European Green Deal European Parliament resolution of 15 January 2020 on the European Green Deal (2019/2956(RSP)).
- GeORG-project team, 2013. Geopotenziale des tieferen Untergrundes im Oberrheingraben, Fachlich-Technischer Abschlussbericht des Interreg-Projekts GeORG, Teil 2: Geologische Ergebnisse und Nutzungsmöglichkeiten. Freiburg i. Br.
- GeORG-Projektteam, 2013. Geopotenzial des tieferen Untergrundes im Oberrheingraben Fachlich-Technischer Abschlussbericht des INTERREG-Projekts GeORG Teil 1: Ziele und Ergebnisse des Projekts (Zusammenfassung). LGRB-Informationen 28, 104.
- Geyer, M., Nitsch, E., Simon, T., Geyer, O.F., Gwinner, M.P., 2011. Geologie von Baden-Württemberg, 5th ed. Schweizerbart'sche, E., Stuttgart.
- Götz, M., Lefebvre, J., Mörs, F., McDaniel Koch, A., Graf, F., Bajohr, S., Reimert, R., Kolb, T., 2016. Renewable Power-to-Gas: A technological and economic review. Renew. Energy 85, 1371–1390. https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.07.066
- Heinemann, N., Alcalde, J., Miocic, J.M., Hangx, S.J.T., Kallmeyer, J., Ostertag-Henning, C., Hassanpouryouzband, A., Thaysen, E.M., Strobel, G.J., Schmidt-Hattenberger, C., Edlmann, K., Wilkinson, M., Bentham, M., Haszeldine, R.S., Carbonell, R., Rudloff, A., 2021. Enabling large-scale hydrogen storage in porous media – the scientific challenges. Energy Environ. Sci. https://doi.org/10.1039/D0EE03536J
- Hinsken, S., Ustaszewski, K., Wetzel, A., 2007. Graben width controlling syn-rift sedimentation: the Palaeogene southern Upper Rhine Graben as an example. Int. J. Earth Sci. 96, 979–1002. https://doi.org/10.1007/s00531-006-0162-y
- InSPEE-DS, 2020. Informationssystem Salz: Planungsgrundlagen, Auswahlkriterien und Potenzialabschätzung für die Errichtung von Salzkavernen zur Speicherung von Erneuerbaren Energien (Wasserstoff und Druckluft) – Doppelsalinare und flach lagernde Salzschichten Teilprojekt Bewertungskriterien und Potenzialabschätzung (No. 03ET6062A). BGR, Hannover.
- Lagneau-Herenger, L., 1965. Géologie du bassinpotassiqued'Alsace. Trav Lab GéolFacSci Grenoble 41, 57–96.
- Mahlia, T.M.I., Saktisahdan, T.J., Jannifar, A., Hasan, M.H., Matseelar, H.S.C., 2014. A review of available methods and development on energy storage; technology update. Renew. Sustain. Energy Rev. 33, 532–545. https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.068
- Panfilov, M., 2010. Underground Storage of Hydrogen: In Situ Self-Organisation and Methane Generation. Transp. Porous Media 85, 841–865. https://doi.org/10.1007/s11242-010-9595-7
- Tarkowski, R., 2019. Underground hydrogen storage: Characteristics and prospects. Renew. Sustain. Energy Rev. 105, 86–94. https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.01.051