



Potenziale der CO₂-Speicherung in Hessen – eine Grundlage zur klimafreundlichen geo- und energietechnischen Nutzung des tiefen Untergrundes



Umwelt und Geologie

**Potenziale der CO₂-Speicherung in Hessen –
eine Grundlage zur klimafreundlichen
geo- und energietechnischen Nutzung des tiefen
Untergrundes**

Wiesbaden, 2009

Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie

Impressum

Umwelt und Geologie

ISSN 1617-4038
ISBN 978-3-89026-355-7

Potenziale der CO₂-Speicherung in Hessen – eine Grundlage zur klimafreundlichen geo- und energietechnischen Nutzung des tiefen Untergrundes

Bearbeitung: Anne Kött, HLOG
Dr. Matthias Kracht, HLOG

Titelbild: Sondenkopf (Foto: Dr. Johann-Gerhard Fritsche)

Layout: Hermann Brenner

Herausgeber:

Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie
Rheingaustraße 186
65203 Wiesbaden

Telefon: 0611 69 390

Telefax: 0611 69 39555

www.hlug.de

Der Herausgeber übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie für die Beachtung privater Rechte Dritter. Nachdruck – auch auszugsweise – nur mit schriftlicher Genehmigung des Herausgebers.

Inhalt

Vorwort	4
1 Einleitung	5
2 CO ₂ -Speicherung	5
3 Vorgehensweise	7
4 Möglichkeiten und Ausschlussgebiete der CO ₂ -Speicherung in Hessen	10
4.1 Ausschlussgebiete	10
4.2 Potenzielle Speicher und Deckschichten	10
4.2.1 Tiefe saline Aquifere	10
4.2.2 Entleerte Erdöl- und Erdgaslagerstätten	21
4.2.3 Kohlenlagerstätten	21
4.2.4 Salzlagerstätten	23
5 Speicherung und konkurrierende Nutzung	25
6 Zusammenfassung der Ergebnisse für Hessen	26
7 Ausblick	28
8 Glossar	29
9 Literatur	31

Vorwort

Im Rahmen des integrierten Klimaschutzprogramms für Hessen (= INKLIM 2012 II plus) des Hessischen Ministeriums für Umwelt, ländlicher Raum und Verbraucherschutz (HMULV) wurde vom Hessischen Landesamt für Umwelt und Geologie (HLUG) die Eignung des Untergrundes zur dauerhaften Einlagerung von CO₂ im Rahmen einer Vorstudie untersucht. Hierbei wurden die verschiedenen Speichermöglichkeiten in Hessen (Speicherung durch künstliche Mineralisierung, in ausgeförderten Erdgas- und Erdölfeldern, Salzstöcken, Kohlenflözen sowie in salinaren Aquiferen) beleuchtet und deren gesteinspezifische Eigenschaften, Tiefenlage, Speichersicherheiten durch überlagernde Deckgesteine und mögliche konkurrierende Nutzungen aufgezeigt.

Die Einlagerung von CO₂ durch Injektion mit Druck ist in natürlich vorhandenen (Kluft- und Porenvolumen) und künstlich geschaffenen Hohlraumvolumen in Gesteinen des tieferen (>800–1000 m) Untergrundes möglich. Die Schichtenverzeichnisse der Bohrungen aus dem Archiv des HLUG lassen Aussagen über die Tiefenlage der für die CO₂-Einlagerung in Frage kommenden Schichten zu. Es wurden insgesamt ca. 1200 Bohrungen gesichtet, von denen nur etwa 500 Bohrungen tiefer als 500 m und knapp 200 tiefer als 800 m sind. Als Ergebnis wurden Karten mit dazugehörigen Tiefenlinienplänen für geologische Einheiten gezeichnet.

In Hessen kann die Speicherung durch künstliche Mineralisierung sowie in Salzstöcken bzw. Kohlenflözen ausgeschlossen werden. In Frage kommen ausgeförderte Erdöl- und Erdgasfelder und salinare Aquifere. Dies wird im Rahmen einer länderübergreifenden, bundesweiten Studie auch für Hessen zu verifizieren sein.

1 Einleitung

Seit Beginn der Industrialisierung ist der Anteil an Treibhausgasen in der Atmosphäre kontinuierlich angestiegen. Diese sind maßgeblich an der globalen Klimaerwärmung beteiligt. Vor allem das bei der Verbrennung fossiler Rohstoffe (vor allem Kohle, Erdöl, Erdgas, Biokraftstoffe) freiwerdende Kohlenstoffdioxid (CO₂) wird mit einem Anteil von ca. 60 % an den Gesamtemissionen für den so genannten Treibhauseffekt verantwortlich gemacht.

Die EU hat sich unter deutscher Ratspräsidentschaft verpflichtet, den Ausstoß von Treibhausgasen bis zum Jahr 2020 um mindestens 20 % unter den Wert von 1990 zu senken (das Kyoto-Protokoll sieht durchschnittlich 5,2 % vor) und den Anteil regenerativer Energien am Gesamtverbrauch auf 20 % zu steigern.

In dem vom Weltklimarat (IPCC=Intergovernmental Panel on Climate Change) herausgegebenen Klimabericht (WG III 2001) wird die Abscheidung des in Kraftwerken entstehenden CO₂ und dessen Speicherung in tieferen geologischen Formationen als eine

Option angegeben, um das CO₂ für möglichst lange Zeiträume der Atmosphäre zu entziehen. Eine Richtlinie, die den Rechtsrahmen für die Speicherung von CO₂ regelt, wurde von der EU-Kommission erarbeitet (Legislative Entscheidung des Europäischen Parlaments vom 17. Dez. 2008 zum Proposal for a directive of the european parliament and of the council on the geological storage of carbon dioxide).

Nach dem geplanten Kernenergieausstieg in Deutschland ist es dringend erforderlich, Technologien zu entwickeln, die den Anforderungen an Umweltverträglichkeit, Nachhaltigkeit, Sicherheit und Wirtschaftlichkeit genügen. Die regenerativen Energien können derzeit den Bedarf noch nicht ausreichend decken. Daher sollen fossile Brennstoffe weiterhin genutzt werden. Für die dabei entstehenden CO₂-Mengen müssen geeignete Abscheidungs- und Speicherungstechnologien (Carbon Dioxide Capture and Storage [CCS]-Prozess) gefunden werden, um den weiteren CO₂-Anstieg in der Atmosphäre zu verringern.

2 CO₂-Speicherung

Unter CO₂-Speicherung oder CO₂-Sequestrierung versteht man die dauerhafte (d.h. möglichst länger als 10 000 Jahre), sichere Endlagerung oder Deponierung von CO₂ unterhalb der Erdoberfläche. Zur Einlagerung von CO₂ werden die natürlich vorhandenen oder künstlich geschaffenen Hohlräume in Gesteinen des tieferen Untergrundes genutzt. Die effektive Nutzung dieses Speicherpotenzials setzt eine hohe Verdichtung des CO₂ (möglichst >600 kg/m³) voraus.

Ab einer bestimmten Tiefe sind in der Regel alle Hohlräume unterhalb der Erdoberfläche wassererfüllt. Die Löslichkeit von CO₂ in Wasser (RADGEN et al. 2005):

- steigt mit steigendem pH-Wert
- steigt mit zunehmendem Druck
- sinkt mit steigender Salinität
- sinkt mit zunehmender Temperatur.

Die für die Injektion des CO₂ erforderlichen Druck- und Temperaturverhältnisse werden, bei einem hydrostatischen Druckgradienten von ca. 10 MPa/km,

i.A. ab Tiefen von 800–1000 m unterhalb der Geländeoberkante erreicht (RADGEN et al. 2005). Der in diesen Tiefen jedoch hohe Anteil an gelösten Ionen (Salinität) im Grundwasser, hohe geothermische Gradienten sowie Verunreinigungen des in den Kraftwerken abgeschiedenen CO₂ können dazu führen, dass eine effektive Einspeisung erst in deutlich größeren Tiefen möglich ist (siehe Abb. 1).

Durch den in Tiefen >800 m herrschenden Druck besitzt das CO₂ etwa die gleiche Dichte wie Salzwasser, wodurch es dieses zusätzlich auch aus den Gesteinskapillaren verdrängen kann (kapillarer Schwellendruck). Liegt nun der geplante Speicherdruck deutlich über dem initialen Lagerstättendruck, besteht die Gefahr, dass langfristig Gas nach oben migrieren kann. Daher muss über dem geplanten Speicher eine impermeable (undurchlässige) Deckschicht mit einem möglichst hohen Mindestspeerdruck liegen. Der maximale und minimale Speicherdruck wird also durch das mechanische Materialverhalten des umgebenden Gesteins bestimmt.

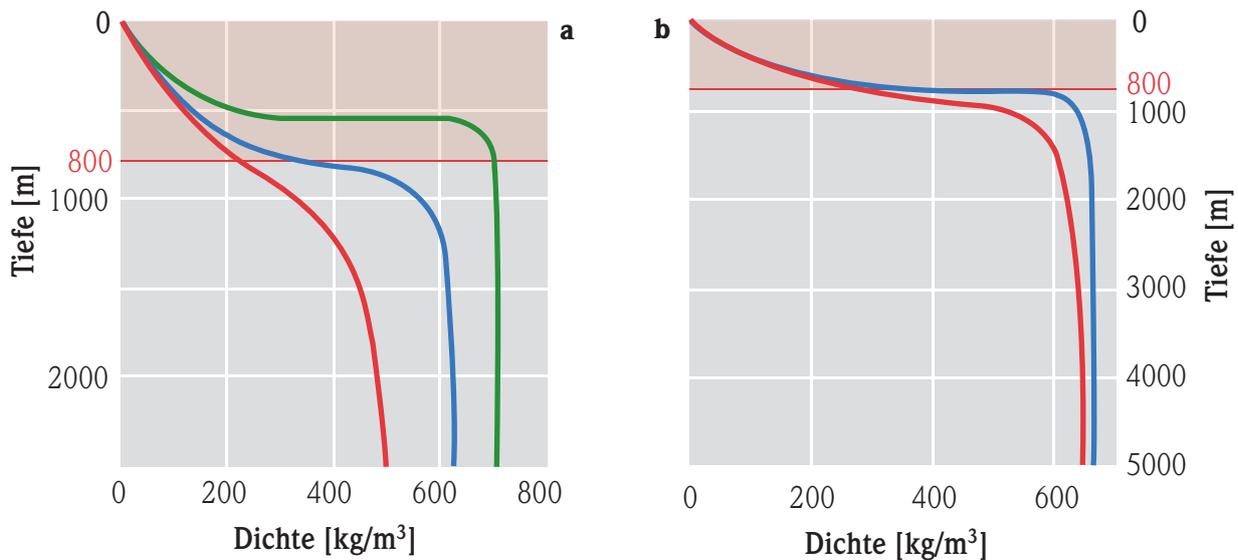


Abb. 1: Abhängigkeit der Dichte des CO₂ von verschiedenen Einflussfaktoren (verändert nach CHADWICK et al. 2007).
 a: CO₂-Dichteverhältnis in Abhängigkeit von der Tiefe bei angenommenem hydrostatischem Druck für durchschnittliche Temperaturgradienten (blau), für erhöhte Temperaturgradienten (45 °C/1000 m, rot) und bei hoch konzentrierten Salzlösungen (grün).
 b: CO₂-Dichteverhältnis bei reinem CO₂ (blau) und verunreinigtem CO₂ (rot) in Abhängigkeit von der Tiefe.

Mit zunehmender Tiefe nimmt aufgrund der Auflast die Porosität der Gesteine ab. Dies ist u. a. abhängig von der Lithologie und dem Durchmesser der Einzelkörner. Eine genaue Vorhersage, wieviel Prozent der Porosität der in Frage kommenden Speichergesteine mit steigender Tiefe verloren geht, ist nicht zu treffen.

Falls Abschätzungen über das Hohlraumvolumen der jeweiligen Gesteine möglich sind, so ist damit noch nicht bekannt, welcher Teil der Kapazitäten auch technisch nutzbar ist. Die volumetrische Speicherkapazität ist daher als Maximalwert anzusehen. Als Speichereffizienz bezeichnet man den Anteil des vom CO₂-erfüllten Volumens am Gesamtporenvolumen des Speichers. Kapazitätsabschätzungen gehen von einer durchschnittlichen Speichereffizienz von 10–20 % aus (Gemeinsamer Bericht des BMWi, BMU und BMBF für die Bundesregierung vom September 2007).

Die Speichereffizienz ist jedoch nicht nur vom Untergrund, sondern auch von Anforderungen an die Nutzung der Strukturen, den gewählten Speicherstrategien sowie der Reinheit des abgeschiedenen CO₂ abhängig (siehe Abb. 1).

Außerdem kann die Mobilisation von Feststoffen durch die aggressiven, kohlen-sauren heißen Lösungen während der Injektion u. a. zu chemischen Reaktionen, Änderung der Permeabilität (gesteins-spezifisch und nicht vorhersehbar), Dichte- und Volumenschwankungen sowie unerwünschtem Entweichen (Leckage) führen.

Grundsätzlich kommen zur Speicherung von CO₂ in Hessen folgende Möglichkeiten in Frage (siehe auch Abb. 2):

- Injektion in tiefe saline Aquifere (Poren-, Kluft- und Karstgrundwasserleiter), also in Gesteinsschichten, die aufgrund ihres Hohlraumvolumens (Porosität) und ihrer Durchlässigkeiten (Permeabilität) die Fähigkeit besitzen, Flüssigkeiten und Gase transportieren und speichern zu können,
- Deponierung in entleerten Erdgas- und Erdölfeldern, die bereits über geologische Zeiträume ihre Speichersicherheit bewiesen haben und meist sehr gut erkundet sind,
- CO₂-Sequestrierung in stillgelegten Kohlengruben und tiefen, nicht abbauwürdigen Kohlenflözen,
- CO₂-Speicherung in Salzkavernen, die sich theoretisch sehr gut als Speicher eignen, da die Salzla-

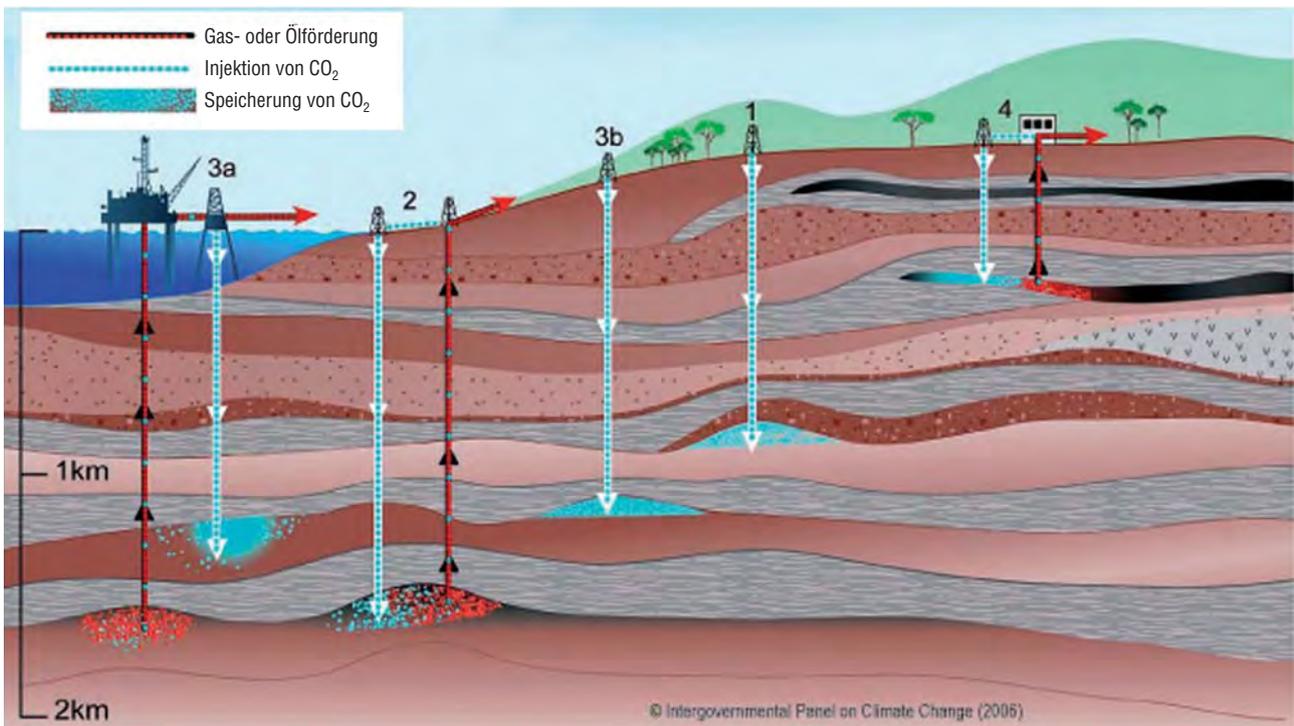


Abb. 2: Überblick über die Möglichkeiten der CO₂-Speicherung.
 1 Einlagerung in erschöpfte Öl- und Gasfelder; 2 verstärkte Ausförderung von Öl- und Gasfeldern;
 3 Salinare Aquifere auf See (a) und an Land (b); 4 Speicherung in Kohlenflözen zur Steigerung der Flözgasausbeute.

gen in der Regel eine weitgehend gas- und flüssigkeitsundurchlässige Barriere bilden und daher sicher gegen jegliches Entweichen von gefährlichen Stoffen erscheinen.

Folgende Speicheroptionen kommen für Hessen nicht Betracht:

- Verfahren der so genannten künstlichen Mineralisierung, bei der das CO₂ durch Mineralumwand-

lung (Karbonatisierung) dauerhaft an die Gesteine gebunden wird. Diese sind noch nicht hinreichend untersucht und bisher weder aus energetischer noch aus wirtschaftlicher Sicht rentabel.

- Die für Hessen nicht in Frage kommende Verbringung von CO₂ in die Ozeane wird aus ökologischen Gründen generell ausgeschlossen (Entwurf der Europäischen Richtlinie über die geologische Speicherung von Kohlendioxid).

3 Vorgehensweise

Bei der Bearbeitung zur Ermittlung der CO₂-Speicherpotenziale in Hessen wurde folgenden Fragestellungen nachgegangen:

- Welche Gesteine können grundsätzlich ausgeschlossen werden (weil sie zu dicht sind und keinen ausreichenden Hohlraum besitzen)?
- Welche Gesteine bzw. Formationen eignen sich aufgrund ihrer lithologischen Eigenschaften als CO₂-Speichergestein (betrifft in erster Linie die

salinaren Aquifere)?

- Welche dieser Gesteine sind in Hessen in einer Tiefe >800 m anzutreffen?
- Gibt es im Hangenden ausreichend mächtige Gesteinseinheiten, die als Deckgestein geeignet sind?
- Welche schon vorher genutzten Hohlräume in >800 m Tiefe gibt es?
- Welche konkurrierende Nutzung besteht neben der CO₂-Speicherung?

Tab. 1: Eigenschaften der Speicher- und Deckschichten
(nach CHADWICK et al. 2007)

Speicher-eigenschaften	geeignet	weniger geeignet
Tiefe [m u. GOK]	1000–2500	<800 und >2500
Mächtigkeit [m]	>50	<20
Porosität [%]	>20	<10

Deckschichteigenschaften		
Laterale Kontinuität	ungestört	gestört, variierend
Mächtigkeit [m]	>100	<20

Als potenzielle CO₂-Speicher können Gesteine ausgeschlossen werden, die kein oder kaum nutzbares Hohlraumvolumen besitzen. Geeignet sind Gesteinseinheiten, die natürliche oder künstliche Hohlräume besitzen bzw. als Speichergestein die Kriterien von Tab. 1 erfüllen. Um eine effektive Einspeisung zu ermöglichen, sollte das Speichergestein (meist grobkörnige Sandsteine und klüftige Kalksteine) eine Porosität von mindestens 10 % und eine Mächtigkeit von mindestens 20 m aufweisen. Leider sind Angaben über Porositäten und Permeabilitäten der jeweiligen Gesteine eher selten.

Um die Speichersicherheit zu gewährleisten, muss jedes Speichergestein von einer mindestens 50 m (MAY, mündl. Mitteilung) mächtigen, impermeablen Deckschicht (Tone, Salze) überlagert sein, unter der sich das CO₂ lateral entlang, aber nicht vertikal (z. B. an Klüften) nach oben bewegen kann. Möglich sind hier auch mehrere abdichtende Schichten, so genannte „multiple Barrieren“.

Die Speicher müssen ausreichend groß und durch Bohrungen in ihrer horizontalen und vertikalen Ausdehnung hinreichend bekannt sein. Aufgrund der geringen Anzahl an Kernbohrungen liegt ein genereller Mangel an verlässlichen Informationen über die geologischen und strukturellen Verhältnisse im tiefen Untergrund vor. Die Schichtenverzeichnisse der Bohrungen aus dem Archiv des HLUg, die in analoger (Bohrkataster) und digitaler Form (GEODIN) vorhanden sind, lassen

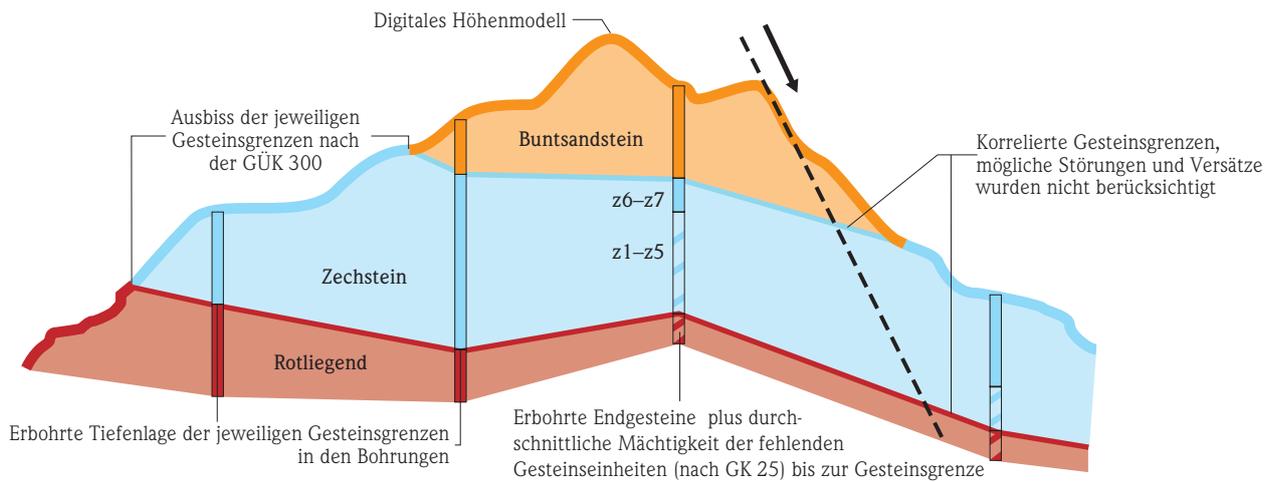
Aussagen über die Tiefenlage der für die CO₂-Einlagerung in Frage kommenden Schichten zu.

Insgesamt wurden ca. 1200 Bohrungen gesichtet, von denen nur etwa 500 Bohrungen tiefer als 500 m (Abb. 3) und knapp 200 tiefer als 800 m sind (die meisten davon im Oberrheingraben). Anhand der in den Bohrungen angetroffenen Höhenlagen der Schichtgrenzen und den Schnittspuren der an der Oberfläche austreichenden Schichtgrenzen mit dem digitalen Höhenmodell wurden Tiefenlinienpläne konstruiert (Abb. 4).



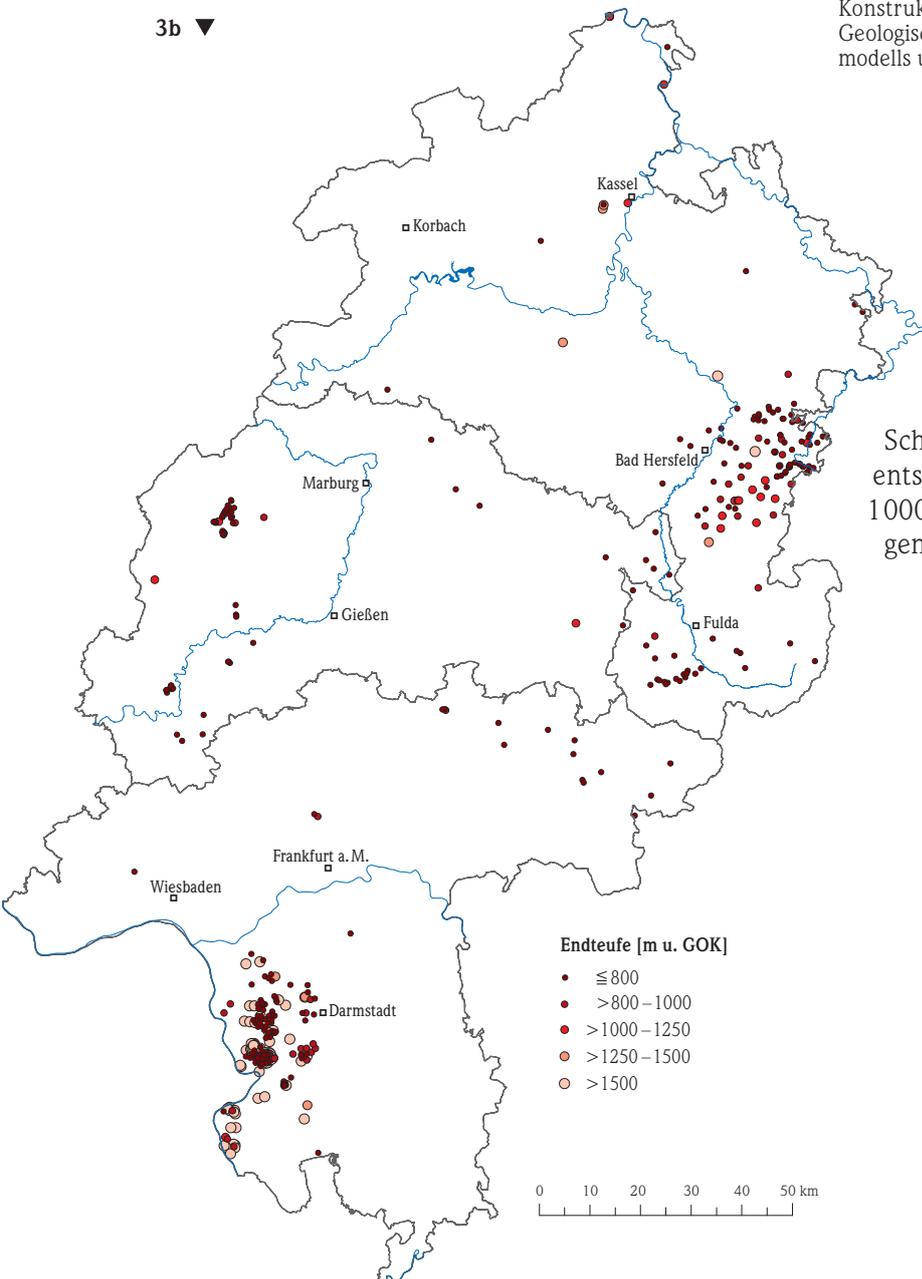
Abb. 3 a und b: Bohrungen aus dem Archiv des HLUg mit einer Teufe >500 m.

Vorgehensweise



▲ **Abb. 4:** Konstruktion der Speichergesteins-Oberflächen mit Hilfe der Geologischen Übersichtskarte 1:300 000, des Digitalen Höhenmodells und der Bohrungen.

3b ▼



Geologische Störungen und dadurch bedingte Versätze der Gesteinsschichten wurden nicht berücksichtigt. Je weniger Bohrungen in einer Region vorhanden sind, desto unsicherer ist die berechnete Schichtoberfläche. Die für die CO₂-Speicherung entscheidende 800-Meter-Tiefenlinie sowie die 1000-Meter-Tiefenlinie sind farbig in den jeweiligen Abbildungen hervorgehoben.

4 Möglichkeiten und Ausschlussgebiete der CO₂-Speicherung in Hessen

4.1 Ausschlussgebiete

Als potenzielle CO₂-Speicher können Gesteine ausgeschlossen werden, die kein oder kaum nutzbares Hohlraumvolumen besitzen. Dazu zählt das kristalline Grundgebirge, das in Odenwald und Spessart zu Tage tritt und aus metamorphen und magmatischen Gesteinen besteht (siehe Abb. 5). Die Ortho- und Paragneise sowie die Glimmerschiefer des Spessarts sind aufgrund ihres hohen Metamorphosegrades, der zu Mineralneubildungen und zur Verheilung bestehender Klüfte führte, genauso wie die kluftarmen Granite, Granodiorite, Diorite und Gabbros des Odenwaldes insgesamt nur schlecht wasserwegsam (UDLUFT et al. 1957, DIEDERICH et al. 1991).

Das Rheinische Schiefergebirge besteht aus gefalteten und geschieferten Gesteinen wie Ton-, Kiesel- und Flaserschiefer, Grauwacken, Sandsteinen und Quarziten. Im Lahn-Dill-Bergland kommen zusätzlich noch Kalksteine und Vulkanite wie Keratophyre, Diabase und Schalsteine vor. Die devonischen und karbonischen Gesteine besitzen i. d. R. kein nutzbares Porenvolumen und sind meist nur schlecht durchlässige Kluftgrundwasserleiter (DIEDERICH et al. 1991). Ausnahmen sind die stark verkarsteten mitteldevonischen Massenkalksteine (z. B. bei Limburg, Wetzlar, Adorf) sowie Gebiete intensiver Zerbrechung durch junge Dehnungsfugen wie z. B. in der Idsteiner Senke und im Limburger Becken (STENGEL-RUTKOWSKI 1967, 1979). Aufgrund der starken Verfaltung und Störung des Schichtverbandes ist eine genaue Vorhersage der Lage und Ausdehnung der jeweiligen Schichten in Tiefen größer 800 m nahezu unmöglich. Die Störungsbahnen und offene Klüfte begünstigen das Entweichen von CO₂ aus dem Untergrund.

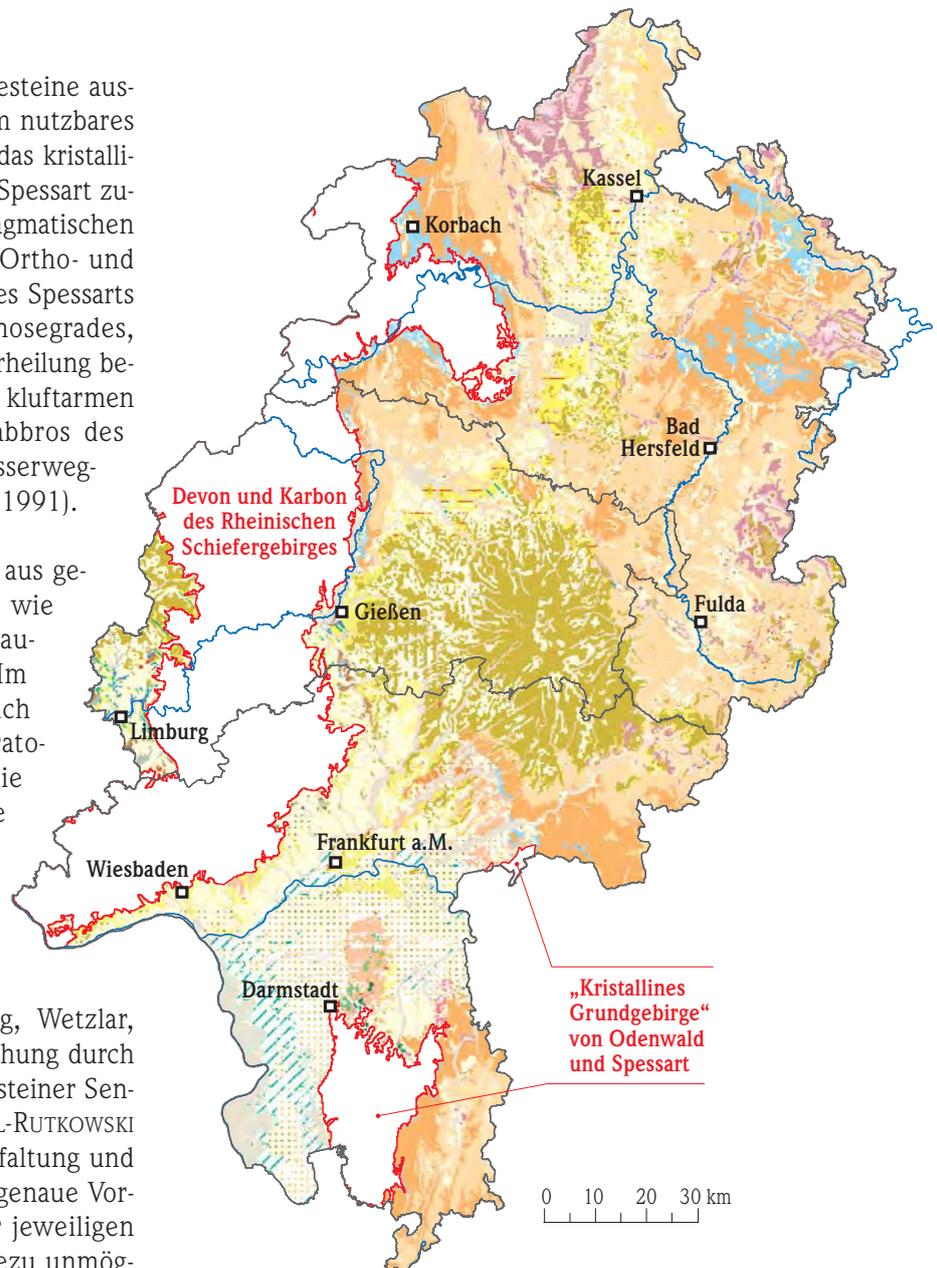


Abb. 5: Geologische Übersichtskarte von Hessen (GÜK 300) mit Ausschlussgebieten für CO₂-Speicherung (weiße Flächen mit roter Umrandung).

4.2 Potenzielle Speicher und Deckschichten

4.2.1 Tiefe saline Aquifere

Aquifere sind poröse Gesteinsschichten im Untergrund, die aufgrund ihrer Porosität und Permeabilität die Fähigkeit besitzen, Flüssigkeiten und Gase

transportieren und speichern zu können. Ab einer bestimmten Tiefe sind in der Regel alle Hohlräume unterhalb der Erdoberfläche wassererfüllt. Je nach Art der Hohlräume unterscheidet man Poren-, Kluft- und Karstgrundwasserleiter, wobei sich v. a. Porengrundwasserleiter für die CO₂-Speicherung eignen.

Rotliegend

Das Rotliegend stellt einen Zeitraum zwischen 299 und etwa 257 Millionen Jahren dar. Neben dem Zechstein ist das Rotliegend eine Epoche des Perm, der auf der geologischen Zeitskala der jüngste Abschnitt des Erdaltertums (Paläozoikum) an der Grenze zum Erdmittelalter (Mesozoikum) ist.

Die tiefsten und ältesten Aquifere in Hessen, die als potenzielle CO₂-Speicher in Frage kommen könnten, sind die Gesteine des Rotliegend. Zu dieser Zeit befand sich zwischen der NE-SW verlaufenden Hunsrück-Oberharz-Schwelle im NW und der parallel dazu verlaufenden Spessart-Rhön-Schwelle im SE (siehe Abb. 7) die Werra-Saale-Senke, in die der Abtragungsschutt in Form klastischer Sedimente transportiert wurde. Im Beckenbereich waren aber bereits ab dem Rotliegend schmale, NW-SE streichende Querswellen (z. B. Baumbach-Schwelle) und -senken vorhanden (KULICK et al. 1984), die den Sedimentationsraum unterteilen.

Zwischen Odenwald und Taunus (MARELL 1989) bis hin zur Wetterau (KOWALCZYK 1983) steht das Rotliegend oberflächlich oder oberflächennah an und kommt daher als potenzielles CO₂-Speichergestein nicht in Frage (siehe Abb. 7, farbige Flächen). Lediglich im Vogelsberg und im Werra-Becken kommt das Rotliegend in einer Tiefe von z. T. mehr als 800 m vor. Die Saar-Werra-Senke enthält im Zentrum von Wetterau und Werra-Becken eine recht eintönige Schichtenfolge aus vorwiegend schlecht sortierten Ton- und Feinsandsteinen mit unterschiedlichen Karbonatgehalten, in höheren Schwellenbereichen sowie am SE-Hang der Hunsrück-Oberharz-Schwelle auch gröbere Sandsteine und Konglomerate. Die gesamte Sedimentabfolge des Rotliegend im Hessischen Becken kann Mächtigkeiten von mehr als

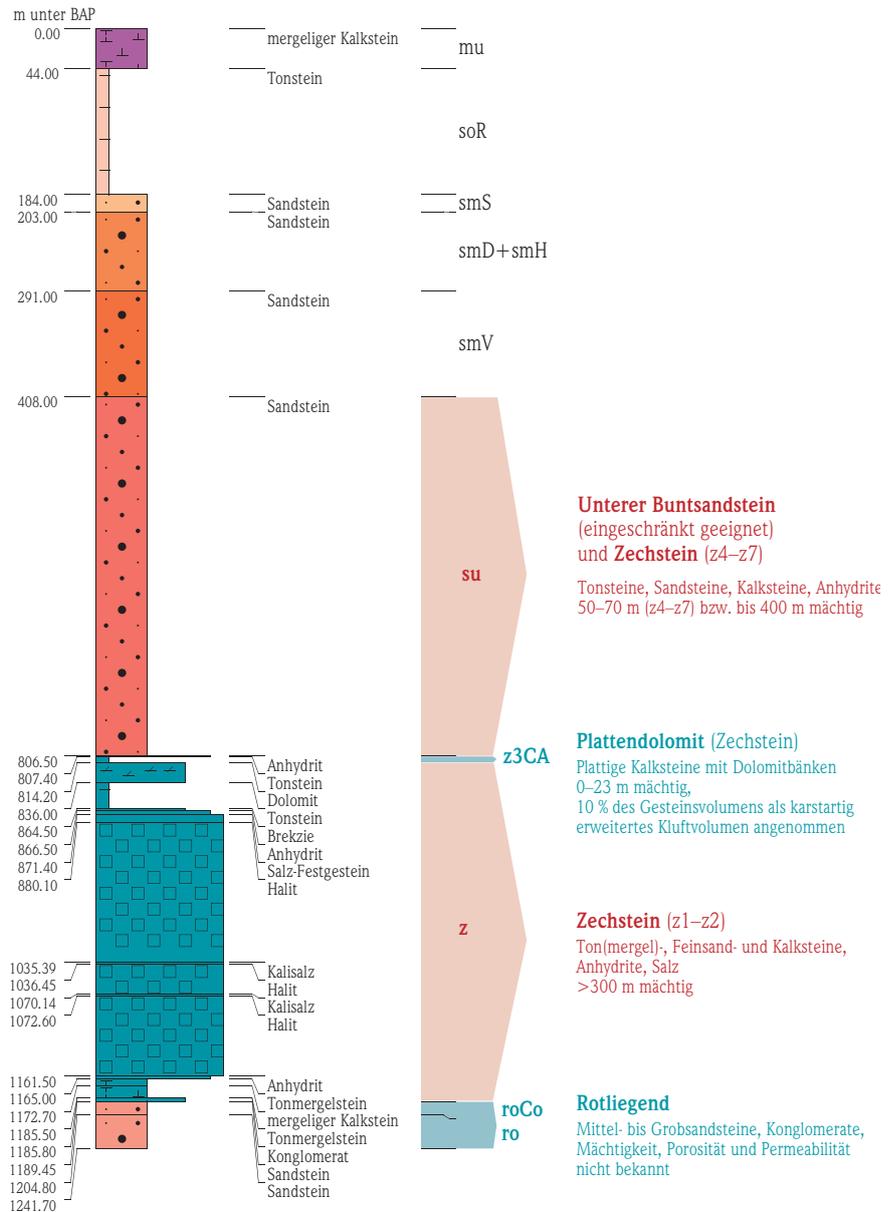


Abb. 6: Bohrprofilssäule der Bohrung Mansbach mit den potenziellen Speicher- (blau) und Deckschichten (rot).

600 m (Bohrung Weißenborn 2) erreichen (nach KOWALCZYK 1983 sogar ca. 1000 m), reduziert sich aber nach NW hin gegen die Hunsrück-Oberharz-Schwelle kontinuierlich (FRITSCHKE et al. 2000). Die konglomeratisch ausgebildeten Mittel- bis Grobsandsteinlagen sowie die Konglomeratlagen besitzen häufig eine tonige, kiesige oder karbonatische Matrix und erreichen Mächtigkeiten von wenigen Dezimetern bis mehreren Metern (MOTZKA & LAEMMLEN 1967, MOTZKA 1968, LAEMMLEN 1975), die lokal aber wiederum auch stark schwanken können.

Die Lithologien der angetroffenen Rotliegend-Gesteine variieren auf kleine Distanzen häufig von Bohrung zu Bohrung (KULICK et al. 1984). Über Porositäten und Permeabilitäten der Gesteine liegen keine Angaben vor, sie dürften aber aufgrund der feinen Körnung und des hohen Matrixgehaltes eher gering sein. Der Versuch einer Salzabwasserversenkung in Gesteine des Rotliegend im Bereich Neuhoef weist auf ungünstige Aufnahmefähigkeiten hin (FRITSCHÉ, mündl. Mittl.). Lediglich die Gesteine mit sandig-kiesiger Matrix (z.B. in der Bohrung Reckrod 2) könnten genügend Porenraum aufweisen, um als CO₂-Speicher in Frage zu kommen. Dies müsste an Bohrproben überprüft werden.

Überlagert werden die Rotliegend-Gesteine von tonig-mergeligen, karbonatischen, sulfatischen und salinaren Sedimenten des Zechstein, die Mächtigkeiten über 300 m erreichen können. Die Gesteine des Zechstein weisen ebenfalls stark wechselnde Gesteinseigenschaften auf (BECKER 2002). So sind z.B. die salinaren Sedimente nur im Werra- und Fulda-Becken anzutreffen und dort auch nicht flächendeckend verbreitet (z.B. im Salzhang und in Auslaugungsgebieten). Daher sind Aussagen über die Eignung des Zechstein als Deckgestein schwierig. In Regionen salinärer Ausprägung könnte sich der Zechstein aufgrund der Fließigenschaften des Salzes recht gut als Deckgestein eignen. Allerdings durchschlagen häufig Klüfte und Basaltgänge, an denen CO₂ leicht aufsteigen kann, die Schichten des Zechstein. Diese haben zur Imprägnierung des Zechstein-Salinars mit CO₂ geführt. Örtlich wurden Salzwasseraufstiege aus dem Rotliegend in das Zechsteinsalinar festgestellt (Fritsche, mündl. Mittl.).

Im Vogelsberg und in der Hohen Rhön reicht die Anzahl der Bohrungen bei weitem nicht aus, um verlässliche Aussagen über einen möglichen Speicher sowie die Deckschichten machen zu können. Die Bohrungen, die bis ins Rotliegend reichen, wurden in dieser Studie über weite Distanzen korreliert. Die tektonischen Gegebenheiten konnten aufgrund überwiegender Unkenntnis der Versatzbeträge und Einfallsrichtungen nicht berücksichtigt werden. Hierzu wäre eine weitere Aufbereitung vorhandener und zukünftiger seismischer Messungen erforderlich. Gerade im Vogelsberg sind zahlreiche Schollen vorhanden (z. B. die Hungenschotten-Tiefscholle), auf denen die jeweiligen Gesteinseinheiten um mehrere Zehner Meter versetzt angetroffen wurden (EHRENBERG & HICKETHIER 1985).

Zechstein

Der Zechstein ist der jüngere Teil des Perm und spiegelt den Zeitraum von ca. 257–251 Mio. Jahren vor heute wieder. Im Zechstein öffnete sich die Saar-Werra-Senke nach Norden hin zum südlichen Perm-Becken. Dabei kam es mehrfach sowohl zu marinen Überflutungen der Hessischen Senke als auch zu Eindampfungen und Ausfällungen von Sulfat- und Salzgesteinen. Die noch im Rotliegend vorhandene Hunsrück-Oberharz-Schwelle war nur noch abgeschwächt vorhanden (KOWALCZYK 1983). Gesteine des Zechstein wurden bis zum Schiefergebirgsrand abgelagert und sind dort als geringmächtige rote Klastika in kleinen intramontanen Becken erhalten geblieben.

Von den Gesteinen des Zechstein weist der zur Leine-Folge (z3) gehörende Plattendolomit (Ca3 bzw. z3d) die größten Wasserwegsamkeiten auf (Deubel 1954). In der Werra-Meißner-Fazies handelt es sich um plattige bis bankige Karbonate, die z.T. grobkavernös und zerbrochen sind. Oft sind sie allerdings auch zu „zuckerkörnigem“ Dolomit umkristallisiert (Becker & Kulick 1999). Möller (1985) unterteilt den Ca3 im Werra-Becken lithostratigraphisch in eine dolomitische Basisfolge und eine fossilführende kalzitische Serie (Ca3), die überlagert werden von pelitisch-karbonatischen Wechselfolgen (Ca3T). Der Plattendolomit ist in der gesamten hessischen Zechsteinsenke bis in deren Randgebiete verbreitet (Abb. 8). Je nach seiner Entstehung in unterschiedlichen Flachwasserbereichen weist er wechselnde Gesteinseigenschaften und Mächtigkeiten zwischen 0–30 m auf (Abb. 6 und 9). Bedingt durch die Subrosion von Salzen und Sulfaten im Liegenden zeigt der Ca3 mehr oder weniger starke Störungen im Schichtverband, Verstellungen bis hin zu Schichtauflösungen.

Der Plattendolomit besitzt aufgrund der meist dichten kristallinen Struktur keine primäre Gesteinsdurchlässigkeit. Durch starke tektonische und salinartektonische Beanspruchung ist er jedoch häufig engständig geklüftet bzw. kleinstückig zerbrochen. Die Fugen erweiterten sich durch den Angriff aggressiver Wässer und ein verzweigtes Netz schlotenartiger Hohlräume entstand, welches das Volumen der primären Trennfugensysteme um ein Mehrfaches übersteigt. Deubel (1954) nimmt bis zu 10 % des Gesteinsvolumens als karstartig erweitertes Kluftvolumen an, wobei die Verkarstung mit größte-

Möglichkeiten und Ausschlussgebiete der CO₂-Speicherung in Hessen

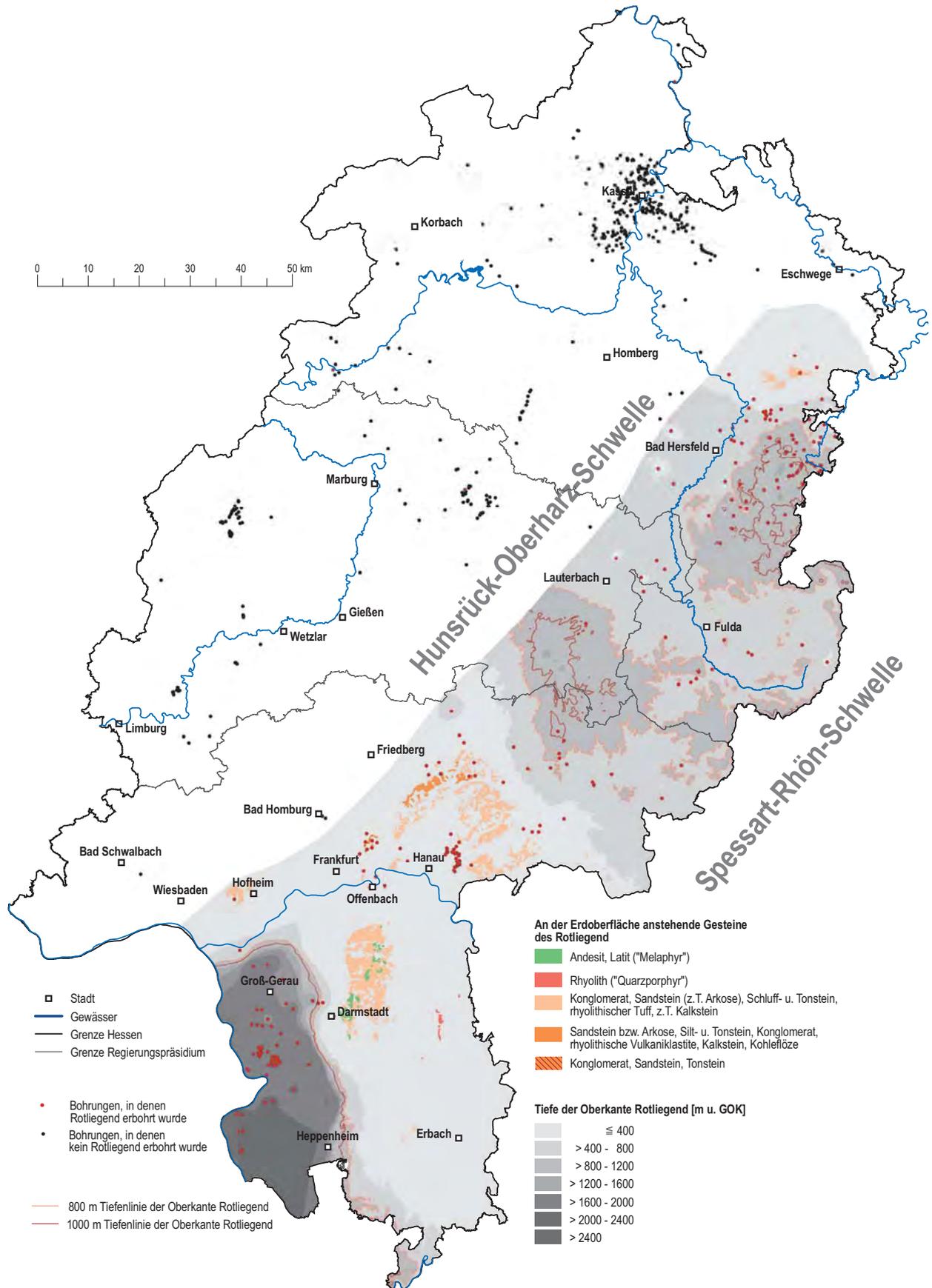


Abb. 7: Verbreitung des potenziellen Rotliegend-Speichers und Tiefenlage der Grenze Rotliegend-Zechstein (in Meter unter Geländeoberkante).

Potenziale der CO₂-Speicherung in Hessen

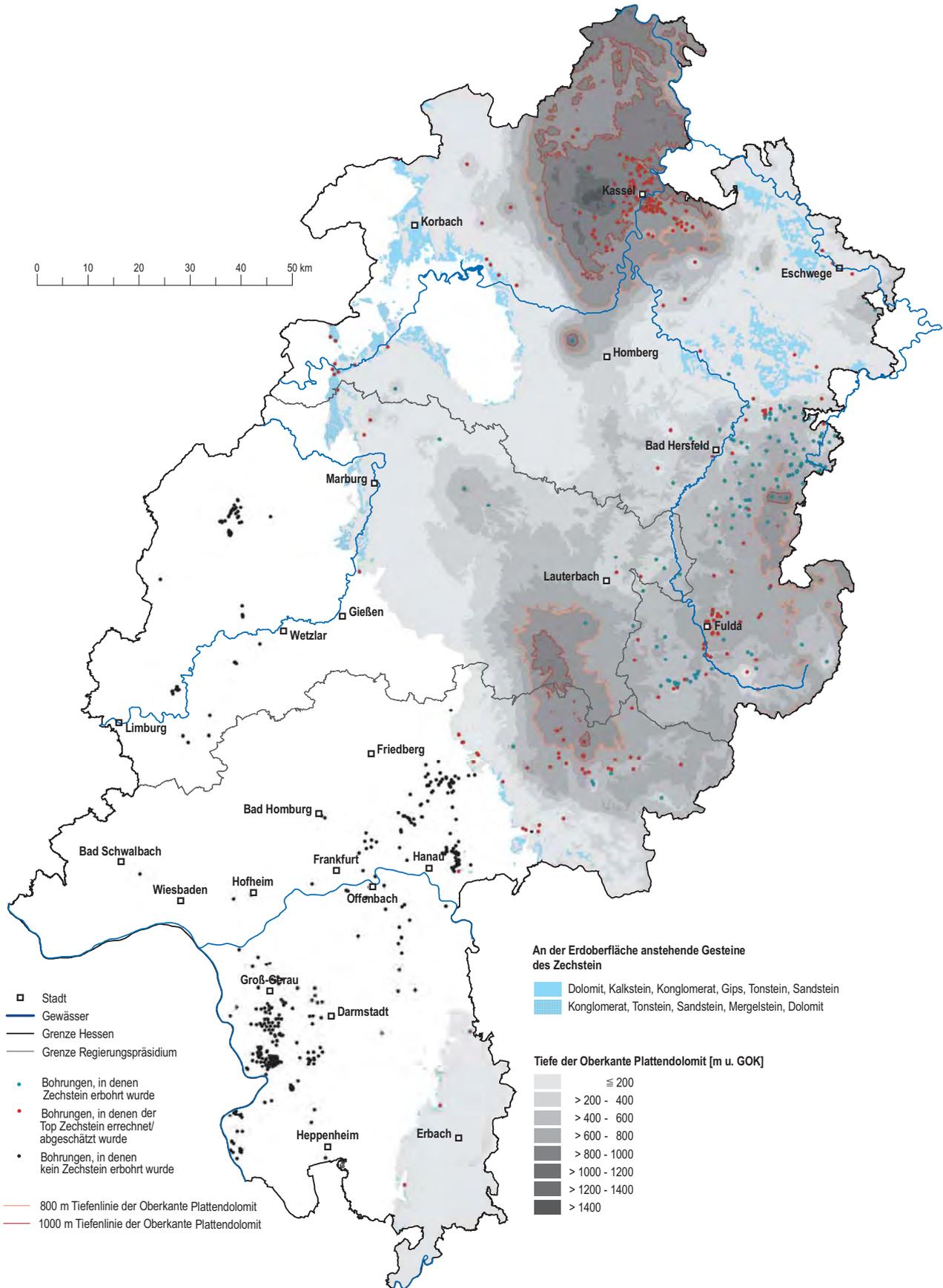


Abb. 8: Verbreitung und Tiefenlage (in Meter unter Geländeoberkante) der Oberkante des potenziellen Speichers Plattendolomit (zCa3).

rer Tiefe abnimmt. Sehr hohe Wasserwegsamkeiten werden in Salzauslaugungsgebieten, besonders am Rand von Subrosionssenkungen und am Salzhang erreicht, wo das Gestein durch die Beanspruchung zerbrochen ist (MOTZKA 1968). Mit Zunahme an tonigen Gesteinen in Richtung Süden nehmen der Hohlraumgehalt und die Wasserwegsamkeiten deutlich ab (DEUBEL 1954, MÖLLER 1985).

Die nötige Tiefenlage des Plattendolomit von >800 m wird im Raum Kassel (in zwei Bohrungen), im Vogelsberg (in einer Bohrung) sowie im Werra-Kali-Gebiet erreicht. Die Lage der 800-m-Tiefenlinie ist ein rein rechnerischer Wert, der aufgrund der wenigen Bohrungen absolut nicht mit der Wirklichkeit übereinstimmen muss (Schollenbau des Vogelsberges!). Aussagen über mögliche CO₂-Speicher sind hier nicht möglich, reichen aber auch nicht zum Ausschluss.

Der überlagernde jüngere Zechstein (z4–z7) könnte sich aufgrund der tonig-schluffig-feinsandigen Ausbildung (KÄDING 2000, HUG 2004) gut als Deckgestein eignen, ist allerdings häufig stark geklüftet. Diffuse Austritte mit erheblichen Salzwasseranteilen in die Werra und in den quartären Grundwasserleitern des Werratal als Folge der Versenkung von Salzabwässern im Plattendolomit zeigen, dass die überlagernden Deckschichten stellenweise (v. a. an Störungen, Basaltgängen, Salzhang, Subrosionssenkungen) sehr durchlässig sind (KoSaAB 1994, SKOWRONEK et al. 1999). Eine konkurrierende Nutzung ist durch die seit 1924/1925 durch-

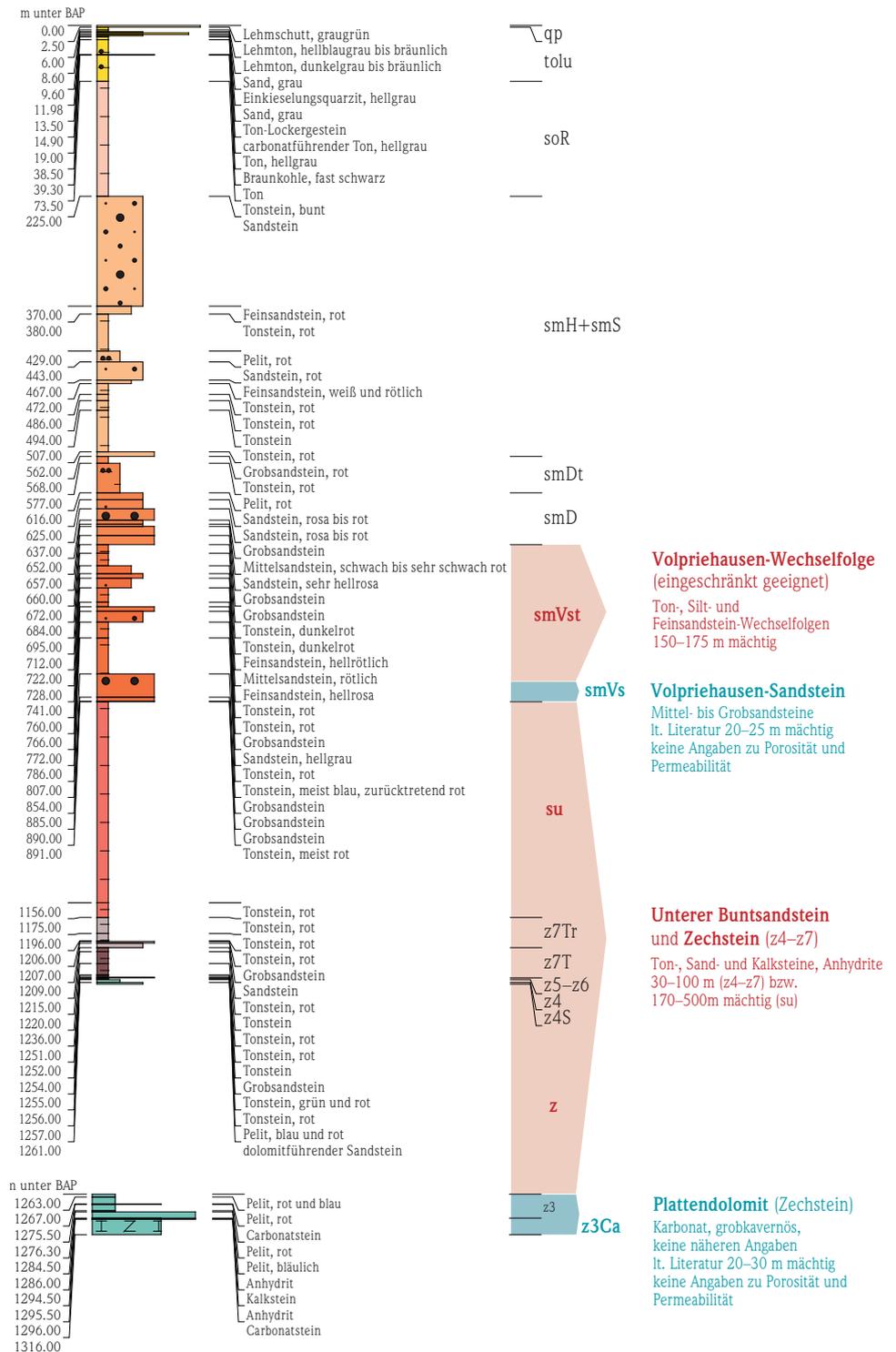


Abb. 9: Bohrprofilsäule der Bohrung Wilhelmshöhe 1 (Kassel) mit den potenziellen Speicher- (blau) und Deckschichten (rot).

geführte Versenkung salinärer Wässer (Salzabwasser aus der Kaliproduktion) im Plattendolomit des Werra-Kali-Gebietes gegeben (KoSaAB 1994, SKOWRONEK et al. 1999).

Potenziale der CO₂-Speicherung in Hessen

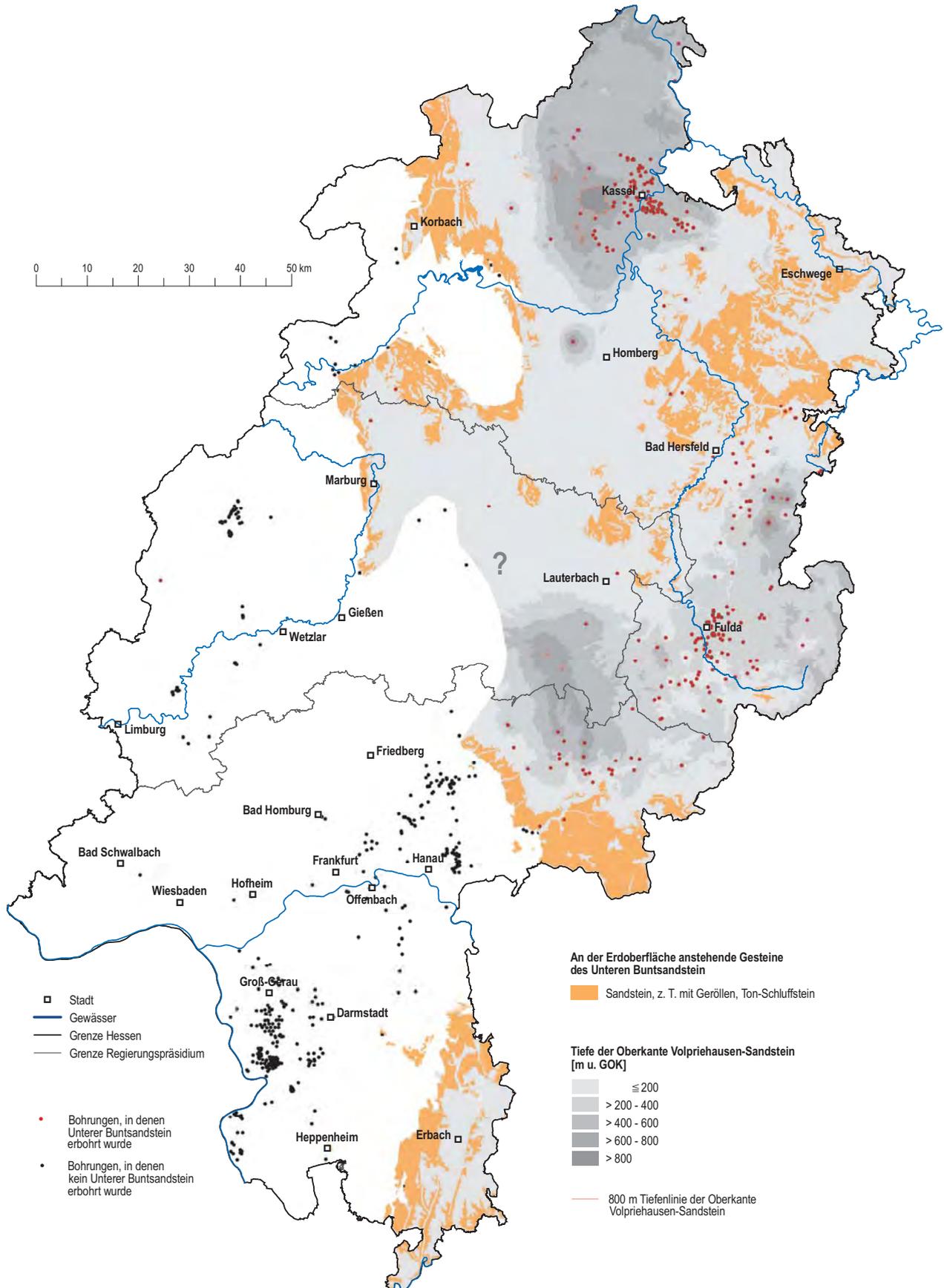


Abb. 10: Verbreitung und Tiefenlage der Oberkante des potenziellen Speichers Volpriehausen-Sandstein (in Meter unter Geländeoberkante).

Buntsandstein

Der Buntsandstein ist die untere lithostratigraphische Einheit der Germanischen Trias, die das Erdmittelalter (Mesozoikum) einleitet. Die Untergrenze ist in der Hessischen Senke mit dem Einsetzen der Calvörde-Folge, im Spessart und Odenwald mit dem Heigenbrücken-Sandstein festgelegt. Nach der stratigraphischen Tabelle von Deutschland entspricht er geochronologisch dem Zeitraum von ca. 251–243 Mio. Jahren vor heute. Er wird in drei Untergruppen gegliedert: Oberer- (Röt-Formation), Mittlerer (Volpriehausen-, Detfurth-, Hardegsen- und Solling-Formation) und Unterer Buntsandstein (Calvörde- und Bernburg-Formation).

Die rhythmische Abfolge von mittel- bis grobkörnigen Sandsteinhorizonten und tonig-schluffig-sandigen Wechselfolgen des Mittleren Buntsandstein stellen mehrere, aber nicht immer scharf getrennte Grundwasserstockwerke dar. Der Volpriehausen-Sandstein, der die Basis des Mittleren Buntsandstein bildet, ist ein Grundwasserleiter, der die nötige Tiefenstufe von >800 m u. GOK nur lokal in zwei Bohrungen im Raum Kassel erreicht (Abb. 9 und 10). Es handelt sich hierbei um ein 20–25 m mächtiges, oft relativ bindemittelarmes und absandendes Grobsandsteinpaket, in dem allerdings nach DÜRBAUM et al. (1969) auch alle Übergänge bis zum dichten Sandstein auftreten können. Angaben über Porositäten und Permeabilitäten liegen nicht vor.

Überdeckt wird er von den 150–175 m mächtigen Ton-, Silt- und Feinsandstein-Folgen der Volpriehausen-Wechselfolge, die aber aufgrund der Klüftung nur eingeschränkt als abdichtende Deckschichten geeignet erscheint. Es liegen keine Angaben über Porositäten und Permeabilitäten sowie die laterale Verbreitung der Speicher und Deckschichten in dieser Tiefe vor.

Rotliegend und Tertiär des Oberrheingrabens

Der Oberrheingraben ist Teil des mitteleuropäischen Grabensystems, welches sich vom Mittelmeer bis in die Nordsee verfolgen lässt. Im hessischen Teil besteht der Untergrund zumeist aus kristallinen und spätpaläozoischen Gesteinseinheiten, die um 2–4 ° nach Süden gekippt liegen (MEIER 1989). Die gra-

benfüllenden tertiären und quartären Sedimente, die eine Gesamtmächtigkeit von knapp 3000 m (2815 m NW Bürstadt) erreichen, überlagern demnach von Norden nach Süden immer jüngere Schichten. Im hessischen Teil wurden jedoch fast nur Rotliegendesteine erbohrt.

Im Oberrheingraben sind die Gesteine des Rotliegend und der tertiären Pechelbronn-Gruppe potenziell zur CO₂-Speicherung geeignet. Die unterhalb der Tertiärbasis angetroffenen Gesteine des Rotliegend (Ton- und Sandsteine, Konglomerate, basische Eruptivgesteine) sind von Bohrung zu Bohrung sehr unterschiedlich ausgebildet (MÜLLER 1996). Genaue Vorhersagen über die Lithologie und Verbreitung und damit die Eignung als potenzielles CO₂-Speichergestein sind daher kaum möglich. Es liegen keine Aussagen über die Wasserwegsamkeiten und nutzbaren Hohlraumgehalte der Rotliegendesteine vor. Die oberflächennah anstehenden Ablagerungen in Odenwald und Wetterau sind Kluftgrundwasserleiter (DIEDERICH et al. 1991), deren Klüfte häufig wieder durch das tonige Bindemittel der Sedimente verschlossen sind. Es ist wahrscheinlich, dass dies auch für die Gebiete gilt, in denen das Rotliegend von tertiären und quartären Porenwasser führenden Sedimenten bedeckt ist.

Mit dem Tertiär begann vor ca. 65 Mio. Jahren der Zeitabschnitt der Erdneuzeit (Känozoikum), die mit dem Quartär seit ca. 2,6 Mio. Jahren bis heute andauert. Das Alttertiär (Paläogen) wird in Paläozän, Eozän und Oligozän und das Jungtertiär (Neogen) in Miozän und Pliozän unterteilt.

Die Pechelbronn-Gruppe stellt sowohl die wichtigsten Muttergesteine als auch Speichergesteine für Erdöl- und Erdgasbildung im engsten Wechsel dar. Daher ist sie auch zur Speicherung von CO₂ geeignet.

Die Unteren Pechelbronn-Schichten bestehen aus mehreren Abfolgen von 3–10 m mächtigen, meist schlecht sortierten Mittel- bis Grobsand- und Konglomeratlagen, die durch feinerklastische Lagen (Ton- bis Siltsteine) getrennt werden (GAUPP & NICKEL 2001, RADTKE & MARTINI 2007). Internbau und Mächtigkeiten (0 bis >150 m) variieren erheblich. Die Mittleren Pechelbronn-Schichten bestehen aus Mergeln, Tonsteinen, Kalkfeinsandsteinen und Quarzsandsteinen, die in Senken eine Mächtigkeit von

mehr als 50 m, auf Schwellen meist nur <5 m erreichen. Die Oberen Pechelbronn-Schichten variieren auf engstem Raum sehr stark. So treten z. B. bei Stockstadt und im Bereich des Kühkopfes kalkige Feinsandsteine, Tonsteine und Mergel in einer Mächtigkeit von 20–46 m, bei Eich bis 135 m mächtige Fein- bis Grobsandsteine und Konglomerate und bei Königsgarten 0–4 m mächtige Feinsedimente mit Kohlenflözchen auf.

Die Mächtigkeiten der Speichersande liegen zwischen 1,5 und 28 m. Sie haben ein durchschnittliches Porenvolumen von ca. 22 % und Durchlässigkeiten von 0–100 mD (Obere Pechelbronnschichten) bzw. 100–1000 mD (Untere Pechelbronnschichten) (FINKENWIRTH 1984). Allerdings ist ein Beweis für laterale Kontinuität einzelner Sandhorizonte weder sedimentologisch noch petrographisch zu erbringen (GAUPP & NICKEL 2001). Zahlreiche NNE–SSW verlaufende Schwellen und Senken (z. B. Kühkopf-Eich-Schwelle, Biebesheim-Wattenheim-Senke) sowie ein Mosaik von Kippschollen sorgen für sehr engraumige Veränderungen in Mächtigkeit und Fazies.

Im Hangenden folgen als mögliche Deckschichten wechselnd mächtige Abfolgen von schiefrigen, bituminösen (Rupelton) und feinsandigen (Meletta-Schichten und Cyrenenmergel) Ton- und Tonmergelsteinen sowie Tonmergel- und Mergelsteinen, die Einlagerungen von fein- bis mittelkörnigen kalkhaltigen Sandsteinen (Bunte Niederrödener Schichten), dolomitischen Kalksteinbänken (Cerithien-Schichten) oder bituminöse Lagen und Salinarfolgen (Corbicula-Schichten) enthalten können. Auch diese Gesteine können lokal als Speichergesteine für Erdöl dienen (z. B. in Landau, ANDRES & SCHAD 1959). Bei den überlagernden Hydrobienschichten dominieren ebenfalls bituminöse, mergelige Tonsteine, Tonmergelsteine und vermehrt dolomitische Kalksteinlagen.

Im untermiozänen „Jungtertiär I“ schalten sich in die Tone und Tonmergel Feinsandlinsen und dünne Braunkohlenlagen, im „Jungtertiär II“ (Obermiozän bis Pliozän) auch kiesige Grobsandlagen ein. Die größeren Horizonte dienen lokal als Erdgasspeicher (Stockstadt, Hähnlein). Zur CO₂-Speicherung in salinaren Aquiferen kommen sie jedoch nicht in Frage, da sie nicht die nötige Tiefenlage erreichen. Die tertiären Sedimente Hessens außerhalb des Oberrheingrabens erreichen nicht die nötige Mächtigkeit und damit auch nicht die nötige Tiefe, um als CO₂-Speicher dienen zu können.

Lithologie, Mächtigkeit und Verbreitung der Gesteine im Oberrheingraben variieren räumlich so stark, dass keine Vorhersagen über Speichermöglichkeiten und -kapazitäten möglich sind. Der Top des Rotliegend liegt z.T. deutlich tiefer als 2500 m unter der Geländeoberkante (im Süden Hessens). Die Tiefe und der erhöhte geothermische Gradient (ca. 6–9 °C/100 m) wirken sich ungünstig auf die Löslichkeit des CO₂ im Wasser aus. Die zahlreichen Tiefbohrungen erschweren die Abdichtung des Deckgesteins. Außerdem besteht aufgrund der aktiven Tektonik infolge der anhaltenden Grabenabsenkung eine erhöhte Gefahr von Erdbeben.

Neben der Nutzung des tieferen Untergrundes als Erdgasspeicher sind auch mehrere Erlaubnisfelder zur Aufsuchung von Erdwärme (z. B. bei Riedstadt) im Planungs- und Erkundungsstadium (FRITSCH & KRACHT 2007). Die oberen Stockwerke des Hessischen Rieds werden intensiv zur Trinkwassergewinnung genutzt.

In Tab. 2 und 3 sind die Eigenschaften der potenziellen Speicher- und Deckschichten der tiefen salinaren Aquifere in Hessen aufgeführt und nach verschiedenen Kriterien bewertet:

Tab. 2: Übersicht und Wertung der potenziellen Speichergesteine in Hessen

Speicher-Eigenschaften

Stratigraphie	Rotliegend		Zechstein: Plattendolomit		Rotliegend und Zechstein: Plattendolomit	Mittl. Bunt- sandstein: Volprie- hausen Sandstein	Tertiär: Untere Pechelbronn Schichten
Region	Hessische Senke	Oberrhein- graben	Raum Kassel	Werra- Kali-Gebiet	Vogelsberg und Rhön	Raum Kassel	Oberrhein- graben
Lithologie	konglomeratische Mittel- bis Grobsandsteine und Konglomerate	mittel- bis grobkörnige Sandsteine und Konglomerate	Karbonat, z.T. zerbrochen, grobkavernös, Lithologie nicht genau bekannt	plattige Kalksteine, einzelne Dolomitbänkchen und Sandflaserschichten	keine Angaben, nur eine Bohrung im zentralen Bereich des Vogelsberges	(Mittel- bis) Grobsandsteine	schlecht sortierte Mittel- bis Grobsand- und Konglomeratlagen
Tiefe [m u. GOK]	800–1140	1400– >2840	800–1300	800–950	>800	max. 815 bzw. 885 (2 Bohrungen) sonst <800	>1200
Mächtigkeit [m]	einzelne Lagen meist <3	850–250, einzelne Zyklen	20–30	9–23	–	20–25	1,5–28, einzelne Zyklen
Porosität [%]	–	oberflächen- nahe Gesteine eher gering	<10	<10	–	–	durchschnittl. 22
Permeabilität [mD]	–	–	–	–	–	–	100–1000
Salinität [mg/l]	–	–	–	>10000	–	–	–
Laterale Kontinuität	Lithologie variiert von Bohrung zu Bohrung	sehr variabel in Lithologie, Teufe, Mächtigkeit und Verbreitung	nicht bekannt (nur zwei Bohrungen)	Übergang nach SW in tonig-mergelige Fazies	nur eine Bohrung, starker Schollenbau	ausreichende Teufe nicht gegeben, nur zwei Bohrungen >800 m, zu geringe Verbreitung	sehr variabel in Lithologie, Teufe, Mächtigkeit und Verbreitung
Weitere Vorgehensweise	Sichtung von Bohrprofilen, Bohrkerne vorhanden?	Sichtung seismischer Profile, Bohrprofile	flächendeckendes Abteufen neuer Bohrungen, Seismik	keine	flächendeckendes Abteufen neuer Bohrungen, Seismik	keine	Sichtung seismischer Profile, Bohrprofile
Nutzung	–	Geothermie	–	Versenkung von Salzabwasser der Kaliindustrie	–	Trinkwasser-Gewinnung	potenzielle Erdöllager

- ungeeignet
- bedingt geeignet bzw. weitere Erkundungen erforderlich
- geeignet (aber weitere Einzelfallbetrachtung erforderlich)
- keine oder unzureichende Angaben

Tab. 3: Übersicht und Wertung der potenziellen Deckgesteine in Hessen

Deckschicht-Eigenschaften

Stratigraphie des Speichers	Rotliegend		Zechstein: Plattendolomit		Rotliegend und Zechstein: Plattendolomit	Mittl. Bunt- sandstein: Volprie- hausen Sandstein	Tertiär: Untere Pechelbronn- Schichten
Region	Hessische Senke	Oberrhein- graben	Raum Kassel	Werra- Kali-Gebiet	Vogelsberg und Rhön	Raum Kassel	Oberrhein- graben
Stratigraphie der Deckschichten	Zechstein	Rotliegend (Tone und Vulkanite), Eozän (Basistone)	Zechstein (z4–z7), Unterer Buntsand- stein	Zechstein (z4–z7)	Tertiär (Vulkanite), Buntsand- stein	Mittlerer Buntsand- stein: Volpriehausen- Wechselfolge	Mittlere Pechelbronn- Schichten (MPS), Rupelton (RT)
Lithologie	(mergelige) Tonsteine, Anhydrite, Salze, Kalksteine, Feinsandsteine	Ton- und Siltsteine, Vulkanite	(mergelige) Tonsteine, Anhydrite, (Fein-)Sand- steine, Kalksteine	(mergelige) Tonsteine, Anhydrite, (Fein-)Sand- steine, Kalksteine	Buntsandstein, Basalt, zwischen- gelagerte, meist vertonte Tuff-Horizonte	Wechselfolge aus Ton-, Silt- und Fein- sandsteinen	Tonsteine, Mergel, Kalk- und Quarz- sandsteine
Mächtigkeit [m]	>300	0– >500	30–100 (z4–z7) bzw. 170–500	50–70	im zentralen Bereich >700	150–175	<5–50 (MPS) bzw. 50–100 (RT)
Porosität [%]	–	–	–	Salzwasser- aufstiege weisen auf Undichtigkeit hin	stark geklüftet	–	–
Laterale Kontinuität	sehr variabel in Lithologie, Teufe, Mächtigkeit und Verbreitung	sehr variabel in Lithologie, Teufe, Mächtigkeit und Verbreitung	–	sehr variabel in Lithologie, Teufe, Mächtigkeit und Verbreitung	einzelne Schollen	vorhanden	sehr variabel in Lithologie, Teufe, Mächtigkeit und Verbreitung
Tektonik	Störungen, Basaltgänge	Horst- und Graben- strukturen, Erdbeben	Graben- strukturen, Störungen, Subrosions- senken	Graben- strukturen, Störungen, Subrosions- senken	stark geklüftet, einzelne Schollen	Graben- strukturen, Störungen, Subrosions- senken	Schwellen und Senken, Mosaik von Kippschollen, Erdbeben
konkurrierende Nutzung	Verpressung salinarer Wasser, Sondermüll- deponien	potenzielle Erdöl- und Erdgaslager	–	–	Trinkwasser- reservoir Rhein-Main	–	potenzielle Erdöl- und Erdgaslager

- ungeeignet
- bedingt geeignet bzw. weitere Erkundungen erforderlich
- geeignet (aber weitere Einzelfallbetrachtung erforderlich)
- keine oder unzureichende Angaben

4.2.2 Entleerte Erdöl- und Erdgaslagerstätten

Ein schon seit Jahrmillionen bewährtes und damit sicheres Speichergestein stellen die Felder von Erdöl- und Erdgaslagerstätten dar. Entleerte Lagerstätten könnten als potenzielle CO₂-Speicher dienen.

Große Vorteile liegen in den schon vorhandenen genauen Kenntnissen über die geologischen Verhältnisse der Speicher- und Deckschichten sowie das Vorhandensein der Infrastruktur (Bohrlöcher, Sondenplätze, Kompressoranlagen, Pipelines). Dadurch verringern sich die Kosten einer möglichen CO₂-Einspeisung erheblich.

Injiziert man CO₂ in die Lagerstätte, so erhöht sich der Lagerstättendruck und die noch vorhandenen Kohlenwasserstoffe können mobilisiert und zusätzlich gefördert werden (CO₂-Enhanced Oil Recovery [CO₂-EOR] bzw. CO₂-Enhanced Gas Recovery [CO₂-EGR]). Dadurch verlängert sich die wirtschaftliche Lebensdauer der Lagerstätten. Diese Verfahren werden schon seit 1972 in den USA praktiziert (REICHEL et al. 1999). Auf diesem Gebiet liegen also schon große Erfahrungen vor. Außerdem könnte der ursprüngliche Lagerstättendruck im Speicher wieder aufgebaut und somit die Stabilität in den Speicher- und Deckschichten wiederhergestellt werden. Das setzt voraus, dass die vielen alten Bohr- und Förderlöcher abgedichtet sind und die Deckschichten nicht zerstört wurden, so dass keine unkontrollierbaren Aufstiegswege vorliegen.

Nach GERLING & MAY (2001) kommen die deutschen Erdöl- und Erdgasfelder als potenzielle CO₂-Speicher kaum in Frage, da sie zu geringe Speicherkapazitäten aufweisen und meist in zu geringer Tiefe liegen. Einige wenige norddeutsche Gaslagerstätten besitzen genügend Speichervolumen. Die hessischen Kohlenwasserstofffelder liegen im Oberrheingraben, der die aktivste hessische Erdbebenregion ist. Es gibt mehrere Erdölvorkommen in den tertiären Pechelbronn- bis Hydrobienschichten (z. B. bei Stockstadt, Wattenheim, Rot, Dudenhofen, Huttenheim, Minfeld), meist in Tiefen zwischen 2300 und 2500 m unter der Geländeoberkante. Aufgrund der unregelmäßigen Ausbildungen der Speichergesteine sowie der engen räumlichen Begrenzung durch zahlreiche Störungen handelt es sich

um sehr kleine Felder.

In der Schichtenfolge von den Hydrobienschichten bis zum Pliozän existieren mehrere Erdgas-Speichergesteine. Gasfelder gibt es bei Eich, Stockstadt, Pfungstadt, Wolfskehlen, Groß-Gerau, Dornheim, Büttelborn und Darmstadt. Meist liegen hier Schichtaufwölbungen vor, die durch zahlreiche Brüche begrenzt sind (z. B. bei Pfungstadt). Die größten Erdgaslager (Hähnlein und Stockstadt) befinden sich in einer Tiefe von 450–500 m unter der Geländeoberkante und werden als Untertage-Gasspeicher genutzt, um im Bedarfsfall auf Erdgasvorräte zurückgreifen zu können.

4.2.3 Kohlenlagerstätten

Eine weitere Möglichkeit der CO₂-Sequestrierung bieten stillgelegte Kohlengruben und tiefe, nicht abbauwürdige Kohlenflöze. Da die großen CO₂-Emitenten wie kohlenbefeuerte Kraftwerke und Stahlwerke oftmals in Nähe von Kohlenlagerstätten liegen, sind die entstehenden Transportkosten als eher niedrig anzusehen. Allerdings sind die ehemaligen Kraftwerke in Kassel, Eschwege, Borken und Wölfersheim zwischenzeitlich stillgelegt.

Die Speicherung in Schächten und Stollen nach deren Stilllegung setzt voraus, dass die Hohlräume hochdruckresistent abgedichtet sind, so dass das CO₂ nicht entweichen kann. In Untersuchungen im Rahmen des europäischen GESTCO-Projektes (European Potential for Geological Storage of CO₂ from Fossil Fuel Combustion) wird in Deutschland von der Speicherung in Kohlenbergwerken abgeraten, weil keine Gewährleistung besteht, dass es keine Verbindung zu anderen Bergwerken und zur Erdoberfläche gibt. Die genaue Lage vieler historischer Stollen ist nicht mehr bekannt, so dass hier eine Sicherheit nicht gegeben ist. Außerdem steigt durch die Injektion von CO₂ der Druck innerhalb der Hohlräume, was zum Absinken und Nachbrechen der überlagerten Gesteine sowie zu Wassereinbrüchen und somit zur Verdrängung und zum Entweichen des Gases an die Erdoberfläche führen könnte.

Die Lösung des CO₂ im Grubenwasser gefluteter Stollen setzt aufgrund der physikalischen und chemischen Eigenschaften des CO₂ größere Tiefen voraus. Allerdings beträgt das Speicherpotenzial im

Potenziale der CO₂-Speicherung in Hessen

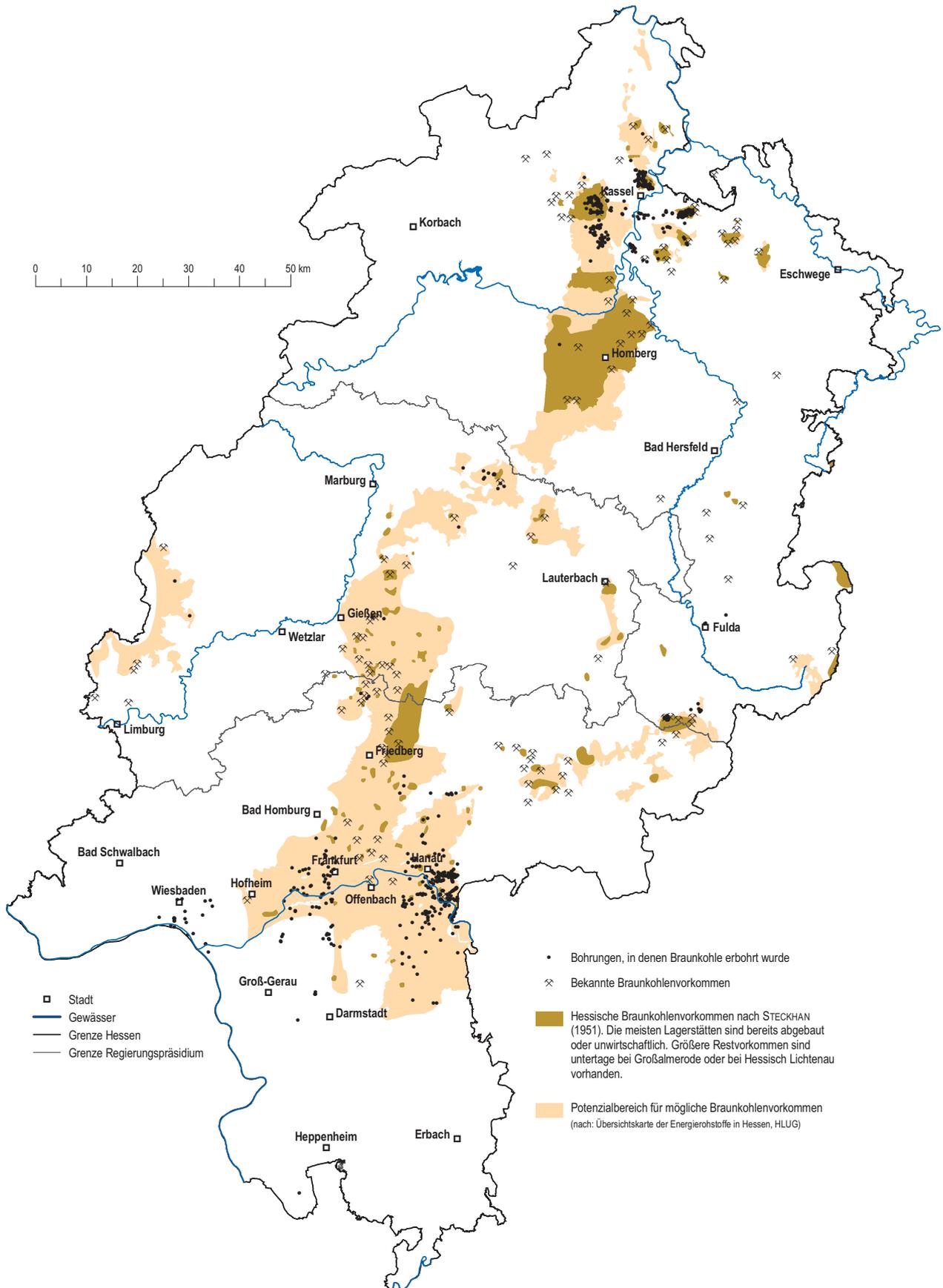


Abb. 11: Braunkohlenvorkommen in Hessen.

Grubenwasser nur 10 % dessen, was man in nichtgefluteten Hohlräumen speichern könnte. Klären müsste man auch die Herkunft des Wassers sowie die Wegsamkeiten durch das Deckgebirge. Alles in allem scheint diese Methode nach heutigem Stand der Forschung wenig vielversprechend zu sein.

Die dritte Möglichkeit ist die Adsorption des CO₂ an nicht abbaubaren Kohlenlagerstätten. Kohle besteht sowohl aus organischen als auch aus mineralischen Bestandteilen und weist je nach Inkohlungsgrad Porositäten zwischen 1,6 und 20 % auf (HARRIS et al. 2004). Durch schwache Wechselwirkung zwischen den Molekülen (van der Waals-Kräfte) kann CO₂ an die Oberfläche der Kohlenmatrix adsorbiert werden. Die Adsorptionskapazität ist sowohl abhängig von den Kohleneigenschaften selbst, die innerhalb eines Flözes stark variieren können, als auch von äußeren Faktoren wie Temperatur, Druck und Feuchtegrad. Die Vorgänge hierbei sind sehr komplex, es besteht noch ein großer Forschungsbedarf.

Ein Nachteil all dieser Methoden ist, dass die momentan aus technischen Gründen noch nicht abbaubaren Kohlenflöze auch in Zukunft nicht mehr zur Kohlegewinnung nutzbar gemacht werden können, da sonst das CO₂ wieder freigesetzt werden würde.

Steinkohle kommt in Hessen nicht vor. Braunkohle ist in den eozänen, oligozänen, miozänen und pliozänen Ablagerungen der Hessischen Tertiärsenke zu finden (STECKHAN 1952, CHRISTOPHER 1993). So unterschiedlich wie das Alter sind auch die Mächtigkeiten der jeweiligen Flöze sowie deren Einschaltungen und Zwischenmittel. Starke tektonische Beanspruchungen führen zu Versätzen und häufigen Wasserzutritten, so dass eine laterale Kontinuität der Flöze häufig nicht gegeben ist. Die in Hessen vorkommenden Braunkohlenflöze und -gruben (Abb. 11) befinden sich alle in zu geringer Tiefe und sind in der Regel zu gering mächtig (<5 m), so dass keine effektive Speicherung von dichtem CO₂ möglich ist. Die Deckschichten sind nicht mächtig genug, um sicher abzudichten.

4.2.4 Salzlagerstätten

Kavernenspeicher werden im Allgemeinen in

Deutschland in Salzstrukturen (Salzstöcken) errichtet, welche nur im Norddeutschen Becken in ausreichenden Mächtigkeiten und Kapazitäten vorkommen (SEDLACEK et al. 1994). Im osthessischen Reckrod existieren jedoch drei Kavernenspeicher im ansonsten sählig gelagerten Werra-Steinsalz (Zechstein), das hier durch Auffaltungen erhöhte Mächtigkeiten aufweist. Salzbergwerke eignen sich sehr gut als Speicher für CO₂-Versenkung, da die Salzlagen in der Regel eine sehr dichte Barriere bilden und daher sehr sicher gegen jegliches Entweichen von gefährlichen Stoffen sind. Jedoch begründet sich hierauf der Nutzungskonflikt mit der Untertage-Deponierung von besonders überwachungsbedürftigen Abfällen aus Verbrennungsanlagen sowie der metallverarbeitenden und chemischen Industrie (z. B. Herfa-Neurode).

Das hessische Kalirevier erstreckt sich von Heringen im Norden bis nach Neuhaus im Süden (unterbrochen vom Fuldaer Graben) sowie von Bad Hersfeld im Westen bis an die hessisch-thüringische Grenze und weiter bis Bad Salzungen. Abgebaut werden die 2–3 m mächtigen Flöze Hessen und Thüringen in Tiefen zwischen 400 und 1500 m. Die häufig zu beobachtenden Mächtigkeitsschwankungen der ohnehin nur lokal verbreiteten Zechstein-Salinare sind auf die Eigenschaft zurückzuführen, dass Salzminerale unter hohem Druck sehr weit in horizontaler und vertikaler Richtung fließen können. Dadurch kommt es zur Verfaltung und Schichtverdopplung mancher Schichten sowie durch die Einwirkung von Grundwasser zur Ausbildung einer geneigten Ablauungsfläche, dem Salzhang (LAEMMLEN 1975).

In Reckrod, Landkreis Fulda, wurden 3 künstliche Hohlräume in 800–1500 m innerhalb des Werra-Salinars durch Einspeisung von Flusswasser geschaffen (FRITSCHKE 2000). Aufgrund des heterogenen Aufbaus des Salinars mit eingelagerten Kaliflößen und Schichtverstellungen konnten die ersten zwei Kavernen nicht vollständig und regelmäßig ausgesolt werden, so dass Ende 2000 eine dritte Kavernenbohrung abgeteuft wurde, um das angestrebte Volumen von 1 000 000 m³ zu erlangen. Die Kavernen dienen der Einlagerung und Bedarfssicherung von Erdgas.

Die sich im Hangenden anschließenden Gesteine des jüngeren Zechstein und Buntsandstein variieren sehr stark in Lithologie, Verbreitung und Mächtigkeit, so dass die Schutzfunktion nicht generell ge-

währleistet werden kann, sondern im Einzelfall gesondert überprüft werden muss. Besonders das Vorhandensein von Störungen und Basaltgängen begünstigen das Entweichen von Gasen. Im Bereich Reckrod wurde zwischen einer Kavernenbohrung und einer bereits fertig gestellten Kaverne eine Durchlässigkeit innerhalb des Werra-Salinars registriert, was zu einer Änderung in der Kavernenkonzeption führte (FRITSCHKE, mündl. Mittlg.).

Ein Problem beim Abbau der Kalisalze ist die Entsorgung der anfallenden Abwässer. Seit 1928 wird ein

Teil in den Plattendolomit versenkt (s. d.), ein Teil wird abflussabhängig in den Vorfluter eingeleitet (KoSaAB 1994; SKOWRONEK et al. 1999).

Die Salzkavernen in Hessen liegen in weiten Bereichen nicht in für die CO₂-Speicherung ausreichender Tiefe vor. Die Ausdehnung und Kapazitäten der Hohlräume sind meist sehr gering. Eine Speichersicherheit kann aufgrund der lithologisch stark variierenden Deckschichten und dem möglichen Auftreten von Störungen und Basaltgängen nicht generell gewährleistet werden.

5 Speicherung und konkurrierende Nutzung

Die Speichereigenschaften sowie die geologische Sicherheit der CO₂-Speicherung sind von Gegebenheiten des Untergrundes und daher von nicht berechenbaren Faktoren abhängig. Die möglichst genaue Kenntnis des geologischen Aufbaues ist daher unerlässlich. Die Speicherkapazität der Gesteine ist bei rasch wechselnden lithologischen und faziellen Verhältnissen schwer zu bestimmen. In seltenen Fällen liegen Angaben über Porosität und Permeabilität der Gesteine im tieferen Untergrund vor. Hydrogeologische Kartierungen und Untersuchungen zu Durchlässigkeiten (z. B. SCHAFT & RAMBOW 1984, PRINZ & HOLTZ 1989) geben Hinweise auf die nutzbaren Hohlräume der Einheiten sowie die Lage der Grundwasserleiter.

Um ein Gefühl für das Speichervermögen zu bekommen, wird immer von einem Bedarf eines „kleinen“ 500 MW-Kohlekraftwerks mit 10000 t pro Tag CO₂ (IPCC-Report) ausgegangen. So wurde beispielhaft (Plattendolomit im Werra-Kali-Revier) für die salinaren Aquifere ein maximales Speichervermögen von 12 420 000 t CO₂ berechnet, welches in nicht einmal vier Jahren erschöpft wäre.

Bei einer Vielzahl von Nutzungen spielt der tieferen geologische Untergrund eine entscheidende Rolle. Hierzu gehören die folgenden Nutzungen, die mit der CO₂-Speicherung in Konkurrenz stehen.

- Förderung von Erdöl und Erdgas
- Untergrundspeicherung von Erdgas
- Untergrundspeicherung von Druckluft
- Versenkung und Speicherung von Fluiden (z. B. Salzabwasser aus der Kaliindustrie)
- Gewinnung des Erdwärmepotenzials für Heizung und Stromerzeugung
- Wärmespeicherung
- Nutzung von Thermal- und Mineralwässern
- Untertagedeponien
- Bergbau

Die verschiedenen Nutzungen des tiefen Untergrundes finden in unterschiedlichen Stockwerken statt. Allerdings ist dabei eine Verzahnung nicht auszuschließen (siehe Abb. 12). Da verschiedene rechtliche Bereiche angesprochen werden, muss es zu einer Abwägung kommen, welche der konkurrierenden Nutzungen den Vorrang bekommen.

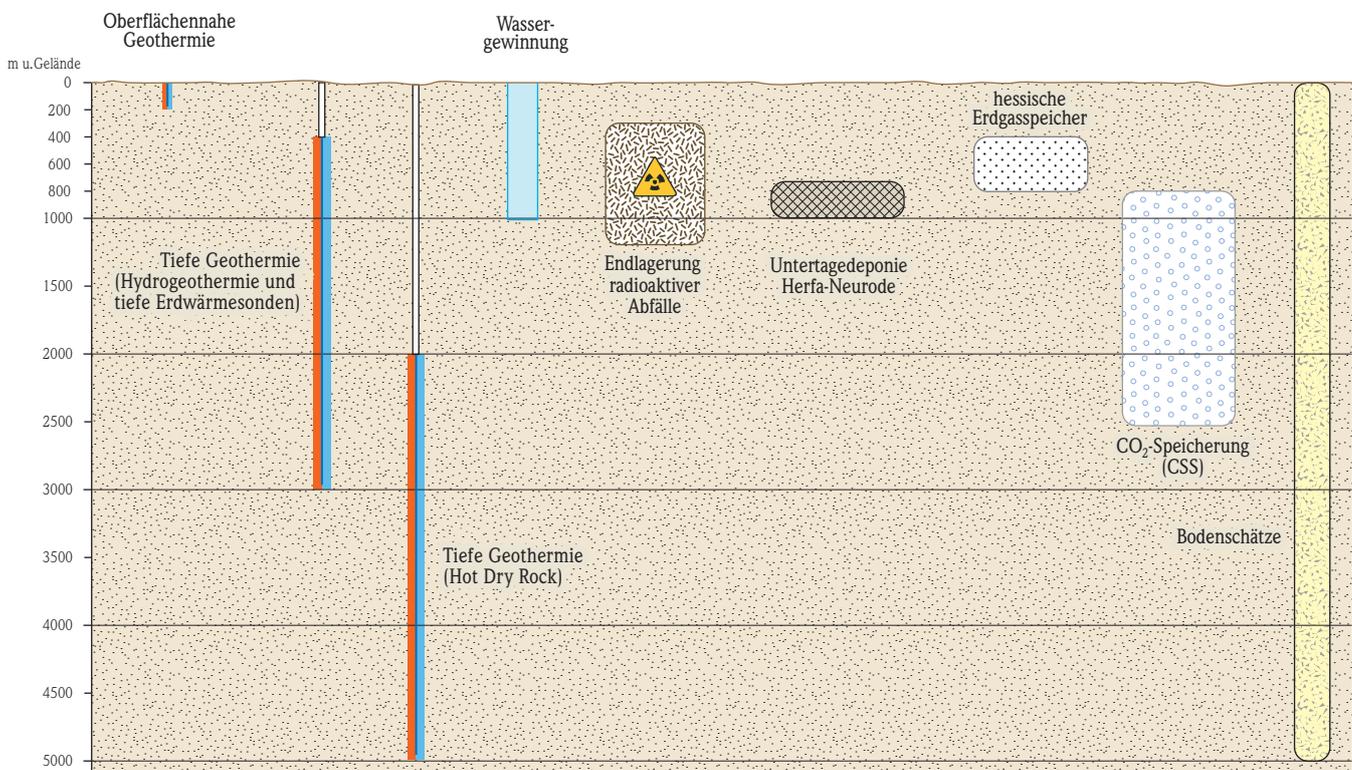


Abb. 12: Verschiedene Teufen zur Nutzung des tiefen Untergrundes.

6 Zusammenfassung der Ergebnisse für Hessen

Gebiete, die sich nicht für die Speicherung von CO₂ eignen (Ausschlussgebiete), sind aufgrund der Gesteinseigenschaften (z. B. fehlendem Hohlraumvolumen) und Strukturgeologie gut belegt. Dies trifft v. a. für das kristalline Grundgebirge des Odenwald und Spessart sowie die gefalteten und geschieferten Gesteine des Rheinischen Schiefergebirges zu.

Folgende Speicheroptionen kommen für Hessen nicht Betracht:

Verfahren der so genannten **künstlichen Mineralisierung** sind noch nicht hinreichend untersucht und bisher weder aus energetischer noch aus wirtschaftlicher Sicht rentabel.

Die für Hessen nicht in Frage kommende Verbringung von CO₂ in die **Ozeane** wird von der Bundesregierung aus ökologischen Gründen generell ausgeschlossen.

Künstlich geschaffene Hohlräume in **Salzlagerstätten** oder aufgegebenen **Kohlenbergwerken** werden vor allem aus Kapazitäts- und Sicherheitsgründen nicht für die Speicherung von CO₂ in Erwägung gezogen. In Hessen befinden sich die Lagerstätten in weiten Bereichen nicht in ausreichender Tiefe und besitzen keine ausreichend mächtigen und sicheren Deckschichten. Lediglich bei Fulda existieren drei potenziell geeignete Salzkavernenspeicher, die allerdings zur Erdgasspeicherung genutzt werden.

In Hessen bestehen kurz- und mittelfristig nutzbare Möglichkeiten zur Speicherung von CO₂ in erschöpften Erdöl- und Erdgaslagerstätten und in salinaren Aquifere.

Die Lagerstättenverhältnisse und das Speicherpotenzial der **Erdöl- und Erdgasfelder** im Oberrheingraben sind in der Regel sehr gut dokumentiert. Leider weisen die Erdgasfelder nur sehr geringe Kapazitäten auf und werden z.T. als Gasspeicher genutzt. Auch die Kapazitäten der Erdölfelder im Oberrheingraben sind im Vergleich zu den norddeutschen Feldern sehr gering. Hier ist jedoch immer eine Einzelfallbetrachtung notwendig.

Die Speicherkapazität der **salinaren Aquifere** in mehr als 800 m Tiefe lässt sich aufgrund der ungenügenden Anzahl der Bohrungen nur schwer bestimmen. Hier wird nochmals auf die Tab. 2 und 3 hingewiesen, in denen die einzelnen geologischen Einheiten bewertet werden. Starke Fazies- und Mächtigkeitsschwankungen sind die Regel. Angaben über Permeabilitäten und Porositäten liegen in den wenigsten Fällen vor. Folgende hessische Gebiete wurden im Hinblick auf ihre potenziellen CO₂-Spei-

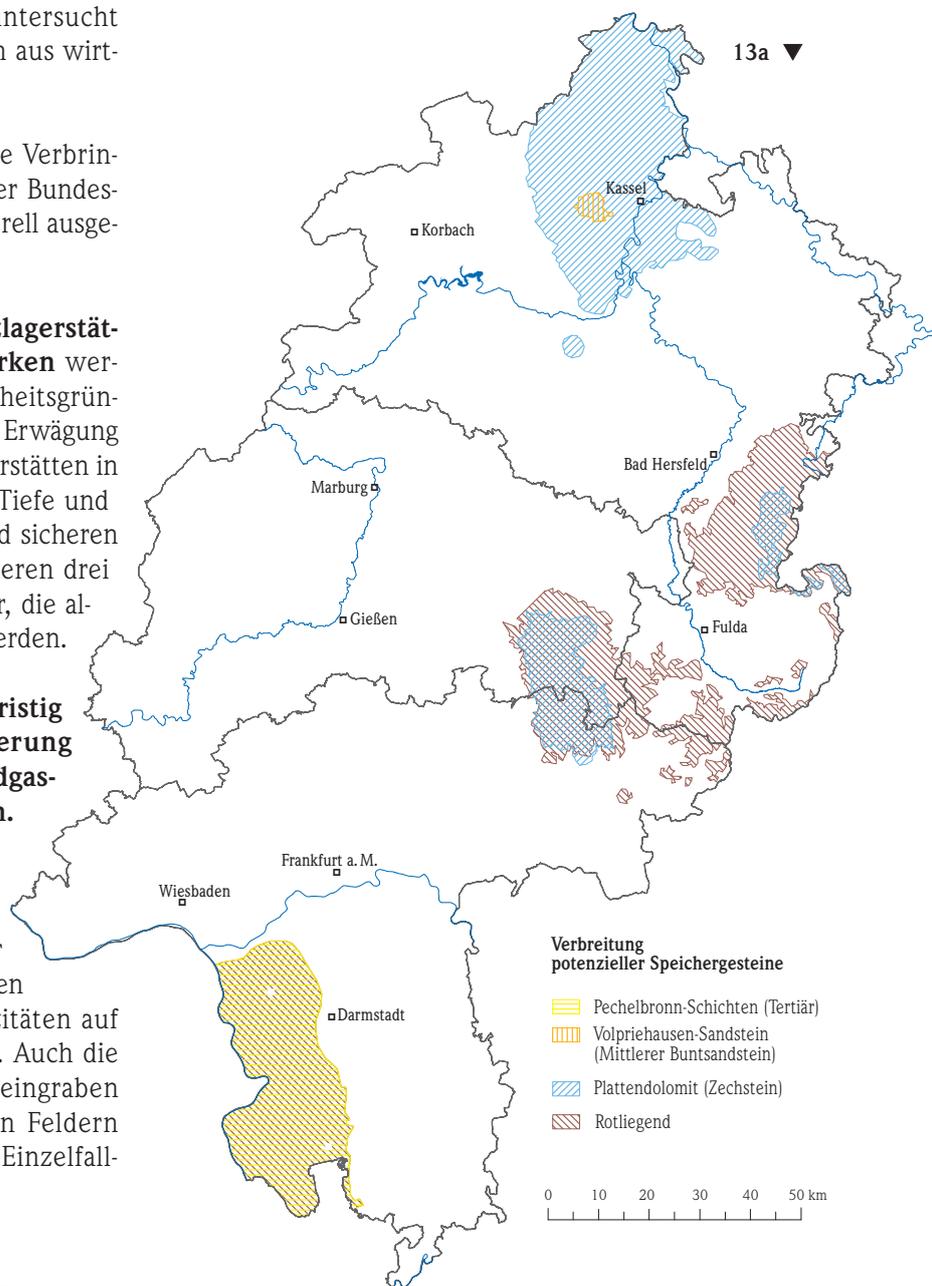


Abb. 13 a und b:
Potenzielle CO₂-Speicher in Hessen und ihre Wertung.

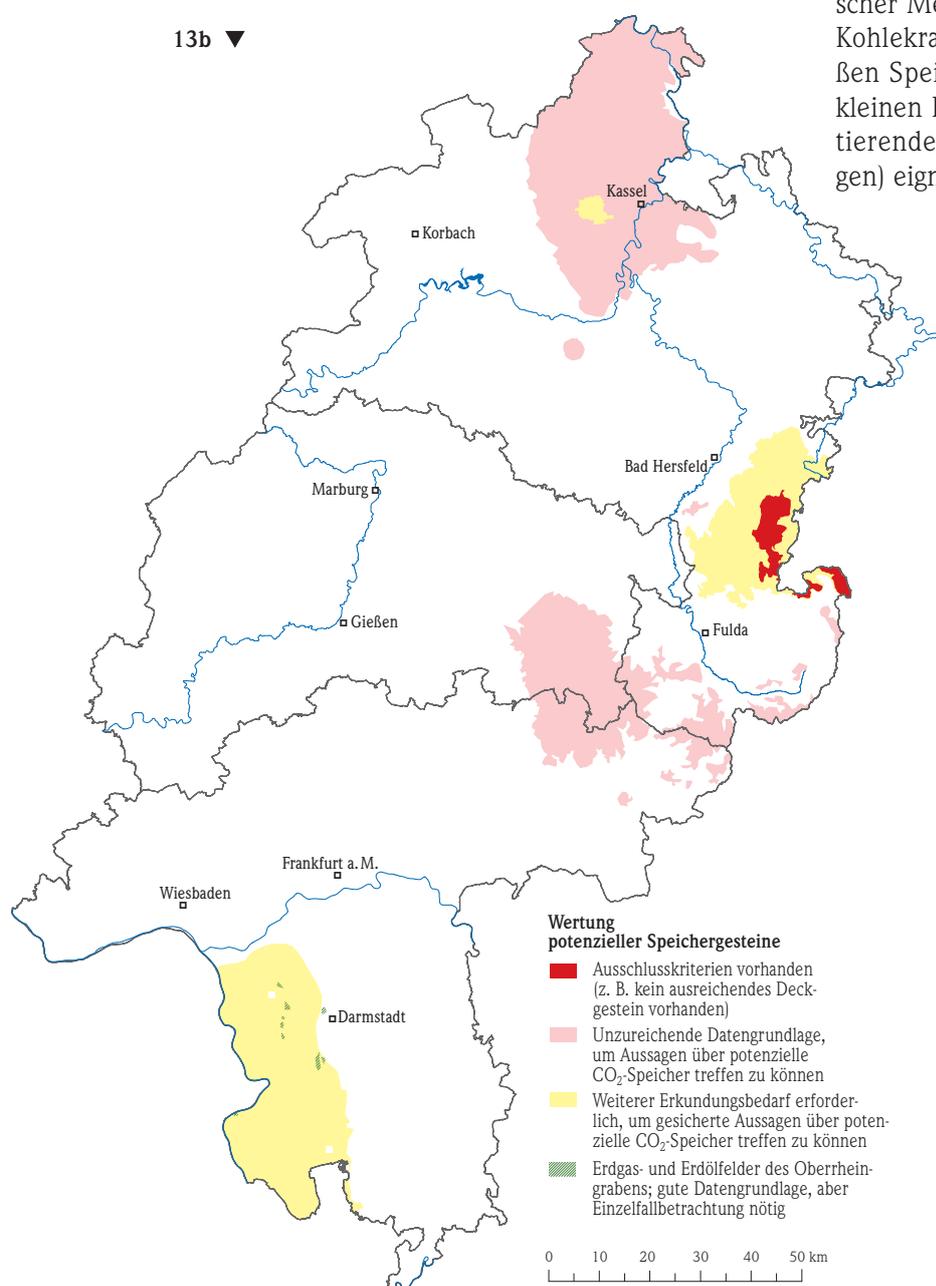
chermöglichkeiten mit der dazu erforderlichen Tiefenlage ermittelt (siehe Abb. 13).

Danach kann man den Plattendolomit im Werra-Kali-Gebiet als Speichergestein ausschließen, da die Speichersicherheit aufgrund der lithologischen Eigenschaften der Deckschichten nicht gegeben ist. Im Raum Kassel, im Vogelsberg und der Hohen Rhön ist die Datengrundlage unzureichend. Hier müssten flächendeckend neue Bohrungen abgeteuft werden.

Der Volpriehausen-Sandstein im Raum Kassel liegt nur in einem sehr begrenzten Gebiet unterhalb 800 m unter GOK. Weiterer Erkundungsbedarf ist erforderlich, was die Eignung des Rotliegend im Werra-Kali-Gebiet sowie des Rotliegend und der tertiären Pechelbronn-Schichten im Oberrheingraben betrifft.

Bei den salinaren Aquiferen sind detaillierte Untersuchungen bezüglich flächenhafter Ausdehnung und Kapazitäten notwendig (z. B. Auswertung seismischer Messungen). Allerdings gibt es für die großen Kohlekraftwerke in Hessen keine ausreichend großen Speicher. Es sollte untersucht werden, ob die kleinen Felder Hessens sich für kleinere CO₂-emittierende Anlagen bzw. Quellen (z. B. Chemieanlagen) eignen.

13b ▼



7 Ausblick

Die Aussagen in dieser Studie beruhen bisher nur auf Literaturstudien sowie der Auswertung von Bohrungen und geologischen Kartierungen. Für eine weitere Bewertung ist es erforderlich, die bekannten und ggf. zusätzlich zu messenden seismischen Profile auszuwerten und tektonisch relevante Strukturen in die hier vorgestellten Karten einfließen zu lassen, um die potenziellen Gebiete detaillierter betrachten zu können. Vergleichbar zu dieser Vorstudie wäre es lohnenswert, mittels einer weiterführenden, ausführlicheren Studie die seismischen Daten zu integrieren. Das Gesamtbild von Hessen wird sich dadurch nochmals verändern und verbessern lassen.

Die hier vorgestellten potenziellen Speicherhorizonte sowie deren Deckschichten bedürfen noch einer Vielzahl detaillierter geologischer und lithologischer Untersuchungen hinsichtlich der Gesteins- und Lagerungseigenschaften sowie ihrer räumlichen Grenzen. Diese Erkenntnisse können voraussichtlich nur durch den Einsatz von geophysikalischen Messmethoden und durch das Abteufen zusätzlicher Tiefbohrungen (ab 500 m Teufe) gewonnen werden. Vorher sollten weitere Betrachtungen und Bewertungen, beispielsweise hinsichtlich konkurrierender Nutzungen, Infrastruktur und Transportwegen von den Entstehungsorten (Kohlekraftwerke, Chemiebetriebe) zu den Lagern sowie den technischen Eigenschaften der einzulagernden Gase/Flüssigkeiten (z. B. Reinheit des CO₂) und ihrer Wechselwirkungen mit dem umgebenden Material erfolgen.

Die Umweltverträglichkeit bei Lagerung großer Mengen CO₂ ist noch nicht hinreichend untersucht. Aufgrund der zahlreichen Unwägbarkeiten kann die CO₂-Verpressung nicht die abschließende Lösung der Klimaproblematik sein, sondern bestenfalls zur Überbrückung bis zur ausreichenden Entwicklung

CO₂-freier bzw. CO₂-armer erneuerbarer Energieträger beitragen.

Wünschenswert wäre auch vor dem Einsatz von Techniken, die CO₂ erzeugen, eine Betrachtung anzustellen, die die Hierarchie: Vermeidung, Verminderung, Verwertung und dann erst Speicherung berücksichtigt (Tab. 4). Daneben ist es auch für das Bundesland Hessen erforderlich die CO₂-Quellen zu bilanzieren. Dazu gehören unter anderem Kraftwer-

Tab. 4: Möglichkeiten der CO₂-Reduzierung

Möglichkeiten der CO ₂ -Reduzierung		Potenzial
Vermeidung	Wechsel zu Techniken, die CO ₂ nicht entstehen lassen	groß
Verminderung	Alle neuen Techniken, die eine Reduzierung von CO ₂ ermöglichen	groß
Verwertung	Getränke Kunstdünger Löschmittel Lösungsmittel Methanolsynthese	begrenzt
Biologische Bindung	Aufforstung Meeresalgen Gewächshäuser	nicht dauerhaft
Ozeanspeicherung	Gaslösung in 1000 m Tiefe Trockeneisversenkung Tiefseeinjektion	dauerhafte Speicherung fraglich, gesetzlich nicht machbar
Geologische Speicherung	Ausgebeutete Öl-/Gasfelder Erweiterte Öl-/Gasförderung Salinare Aquifere	groß als Zwischenlösung
	Kohle Mineralisierung Salzlagerstätten	noch nicht ausreichend erforscht

ke, die fossile Energieträger verwenden, der Verkehr, Chemiebetriebe, Gebäudeheizung und das natürlich entstandene CO₂.

Primäres Ziel sollte eine Verbesserung der Energieeffizienz sowie eine Steigerung der Energieeinsparung auf Seiten des Verbrauchers sein.

8 Glossar

Adsorption:

Anlagerung der Atome oder Moleküle von Flüssigkeiten oder Gasen an eine feste Oberfläche.

Aquifere (= Grundwasserleiter):

Gesteinskörper im Untergrund, die aufgrund ihrer Porosität und Permeabilität die Fähigkeit besitzen, Flüssigkeiten und Gase transportieren und speichern zu können.

Carbon Dioxide Capture and Storage (CCS-)

Prozess:

Abscheidung von CO₂ in einem Kraftwerksprozess und anschließende Speicherung in geologischen Strukturen.

CO₂-Speicherung oder CO₂-Sequestrierung:

Dauerhafte (möglichst > 10 000 Jahre) Endlagerung oder Deponierung von CO₂ im tiefen Untergrund, welches bei Stromerzeugung durch Verbrennung fossiler Energien entsteht.

Durchlässigkeit:

Die Permeabilität und der Durchlässigkeitsbeiwert (kf-Wert) beschreiben die Durchlässigkeit eines porösen Mediums gegenüber einem Fluid (z. B. Wasser), wobei sich die Permeabilität allein auf die Gesteinseigenschaften beschränkt und der Durchlässigkeitsbeiwert [Maßeinheit: m/s] die Eigenschaften des Fluids (z. B. Dichte, Viskosität, Temperatur) zusätzlich einbezieht. Der Durchlässigkeitsbeiwert gibt an, welcher Volumenstrom [Q] bei einem hydraulischen Gradienten [i] pro Fläche [A] bei einer bestimmten Fluidtemperatur strömt.

Emission:

Aussendung von Teilchen, Strahlung oder Kräften an die Umwelt.

Fazies:

Alle Eigenschaften eines Gesteins, die aus seiner Entstehungsgeschichte herrühren. Neben der Ausbildung der Gesteine (Lithofazies) können auch die im Gestein erhaltenen Fossilien (Biofazies) Hinweise auf das Klima, den Lebensraum und die sonstigen Umweltbedingungen liefern, die zur Zeit der Ablagerung herrschten.

Fossile Rohstoffe:

Rohstoffe, die aus organischem Material hervorge-

gangen sind. Hierzu zählen Kohle, Erdöl und Erdgas. Sie dienen als Brenn- und Kraftstoff in Kraftwerken, Fahrzeugen und Flugzeugen und als Ausgangsmaterial für die chemische Industrie.

Geothermische Tiefenstufe:

Die Tiefe, in der sich die Erdkruste um 1 °C erwärmt. Eine solche Erwärmung erfolgt durchschnittlich auf eine lotrechte Strecke von 33 Meter, wobei man aufgrund dessen auch oft einen geothermischen Gradienten von 3 °C pro 100 Meter angibt.

Globale Klimaerwärmung:

Während der vergangenen Jahrzehnte beobachteter allmählicher Anstieg der Durchschnittstemperatur der erdnahen Atmosphäre und der Meere sowie die erwartete weitere Erwärmung in der Zukunft.

Initialer Lagerstättendruck:

Derjenige Druck, dem die Fluide oder Gase, die das Porenvolumen der Speichergesteine ausfüllen, unterliegen, bevor die Lagerstätte erstmalig durch ein Bohrloch erschlossen wird.

INKLIM 2012 (= Integriertes Klimaschutzprogramm Hessen 2012):

Ein vom Hessischen Ministerium für Umwelt, ländlicher Raum und Verbraucherschutz (HMULV) aufgestelltes Klimaschutzprogramm für Hessen, das zur Erfüllung der Treibhausgasminimierung nach Ratifizierung des Kyoto-Protokolls beitragen soll (www.hmuly.hessen.de, www.hlug.de).

IPCC (= Intergovernmental Panel on Climate Change):

Die 1988 ins Leben gerufene und in Genf ansässige zwischenstaatliche Sachverständigengruppe, auch als **Weltklimarat** bezeichnet, die sich mit dem Klimawandel beschäftigt, die Risiken der globalen Erwärmung beurteilen und Vermeidungsstrategien zusammentragen soll.

Kapillare:

Bezeichnung für kleine bzw. kleinste Hohlräume, in denen aufgrund der Adsorptionskräfte Flüssigkeiten auch entgegen der Schwerkraft wandern können.

Kapillarer Schwellendruck:

Derjenige Druck, bei dem das in einem wassergesät-

tigten Gestein unter Lagerstättenbedingungen injizierte Gas das in den Gesteinskapillaren gebundene Wasser verdrängt.

Kyoto-Protokoll:

Ein 1997 beschlossenes Zusatzprotokoll zur Ausgestaltung der 1992 in Rio de Janeiro unterzeichneten **Klimarahmenkonvention (UNFCCC)** der Vereinten Nationen. Das am 16. Februar 2005 in Kraft getretene und 2012 auslaufende Abkommen sieht vor, den jährlichen Treibhausgas-Ausstoß der Industrieländer zu reduzieren.

Lithologie:

Chemische und physikalische Beschaffenheit der Gesteine, ihre Eigenschaften und ihre Zusammensetzung aus einzelnen Mineralen sowie ihre Körnung und Kristallstruktur.

Permeabilität:

Gesteinsspezifische Eigenschaft für das Durchströmen von Gasen und Flüssigkeiten durch einen porösen Körper [Maßeinheit: Darcy ($1 \text{ D} = 0,98697 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$)] (siehe auch Durchlässigkeit).

Porosität bzw. Hohlraumvolumen:

Die absolute Porosität ist der Anteil des Hohlraumvolumens am Gesamtvolumen des Gesteins [Maßeinheit: dimensionslos (%)]. Der durchflusswirksame Hohlraumanteil kennzeichnet den Hohlraumanteil, in dem verfügbares, nutzbares (effektives), d. h. frei bewegbares Wasser enthalten ist, also beispielsweise kein Haftwasser. Der durchflusswirksame Hohlraumanteil bietet Durchlässigkeit, ist jedoch nicht direkt in diese umsetzbar, da zusätzlich auch die Größe, Gestalt und Verbindung der Hohlräume entscheidend sind.

Regenerative Energien (=Erneuerbare Energien):

Energie aus nachhaltigen Quellen, die nach menschlichen Maßstäben unerschöpflich sind, z. B. die Energieströme aus der thermonuklearen Umwandlung in der Sonne, dem radioaktiven Zerfall im Erdinnern sowie der Erdrotation und den damit verbundenen Effekten (Gezeiten). Auf der Erde können diese Energiequellen in Form von Sonnenlicht und -wärme, Windenergie, Wasserkraft, Biomasse und Erdwärme genutzt werden.

Salinar:

Gesteinskomplex, der überwiegend aus Salzgesteinen besteht.

Speichereffizienz:

Anteil des vom CO₂-erfüllten Volumens am Gesamtporenvolumen des Speichers. Sie ist nicht nur vom Untergrund, sondern auch von Anforderungen an die Nutzung der Strukturen, den gewählten Speicherstrategien sowie der Reinheit des abgeschiedenen CO₂ abhängig.

Treibhauseffekt:

Prozess, bei dem die kurzwellige Sonnenstrahlung an der Erdoberfläche zu einem großen Teil absorbiert, in Wärme umgewandelt und als Wärmestrahlung wieder abgestrahlt wird. Treibhausgase wie Wasserdampf (H₂O), Kohlenstoffdioxid (CO₂), Methan (CH₄), Distickstoffoxid (Lachgas, N₂O), Schwefelhexafluorid (SF₆), Ozon (O₃) und Fluor-Chlor-Kohlenwasserstoffe (FCKW) können aufgrund ihrer chemischen Natur in unterschiedlichem Ausmaß die Wärmestrahlung absorbieren und so die Wärme in die Atmosphäre abgeben.

9 Literatur

- ANDRES, J. & SCHAD, A. (1959): Seismische Kartierung von Bruchzonen im mittleren und nördlichen Teil des Oberrheintalgrabens und deren Bedeutung für die Ölabsammlung. – Erdöl und Kohle, **12**: Nr. 5; Hamburg (Industrieverlag von Hernhaussen K.G.).
- BECKER, F. (2002): Zechsteinkalk und Unterer Werra-Anhydrit (Zechstein 1) in Hessen: Fazies, Sequenzstratigraphie und Diagenese. – Geol. Abh. Hessen, **109**, 231 S.; Wiesbaden.
- BECKER, R. E. & KULICK, J. (1999): Erläuterungen zur geologischen Karte von Hessen 1:25 000, Bl. 4923 Altmorschen. – 394 S.; Wiesbaden.
- BMWi, BMU & BMBF (2007): Entwicklungsstand und Perspektiven von CCS-Technologien in Deutschland. – Gemeinsamer Bericht des BMWi, BMU und BMBF für die Bundesregierung (19. September 2007).
- CHADWICK, A.; ARTS, R.; BERNSTONE, CH.; MAY, F.; THIBEAU, S. & ZWEIGEL, P. (2007): Best Practice for the Storage of CO₂ in Saline Aquifers. – Observations and guidelines from the SACS and CO2STORE projects.
- CHRISTOPHER, A. (1993): Der hessische Braunkohlenbergbau und seine Bahnen - Bergbau und Bahnen, **2**, 176 S.; Biebental (Verlag im Biebental).
- DEUBEL, F. (1954): Zur Frage der unterirdischen Abwasserversenkung in der Kali-Industrie. – Abh. dt. Akad. Wiss., Kl. Math. u. allg. Naturwiss., **H3**: 23 S.; Berlin.
- DIEDERICH, G.; FINKENWIRTH, A.; HÖLTING, B.; KAUFMANN, E.; RAMBOW, D.; SCHARPFF, H.-J.; STENGEL-RUTKOWSKI, W. & WIEGAND, K. (1991): Hydrogeologisches Kartenwerk Hessen 1:300 000. – Geol. Abh. Hessen, **95**: 83 S.; Wiesbaden.
- DÜRBAUM, H. J.; MATTHES, G. & RAMBOW, D. (1969): Untersuchungen der Gesteins- und Gebirgsdurchlässigkeit des Buntsandstein in Nordhessen. – Notizbl. hess. L.-Amt Bodenforsch., **97**: 258–274; Wiesbaden.
- EHRENBERG, K.-H. & HICKETHIER, H. (1985): Die Basaltbasis im Vogelsberg. Schollenbau und Hinweise zur Entwicklung der vulkanischen Abfolge. – Geol. Jb. Hessen, **113**: 97–135; Wiesbaden.
- FINKENWIRTH, A. (1984): Eignung der Lokation Stockstadt am Rhein als Standort für ein deutsches Hot-Dry-Rock-Projekt. – Gutachten des Hessischen Landesamtes für Bodenforschung; Wiesbaden.
- FRITSCH, H.-G. (2000): Geologische Beratung zum Erdgaskavernenspeicher Reckrod. – Jahresbericht 2000 des Hessischen Landesamtes für Umwelt und Geologie, 107–110; Wiesbaden.
- FRITSCH, H.-G.; BECKER, F. & HEGGEMANN, H. (2000): Die Tiefbohrung Rotenburg HKZ 1001 – Geologie des Deckgebirges und hydrogeologische Ergebnisse. – Geol. Jb. Hessen, **128**: 5–17; Wiesbaden.
- FRITSCH, J.-G. & KRACHT, M. (2007): Geothermische Potenziale und Seismizität in Hessen. – 2. Tiefengeothermie-Forum, 4.9.2007; Darmstadt.
- GAUPP, R. & NICKEL, B. (2001): Die Pechelbronn-Schichten im Raum Eich-Stockstadt (Nördlicher Oberrheingraben, Blatt 6216 Gernsheim). – Geol. Jb. Hessen, **128**: 19–27; Wiesbaden.
- GERLING, P. & MAY, F. (2001): Stellungnahme vor der Enquete-Kommission. – Deutscher Bundestag.
- HARRIS, J. M.; MARTINS AKINTUNDE, O.; MUKERJI, T. & URBAN, J. (2004): Predicting Pressure and Saturation Changes From Elastic Wave Velocities in a CO₂-Flooded Coal Bed Methane: A Modeling Study. – Tagungsbeitrag AAPG Annual Meeting April 18–21, 2004; Dallas (Texas).
- HUG, N. (2004): Sedimentgenese und Paläogeographie des höheren Zechstein bis zur Basis Buntsandstein in der Hessischen Senke. – Geol. Abh. Hessen, **113**: 238 S.; Wiesbaden.
- KÄDING, K.-CH. (2000): Die Aller-, Ohre-, Friesland- und Fulda-Folge (vormals Bröckelschiefer-Folge). – Kali und Steinsalz **13** (14): 86–96; Essen.
- KoSaAB - Koordinierungsausschuss Salzabwasser Hessen-Thüringen (1994): Sonderbericht Diffuse Einträge von Salzwasser in die Werra - 1994. – Thüringer Ministerium für Landwirtschaft, Naturschutz und Umwelt; Erfurt.
- KOWALCZYK, G. (1983): Das Rotliegende zwischen Taunus und Spessart. – Geol. Abh. Hessen, **84**: 99 S.; Wiesbaden.
- KULICK, J.; LEIFELD, D.; MEISL, S.; PÖSCHL, W.; STELLMÄCHER, R.; STRECKER, G.; THEUERJAHR, A.-K. & WOLF, M. (1984): Petrofazielle und chemische Erkundung des Kupferschiefers der Hessischen Senke und des Harz-Westrandes. – Geol. Jb., **D 68**: 3–223; Hannover.
- LAEMMLEN, M. (1975): Erläuterungen zur geologischen Karte von Hessen 1:25 000, Bl. 5225 Geisa. – 272 S.; Wiesbaden.
- MARELL, D. (1989): Das Rotliegende zwischen Odenwald und Taunus. – Geol. Abh. Hessen, **89**: 128 S.; Wiesbaden.
- MEIER, L. (1989): Ein Modell für die Tiefenstruktur und Kinematik im Bereich des nördlichen Oberrheingrabens. – Dissertation Universität Karlsruhe; Karlsruhe.
- MOTZKA, R. (1968): Erläuterungen zur geologischen Karte von Hessen 1:25 000, Bl. 5324 Hünfeld. – 156 S., Wiesbaden
- MOTZKA, R. & LAEMMLEN, M. (1967): Erläuterungen zur geologischen Karte von Hessen 1:25 000, Bl. 5224 Eiterfeld. – 156 S.; Wiesbaden.

- MÖLLER, H. (1985): Petrographie und Fazies des Plattendolomits (Leine-Karbonat, Ca₃) im hessischen Zechstein-Becken. – Bochumer geol. u. geotechn. Arb., **20**: 77–112; Hannover.
- MÜLLER, H. (1996): Das Permokarbon im nördlichen Oberrheingraben. – Geol. Abh. Hessen, **99**: 85 S.; Wiesbaden.
- Prepared by working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change [METZ, B.; DAVIDSON, O.; DE CONNICK, H.C.; LOOES, M.; MEYER, L.A. (Eds.)] (2005): IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. – Cambridge University Press.
- PRINZ, H. & HOLTZ, S. (1989): Zur Durchlässigkeit des Buntsandsteingebirges – Erfahrungen aus dem Tunnel- und Talsperrenbau in Hessen (BRD). – Mitt. Ing.- u. Hydrogeol., **32**: 197–224; Aachen.
- RADGEN, P.; CREMER, C.; WARKENTIN, S.; GERLING, P.; MAY, F. & KNOPE, ST. (2005): Bewertung von Verfahren zur CO₂-Abscheidung und -Deponierung. – Climate Change; Umweltbundesamt.
- RADTKE, G. & MARTINI, E. (Hrsg.) (2007): Die Bohrungen Wallau im nordöstlichen Mainzer Becken (Rotliegend, Pechelbronn-Gruppe, Bodenheimer-Formation). – Geol. Abh. Hessen, **116**: 273 S.; Wiesbaden.
- REICHLER, D.; HOUGHTON, J.; KANE, B. & EKMANN, J. (Eds.) (1999): Carbon Sequestration - Research and Development. – Office of Science, Office of Fossil Energy, U.S. Dep. of Energy; Oak Ridge.
- SCHRAFT, A. & RAMBOW, D. (1984): Vergleichende Untersuchungen zur Gebirgsdurchlässigkeit im Buntsandstein Ost Hessens. – Geol. Jb. Hessen, **112**: 235–261; Wiesbaden.
- SEDLACEK, R.; STANCU-KRISTOFF, G. & LÖSCH, J. (1994): Untertage-Porengasspeicher in der Bundesrepublik Deutschland 1993. – Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung; Hannover.
- SKOWRONEK, F.; FRITSCH, J.-G.; ARAGON, U. & RAMBOW, D. (1999): Die Versenkung und Ausbreitung von Salzabwasser im Untergrund des Werra-Kaligebietes. – Geol. Abh. Hessen, **105**: 83 S.; Wiesbaden.
- STECKHAN, W. (1952): Der Braunkohlenbergbau in Nordhessen. – Hessisches Lagerstättenarchiv, Heft **1**: 212 S.; Wiesbaden.
- STENGEL-RUTKOWSKI, W. (1967): Einige Vorkommen von Natrium-Chlorid-Wasser im östlichen Rheinischen Schiefergebirge. – Notizbl. hess. L.-Amt Bodenforsch., **95**: 190–212; Wiesbaden.
- STENGEL-RUTKOWSKI, W. (1979): Das östliche Rheinische Schiefergebirge. – Hydrol. Atlas BRD, Textband: 191–194; Boppard (H. Boldt-Verl.).
- UDLUFT, H.; HENTSCHEL, H.; MICHELS, F.; NÖRING, F.; SCHENK, E.; SCHMITT, O.; TEIKE, M.; THEWS, D.; THOME, K. N. & ULBRICH, R. (1957): Hydrogeologische Übersichtskarte 1:500 000, Erläuterungen zu Blatt Frankfurt. – Bundesanst. f. Landeskunde; Remagen.