

**Abschlussbericht zur Vorstudie zum  
Informationssystem Speichergesteine zur CO<sub>2</sub>-  
Speicherung für den Standort Hessen – eine  
Grundlage zur klimafreundlichen geo- und  
energietechnischen Nutzung des tiefen  
Untergrundes (Speicherkataster)**

**INKLIM 2012 II plus**

Bearbeiterin: Dipl. Geol. Anne Kött

Februar 2008

# Inhalt

<b>1</b>	<b>Veranlassung</b> .....	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>5</b>
2.1	Eigenschaften und Speicherung des Kohlenstoffdioxids .....	6
2.2	Speicherung und konkurrierende Nutzung.....	10
2.3	Generelle Aspekte, die bei der Speicherung berücksichtigt werden sollten .....	11
<b>3</b>	<b>Stand der Forschung und Projekte</b> .....	<b>12</b>
<b>4</b>	<b>Vorgehensweise und Datengrundlage</b> .....	<b>15</b>
4.1	Auswahlkriterien (Gesteinseigenschaften).....	15
4.2	Bohrungen und Tiefenlinienpläne.....	16
<b>5</b>	<b>Ausschlussgebiete – für die Speicherung von CO<sub>2</sub> ungeeignete Gebiete</b> .....	<b>20</b>
<b>6</b>	<b>Speicherung in tiefen salinaren Aquiferen</b> .....	<b>22</b>
6.1	Nord- und Osthessen (Hessische Senke).....	22
6.1.1	Rotliegend.....	22
6.1.2	Zechstein.....	27
6.1.3	Mittlerer Buntsandstein .....	35
6.2	Südhessen (Oberrheingraben) .....	37
6.2.1	Rotliegend.....	38
6.2.2	Tertiär .....	40
6.3	Bewertung der Situation in Hessen .....	43
<b>7</b>	<b>Speicherung in entleerten Erdöl- und Erdgaslagerstätten</b> .....	<b>47</b>
7.1	Erdöllagerstätten .....	47
7.2	Erdgaslagerstätten .....	49
7.3	Bewertung der Situation in Hessen .....	51
<b>8</b>	<b>Kohlenlagerstätten</b> .....	<b>52</b>

8.1	Prozesse.....	52
8.2	Kohlenvorkommen in Hessen .....	53
8.3	Bewertung der Situation in Hessen .....	56
<b>9</b>	<b>Salzlagerstätten.....</b>	<b>56</b>
9.1	Salzlagerstätten in Hessen.....	57
9.2	Bewertung der Situation in Hessen .....	57
<b>10</b>	<b>Ozeanspeicherung .....</b>	<b>58</b>
10.1	Methoden der Ozeanspeicherung .....	58
10.2	Bewertung der Situation in Hessen .....	58
<b>11</b>	<b>Mineralisierung .....</b>	<b>59</b>
11.1	Prozesse.....	59
11.2	Bewertung der Situation in Hessen .....	59
<b>12</b>	<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>60</b>
<b>13</b>	<b>Glossar .....</b>	<b>65</b>
<b>14</b>	<b>Literatur .....</b>	<b>68</b>
<b>15</b>	<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>74</b>
<b>16</b>	<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>75</b>
<b>Anhang</b>	..... Fehler! Textmarke nicht definiert.	

Anhang 1: Karten im Din A3 – Format

Anhang 2: Tabelle der Bohrungen aus dem Archiv des HLUG, die zur Lagebestimmung potenzieller CO<sub>2</sub>-Speicher hinzugezogen wurden

Anhang 3: Weiterführende Literatur zur regionalen Geologie von Hessen (die CO<sub>2</sub>-Speicherung betreffend) und Grundlagen und verwendete Literatur zum Thema CO<sub>2</sub>-Speicherung

# 1 Veranlassung

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 freiwerdende Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) 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. Auf der 13. Weltklimakonferenz im Dezember 2007 in Bali diskutierten die Nationen über Maßnahmen, die 2009 verabschiedet werden und dann 2013 die Nachfolge des Kyoto-Protokolls antreten könnten.

In dem vom Weltklimarat (**IPCC** = Intergovernmental Panel on Climate Change) herausgegebenen Klimabericht (WG III 2001) wird die Abscheidung des in Kraftwerken entstehenden CO<sub>2</sub> und dessen Speicherung in tieferen geologischen Formationen als eine mögliche Option angegeben, um das CO<sub>2</sub> für möglichst lange Zeiträume der Atmosphäre zu entziehen. Der europäische Emissionshandel für Unternehmen sieht die Anrechenbarkeit von Maßnahmen zur CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Speicherung vor. Derzeit wird ein Entwurf für eine Richtlinie, die den Rechtsrahmen für die Speicherung von CO<sub>2</sub> regelt, von der EU-Kommission vorgelegt (Proposal for a directive of the european parliament and of the council on the geological storage of carbon dioxide vom 23.01.2008).

Im Frühjahr 2004 wurde vom Hessischen Ministerium für Umwelt, ländlicher Raum und Verbraucherschutz (HMULV) ein integriertes Klimaschutzprogramm für Hessen ins Leben gerufen (= **INKLIM 2012**), das entsprechend den Vereinbarungen des Kyoto-Protokolls zu einer vertragsgemäßen Minderung der Treibhausgasemissionen beitragen soll. Im Rahmen dieses Programms untersucht das Hessische Landesamt für Umwelt und Geologie (HLUG) die Eignung des Untergrundes in Hessen zur dauerhaften Einlagerung von CO<sub>2</sub>.

## 2 Einleitung

Bei der Verbrennung organischer Kohlenstoffverbindungen (v. a. Kohle, Erdöl, Erdgas, Biokraftstoffe) reagiert der enthaltene Kohlenstoff mit dem Luftsauerstoff ( $O_2$ ) zu Kohlenstoffdioxid ( $CO_2$ ). Neben anderen Treibhausgasen wie Wasserdampf ( $H_2O$ ), Methan ( $CH_4$ ), Distickstoffoxid (Lachgas,  $N_2O$ ) und Fluor-Chlor-Kohlenwasserstoffen (FCKW) ist  $CO_2$  maßgeblich an der Entstehung des Treibhauseffektes beteiligt. Treibhausgase lassen die kurzwellige Sonnenstrahlung ungehindert passieren, halten aber die von der Erdoberfläche reflektierten Strahlen im langwelligen Infrarotbereich zurück.

Tab. 1: Möglichkeiten der  $CO_2$ -Reduzierung

Möglichkeiten der $CO_2$ -Reduzierung		Potenzial
<b>Vermeidung</b>	Wechsel zu Techniken, die $CO_2$ nicht entstehen lassen	groß
<b>Verminderung</b>	Alle neuen Techniken, die eine Reduzierung von $CO_2$ ermöglichen	groß
<b>Verwertung</b>	Getränke	begrenzt
	Kunstdünger	
	Löschmittel	
	Lösungsmittel	
	Methanolsynthese	
<b>Biologische Bindung</b>	Aufforstung	nicht dauerhaft
	Meeresalgen	
	Gewächshäuser	
<b>Ozeanspeicherung</b>	Gaslösung in 1000 m Tiefe	dauerhafte Speicherung fraglich, gesetzlich nicht machbar
	Trockeneisversenkung	
	Tiefseeinjektion	
<b>Geologische Speicherung</b>	Ausgebeutete Öl-/Gasfelder	groß als Zwischenlösung
	Erweiterte Öl-/Gasförderung	
	Salinare Aquifere	
	Kohle	noch nicht ausreichend erforscht
	Mineralisierung	
	Salzlagerstätten	

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 CO<sub>2</sub>-Mengen müssen geeignete Abscheidungs- und Deponierungstechnologien (Carbon Dioxide Capture and Storage (CCS) -Prozess) gefunden werden, um den weiteren CO<sub>2</sub>-Anstieg in der Atmosphäre zu verringern.

Aufgrund der zahlreichen Unwägbarkeiten kann die CO<sub>2</sub>-Verpressung nicht die abschließende Lösung der Klimaproblematik sein, sondern bestenfalls zur Überbrückung bis zur ausreichenden Entwicklung CO<sub>2</sub>-freier bzw. CO<sub>2</sub>-armer Erneuerbarer Energieträger beitragen. Primäres Ziel sollte eine Verbesserung der Energieeffizienz sowie eine Steigerung der Energieeinsparung auf Seiten des Verbrauchers sein (siehe auch Tab. 1).

Die vorliegende Studie befasst sich mit der **Aufarbeitung geologischer Grundlagen**, die nötig sind, **um geeignete Speicher im tieferen Untergrund von Hessen aufzufinden**. Technische, rechtliche oder ökonomische Aspekte wurden nicht in die Betrachtung mit einbezogen.

## 2.1 Eigenschaften und Speicherung des Kohlenstoffdioxids

Unter CO<sub>2</sub>-Speicherung oder CO<sub>2</sub>-Sequestrierung versteht man die dauerhafte Endlagerung oder Deponierung von CO<sub>2</sub> unterhalb der Erdoberfläche. Um eine effiziente und dauerhafte Speicherung, d.h. möglichst länger als 10.000 Jahre, zu ermöglichen, müssen bestimmte Kriterien erfüllt sein.

Zur Einlagerung von CO<sub>2</sub> werden die natürlich vorhandenen Hohlräume in Gesteinen des tieferen Untergrundes genutzt. Die effektive Nutzung dieses Speicherpotenzials setzt eine hohe Verdichtung des CO<sub>2</sub> (möglichst > 600 kg/m<sup>3</sup>) voraus.

Kohlenstoffdioxid ist ein gut in Wasser lösliches, farb- und geruchloses Gas mit folgenden Eigenschaften:

- Dichte: 1,9767 kg/m<sup>3</sup> (bei 0°C)
- Dampfdruck: 57,258 bar (bei 20°C)
- kritische Temperatur: 304,2K (= 31°C)
- kritischer Druck: 7,375 MPa (= 73,8 bar)
- kritische Dichte: 468 kg/m<sup>3</sup>

Oberhalb des kritischen Punktes (siehe Abb. 1) sind Flüssigkeit und Gas nicht mehr voneinander zu unterscheiden, man spricht von einem überkritischen Zustand. Die kritische Temperatur ist die Temperatur, unterhalb der ein Gas durch Druck verflüssigt werden kann; oberhalb der kritischen Temperatur ist dies nicht mehr möglich.

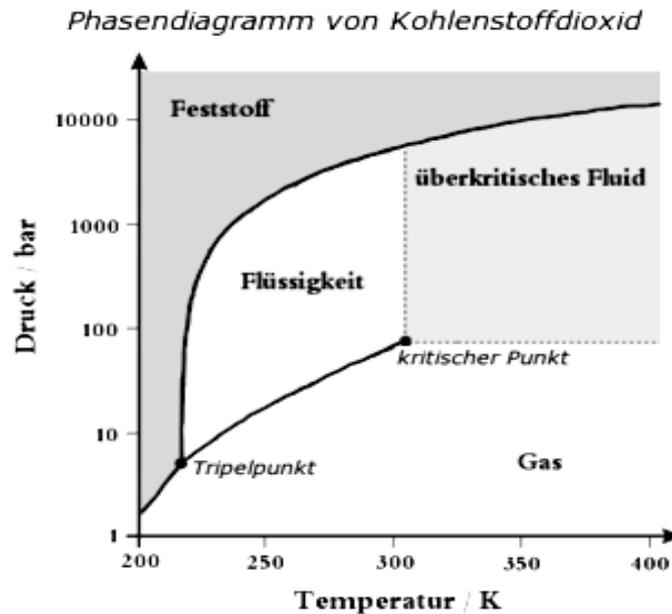


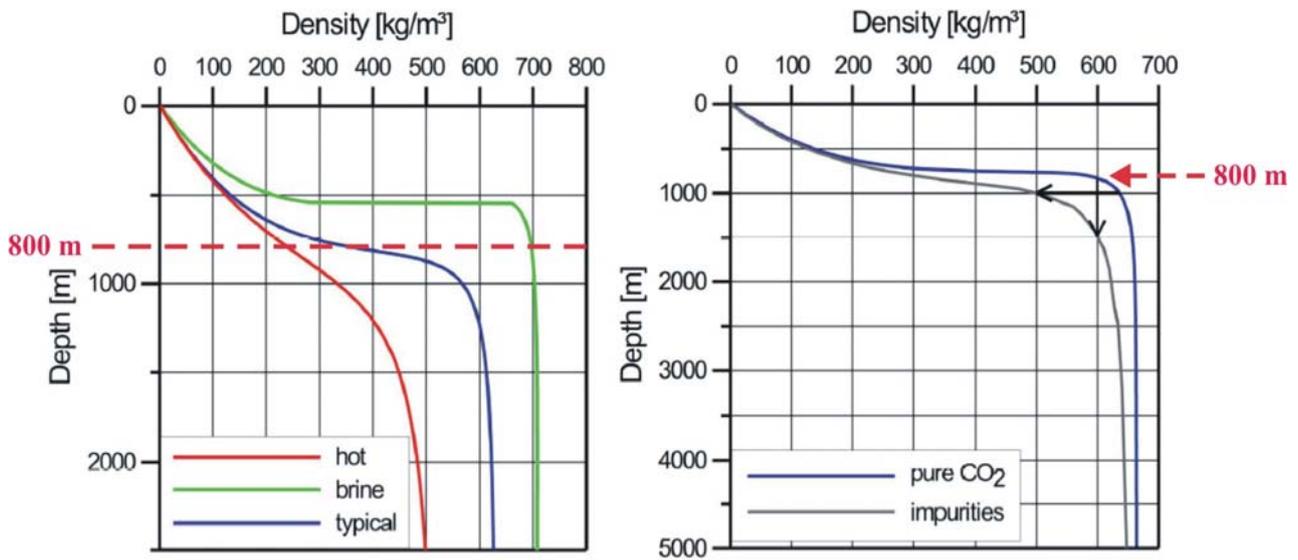
Abb. 1: Vereinfachtes Phasendiagramm des Kohlenstoffdioxids (Quelle: Wikipedia)

Ab einer bestimmten Tiefe sind in der Regel alle Hohlräume unterhalb der Erdoberfläche wassererfüllt. Die Löslichkeit von CO<sub>2</sub> in Wasser

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

Die für die Injektion des CO<sub>2</sub> erforderlichen Druck- und Temperaturverhältnisse werden, bei einem hydrostatischen Druckgradienten von ca. 10 MPa/km, i. A. ab Tiefen von 800 m unterhalb der Geländeoberkante erreicht (RADGEN et al. 2005). Der in diesen Tiefen jedoch hohe Anteil an gelösten Ionen (Salinität) im Grundwasser verringert wiederum die Löslichkeit des CO<sub>2</sub>. Verunreinigungen des in den Kraftwerken abgeschiedenen CO<sub>2</sub> sowie hohe geothermische Gradienten können dazu führen, dass z. B. eine Dichte von 600 kg/m<sup>3</sup> erst in deutlich größerer Tiefe erreicht wird (siehe Abb. 2).

Durch den in Tiefen > 800 m herrschenden Druck besitzt das CO<sub>2</sub> 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 Mindestsperrdruck liegen. Der maximale und minimale Speicherdruck wird also durch das mechanische Materialverhalten des umgebenden Gesteins bestimmt.



**CO<sub>2</sub> density variation with depth (left) assuming hydrostatic pressure and typical temperature gradients in sedimentary basins (blue); elevated geothermal gradients (45 °Ckm<sup>-1</sup>, red) and hydrostatic pressure gradients of highly concentrated brines (12.5 MPakm<sup>-1</sup>, green). Effect of impurities (right) e.g. 2.75 % O<sub>2</sub> and other components.**

Abb. 2: Abhängigkeit der Dichte des CO<sub>2</sub> von verschiedenen Einflussfaktoren (verändert nach CHADWICK et al. 2007)

Mit zunehmender Tiefe nimmt aufgrund der Auflast die Porosität der Gesteine ab (siehe Abb. 3). Dies ist u.a. abhängig von der Lithologie und dem Mediandurchmesser der Einzelkörner (in Abb. 3 angegeben in mm). 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 CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub> abhängig (siehe Abb. 2).

Die Speichereigenschaften sowie die geologische Sicherheit der CO<sub>2</sub>-Speicherung sind von Gegebenheiten des Untergrundes und daher von nicht berechenbaren Faktoren abhängig. Die möglichst genaue Kenntnis des geologischen Aufbaues ist daher unerlässlich.

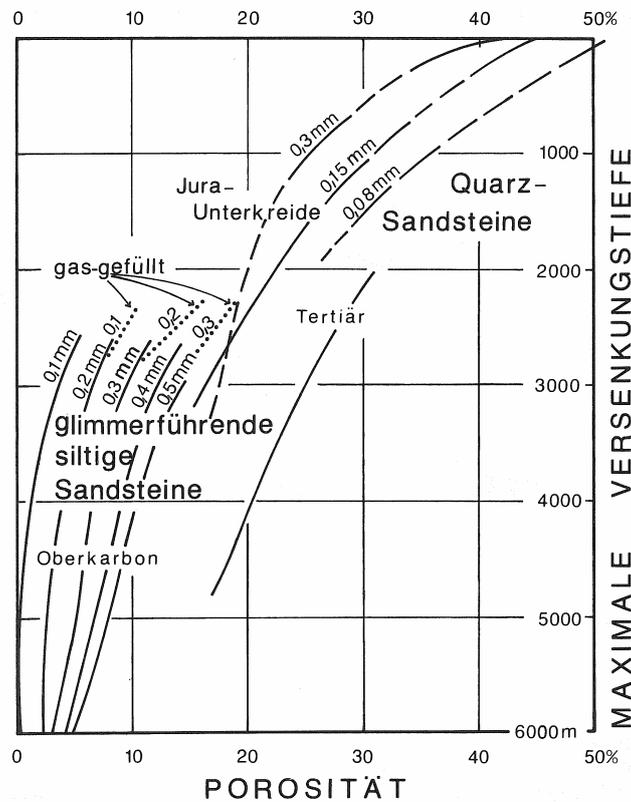


Abb. 3: Abnahme der Sandsteinporosität (an ausgewählten Gesteinen) mit zunehmender maximaler Versenkungstiefe, in Abhängigkeit vom Mediandurchmesser der Einzelkörner (FÜCHTBAUER et al. 1988)

Nach einschlägiger Literatur (z. B. RADGEN et al. 2005) kommen zur Speicherung von CO<sub>2</sub> grundsätzlich folgende Möglichkeiten in Frage (siehe Abb. 4):

- Salinare Aquifere (Grundwasserleiter)
- Ausgeförderte Erdgas- und Erdölfelder
- Tiefe Kohlenflöze
- Salzstöcke
- Ozean
- Mineralisierung

Ob eine dieser Möglichkeiten grundsätzlich für Hessen in Frage kommt, wird in dieser Vorstudie abgeprüft.

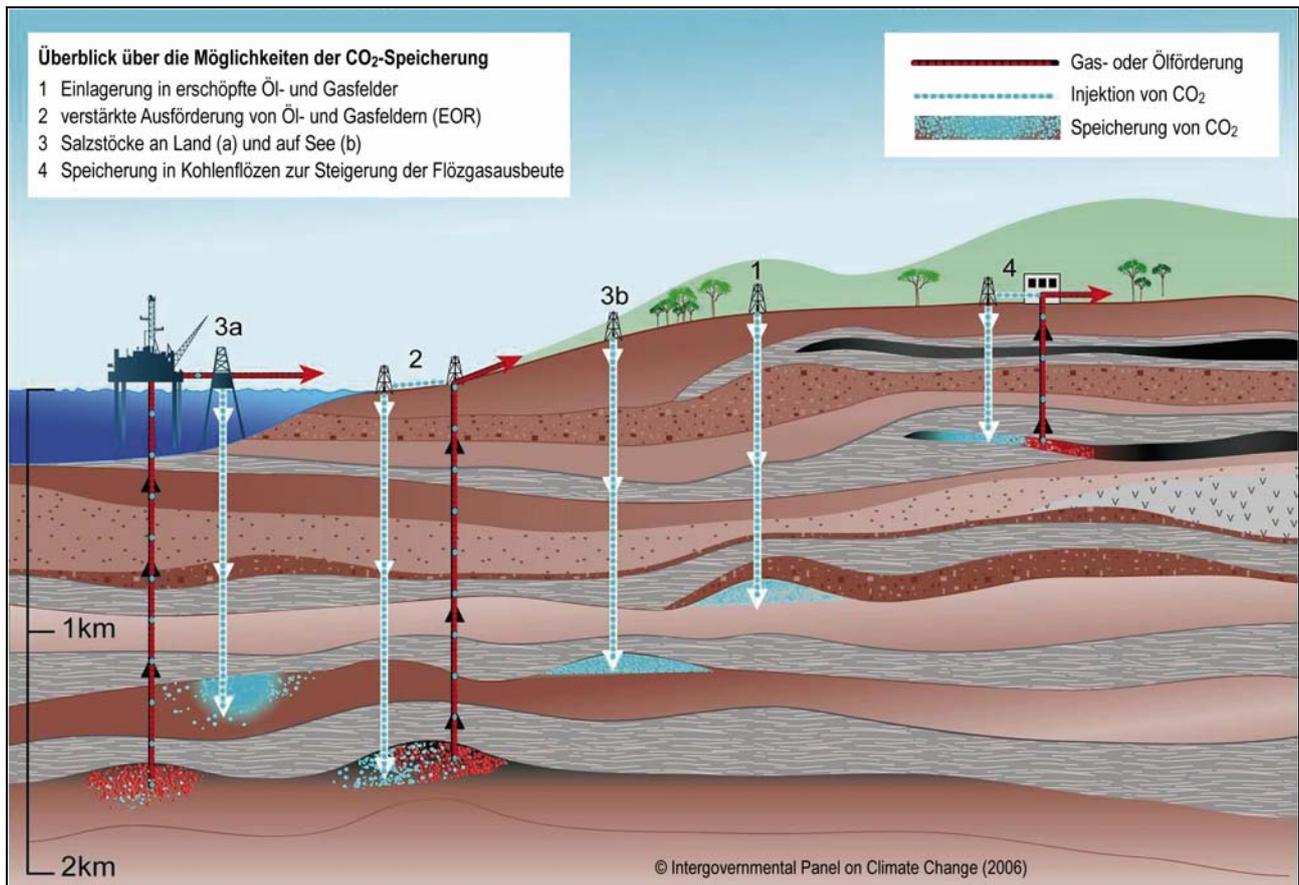


Abb. 4: Überblick über die Möglichkeiten der CO<sub>2</sub>-Speicherung

## 2.2 Speicherung und konkurrierende Nutzung

Bei einer Vielzahl von Nutzungen spielt der tiefere geologische Untergrund eine entscheidende Rolle. Hierzu gehören die folgenden Nutzungen, die mit der CO<sub>2</sub>-Speicherung in Konkurrenz stehen.

- Förderung von Erdöl und Erdgas
- Unterspeicherung von Erdgas
- Unterspeicherung 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

Eine neue und wichtige Rolle kommt tief liegenden Speichergesteinen im Zusammenhang mit der CO<sub>2</sub>-

Sequestrierung zu. Eine Vielzahl von Forschungsprojekten beschäftigt sich z. Zt. mit innovativen Techniken zur Abtrennung von CO<sub>2</sub> aus Industrieabfällen und Rauchgasen sowie deren Kostenminimierung. Parallel zu diesen Entwicklungen müssen entsprechende Erkenntnisse auch über die CO<sub>2</sub>-Einlagerung gesammelt werden. Hierzu zählt neben verfahrenstechnischen, rechtlichen und sicherheitstechnischen Aspekten auch die Abschätzung des Einlagerungsvolumens. Die CO<sub>2</sub>-Speicherung wird das Forschungs- und Entwicklungsstadium (FuE-Stadium) nur dann verlassen und künftig großtechnisch einsetzbar sein, wenn eine ausreichende Kenntnis der räumlichen Verteilung dieses Potenzials gegeben ist.

Um eine verlässliche Bilanzierung der potenziellen Speicherkapazitäten im Untergrund unter Berücksichtigung konkurrierender Nutzungsmöglichkeiten und -ansprüche vornehmen zu können, ist in naher Zukunft die Erarbeitung eines bundesweiten Informationssystems „Speichergesteine“ in der Form eines Speicherkatasters geplant. Dieses soll alle verfügbaren fachlichen Informationen über Speicher- und Abdeckformationen enthalten.

Für Hessen existiert bisher keine zusammenfassende Darstellung der Verbreitung und Ausbildung nutzbarer Speicher und ihrer gesteinsphysikalischen Eigenschaften. Detaillierte Kompilationen liegen lediglich für Regionen mit Kohlenwasserstoff (KW)-Höflichkeit bzw. -Produktion vor.

### **2.3 Generelle Aspekte, die bei der Speicherung berücksichtigt werden sollten**

Folgende Aspekte sollten generell bei der Bewertung einer geplanten Einlagerung von CO<sub>2</sub> in den tieferen Untergrund berücksichtigt werden:

- Genereller Mangel an verlässlichen Informationen über die geologischen und strukturellen Verhältnisse im tiefen Untergrund aufgrund geringer Anzahl an Kernbohrungen.
- Die Speicherkapazität der Gesteine ist bei rasch wechselnden lithologischen und faziellen Verhältnissen schwer zu bestimmen.
- Unbekannte Auswirkungen auf die Gesteinseigenschaften der Speicher- und Deckgesteine bei steigendem Druckniveau im Untergrund.
- Gewährleistung, dass die nach oben gerichtete molekulare Diffusion von CO<sub>2</sub> durch das abdichtende Gestein mindestens 10.000 Jahre dauert und diesbezügliche Monitoring-Möglichkeiten.
- Die Umweltverträglichkeit bei Lagerung großer Mengen CO<sub>2</sub> ist noch nicht hinreichend untersucht.
- Die Mobilisation von Feststoffen während der Injektion kann u. A. zu chemischen Reaktionen, Änderung der Permeabilität (gesteinsspezifisch und nicht vorhersehbar), Dichte- und

Volumenschwankungen sowie unerwünschtem Entweichen (Leckage) führen.

- Chemisch aggressive, kohlensäure heiße Lösungen greifen neben den Gesteinsformationen auch Bohrgeräte, Rohre und Verpressmaterialien an.

### 3 Stand der Forschung und Projekte

Zahlreiche nationale und internationale Forschungsvorhaben beschäftigen sich seit Ende des letzten Jahrhunderts damit, das in Kraftwerken entstehende CO<sub>2</sub> zu minimieren, es abzuscheiden und auf Dauer so zu lagern, dass es nicht in die Atmosphäre gelangen kann. Diese Projekte befinden sich in den unterschiedlichsten Forschungs- und Entwicklungsstadien (FuE).

Zu den förderpolitischen Zielen des Forschungskonzeptes **COORETEC (CO<sub>2</sub>-Reduktions-Technologien)** des Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit (BMWA) unter der Leitung des Forschungszentrums Jülich GmbH gehört die Entwicklung emissionsarmer fossil befeuerter Kraftwerke. In der COORETEC-Kurzfassung vom 03.06.2003 wird auf den FuE-Bedarf hingewiesen, der u. a. in der „systematischen katastermäßigen Erfassung von Speichermöglichkeiten...“ besteht. Dabei wird auf die entscheidende Bedeutung der Zeitachse verwiesen. „Alle Maßnahmen zur CO<sub>2</sub>-Abscheidung sind nur sinnvoll, wenn die anschließende Verwertung/Speicherung zeitgleich erfolgen und für einen ausreichend langen Zeitraum gewährleistet werden kann“.

In der Nordsee, ca. 200 km westlich von Norwegen, injiziert seit 1996 ein internationales Forschungsteam und Statoil im Sleipner-Projekt (**Saline Aquifer CO<sub>2</sub> Storage (SACS)**) jährlich ca. 1 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> in eine etwa 200 m mächtige und in etwa 1.000 m Tiefe liegende Gesteinseinheit (Utsira-Formation). Hier werden v. A. die Möglichkeiten der Überwachung der Leckagen mit konventioneller Seismik getestet. Seit 2003 finanzieren die EU und ein Industrie-Konsortium die Fortführung und Weiterentwicklung der geophysikalischen Überwachungsmethoden des CO<sub>2</sub>-Speichers Sleipner unter dem Namen **CO2STORE**. In Kooperation der BGR (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe) mit geologischen Diensten in Großbritannien (BGS), Frankreich (BRGM), den Niederlanden (NITG-TNO), Norwegen (NGU), Dänemark (GEUS) sowie Schweden-Vattenfall werden noch drei weitere offshore und onshore Fallstudien in Wales (Valleys), Dänemark (Kalundborg) und Deutschland (Niederlausitz) untersucht (BOO et al 2005, BOO et al. 2006, CHADWICK et al. 2007, FRANGEUL et al. 2004).

U. A. beschäftigt man sich mit der Auffindung, Evaluierung und Charakterisierung potenzieller Strukturen mit salinaren Aquiferen in Nordost-Deutschland, welche dem 100 km südöstlich von Berlin gelegenen, geplanten „CO<sub>2</sub>-freien“ Kraftwerk „Schwarze Pumpe“ als potenzieller CO<sub>2</sub>-Speicher dienen könnte. Mithilfe

numerischer Modellierung werden mögliche geochemische Prozesse in den jeweiligen Speicher- und Abdeckgesteinen sowie die Ausbreitung von gasförmigem und gelöstem CO<sub>2</sub> simuliert. Es soll eine standortbezogene Risikoanalyse erstellt werden.

Weiterhin finanzieren die EU und ein Konsortium von Industriepartnern seit 2006 Projekte unter dem Namen **CO2ReMoVe** (**Resear**ch on **CO<sub>2</sub> Monitoring and Verification**), die sich mit Methoden und Konzepten zur Überwachung von CO<sub>2</sub>-Speichern befassen.

Natürliche CO<sub>2</sub>-Austritte und Vorkommen (z. B. in der thüringischen Vorderrhön) untersucht seit 2001 das EU-Projekt **NASCENT** (**Natural Analogues for the Study of CO<sub>2</sub> in the Geological Environment**). Hauptaugenmerk wird auf die Erkundung der Dichtigkeit geologischer Barrieren sowie die Entwicklung geeigneter Überwachungsmethoden gelegt (BRUNE et al. 2002).

Die Forschergruppe **GESTCO** (European Potenzial for **Geological Storage of CO<sub>2</sub> from Fossil Fuel Combustion**) beschäftigte sich von 2000 bis 2003 mit der Erfassung von Speicherpotenzialen in ehemaligen Bergwerken, Öl- und Gasfeldern, Kohlenflözen und Aquiferen, der Bewertung von Speichersicherheiten und der Berechnung der Kosten von Quellen-Senken-Szenarien unter Berücksichtigung von Transportmöglichkeiten (Koordination GEUS, MAY & KRULL (2004); PIESENS & DUSAR 2002).

Im **CASTOR**-Projekt (European Castor project on the **Capture and geological Storage of CO<sub>2</sub>**) werden Methoden zur Abtrennung von CO<sub>2</sub> aus den Abgasen großer Industrieanlagen und deren Speicherung untertage in Aquiferen (Nordsee), Öllagerstätten und Erdgasfeldern sowohl im Meer als auch auf dem Festland entwickelt. Hier wird an vier Pilot- und Demonstrationsstandorten in Norwegen, Spanien, den Niederlanden und Österreich geforscht. Parallel dazu arbeitet man in dem europäischen Gemeinschaftsprojekt **ENCAP** (**Enhanced Capture of CO<sub>2</sub>**) an der Entwicklung von „Kombi-Kraftwerken mit integrierter Vergasung (IGCC)“.

Aufbauend auf GESTCO und CASTOR erstellt das von der EU und einem Industrie-Konsortium finanzierte Projekt **GEOCAPACITY** seit 2006 ein Informationssystem zur Lage von CO<sub>2</sub>-Emissionsquellen und deren CO<sub>2</sub>-Speichermöglichkeiten.

Das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi), die EU und einige Partner aus der Industrie führen seit 2004 unter der Koordination des Geoforschungszentrums (GFZ) Potsdam Untersuchungen am ehemaligen Gasspeicher Ketzin nahe Berlin (**CO2Sink**) durch (FORSTER et al. 2006).

**CO2GEONET** (European Network of Excellence on **Geological Storage of CO<sub>2</sub>**) koordiniert seit 2004, die Projekte, die sich mit der Speicherung von CO<sub>2</sub> beschäftigen (SCHULZ et al. 2007).

Universitäten	Bergakademie Freiberg
	RWTH Aachen
	TU Berlin
	TU Hamburg-Harburg
	Universität Duisburg-Essen
	Universität Karlsruhe
	Universität Stuttgart
Forschungseinrichtungen	Alfred Wegener Institut
	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
	Deutsche Wissenschaftliche Gesellschaft für Erdöl, Erdgas und Kohle e.V.
	Forschungszentrum Jülich GmbH
	Forschungszentrum Karlsruhe
	Fraunhofer Institut für Chemische Technologie
	Fraunhofer Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung
	Geo Forschungs-Zentrum Potsdam
	Potsdam-Institute for Climate Impact Research
	VDI Technologiezentrum
Industrieunternehmen	DBI-GAS- und UMWELTECHNIK GmbH
	Deutsche Shell
	Deutsche Steinkohle Aktiengesellschaft
	G.E.O.S. Freiberg Ingenieurgesellschaft mbH
	Krupp Uhde GmbH
	Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH
	Lurgi AG
	Mannesmann Anlagenbau AG
	RWE Energie AG
	Siemens AG Power Generation
	Verbundnetz Gas Aktiengesellschaft
	VGB
	Sonstige
BMWA	
UBA	

Abb. 5: Deutsche Akteure der CO<sub>2</sub>-Rückhaltung (RADGEN et al. 2005)

**CSEGR** (Carbon Sequestration with Enhanced Gas Recovery) ist ein Projekt, das seit 2005 vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) finanziert wird und numerische Transport-Modellierungen an zwei erschöpften Erdgasfeldern in der Altmark (Rotliegend) und in Niedersachsen (Buntsandstein) durchführt (VOSTEEN 2005).

An der RWTH Aachen untersucht man seit 2006 im Labor unter den jeweiligen Druck- und Temperaturverhältnissen das aggressive Verhalten von CO<sub>2</sub> gegenüber den möglichen Speicher- und Abdeckgesteinen. Hierbei sollen Rückschlüsse auf die Transport- und Zersetzungsprozesse sowie die Dichtigkeit von Gesteinen gezogen werden. Außerdem werden die Wechselwirkungen des CO<sub>2</sub> speziell mit Kohle untersucht.

Die in Abb. 5 aufgeführten Behörden, Institute, Forschungseinrichtungen und Industrieunternehmen sind momentan die deutschen Akteure, die sich mit der CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Speicherung beschäftigen.

## 4 Vorgehensweise und Datengrundlage

Möglichst genaue Kenntnisse des geologischen Untergrundes zur Beurteilung der Eignung als CO<sub>2</sub>-Speicher sind unumgänglich. Neben zahlreichen Veröffentlichungen zu den verschiedensten geologischen Themenbereichen stehen vor allem die geologischen Karten 1: 25.000 mit Erläuterungen zur Verfügung. Allerdings liegen nur von etwa 1/3 der hessischen Landesfläche neuere Kartierungen (nach 1950) mit ausführlichen Erläuterungen vor. Diese geben aber einen guten Überblick über die Lage und Verbreitung von Lagerstätten (Erdöl- und Erdgasfelder, Kohlenflöze und Salzkavernen) sowie die lithologische Ausprägung der unterschiedlichen Gesteinseinheiten. Hydrogeologische Kartierungen und Untersuchungen zu Durchlässigkeiten (z. B. SCHRAFT & RAMBOW 1984, PRINZ & HOLTZ 1989) geben Hinweise auf die nutzbaren Hohlräume der Einheiten sowie die Lage der Grundwasserleiter.

Nach folgenden Fragestellungen wurde vorgegangen:

- 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 CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub>-Speicherung?

### 4.1 Auswahlkriterien (Gesteinseigenschaften)

Zuerst werden die Gesteine in Hessen ausgeklammert, die für die CO<sub>2</sub>-Speicherung ungeeignet, d.h. zu dicht sind (siehe Kapitel 5). Gesucht werden Gesteinseinheiten, die ein möglichst großes Hohlraumvolumen aufweisen.

Eine Möglichkeit, CO<sub>2</sub> im Untergrund zu speichern, ist eine Injektion in tiefe salinare Aquifere (Grundwasserleiter). Aquifere sind poröse Gesteinsschichten im Untergrund, die aufgrund ihrer Porosität und Permeabilität die Fähigkeit besitzen, Flüssigkeiten und Gase transportieren und speichern zu können. Je nach Art der Hohlräume unterscheidet man Poren-, Kluft- und Karstgrundwasserleiter, wobei sich v. a. Porengrundwasserleiter für die CO<sub>2</sub>-Speicherung eignen.

Porengrundwasserleiter sind Gesteine, bei denen die Poren zwischen den Einzelkörnern nach der Ablagerung der Gesteinspartikel erhalten blieben oder sich sekundär neu öffneten. Um eine effektive Einspeisung zu

ermöglichen, sollte das Speichergestein (meist grobkörnige Sandsteine und klüftige Kalksteine) eine Porosität von mindestens 10 % (siehe Tab. 2) und eine Mächtigkeit von mindestens 20 m aufweisen (MAY, mündl. Mittl.). Die Permeabilität hingegen sollte nur an der Injektionsstelle hoch sein, ansonsten wegen der Speichersicherheit eher geringer. Leider sind Angaben über Porositäten und Permeabilitäten der jeweiligen Gesteine eher selten. Im Hangenden des Speichergesteines wird eine mindestens 50 m mächtige, impermeable Deckschicht (Tone, Salze) vorausgesetzt, unter dessen sich das CO<sub>2</sub> lateral entlang, aber nicht vertikal nach oben (z. B. an Klüften) bewegen kann. Möglich sind hier auch mehrere abdichtende Schichten, so genannte „multiple Barrieren“.

Tab. 2: Eigenschaften der Speicher- und Deckschichten (nach CHADWICK et al. 2007)

Speichereigenschaften	geeignet	weniger geeignet
Tiefe [m unter GOK]	1.000 – 2.500	< 800 und > 2.500
Mächtigkeit [m]	> 50	< 20
Porosität [%]	> 20	< 10
Permeabilität [mD]	> 300	< 10 - 100
Deckschichteigenschaften		
Laterale Kontinuität	ungestört	gestört, variierend
Mächtigkeit [m]	> 100	< 20

Aquiferspeicher müssen ausreichend groß und durch Bohrungen in ihrer horizontalen und vertikalen Ausdehnung hinreichend bekannt sein.

## 4.2 Bohrungen und Tiefenlinienpläne

Die Schichtenverzeichnisse der Bohrungen aus dem Archiv des HLUG, die in analoger (Bohrkataster) und digitaler Form (GEODIN) vorliegen, lassen Aussagen über die Tiefenlage der für die CO<sub>2</sub>-Einlagerung in Frage kommenden Schichten zu.

Insgesamt wurden ca. 1.200 Bohrungen gesichtet (siehe Anhang 2) und zur Ausarbeitung von Tiefenlinienplänen der jeweiligen Schichten hinzugezogen. Allerdings sind nur etwa 500 Bohrungen tiefer als 500 m und nur knapp 200 geben Auskunft über die Gesteine in über 800 m Tiefe; die meisten davon wurden im Oberrheingraben abgeteuft (siehe Abb. 6 b).

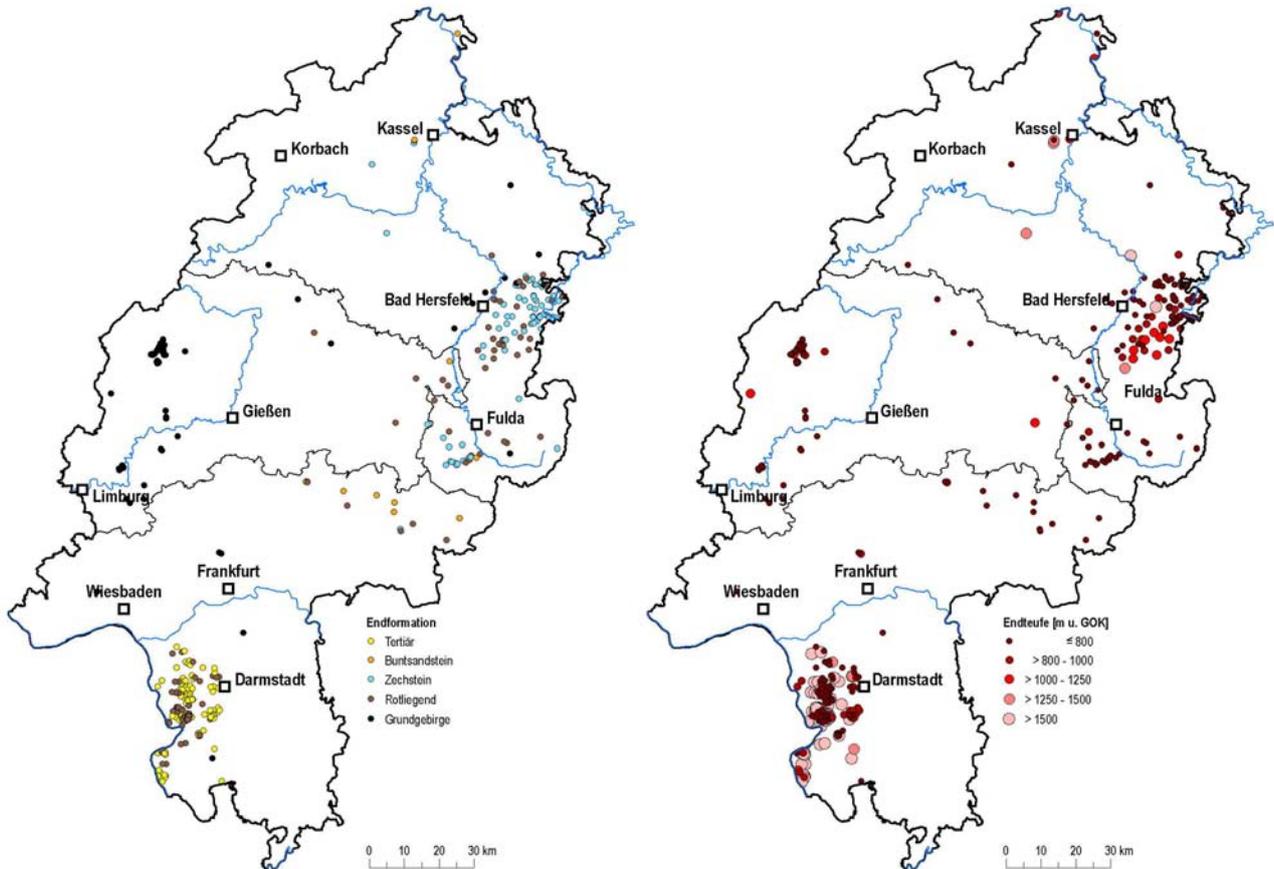


Abb. 6 a und b: Bohrungen mit einer Teufe > 500 m aus dem Archiv des HLUG

In der kompletten Tabelle mit allen 1.200 Bohrungen (siehe Anhang 2) sind die Oberflächen der jeweiligen Schichten in m unter GOK angegeben. Die durchschnittlichen Standard-Schichtmächtigkeiten der jeweiligen geologischen Karten wurden, soweit möglich, zu den erbohrten Endteufen bzw. Endformationen hinzugerechnet und in die Auswertung mit einbezogen (beispielhaft in der Legende der Tabelle 3 erklärt).

Mithilfe des digitalen Höhenmodells (Abb. 8) wurden die Höhenlagen der Ausbisse der entsprechenden Schichtgrenzen der geologischen Karte bezogen auf NN bestimmt. In ArcView (einem Geographischen Informationssystem der Fa. ESRI Inc.) wurde eine Ebene durch die Ausbisse auf der geologischen Karte und die entsprechenden Schichtgrenzen in den Bohrungen gelegt (siehe Abb. 7). 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.

Tab. 3: Ausschnitt aus der Tabelle der zur Bearbeitung hinzugezogenen Bohrungen (komplette Tabelle siehe Anhang 2)

Durchteufte Formationen	Endteufe [m unter GOK]	Endformation	Top sm (Mittl. Buntsandstein)	Top su (Unterer Buntsandstein)	Top z (Zechstein)	Top r (Rotliegend)	Top g (Grundgebirge)
ZD	186	D	x	x	0	x	150
QSZ	587	Z6	132	?	526	690	

10 = in der Bohrung angetroffene Gesteinsgrenze [in Meter unter Geländeoberkante]

x = Gesteine nicht vorhanden (im Beispiel Zeile 1 wurden nur Zechstein und Devon durchteuft, Buntsandstein und Rotliegend kommen nicht vor)

? = Grenze vorhanden, aber nicht feststellbar

690 = Grenze nicht durchteuft, da Bohrung nicht tief genug, aber durchschnittliche Mächtigkeit (hier z1-z5) nach der jeweiligen GK25 zur Endteufe hinzugerechnet

Q = Quartär          S = Buntsandstein          Z = Zechstein          D = Devon

Das Raster der Schichtoberfläche, welches auf NN-Werten beruht, wurde wiederum vom digitalen Höhenmodell abgezogen, so dass man nun die jeweilige Tiefenlage unter der Geländeoberfläche erhält. Die für die CO<sub>2</sub>-Speicherung entscheidende 800-Meter-Tiefenlinie sowie die 1.000-Meter-Tiefenlinie sind farbig in den jeweiligen Abbildungen hervorgehoben.

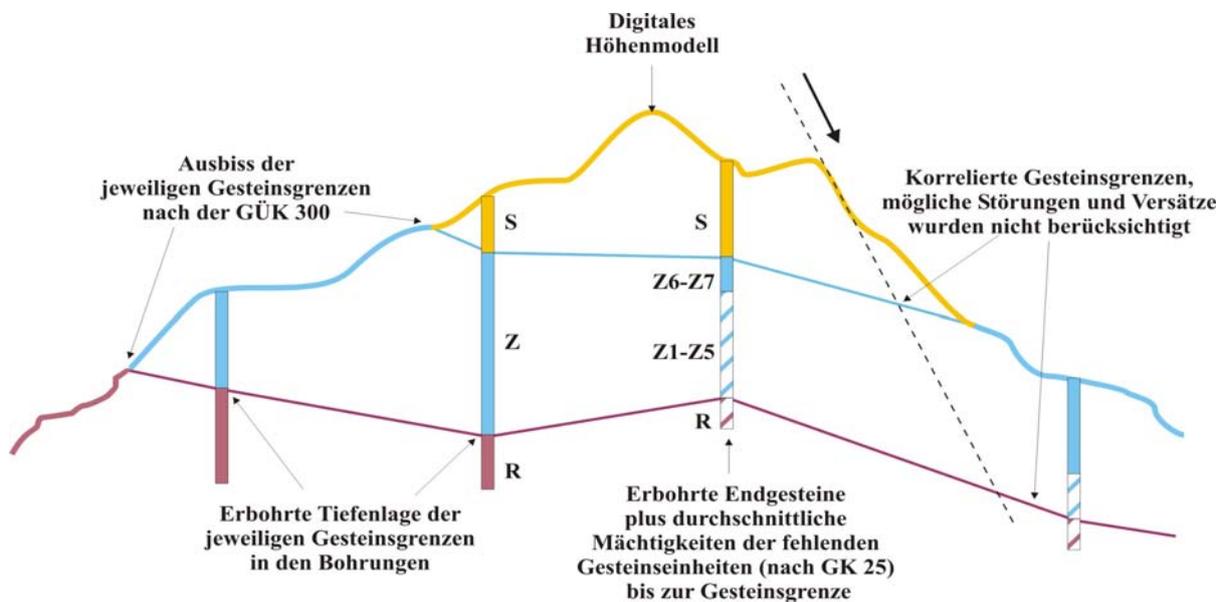


Abb. 7: Konstruktion der Speichergesteins-Oberflächen mit Hilfe der Geologischen Übersichtskarte 1:300.000, des Digitalen Höhenmodells und der Bohrungen



## Digitales Höhenmodell

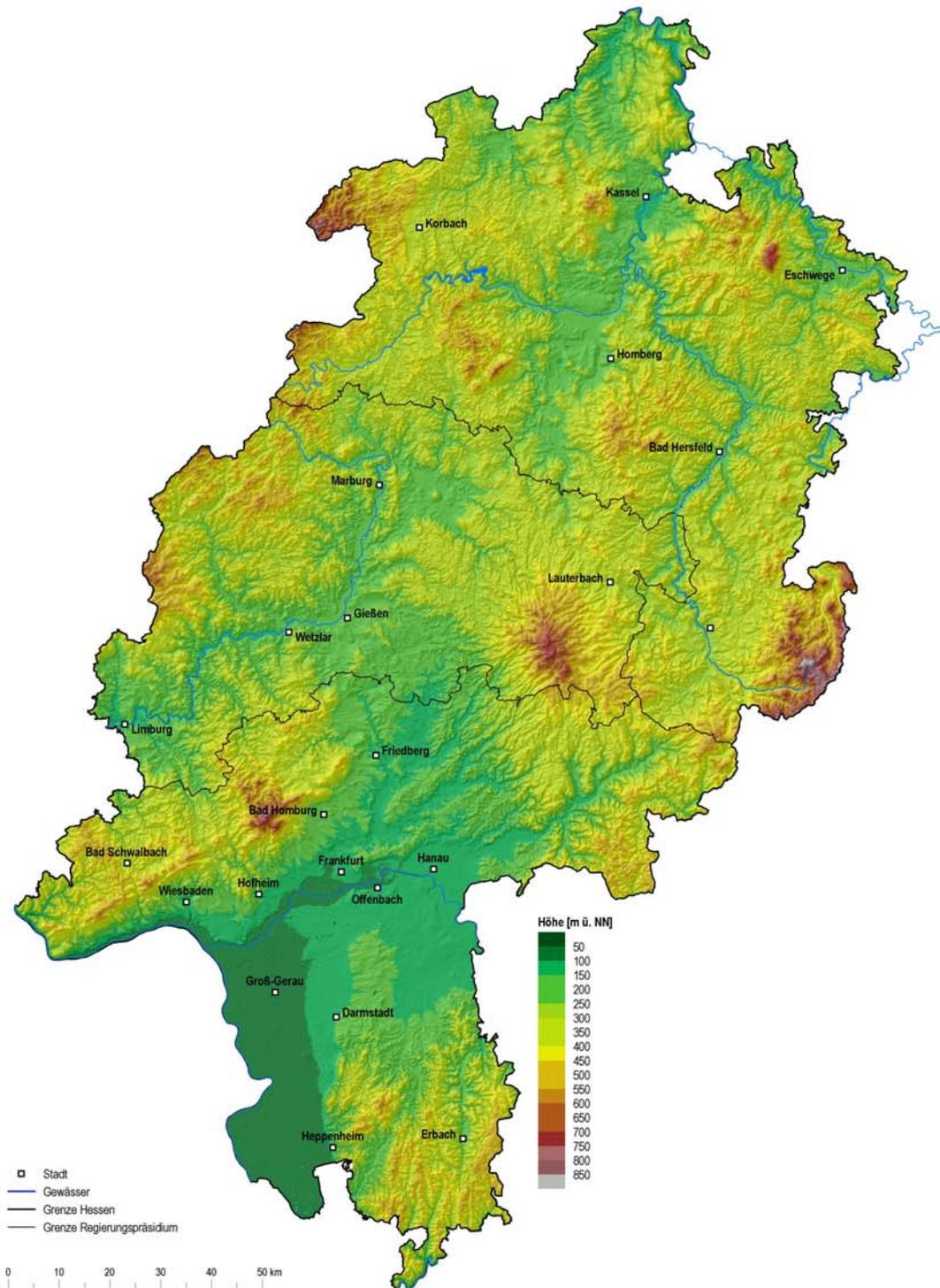


Abb. 8: Digitales Höhenmodell von Hessen

## 5 Ausschlussgebiete – für die Speicherung von CO<sub>2</sub> ungeeignete Gebiete

Als potenzielle CO<sub>2</sub>-Speicher können Gesteine ausgeschlossen werden, die kein oder kaum nutzbares Hohlraumvolumen besitzen.

Dazu zählt das **kristalline Grundgebirge**, das **in Odenwald und Spessart** zutage tritt und aus metamorphen und magmatischen Gesteinen besteht (siehe Abb. 9). 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 klutfarmen Granite, Granodiorite, Diorite und Gabbros des Odenwaldes insgesamt nur schlecht wasserwegsam (UDLUFT et al. 1957, DIEDERICH et al. 1991).

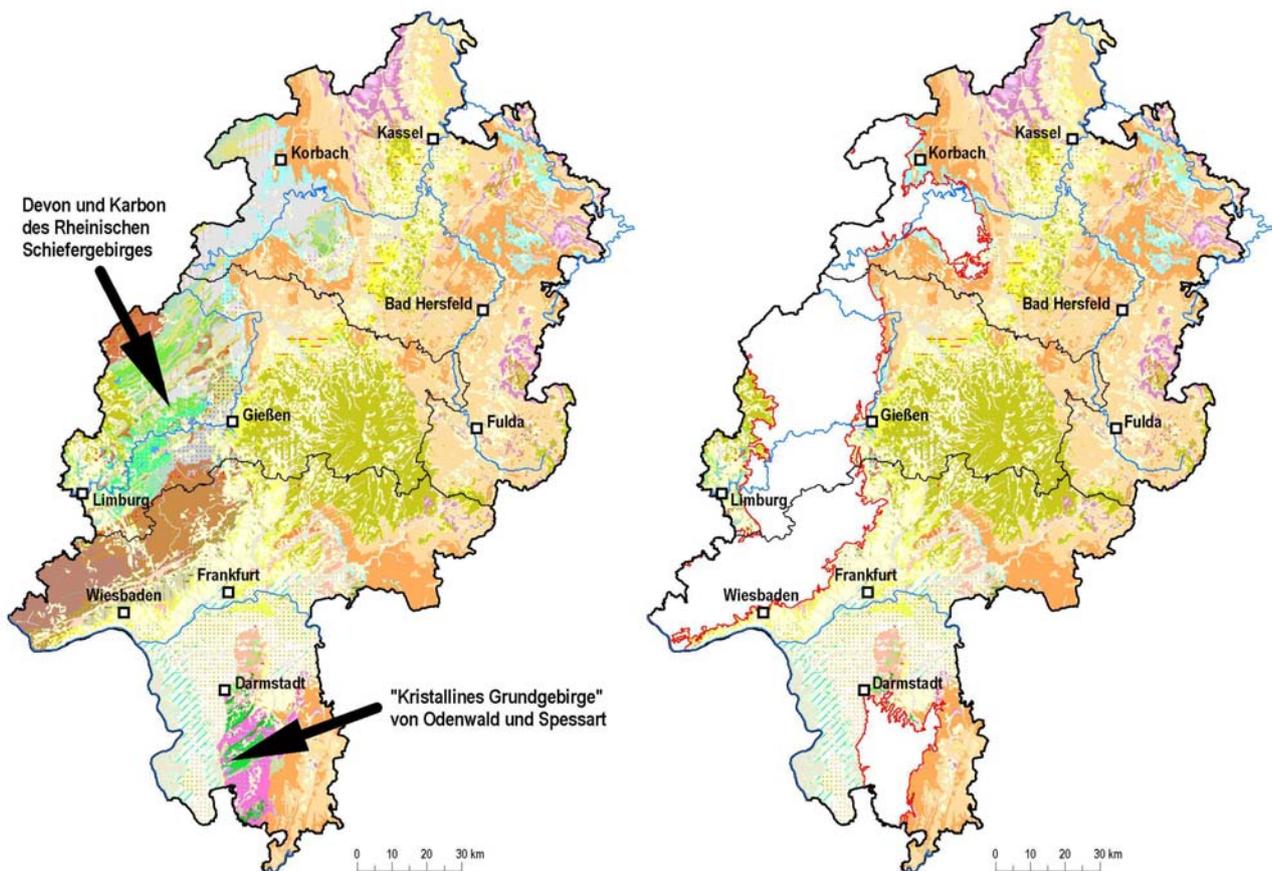


Abb. 9: Geologische Übersichtskarte (GÜK 300) von Hessen (links), Ausschlussgebiete für CO<sub>2</sub>-Speicherung sind weiß dargestellt (rechts)

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 Massenkalk (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 (Abb. 10) 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 CO<sub>2</sub> aus dem Untergrund.



*Abb. 10: Gefaltete und gestörte Gesteinsschichten des Devon im Rheinischen Schiefergebirge (Foto: KÖTT)*

#### Fazit:

- Gebiete, die sich für die Speicherung von CO<sub>2</sub> nicht eignen (Ausschlussgebiete), sind aufgrund der Gesteinseigenschaften und Strukturgeologie gut belegt.
- Sowohl das kristalline Grundgebirge, das in Odenwald und Spessart zutage tritt und aus metamorphen und magmatischen Gesteinen besteht, als auch die gefalteten und geschieferten Ton-, Kiesel- und Flaserschiefer, Grauwacken, Sandsteine und Quarzite des Rheinischen Schiefergebirges können als potenzielle CO<sub>2</sub>-Speicher ausgeschlossen werden, da sie kein oder kaum nutzbares Hohlraumvolumen besitzen.

## 6 Speicherung in tiefen salinaren Aquiferen

### 6.1 Nord- und Osthessen (Hessische Senke)

Zur Zeit des Perm befand sich zwischen der Nordost-Südwest verlaufenden Hunsrück-Oberharz-Schwelle im Nordwesten und der parallel dazu verlaufenden Spessart-Rhön-Schwelle im Südosten (siehe Abb. 11) die Saar-Werra-Senke, in die der Abtragungsschutt in Form klastischer Sedimente transportiert wurde. Im Beckenbereich waren aber bereits ab dem Rotliegend schmale, Nordwest-Südost streichende Querschwellen (z. B. Baumbach-Schwelle) und -senken vorhanden (KULICK et al. 1984), die den Sedimentationsraum unterteilten.

#### 6.1.1 Rotliegend

Das Perm ist auf der geologischen Zeitskala der jüngste Abschnitt des Erdaltertums (Paläozoikum) an der Grenze zum Erdmittelalter (Mesozoikum) und ist in Deutschland in die Epochen Rotliegend und Zechstein unterteilt. Das Rotliegend stellt einen Zeitraum zwischen 299 und etwa 257 Millionen Jahren dar.

Außerhalb der Saar-Werra-Senke wurden vermutlich keine Gesteine des Rotliegend abgelagert oder sie wurden vor der anschließenden Zechstein-Transgression wieder abgetragen (KUPFAHL 1981). Lediglich die Bohrung Reinhardswald 1 (Blatt 4423 Oedelsheim) weist Rotliegend-Gesteine auf.

Zwischen Odenwald und Taunus (MARELL 1989) bis hin zur Wetterau (KOWALCZYK 1983) steht das Rotliegend oberflächlich oder oberflächennah an und kommt daher als potenzielles CO<sub>2</sub>-Speichergestein nicht in Frage (siehe Abb. 11, bunte 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 Südost-Hang der Hunsrück-Oberharz-Schwelle auch gröbere Sandsteine und Konglomerate. Die unterhalb der Zechsteinbasis anzutreffenden Rotliegend-Gesteine können von Bohrung zu Bohrung unterschiedlich ausgeprägt sein (siehe Abb. 12). 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.

**Top Rotliegend**  
**in Meter unter Geländeoberkante**

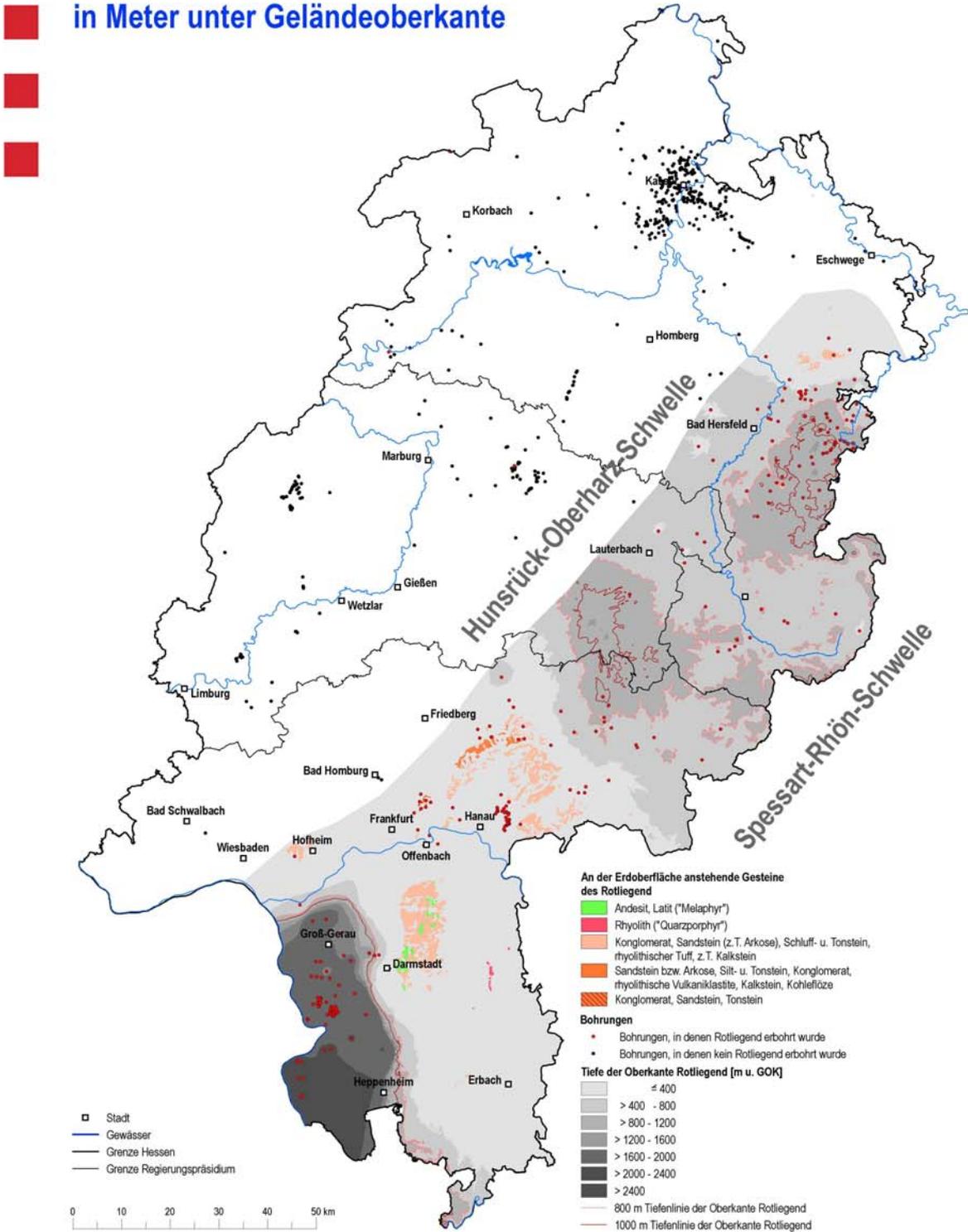


Abb. 11: Verbreitung des potenziellen Rotliegend-Speichers und Tiefenlage der Grenze Rotliegend-Zechstein

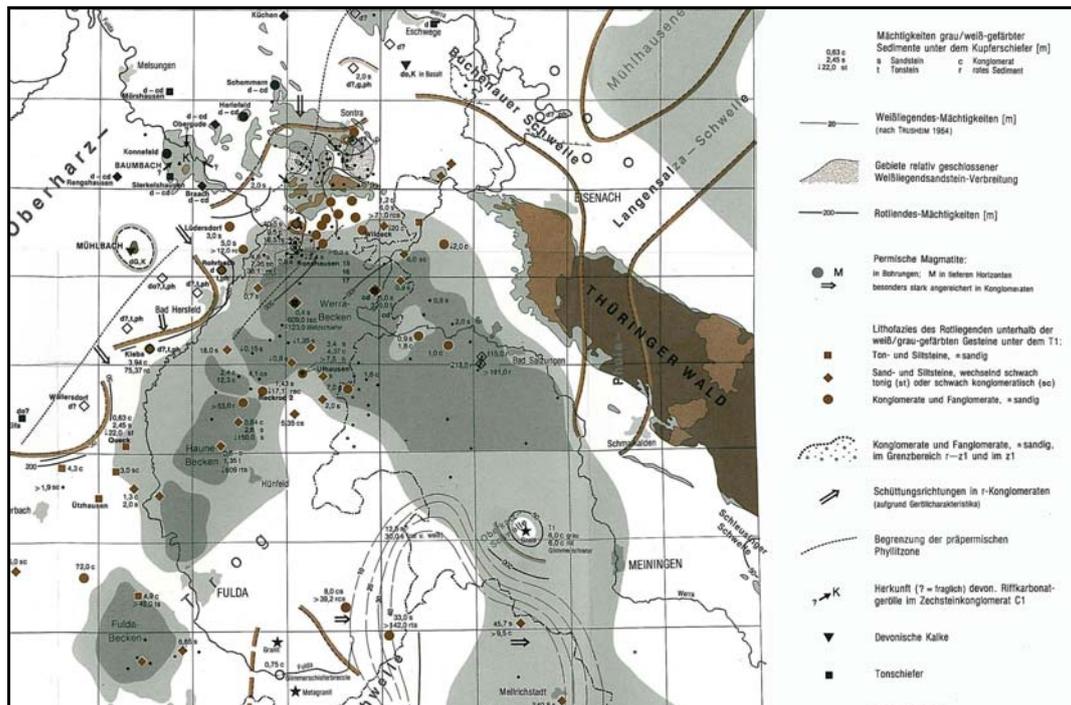


Abb. 12: Ausschnitt aus der Karte: Paläogeographie zur Zeit des Rotliegend (KULICK et al. 1984) mit Bohrungen, die ins Rotliegend reichen sowie die angetroffene Lithologie (runde Symbole = Konglomerate und Sande)

Die gesamte Sedimentabfolge des Rotliegend im Hessischen Becken kann Mächtigkeiten von mehr als 600 m (Bohrung Weißenborn 2) erreichen (nach KOWALCZYK 1983 sogar ca. 1.000 m), reduziert sich aber nach Nordwesten hin gegen die Hunsrück-Oberharz-Schwelle kontinuierlich (FRITSCHKE et al. 2000). 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 Neuhoof weist auf ungünstige Aufnahmefähigkeiten hin. Lediglich die Gesteine mit sandig-kiesiger Matrix (z. B. in Bohrung Reckrod 2) könnten genügend Porenraum aufweisen, um als CO<sub>2</sub>-Speicher in Frage zu kommen. Eine genaue Sichtung der Bohrverzeichnisse des HLUK könnte evtl. hierüber Aufschluss geben.

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 starke Faziesdifferenzierungen auf (BECKER 2002). So sind z. B. die salinaren Sedimente nur im Werra- und Fulda-Becken anzutreffen und dort auch nicht flächendeckend verbreitet (Salzhang und Auslaugungsgebiete). Daher sind Aussagen über die Eignung des Zechstein als Deckgestein aufgrund seiner unterschiedlichen lithologischen Ausprägung schwierig. In Regionen salinärer Ausprägung könnte sich der Zechstein aufgrund der Fließeigenschaften des Salzes recht gut als Deckgestein eignen. Allerdings durchschlagen häufig Basaltgänge (siehe Abb. 13), an denen CO<sub>2</sub> leicht aufsteigen kann, die Schichten des Zechstein. Diese haben zur Imprägnierung des Zechstein-Salinars mit CO<sub>2</sub> geführt. Örtlich wurden

Salzwasseraufstiege aus dem Rotliegend in Gruben des Zechsteinsalinars festgestellt (FRITSCHÉ, mündl. Mittl.).

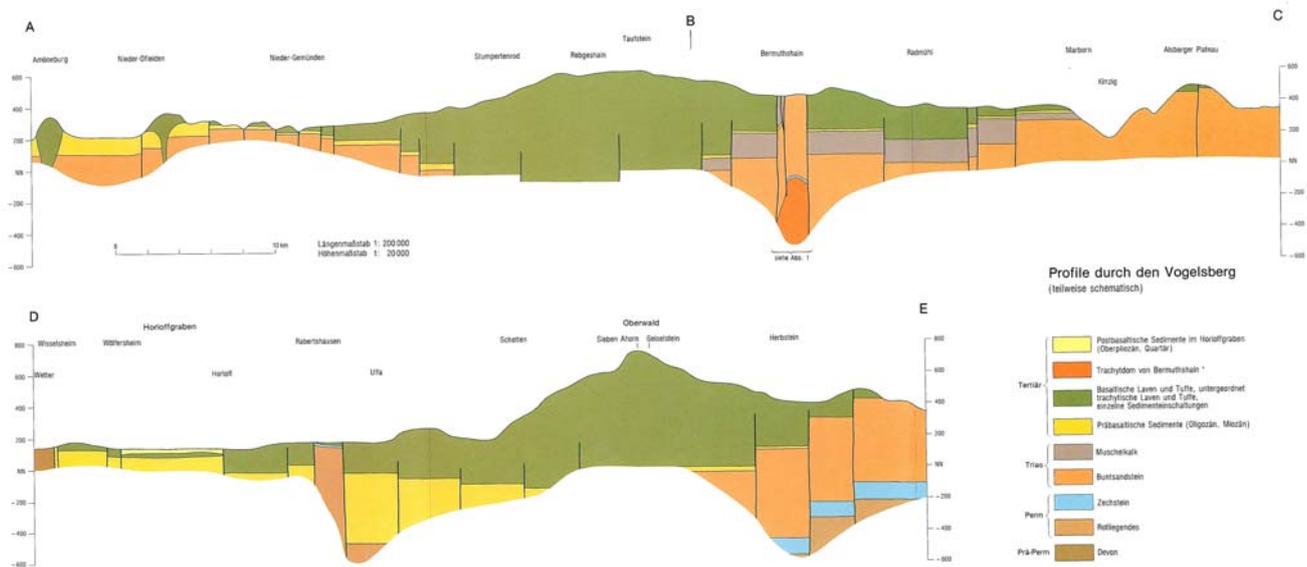


*Abb. 13: Basaltgänge im Salzbergwerk Merkers (Foto: FRITSCHÉ)*

Im Bereich des Vogelsberges und der Rhön dürfte die Oberfläche des Rotliegend ebenfalls tiefer als 800 m liegen (siehe Abb. 11). Allerdings erreicht nur eine Bohrung (Bohrung Herbstein) bei 968 m unter der Geländeoberkante Gesteine des Rotliegend. Die Bohrungen, die bis ins Rotliegend reichen, wurden in dieser Studie über weite Distanzen korreliert, ohne die tektonischen Gegebenheiten zu berücksichtigen. Gerade im Vogelsberg sind mehrere Schollen (siehe Abb. 14 und Abb. 15) vorhanden (z. B. die Hungen-Schotten-Tiefscholle), auf denen die Basaltbasis jeweils mehrere Zehner Meter versetzt angetroffen wurde (EHRENBERG & HICKETHIER 1985).

Die Eignung der vulkanischen Gesteine des Vogelsberges als Deckgestein ist eher zweifelhaft. Zwar sind die den Basalten immer wieder zwischengelagerten Tuffe häufig tonig verwittert, sie sind allerdings nur lokal verbreitet und räumlich eng begrenzt. Die Basalte hingegen können, wie u. a. die Forschungsbohrung 1996 bei Ulrichstein zeigte, bis in Tiefen von 660 m noch engständig und offen geklüft sein.

Die für den Vogelsberg typischen schwebenden Grundwasserstockwerke (LEBMANN et al. 1998, 2001) weisen auf komplexe Lagerungsverhältnisse hin. In der Bohrung Herbstein liegen dem Rotliegend allerdings noch knapp 100 m Gesteine des Zechstein und gut 300 Meter Gesteine des Unteren Buntsandstein auf, die sich als Deckschicht eignen könnten.



Geol. Jb. Hessen, 113, Wiesbaden 1985

Abb. 14: Geologische Profile durch den Vogelsberg (EHRENBERG & HICKETHIER 1985). Deutlich ist hier die unterschiedliche Höhenlage des Rotliegend (dunkelorange) und Zechstein (blau) zu sehen.

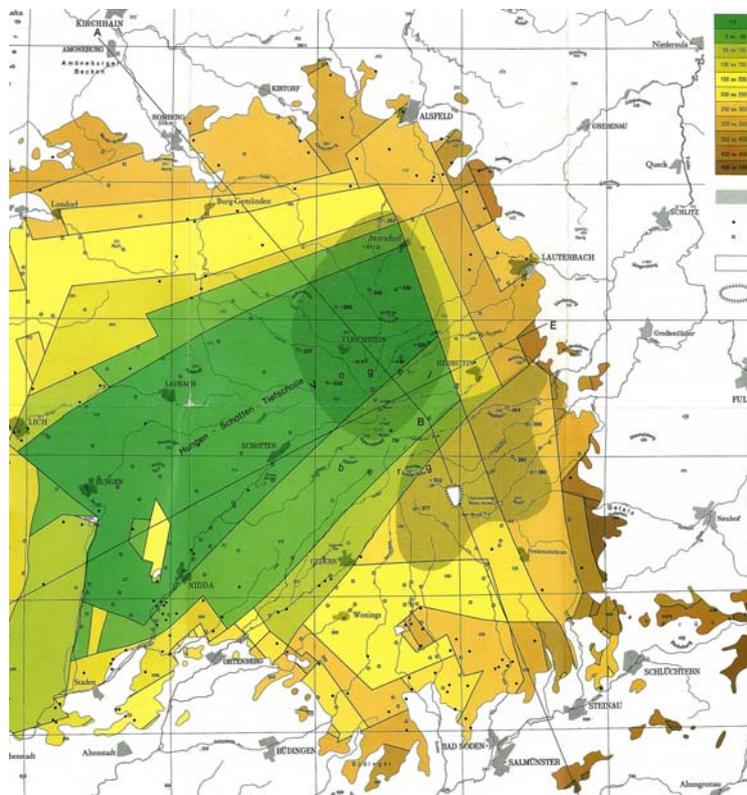


Abb. 15: Der Schollenbau der Basaltbasis des Vogelsberges (EHRENBERG & HICKETHIER 1985).

## Fazit

- Es liegen keinerlei Angaben über Porositäten und Permeabilitäten der Rotliegend-Gesteine vor.
- Die Lithologien der angetroffenen Rotliegend-Gesteine variieren auf kleine Distanzen häufig von Bohrung zu Bohrung (KULICK et al. 1984). Laterale Kontinuität ist auch aufgrund der Schwellen und Senken nicht gegeben.
- Der überlagernde Zechstein könnte sich in Regionen salinärer Ausprägung u.a. aufgrund der Fließeingenschaften des Salzes recht gut als Deckgestein eignen, wenn dort keine Basaltgänge vorhanden sind, die den Aufstieg von CO<sub>2</sub> begünstigen. In den übrigen Regionen kann aufgrund der starken Faziesunterschiede keine Aussage über die Eignung als Deckgestein getroffen werden.
- Die Anzahl der Bohrungen im Vogelsberg und in der Hohen Rhön reichen bei weitem nicht aus, um Aussagen über einen möglichen Speicher machen zu können.

### **6.1.2 Zechstein**

Der Zechstein ist der jüngere Teil des Perm und spiegelt den Zeitraum von ca. 257 bis 251 Millionen 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 calcitische Serie (Ca3), die überlagert werden von pelitisch-karbonatischen Wechselfolgen (Ca3T). Der Plattendolomit ist in der gesamten hessischen Zechsteinsenke bis in deren Randgebiete verbreitet. Je nach seiner Entstehung in unterschiedlichen Flachwasserbereichen weist er fazielle Änderungen auf. Abhängig von der Höhenlage auf den Haupt- und Querswellen (siehe Abb. 16) setzte die Sedimentation des Ca3 früher oder später oder gar nicht ein (BECKER & KULICK 1999). 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.

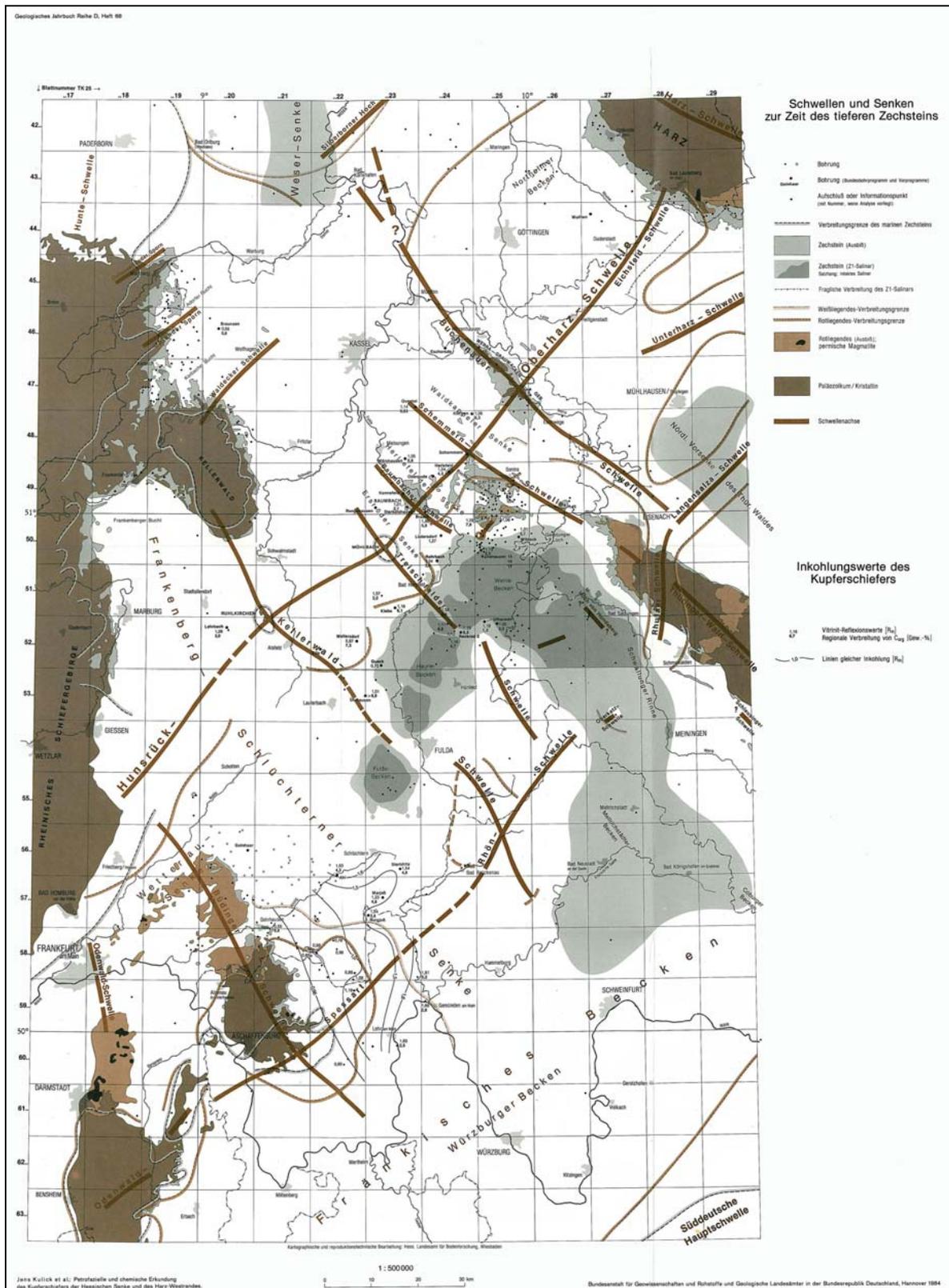


Abb. 16: Paläogeographie des Zechstein mit Schwellen und Trögen (KULICK et al. 1984)

Der Plattendolomit besitzt meist aufgrund der 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 schlottenartiger 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.

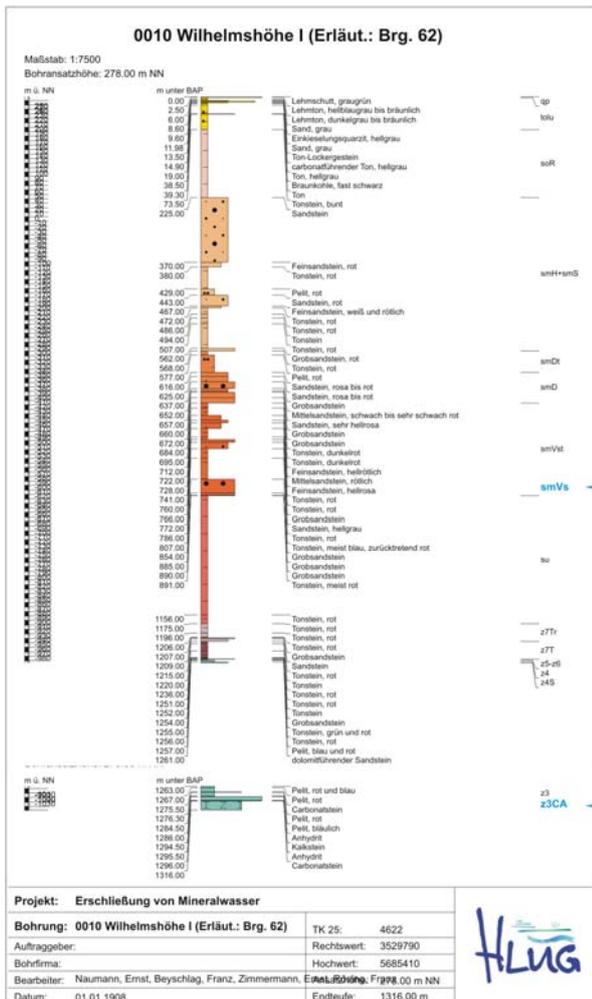


Abb. 17: Bohrprofilssäule der Bohrung Wilhelmshöhe I (Kassel) mit den potenziellen Speicher- (Pfeil) und Deckschichten (Klammer)

Im Raum Kassel wurde der Plattendolomit lediglich in 2 Bohrungen (Wilhelmshöhe I (siehe Abb. 17) und II) in der erforderlichen Tiefe von > 800 m angetroffen (1.295 bzw. 1.273 m u GOK). Die übrigen Bohrungen wurden vor Erreichen des Zechstein eingestellt. Daher ist die 800m-Tiefenlinie (Abb. 18) der Oberkante Plattendolomit ein rein rechnerischer Wert, der aus der aus weniger tiefen Bohrungen berechneten Höhenlage und dem digitalen Höhenmodell ohne Berücksichtigung von Störungen und Schollen konstruiert wurde (siehe Kapitel 4.2). Die Mächtigkeiten des Ca3 können zwischen 20 und 30 m schwanken.



## Top Plattendolomit



## in Meter unter Geländeoberkante

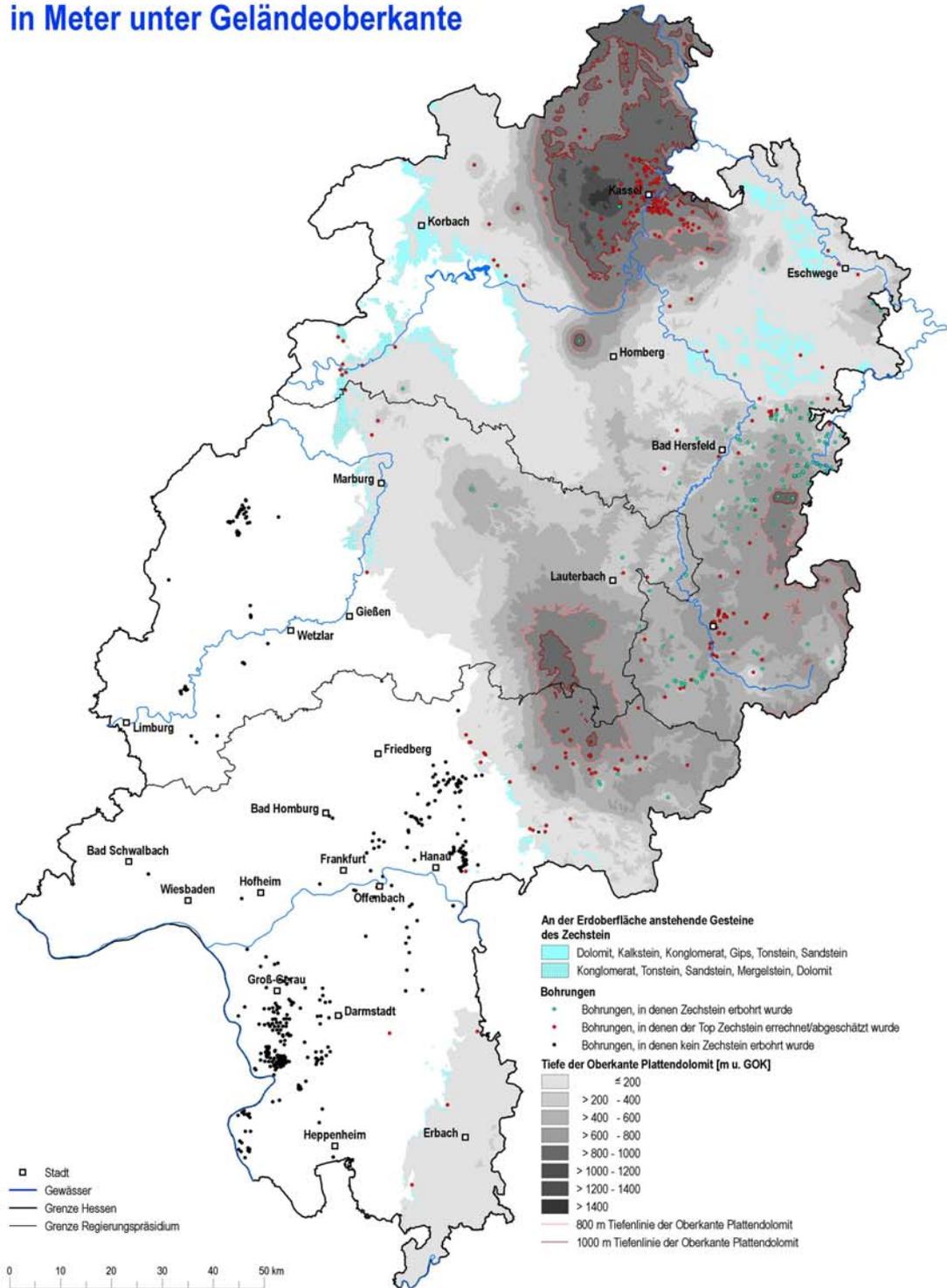


Abb. 18: Verbreitung und Tiefenlage der Oberkante des potenziellen Speichers Plattendolomit (zCa3)

**Mächtigkeiten der Deckschichten  
(z4 - z7 und su) oberhalb des  
Plattendolomit in Meter**

(bei Tiefenlage des Plattendolomits > 800 m u. GOK)

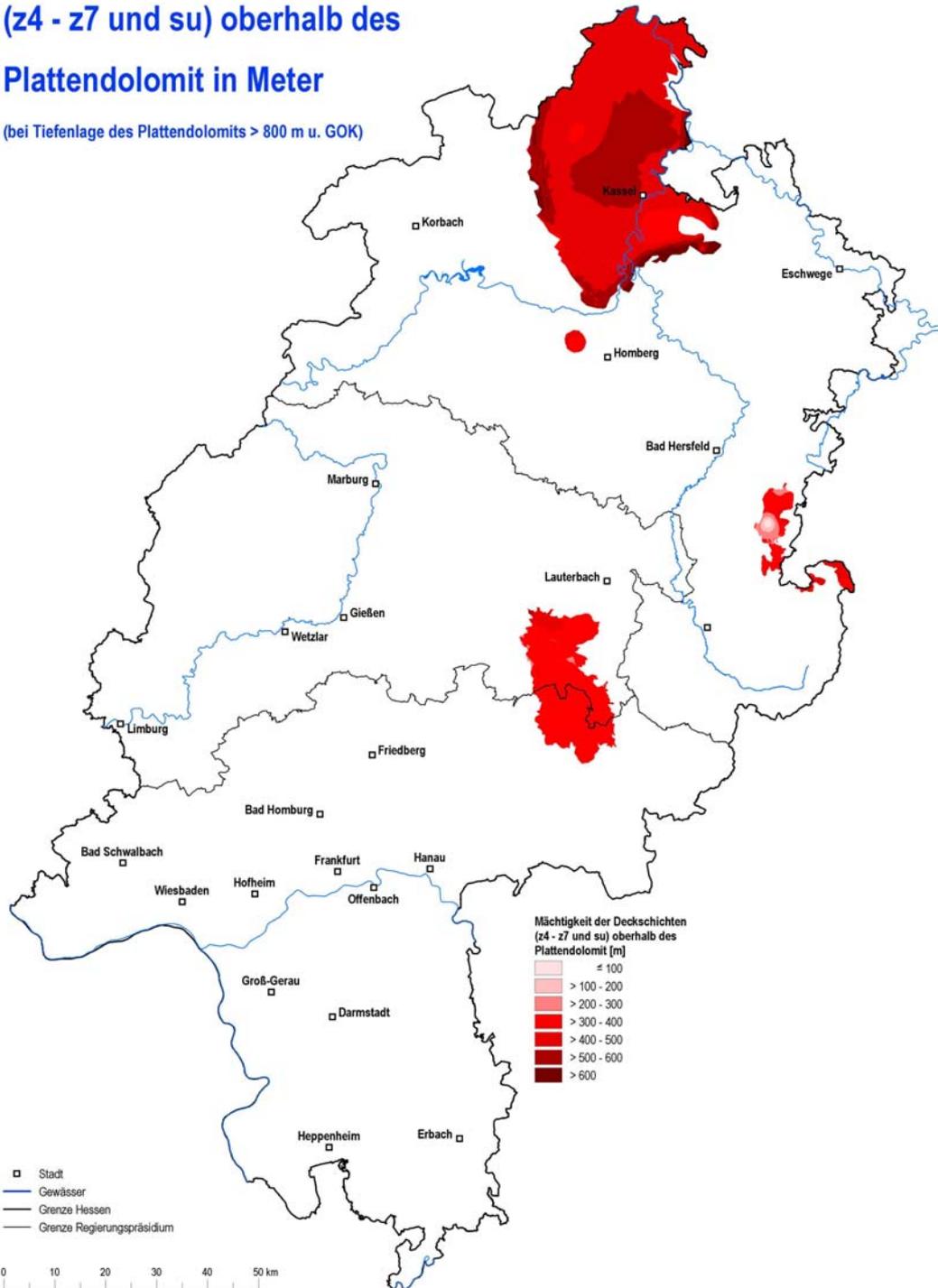


Abb. 19: Die Mächtigkeit der Deckschichten (Zechstein 4-7 und Unterer Buntsandstein) in Bereichen, in denen die Oberkante Plattendolomit tiefer als 800 m u. GOK liegt.

Überlagert wird der Ca3 von Tonstein-Feinsandstein-(Anhydrit-)Wechselfolgen (z4-z7), die bis zur Grenze des Buntsandstein Mächtigkeiten bis 100 m erreichen können (HUG 2004). Die Schichtenfolge des Unteren Buntsandstein, die sich aus Calvörde- (suC) und Bernburg- (suB) Folge (bzw. Gelnhausen- und Salmünster-Folge) aufbaut, ist im Raum Kassel im Wesentlichen feinkörnig ausgebildet. Es handelt sich hierbei um plattige Feinsandsteinlagen mit einzelnen quarzitischen Bänken sowie um sandige und glimmerreiche Tonsteine. Als Deckschichten sind sie jedoch aufgrund ihrer Klüftigkeit nur bedingt geeignet.

Die Deckschichtmächtigkeiten (z4-z7 plus Unterer Buntsandstein) sind in der Abb. 19 dargestellt.

Die Grenzziehung zum Zechstein ist nicht immer eindeutig; der Bröckelschiefer wird heute dem Zechstein (z7, Fulda-Folge) zugerechnet (KÄDING 2000). In den Schichtenverzeichnissen der Bohrungen ist dies aber nicht immer konsequent durchgehalten, daher sind Abweichungen vor allem in der Höhenlage der Zechstein-Oberkante möglich. Der Bröckelschiefer erreicht hier Mächtigkeiten bis zu 60 m, der gesamte Unterer Buntsandstein über 400 m.

In der Werra-Fulda-Senke trennen mehrere Nordwest-Südost verlaufende Untiefen das Hauptbecken in mehrere Teilbecken (KULICK et al. 1984). Der Plattendolomit besteht hier aus plattigen Kalksteinen mit einzelnen Dolomitbänken im tiefsten und höchsten Bereich sowie 2-3 m mächtigen Sandflaserschichten (LAEMMLEN 1975). Er steht ca. 10-20 m unterhalb der Basis des Bröckelschiefers an (z. B. in Bohrung Ufhausen in 866 m u. GOK) und erreicht in der Regel Mächtigkeiten zwischen 9 und 23 m (siehe Abb. 20), kann aber lokal auch völlig fehlen (siehe Abb. 21). Auf Blatt Hünfeld geht der Plattendolomit in südwestlicher Richtung allmählich in eine überwiegend tonig-mergelig ausgebildete Fazies mit nur noch geringmächtigen Dolomitlagen über (DEUBEL 1954).

Auch im Werra-Kali-Gebiet fungiert der Ca3 als Karstgrundwasserleiter, wobei die Verkarstung mit größerer Tiefe abnimmt. Sehr hohe Wasserwegsamkeiten werden in Salzauslaugungsgebieten, besonders am Rand von Subrosionssenken und am Salzhang erreicht, wo das Gestein durch die Beanspruchung zerbrochen ist (MOTZKA 1968). Mit Zunahme an tonigen Gesteinen nehmen der Hohlraumgehalt und die Wasserwegsamkeiten deutlich ab (DEUBEL 1954). Das Grundwasser des Plattendolomits kann im Gebiet um Bebra und um den Salzhang des Werra-Salinars (Bad Hersfeld, Ronshausen) natürliche Gesamtlösungsinhalte von 10.000 mg/l und höher aufweisen (FRITSCHKE et al. 2000).

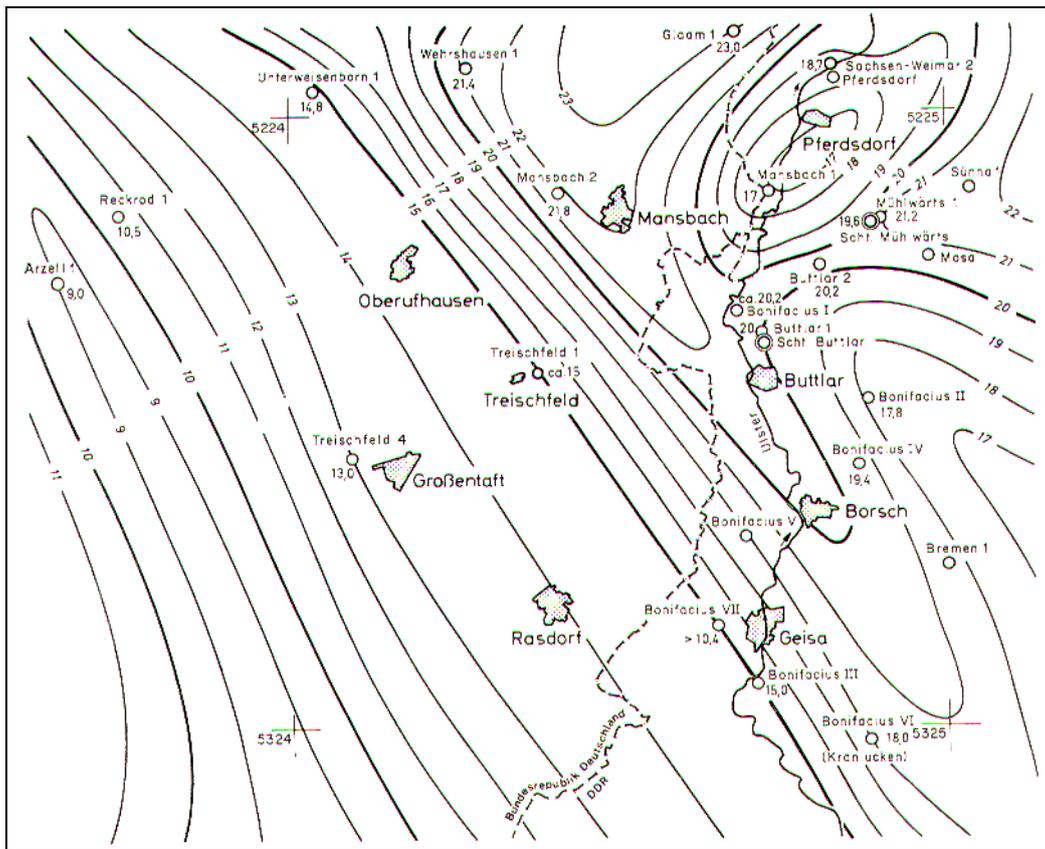


Abb. 20: Mächtigkeit des Plattendolomits (LAEMMLEN 1975)

Wie auch im Raum Kassel stellen hier die Ton- und Schluffsteine des höheren Zechstein recht gute Deckschichten dar. Sie können Mächtigkeiten bis zu 70 m erreichen. Durch das Quellvermögen der z.T. entfestigten Tonsteine können Klüfte und Risse geschlossen werden. Die Gesteine des Unteren Buntsandstein sind hier meist grobkörniger ausgebildet als im Raum Kassel und ebenfalls geklüftet und eignen sich daher weniger als Deckschichten.

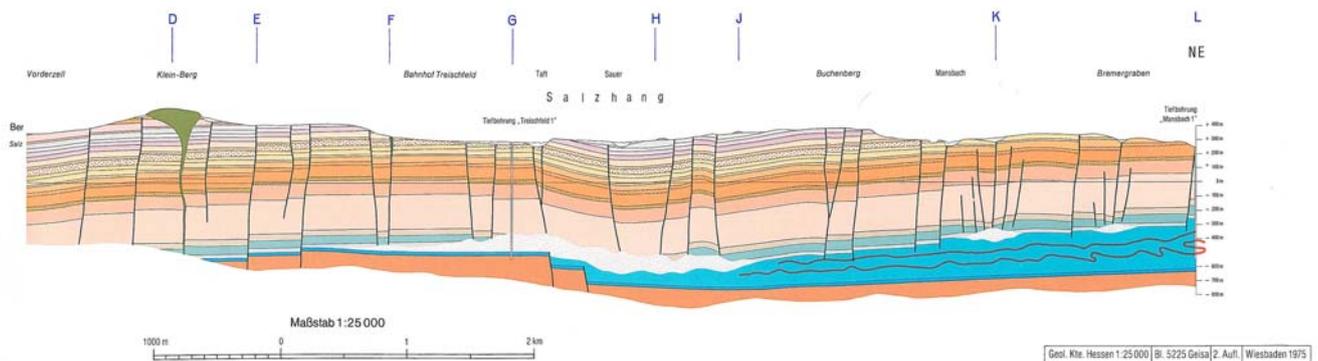


Abb. 21: Geologisches Profil Blatt Geisa (LAEMMLEN 1975)

Seit 1924/1925 wurden im hessischen Werra-Kali-Gebiet kumulativ fast 730 Millionen m<sup>3</sup> Salzabwässer im Plattendolomit (KOSAAB 1994, SKOWRONEK et al. 1999) versenkt. Sehr bald nach Beginn der Versenkung traten im Werra-Tal in Quellwässern erhöhte NaCl-Gehalte sowie Salzwasseraustritte auf. Durch zahlreiche hydrochemische Untersuchungen wurde nachgewiesen, dass ein direkter Zusammenhang zur Versenkung besteht. Dies weist eindeutig darauf hin, dass der Plattendolomit nach oben hin keineswegs abgeschlossen, sondern das Deckgebirge v. A. an Störungen, Basaltgängen, im Bereich des Salzhangs und an Subrosionssenken sehr durchlässig ist, so dass es zu einer Versalzung des Buntsandstein- und Quartär-Grundwasserleiters und zu diffusen Salzwasseraustritten in den Vorfluter (Werra) kommt.

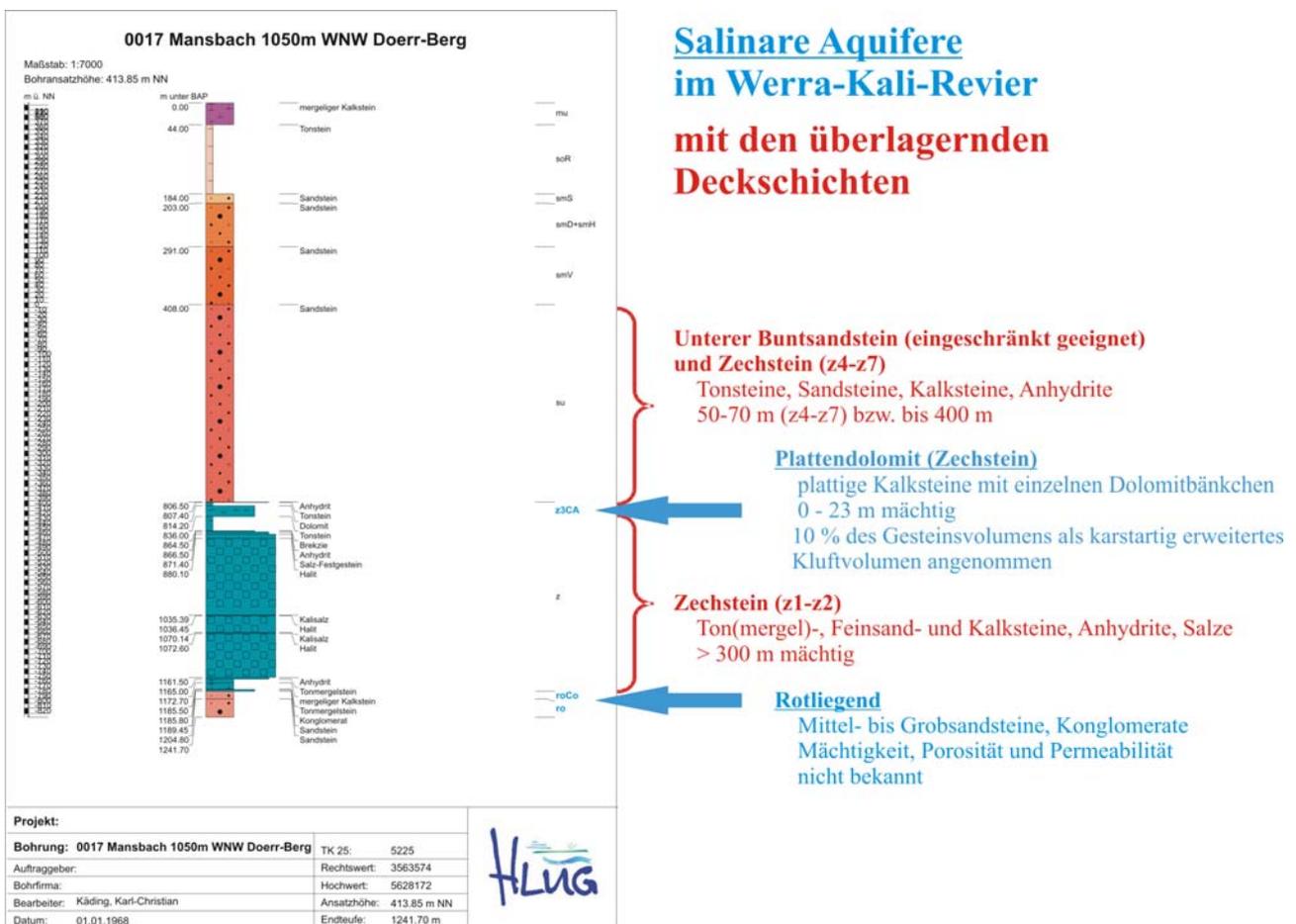


Abb. 22: Bohrprofilssäule mit den potenziellen Speicher-(Pfeil) und Deckschichten (Klammer)

In einem Gebiet von ca. 6.900 ha liegt die Oberkante des Plattendolomits tiefer als 800 m. Geht man von einem Hohlräumvolumen von maximal 10 % und einer mittleren Mächtigkeit des Plattendolomits von ca. 15 m aus, so erhält man ein maximales Hohlräumvolumen von 103.500.000 m<sup>3</sup>. Welcher Teil der volumetrischen Speicherkapazität auch wirklich effizient technisch nutzbar ist, ist nicht bekannt. Untersuchungen und Kapazitätsabschätzungen gehen von einer durchschnittlichen Speichereffizienz von 10

(HOLLOWAY et al. 1996, HEDDLE et al. 2003, VOORMEIJ & SIMANDL 2004) bis 20% aus (Gemeinsamer Bericht des BMWi, BMU und BMBF für die Bundesregierung vom September 2007).

Bei einer Dichte des CO<sub>2</sub> von 600 kg/m<sup>3</sup> könnte man unter den günstigsten Voraussetzungen 12.420.000 t injizieren. Bei einer geschätzten Produktionsrate eines 500 MW-Kohlekraftwerkes von 10.000 t CO<sub>2</sub> pro Tag (IPCC-Report) würde das oben abgeschätzte Volumen keine 4 Jahre ausreichen.

Im Vogelsberg, gibt es, wie auch beim Rotliegend, nur eine Bohrung, die in den Zechstein hinabreicht (Abb. 18). Die Lage der 800 m-Tiefenlinie ist ein rein rechnerischer Wert, der aufgrund des Schollenbaus des Vogelsberges (siehe Abb. 14 und 15) absolut nicht mit der Wirklichkeit übereinstimmt. Aussagen über mögliche CO<sub>2</sub>-Speicher sind hier nicht möglich, reichen aber auch nicht zum Ausschluss.

#### Fazit:

- Der Plattendolomit fungiert als Karstgrundwasserleiter mit einem Hohlraumvolumen von maximal 10 %. Die Mächtigkeiten können zwischen 9 und 30 m schwanken, lokal kann er allerdings auch völlig fehlen.
- Der überlagernde jüngere Zechstein (z4-z7) eignet sich aufgrund tonig-schluffigen Ausbildung gut als Deckgestein. Lokal sollte überprüft werden, ob eine genügende Mächtigkeit vorliegt.
- Erhöhte NaCl-Gehalte in Quellwässern im Werra-Tal sowie diffuse Salzwasseraustritte an der Oberfläche und eine Versalzung des Buntsandstein-Grundwasserleiters nach der Verpressung von Salzabwässern im Plattendolomit zeigen jedoch, dass die überlagernden Deckschichten v.a. an Störungen, Basaltgängen, Salzhängen und Subrosionssenken sehr durchlässig sind.
- Die Anzahl der Bohrungen im Vogelsberg reichen bei weitem nicht aus, um Aussagen über einen möglichen Speicher machen zu können.
- Konkurrierende Nutzung ist durch Versenkung salinarer Wässer (Salzabwasser aus der Kaliproduktion) im Werra-Kali-Gebiet gegeben.

### **6.1.3 Mittlerer Buntsandstein**

Der **Buntsandstein** ist die untere lithostratigrafische 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 bis 243 Millionen Jahren vor heute. Er wird in drei Untergruppen gegliedert: Oberer- (Röt-Formation), Mittlerer (Volpriehausen-, Detfurth-, Hardegsen- und Solling-Formation) und Unterer Buntsandstein

# Top Volpriehausen-Sandstein in Meter unter Geländeoberkante

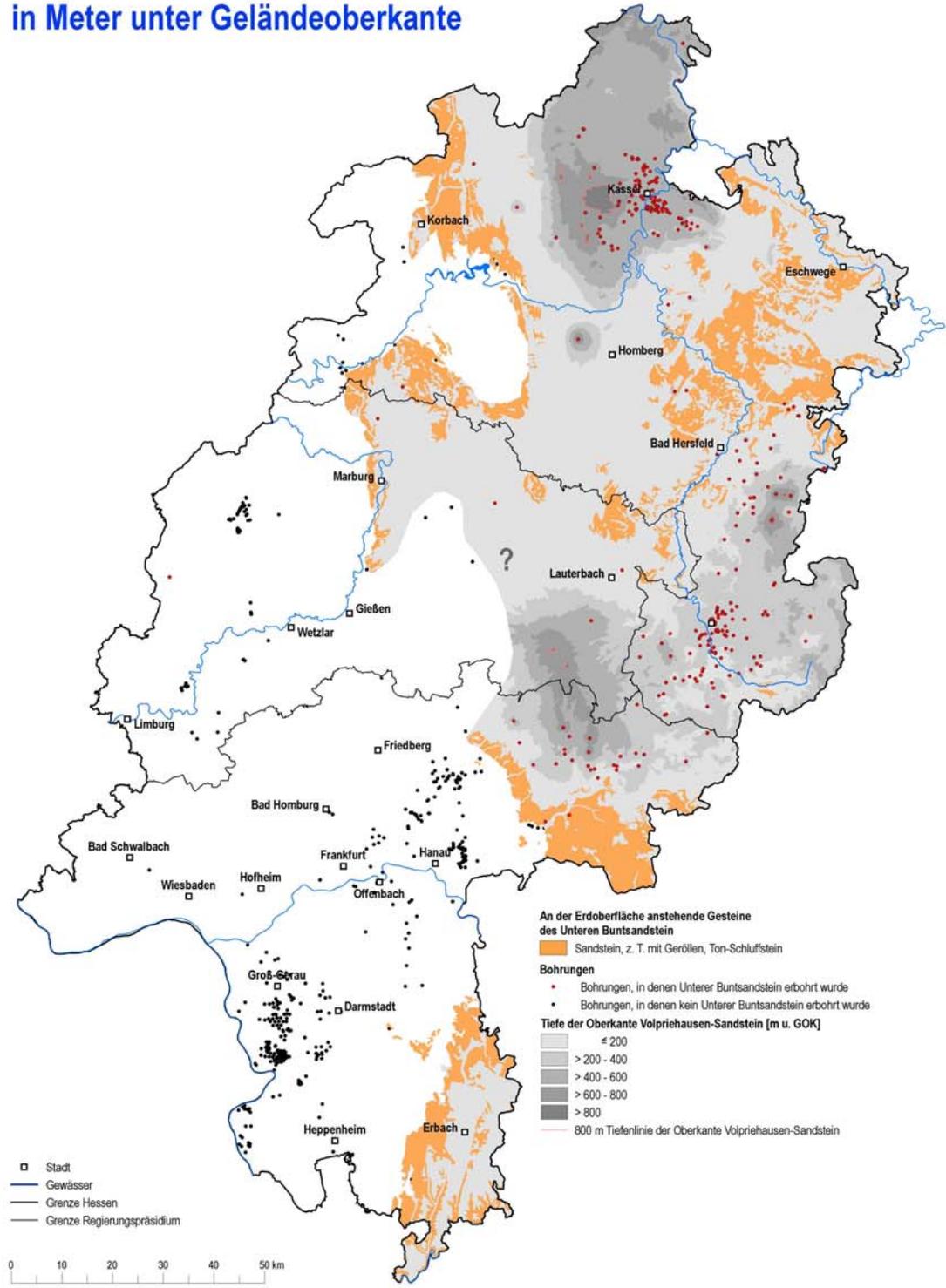


Abb. 23: Verbreitung und Tiefenlage der Oberkante des potenziellen Speichers Volpriehausen-Sandstein

(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. Die als potenzielle CO<sub>2</sub>-Speicher nötige Tiefenstufe von > 800 m u. GOK wird nur im Raum Kassel erreicht (siehe Abb. 23). An der Basis des Mittleren Buntsandstein, direkt dem Unteren Buntsandstein aufliegend, befindet sich in 2 Tiefbohrungen ein 20-25 m mächtiges, oft relativ bindemittelarmes und absandendes Grobsandsteinpaket, der Volpriehausen-Sandstein (smVs). Nach DÜRBAUM et al. (1969) können im smVs allerdings auch alle Übergänge bis zum dichten Sandstein auftreten. Angaben über Porositäten und Permeabilitäten liegen nicht vor. Im Hangenden folgt die 150 bis 175 m mächtige, wasserundurchlässigere Volpriehausen-Wechselfolge aus vorwiegend Ton-, Silt- und Feinsandsteinen (smVst), die aber aufgrund der Klüftung nicht als abdichtende Deckschichten geeignet ist.

#### Fazit:

- Die nötige Tiefenstufe von > 800 m u. GOK wird nur lokal im Raum Kassel erreicht (2 Bohrungen). Keine Aussagen über laterale Verbreitung möglich.
- Keine Angaben über Porositäten und Permeabilitäten. Nach DÜRBAUM et al. (1969) können alle Übergänge von permeabel bis dicht auftreten.
- 150-175 m mächtige Deckschicht der Volpriehausen-Wechselfolge. Auch hier keine Angaben über Porositäten und Permeabilitäten sowie laterale Verbreitung der Ton-, Silt- und Feinsandsteinen. Aufgrund der Klüftung nicht als abdichtende Deckschicht geeignet.

## **6.2 Südhessen (Oberrheingraben)**

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 grabenfüllenden tertiären und quartären Sedimente, die eine Gesamtmächtigkeit von knapp 3.000 m (in Brg. 6316-94 NW Bürstadt: Tertiärbasis bei 2.815 m unter GOK) erreichen, überlagern demnach von Norden nach Süden immer jüngere Schichten. Im hessischen Teil wurden jedoch fast nur Rotliegendgesteine erbohrt, lediglich in einer Bohrung bei Wolfskehlen traf man ein ca. 36 m mächtiges Gesteinspaket aus hellen Dolomiten und einer Wechsellagerung aus Tonen und Mergeln an, die wohl dem Zechstein zugerechnet werden können.

Im Oberrheingraben wurden zur Erdöl- und Erdgasexploration zahlreiche Tiefbohrungen abgeteuft, deren Ergebnisse aber zum großen Teil von der Industrie nicht freigegeben sind. Sie sind aber, soweit sie im

Archiv des HLOG vorhanden waren, in diese Untersuchungen mit eingeflossen. Ebenso existieren zahlreiche seismische Profile (siehe Abb. 24).

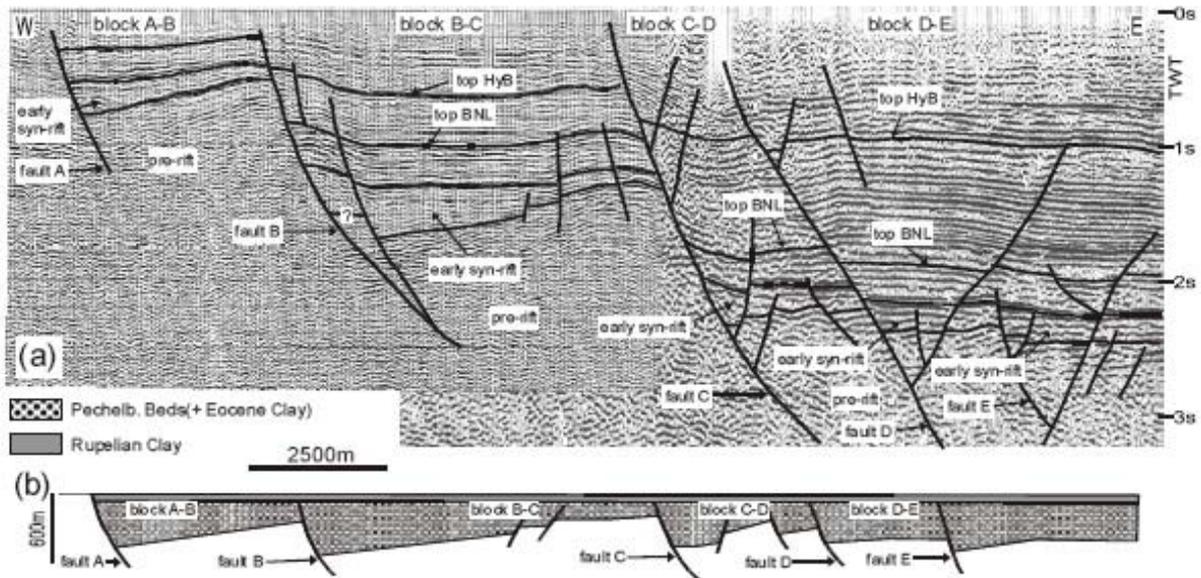


Fig. 3.10a Interpreted composite seismic section showing several intermediate-scale tilted fault blocks bounded by growth faults. TWT two-way-travel time in seconds. Location in Fig. 3.9. Modified from Derer *et al.* (2003). BNL Niederröden Layers, HyB Hydrobia Beds.

Fig. 3.10b Palinspastically restored cross section of the early syn-rift graben fill, derived from the seismic section of Fig. 3.10a (restoration datum top early syn-rift, thickness is not decompacted). Note the half-graben geometry of the depocentres.

Abb. 24: Seismisches Profil durch den Oberrheingraben (bei Worms) zeigt die schollenartige Zerstückelung der Gesteinseinheiten (DERER 2003)

## 6.2.1 Rotliegend

Während der spätvariszischen Gebirgsbildung im Permokarbon bestand zwischen dem Rhenohertzynikum im Norden und der Mitteldeutschen Kristallinschwelle im Süden ein Becken, in dem klastische und vulkaniklastische Sedimente und basische bis saure Vulkanite (letztere örtlich mehrere 100 m) abgelagert wurden. Die Region des heutigen Oberrheingrabens liegt dabei im Übergangsbereich zwischen dem Saar-Nahe-Becken und der Hessischen Senke (KOWALCZYK (1983), MARELL (1989), MÜLLER (1996)). Während im Saar-Nahe-Becken Nordwest-Südost gerichtete und in der Hessischen Senke Nord-Süd gerichtete interne tektonische Strukturen dominieren, überlagern sich im Bereich des Oberrheingrabens beide Richtungen (MÜLLER 1996).

Die unterhalb der Tertiärbasis angetroffenen Gesteine des Rotliegend sind von Bohrung zu Bohrung sehr unterschiedlich ausgebildet. MÜLLER (1996) beschreibt, ausgehend von der Untersuchung der rheinland-pfälzischen Bohrung Gimbsheim 2 (BEB Erdgas und Erdöl GmbH), eine 184 Meter mächtige Abfolge von mittel- bis grobkörnigen Sandsteinen und Konglomeraten, die eine schlechte Sortierung und erhöhte

Matrixgehalte aufweisen. Über die Porositäten und Permeabilitäten liegen keine Angaben vor, sie dürften aber aufgrund des hohen Feinkorngehaltes eher geringer sein. Unter einem Vulkanitpaket von 203 m Mächtigkeit folgen mehrere Zyklen von Fein- bis Grobsanden und Konglomeraten. In der Bohrung Worms traf man unter dem Tertiär eine 20 m mächtige Ton- bis Feinsandabfolge, gefolgt von 554 m mächtigen Vulkaniten an. Erst in deren Liegendem stieß man auf mehrere grobkörnige Sandsteinpakete, die zyklisch in Tonsteine übergingen.

In einer Bohrung bei Stockstadt erbohrte man zwischen einem 131 m mächtigen Ton (Hangendes) und Vulkaniten (Liegendes) in einer Teufe zwischen 1.687 und 1.932 m Grobsandsteine und Grobkonglomerate. Auch hier ist leider nichts über Porositäten, Permeabilitäten und Klüftigkeiten bekannt. Bei Weiterstadt traf man in einer Teufe von 1.773 bis 2.170 m unter Geländeoberkante auf eine Wechsellagerung aus Silt- bis Mittelsandsteinen, in die mehrfach Basalte eingeschaltet sind (MARELL 1989). Bei Zwingenberg dominieren tonige, glimmerreiche Sandsteine und tonige Konglomerate sowie Tonsteine und Melaphyre.

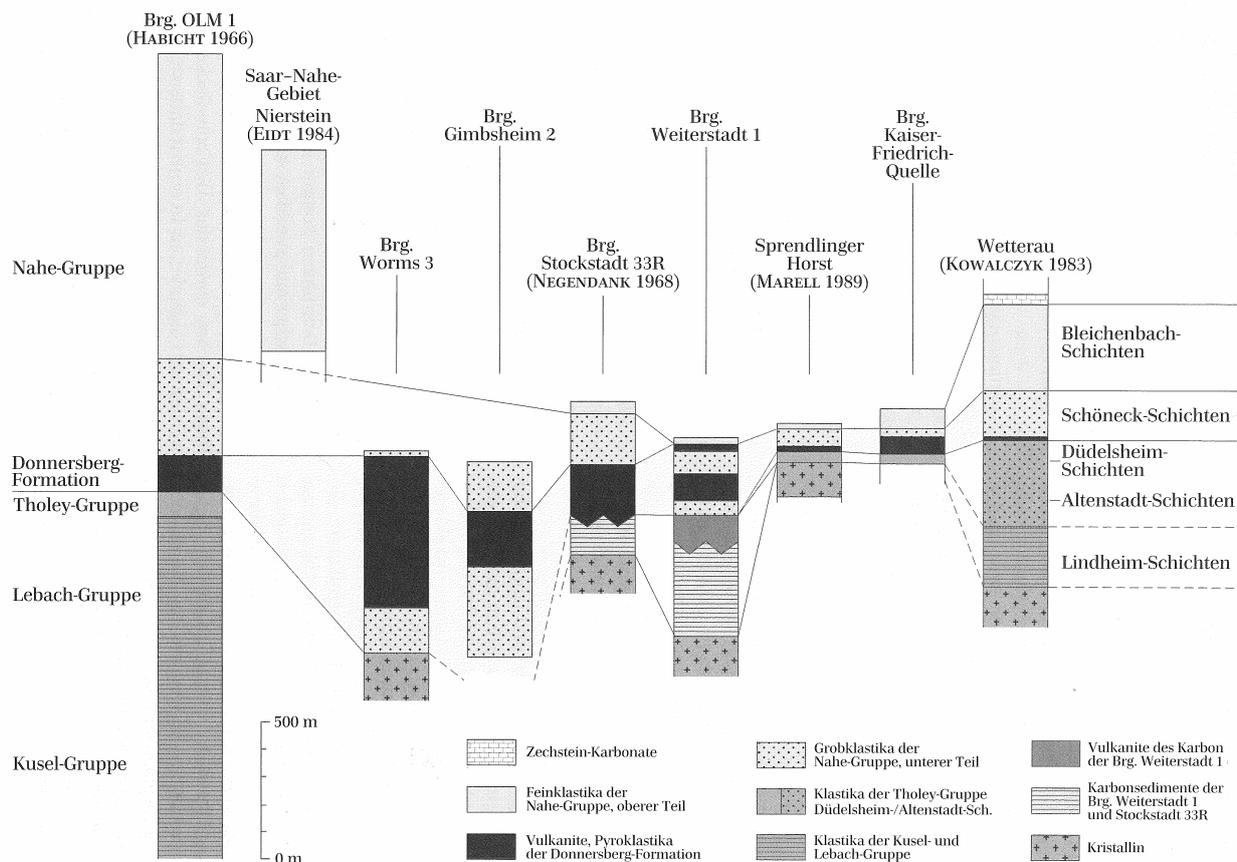


Abb. 25: Nebeneinanderstellung verschiedener Bohrungen ins Rotliegend des Oberrheingrabens (MÜLLER 1996 nach MARELL 1989), deutlich sichtbar die unterschiedliche Höhenlage und Ausprägung der Gesteine

Da es sich bei den Rotliegend-Sedimenten um Ablagerungen von Flüssen, Schwemmfächern, Schichtflutkörpern und Seen handelt, können sie lokal auf geringe Entfernungen lithologisch sehr variieren (siehe Abb. 25). Genaue Vorhersagen über die Lithologie und Verbreitung und damit die Eignung als potenzielles CO<sub>2</sub>-Speichergestein sind unterhalb der tertiären Schichten nicht möglich.

Es liegen keine Aussagen über die Wasserwegsamkeiten und nutzbaren Hohlraumgehalte der Rotliegendgesteine vor. Die oberflächennah anstehenden Ablagerungen (Ton- und Sandsteine, Konglomerate, basische Eruptivgesteine) in Odenwald und Wetterau sind Kluftgrundwasserleiter (DIEDERICH et al. 1991), deren Klüfte häufig wieder durch das tonige Bindemittel der Sedimente verschmiert sind. Es ist wahrscheinlich, dass dies auch für die Gebiete gilt, in denen das Rotliegend von tertiären und quartären porenwasserführenden Sedimenten bedeckt ist.

### 6.2.2 Tertiär

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

Die ältesten tertiären Ablagerungen im nördlichen Oberrheingraben bildet der eozäne Basiston (DOEBL 1967). Die Tone und Siltsteine dieser Einheit überlagern diskordant das Rotliegend. Obwohl sie nur lokal verbreitet sind (in nur 2 Bohrungen sicher nachgewiesen), können sie Mächtigkeiten bis zu 150 m erreichen. Die flächenhaft verbreitete tertiäre Abfolge beginnt mit der Pechelbronn-Gruppe, die in drei Einheiten unterteilt werden kann (siehe Abb. 26). Die Unteren Pechelbronn-Schichten bestehen aus mehreren Abfolgen von 3 bis 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 am Kühkopf kalkige Feinsandsteine, Tonsteine und Mergel in einer Mächtigkeit von 20-46 m auf, bei Eich bis 135 m mächtige Fein- bis Grobsandsteine und Konglomerate und bei Königsgarten 0-4 m mächtige Feinsedimente mit Kohlenflözchen auf.

Die Pechelbronn-Gruppe stellt sowohl die wichtigsten Muttergesteine als auch Speichergesteine für Erdöl- und Erdgasbildung im engsten Wechsel dar. Daher scheinen sie sich auch zur Speicherung von CO<sub>2</sub> zu eignen. Die Mächtigkeiten der Speichersande liegen zwischen 1,5 und 28 m, haben ein durchschnittliches Porenvolumen von ca. 22 % und Durchlässigkeiten von 0-100 mD (oberes Lager) bzw. 100 bis 1.000 mD (unteres Lager) (FINKENWIRTH 1984).

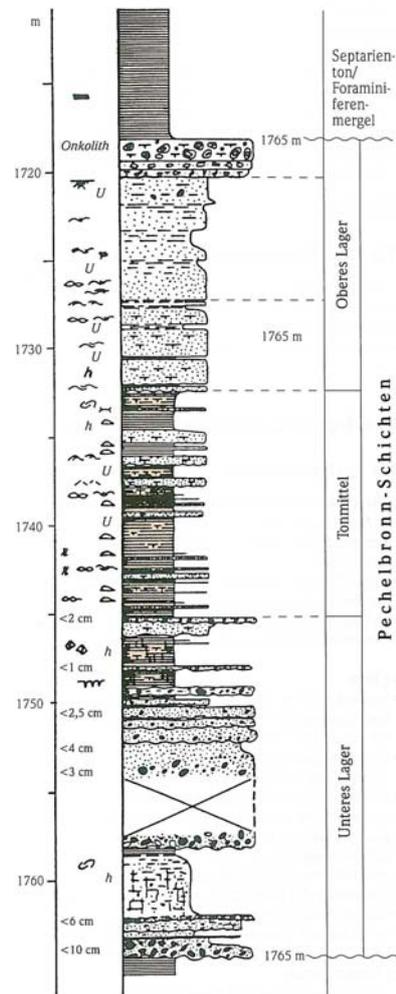


Abb. 26: Lithologisches Profil durch die Pechelbronn-Gruppe (GAUPP & NICKEL 2001)

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 (Abb. 27) sorgen für sehr engräumige Veränderungen in Mächtigkeit und Fazies.

Im Hangenden folgen mehr oder weniger 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).

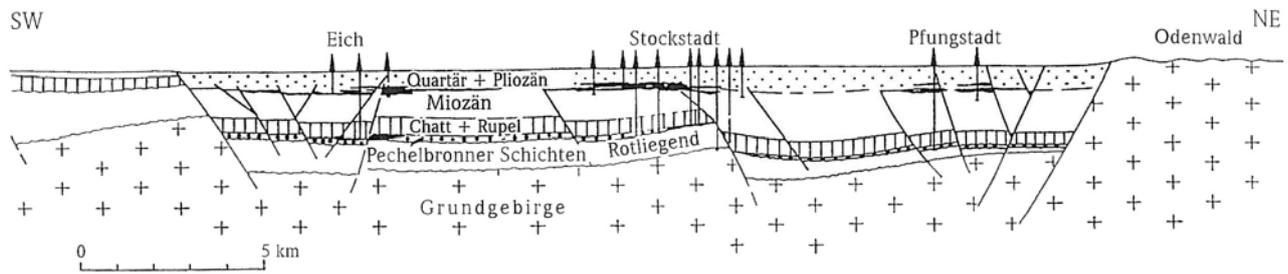


Abb. 27: Schematisches Querprofil durch den nördlichen Oberrheingraben (GAUPP & NICKEL 2001)

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 gröberen Horizonte dienen lokal als Erdgasspeicher. Zur CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub>-Speicher dienen zu können.

### Fazit

- Nur wenige Angaben zu Porositäten und Permeabilitäten der Rotliegend-Gesteine.
- Der Top des Rotliegend liegt z.T. deutlich tiefer als 2.500 m unter der Geländeoberkante (im Süden Hessens). Dadurch ungünstige Druck- und Temperaturverhältnisse des CO<sub>2</sub>. In solchen Tiefen sind aufgrund der Auflast die Gesteinshohlräume stark verringert (siehe Kapitel 2.1).
- Rotliegend und Pechelbronn-Schichten variieren in Lithologie, Mächtigkeit und Verbreitung räumlich stark. Keine Vorhersagen über Speichermöglichkeiten und -kapazitäten möglich.
- Der erhöhte geothermische Gradient (ca. 6°C/100m) im Oberrheingraben wirkt sich ungünstig auf die Löslichkeit des CO<sub>2</sub> im Wasser aus.
- Konkurrierende Nutzung: mehrere Erlaubnisfelder zur Aufsuchung von Erdwärme (z. B. bei Riedstadt) im Planungs- und Erkundungsstadium (FRITSCH & KRACHT 2007)
- Die zahlreichen Bohrungen erschweren die Abdichtung des Deckgesteins.
- Erhöhte Gefahr von Erdbeben.
- Intensive Trinkwassergewinnung in den oberen Stockwerken (Hessisches Ried)

### 6.3 Bewertung der Situation in Hessen

Zusammenfassend werden hier die salinaren Aquifere in Hessen beschrieben.

- Bei den potenziellen Speichern liefert die Datengrundlage (Bohrungen, Gesteinseigenschaften, Literatur) nur punktuelle Aussagen über den tiefen Untergrund. Daher sind detaillierte Untersuchungen bezüglich flächenhafter Ausdehnung und Kapazitäten notwendig.
- Die tiefsten Gesteine in der Hessischen Senke, die als potenzielle CO<sub>2</sub>-Speicher in Frage kommen könnten, sind die Konglomerate und Sandsteine des Rotliegend in der Werra-Saale-Senke (siehe Abb. 11). Allerdings liegen keinerlei Angaben über Porositäten und Permeabilitäten vor und die Lithologien der angetroffenen Rotliegend-Gesteine variieren auf kleine Distanzen häufig von Bohrung zu Bohrung. Der überlagernde Zechstein eignet sich in Regionen salinärer Ausprägung u.a. aufgrund der Fließeigenschaften des Salzes nur dann als Deckgestein, wenn keine Basaltgänge und Störungen vorhanden sind, an denen CO<sub>2</sub> noch oben wandern könnte. In den übrigen Regionen kann aufgrund der starken Faziesunterschiede keine pauschale Aussage über die Eignung als Deckgestein getroffen werden.

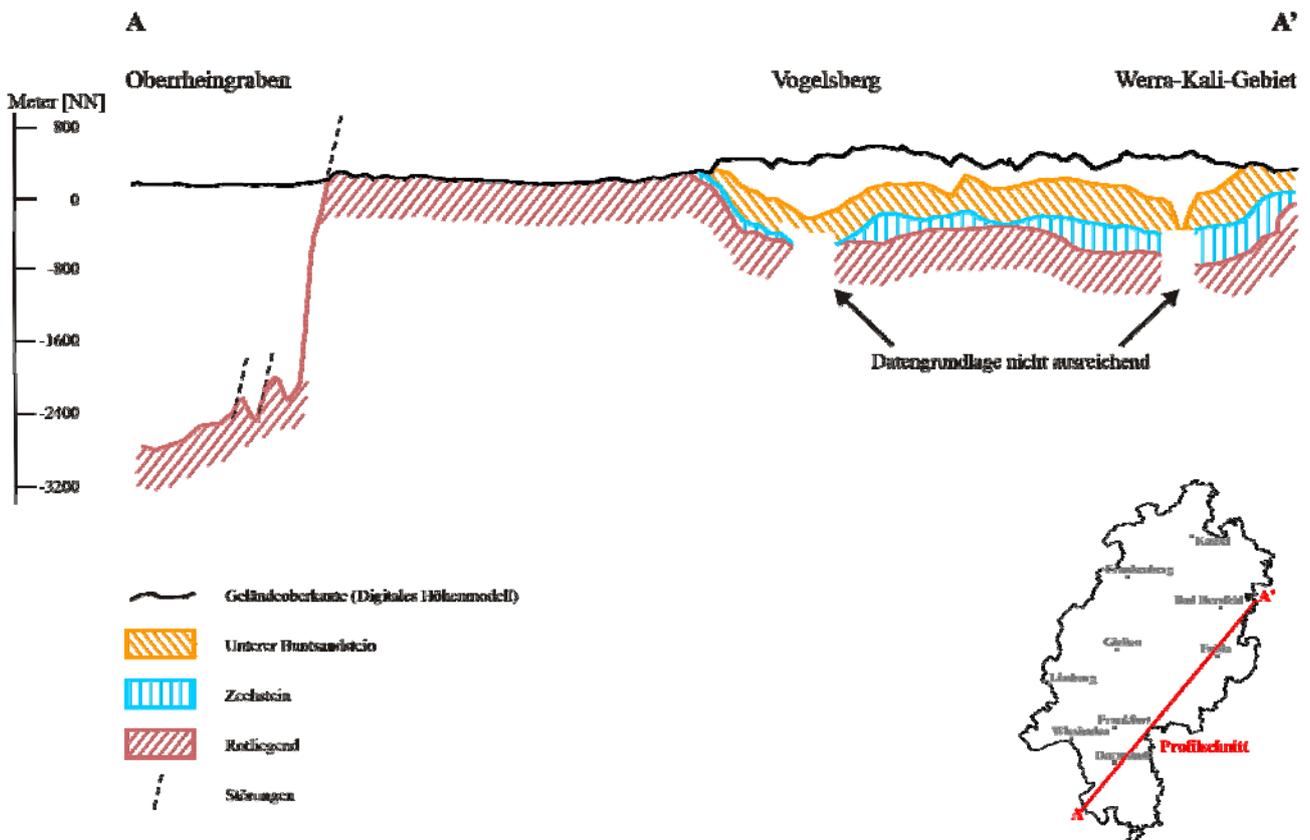


Abb. 28: Vereinfachter Profilschnitt durch die Hessische Senke mit den für die CO<sub>2</sub>-Speicherung relevanten geologischen Einheiten, basierend auf den Bohrdaten des HLUG bzw. den daraus konstruierten Tiefenlinienplänen (Rastern)

- Im Vogelsberg und in der Hohen Rhön reicht die Anzahl der Bohrungen bei weitem nicht aus, um Aussagen über einen möglichen Speicher sowie die Deckschichten machen zu können.
- Der 0-30 m mächtige Plattendolomit fungiert als Grundwasserleiter mit einem karstartig erweiterten Kluftvolumen von maximal 10 %. Die nötige Tiefe von > 800 m wird im Raum Kassel (in 2 Bohrungen) sowie im Werra-Kali-Gebiet und im Vogelsberg erreicht. Der überlagernde jüngere Zechstein (z4-z7) könnte sich aufgrund tonig-schluffigen Ausbildung gut als Deckgestein eignen. Diffuse Austritte in die Werra und in den quartären Grundwasserleiter des Werratal mit erheblichen Salzabwasseranteilen sowie Salz(ab)wasseraufstiege in das Buntsandstein-Deckgebirge als Folge der Versenkung von Salzabwässern im Plattendolomit zeigen jedoch, dass die überlagernden Deckschichten (v. a. an Störungen, Basaltgängen, Salzhang, Subrosionssenken) sehr durchlässig sind.
- 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 2 Bohrungen im Raum Kassel erreicht. Überdeckt wird er von den 150-175 m mächtigen Ton-, Silt- und Feinsandstein-Folgen der Volpriehausen-Wechselfolge. Es liegen keine Angaben über Porositäten und Permeabilitäten sowie die laterale Verbreitung der Speicher und Deckschichten in dieser Tiefe vor.
- Im Oberrheingraben sind die Gesteine des Rotliegend und die überlagernden tertiären Pechelbronn-Schichten potenziell zur CO<sub>2</sub>-Speicherung geeignet. Während nur wenige Angaben zu Porositäten und Permeabilitäten der Rotliegend-Gesteine vorliegen, weisen die Pechelbronn-Schichten ein durchschnittliches Porenvolumen von ca. 22 % und Durchlässigkeiten von bis zu 1.000 mD auf. Die Lithologie, Mächtigkeit und Verbreitung variiert räumlich so stark, dass keine Vorhersagen über Speichermöglichkeiten und -kapazitäten möglich sind. Der Top des Rotliegend liegt z.T. deutlich tiefer als 2.500 m unter der Geländeoberkante (im Süden Hessens). Die Tiefe und der erhöhte geothermische Gradient (ca. 6°C/100 m) im Oberrheingraben wirken sich ungünstig auf die Löslichkeit des CO<sub>2</sub> im Wasser aus. Die zahlreichen Tiefbohrungen erschweren die Abdichtung des Deckgesteins.

In Tabelle 4 sind die Eigenschaften der potenziellen Speicher- und Deckschichten aufgeführt und nach verschiedenen Kriterien wie folgt bewertet:

- Rot: ungeeignet
- Gelb: bedingt geeignet bzw. weiterer Erkundungsbedarf erforderlich
- Grün: geeignet (aber weitere Einzelfallbetrachtung erforderlich)
- Weiß: keine oder unzureichende Angaben

Tab. 4: Übersicht und Wertung der potenziellen Speicher- und Deckgesteine in Hessen

Speicher-Eigenschaften							
Stratigraphie	Rotliegend	Rotliegend	Zechstein: Plattendolomit	Zechstein: Plattendolomit	Rotliegend und Zechstein: Plattendolomit	Mittlerer Buntsandst.: Volpriehausen -Sandstein	Tertiär: Untere Pechelbronn- Schichten
Region	Hessische Senke	Oberrhein- graben	Raum Kassel	Werra-Kali- Gebiet	Vogelsberg und Rhön	Raum Kassel	Oberrhein- graben
Lithologie	konglomera- tische Mittel- Grobsandsteine und Konglomerate	mittel- bis grobkörnige Sandsteine und Konglomerate	Karbonat, z. T. zerbrochen, grobkavernös, Lithologie nicht genau bekannt	Plattige Kalksteine, einzelne Dolomitbän- chen und Sandflasersch.	keine Angaben, nur eine Bohrung im zentralen Bereich des Vogelsbergs	(Mittel- bis) Grobsandsteine	schlecht sor- tierte Mittel- bis Grobsand- und Konglo- meratlagen
Tiefe [m u.GOK]	800 - 1140	1400 - >2800	800 - 1300	800 - 950	> 800 m	max. 815 bzw. 885 (2 Brg), sonst < 800	> 1200
Mächtigkeit [m]	einzelne Lagen meist < 3m	185 - 250, einzelne Zyklen	20 - 30	9 - 23	-	20 - 25	einzelne Zyklen 1,5 - 28
Porosität [%]	-	oberflächen- nahe Gesteine eher gering	< 10	< 10	-	-	Ø 22
Permeabilität [mD]	-	-	-	-	-	-	100 – 1.000
Salinität [mg/l]	-	-	-	> 10.000	-	-	-
Laterale Kontinuität	Lithologie variiert von Bohrung zu Bohrung	sehr variabel in Lithologie, Teufe, Mäch- tigkeit und Verbreitung	nicht bekannt (nur 2 Brg.)	Übergang nach SW in tonig- mergelige Fazies	nur eine Bohrung, starker Schollenbau	ausreichende Teufe nicht gegeben, nur 2 Brg. > 800 m, zu geringe Verbreitung	sehr variabel in Lithologie, Teufe, Mäch- tigkeit und Verbreitung
Weitere Vorgehensweise	Sichtung von Bohrprofilen, Bohrkerne vorhanden?	Sichtung seismischer Profile, Bohrprofile	flächendecken- des Abteufen neuer Bohrun- gen, Seismik	keine	flächendeckendes Abteufen neuer Bohrungen, Seismik	keine	Sichtung seismischer Profile, Bohrprofile
Konkurrierende Nutzung		Geothermie		Verpressung salinarer Wässer		Trinkwasser- Gewinnung	Potenzielle Erdöllager

Deckschicht-Eigenschaften							
<b>Stratigraphie des Speichers</b>	Rotliegend	Rotliegend	Zechstein: Plattendolomit	Zechstein: Plattendolomit	Rotliegend & Zechstein: Plattendolomit	Mittlerer Buntsandst.: Volpriehausen- Sandstein	Tertiär: Untere Pechelbronn- Schichten
<b>Region</b>	Hessische Senke	Oberrhein- graben	Raum Kassel	Werra-Kali- Gebiet	Vogelsberg und Rhön	Raum Kassel	Oberrhein- graben
<b>Stratigraphie der Deckschichten</b>	Zechstein	Rotliegend- Tone, Rotliegend – Vulkanite, Eozäne Basistone	Zechstein (z4-z7), Unterer Buntsandstein	Zechstein (z4-z7)	Tertiärer Basalt, Buntsandstein	Mittlerer Buntsandst.: Volpriehausen -Wechselfolge	Mittlere Pechelbronn- schichten (MPS), Rupelton (RT)
<b>Lithologie</b>	(mergelige) Tonsteine, Anhydrite, Salze, Kalksteine, Feinsandsteine	Ton- und Siltsteine, Vulkanite	(mergelige) Tonsteine, Anhydrite, (Fein-) Sandsteine, Kalksteine	(mergelige) Tonsteine, Anhydrite, (Fein-) Sandsteine, Kalksteine	Buntsandstein, Basalt, zwischen- gelagerte, meist vertonte Tuff-Horizonte	Wechselfolge aus Ton-, Silt- und Feinsand- steinen	Tonsteine, Mergel, Kalk- und Quarzsand- steine
<b>Mächtigkeit [m]</b>	> 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)
<b>Porosität [%]</b>	-	-	-	Salzwasserauf- stiege weisen auf Undichtig- keit hin	stark geklüftet	-	-
<b>Laterale Kontinuität</b>	sehr variabel in Lithologie, Teufe, Mäch- tigkeit und Verbreitung	sehr variabel in Lithologie, Teufe, Mäch- tigkeit und Verbreitung	-	sehr variabel in Lithologie, Teufe, Mäch- tigkeit und Verbreitung	einzelne Schollen	vorhanden	sehr variabel in Lithologie, Teufe, Mäch- tigkeit und Verbreitung
<b>Tektonik</b>	Störungen, Basaltgänge	Horst- und Graben- strukturen, Erdbeben	Grabenstruk- turen, Störungen, Subrosions- senken	Grabenstruk- turen, Störungen, Subrosions- senken	stark geklüftet, einzelne Schollen	Grabenstruk- turen, Störungen, Subrosions- senken	Schwellen & Senken, Mosaik von Kippschollen, Erdbeben
<b>Konkurrierende Nutzung</b>	Verpressung salinarer Wässer, Sondermüll- Deponien	Potenzielle Erdöl- und Erdgaslager	-	Salzgewinnung	Trinkwasser- reservoir Rhein-Main	-	Potenzielle Erdöl- und Erdgaslager

# 7 Speicherung in entleerten Erdöl- und Erdgaslagerstätten

## 7.1 Erdöllagerstätten

Ein schon seit Jahrtausenden bewährtes Speichergestein stellen die Speicher von Erdöl- und Erdgaslagerstätten dar. Entleerte Lagerstätten könnten als potenzielle CO<sub>2</sub>-Speicher dienen. Da die flüssigen und gasförmigen Kohlenwasserstoffe (KW) eine geringere spezifische Dichte als Porenwässer aufweisen, migrieren sie aus dem Ursprungsgestein (Muttergestein) in Speichergesteine. Diese bilden so genannte Fallen unterhalb von impermeablen Schichten und verhindern so ein weiteres Entweichen (Abb. 29).

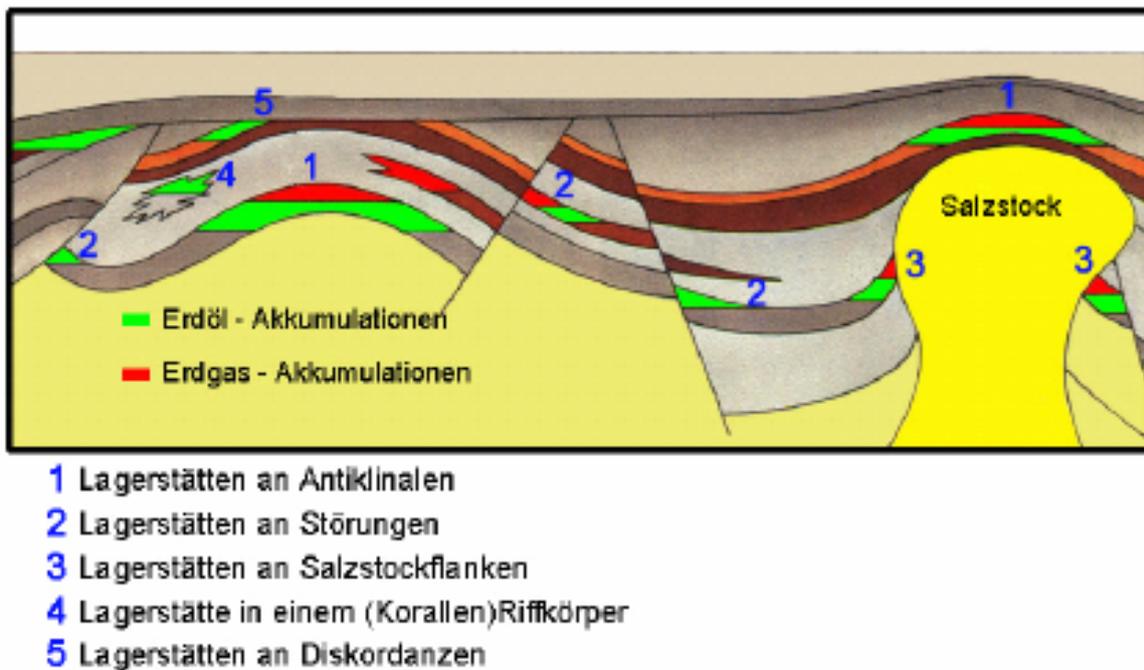


Abb. 29: Schematischer Überblick über die unterschiedlichen Fallenstrukturen bei Kohlenwasserstoffen (RADGEN et al. 2005, nach Mobil Oil AG 1983)

Injiziert man zusätzlich CO<sub>2</sub> in die Lagerstätte, so erhöht sich der Lagerstättendruck und die noch vorhandenen Kohlenwasserstoffe (Abb. 30) können mobilisiert (z. B. vermindert CO<sub>2</sub> die Viskosität des Öls (= CO<sub>2</sub>-Fluten)) und zusätzlich gefördert werden (CO<sub>2</sub>-Enhanced Oil Recovery (CO<sub>2</sub>-EOR) bzw. CO<sub>2</sub>-Enhanced Gas Recovery (CO<sub>2</sub>-EGR)). Dadurch verlängert sich die wirtschaftliche Lebensdauer der Lagerstätten. Diese Verfahren werden schon seit 1972 in den USA praktiziert (REICHLE 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 haben und so keine unkontrollierbaren Aufstiegswege vorliegen.

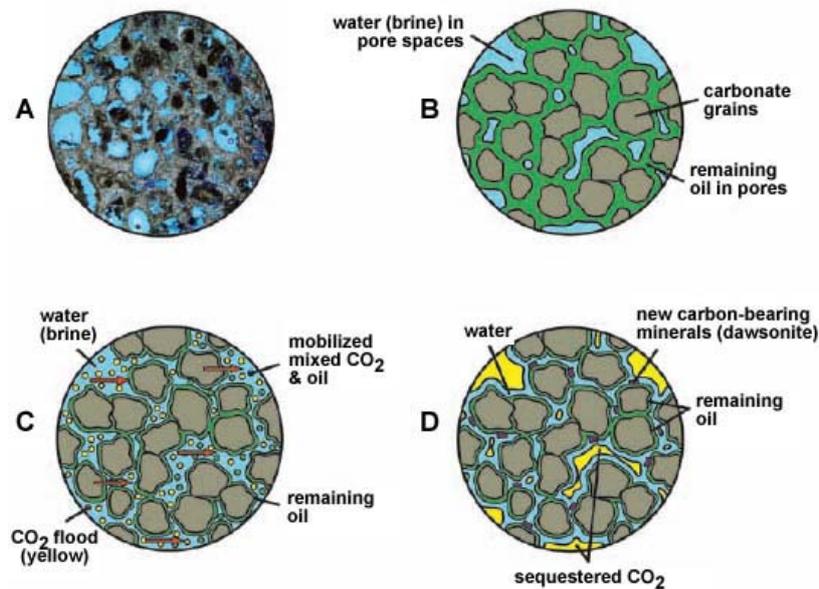


Abb. 30: Verdrängung des Öls (grün) bzw. Lösung in Öl durch  $\text{CO}_2$  (gelb) im Porenraum eines Gesteins (DURHAM 2007)

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  $\text{CO}_2$ -Einspeisung erheblich. Zusätzliche Kosten fallen jedoch an, da das  $\text{CO}_2$  die Kohlenwasserstoffe kontaminiert und wieder abgeschieden werden muss. Durch die Verbrennung des geförderten Öls und Erdgases entsteht wieder neues  $\text{CO}_2$ . Die Menge an injiziertem und entstehenden  $\text{CO}_2$  gleicht sich etwa aus, so dass also keine Netto-Speicherung vorliegt (GERLING & MAY 2001).

Nach GERLING & MAY (2001) kommen die deutschen Erdöl- und Erdgasfelder als potenzielle  $\text{CO}_2$ -Speicher kaum in Frage, da sie zu geringe Speicherkapazitäten aufweisen und meist in zu geringer Tiefe vorliegen. Einige wenige norddeutsche Gaslagerstätten besitzen genügend Speichervolumen.

Im hessischen Teil des Oberrheingrabens gibt es mehrere Erdölvorkommen in den tertiären Pechelbronn- bis Hydrobienschichten (z. B. bei Stockstadt, Wattenheim, Rot, Dudenhofen, Huttenheim, Minfeld), meist in Tiefen zwischen 2.300 und 2.500 m unter der Geländeoberkante. Aufgrund der unregelmäßigen Ausbildungen der Speichergesteine sowie die enge räumliche Begrenzung durch zahlreiche Störungen handelt es sich um sehr kleine Felder. So ist z. B. die Ausdehnung der ölführenden Fläche bei Stockstadt auf 2,5 x 1,3 km beschränkt.

## 7.2 Erdgaslagerstätten

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 (Deutsche Erdöl AG, Wintershall AG, Gewerkschaft Elwerath). Meist liegen hier Schichtaufbeulungen vor (siehe Abb. 31), die durch zahlreiche Brüche begrenzt sind (z. B. bei Pfungstadt). Die größten Erdgaslager (Hähnlein und Stockstadt) werden von der Ruhrgas AG als Untertage-Gasspeicher genutzt, um im Bedarfsfall auf Erdgasvorräte zurückgreifen zu können.

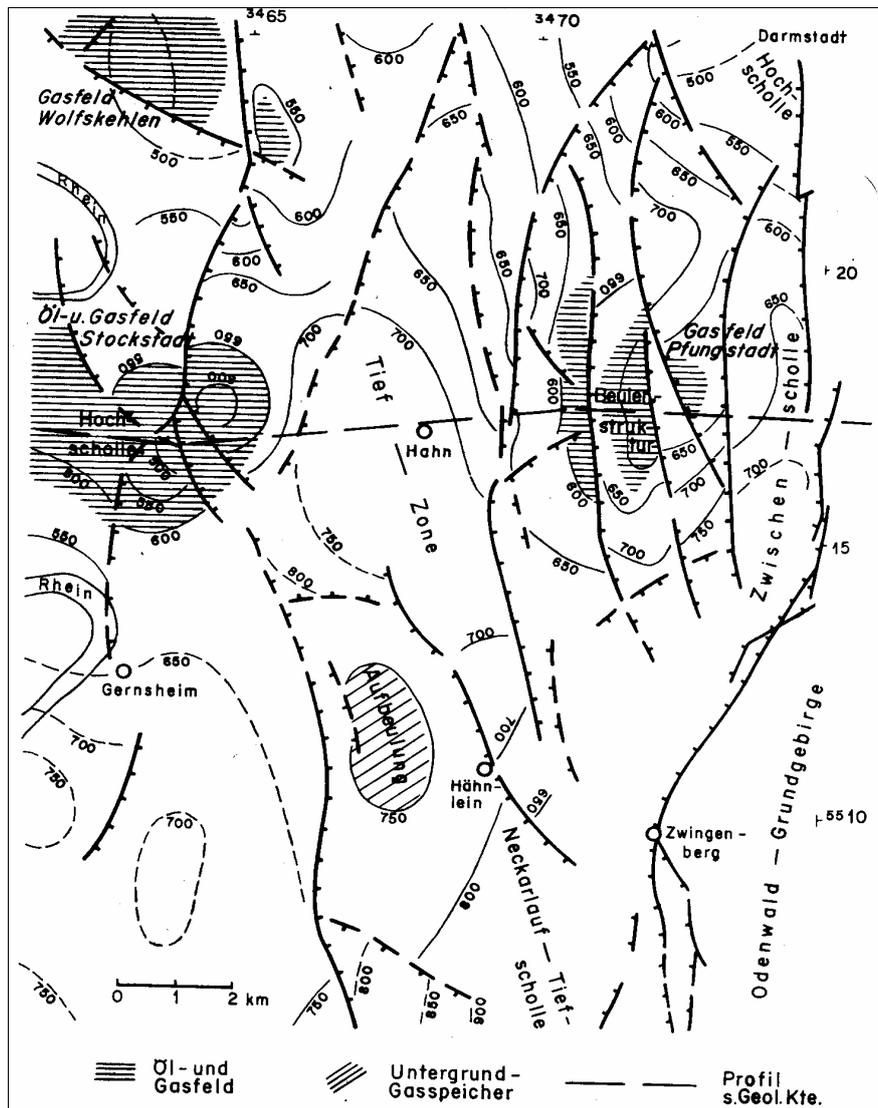


Abb. 31: Tektonische Strukturen einiger Erdgasfelder im Oberrheingraben (KUPFAHL et al. 1972)

Der Gasspeicher Hähnlein liegt etwa 6 km südsüdöstlich von Stockstadt in einer NNW-SSE orientierten, abgesunkenen Scholle der nördlichen Staffelbruchzone des Oberrheingrabens. Begrenzt wird die Scholle von Störungen mit Sprungbeträgen um 20 m. Das Speichergestein, ein ca. 11 m mächtiger Fein- bis

Mittelsandhorizont des Jungtertiär II, weist eine Porosität von 30-35 % und eine Permeabilität bis zu 10.000 mD auf. Die Abdeckung erfolgt durch 45 m mächtige plastische Tone. Der ursprüngliche Lagerstättendruck betrug 50,5 bar in 500 m Tiefe. Hähnlein gehört nach der Einteilung von May (2007) zu den kleineren Speichern (siehe Abb. 32). Der hohe geothermische Gradient im Oberrheingraben und die Tiefenlage des Speichers von weniger als 500 m kann diese Dichte jedoch bei weitem nicht erreicht werden (siehe Kapitel 2).

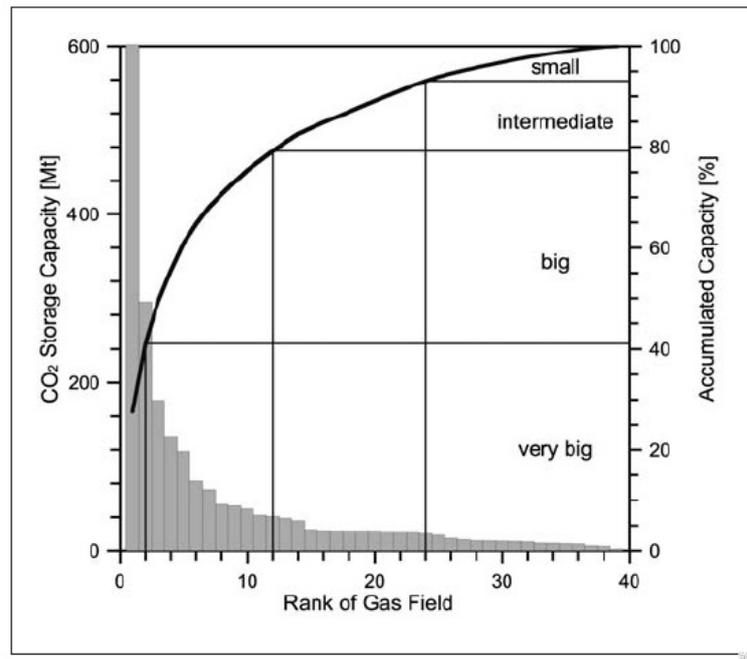


Abb. 32: Größe der Deutschen Erdgasfelder (MAY 2007)

Beim Speicher Stockstadt kam das Erdgas sowohl in den obersten Hydrobienschichten, in 15 - 20 m mächtigen, mergeligen und kalkigen Silt- und Feinsandsteinen des Jungtertiär I als auch in einem 3,5 m mächtigen Sand des Jungtertiär II vor (Abb. 33). Hier liegt ein System von 6 Schollen vor, die von Norden nach Süden treppenförmig abfallen. Die Mächtigkeiten sowie die Schichtenfolge variieren beträchtlich. Der Gasspeicher liegt auf der Nordost-Scholle in einer Tiefe von ca. 450 m. Zwei 8 m mächtige, fein- bis grobkörnige Sandhorizonte, die durch ein 25 m mächtiges Tonpaket getrennt werden, bilden den Speicher. Er weist Porositäten von 20-30 %, Permeabilitäten kleiner 1.000 mD und einen ursprünglichen Lagerstättendruck von 45-50 bar auf. Überdeckt wird er von einem ca. 50 m mächtigen Tonpaket.

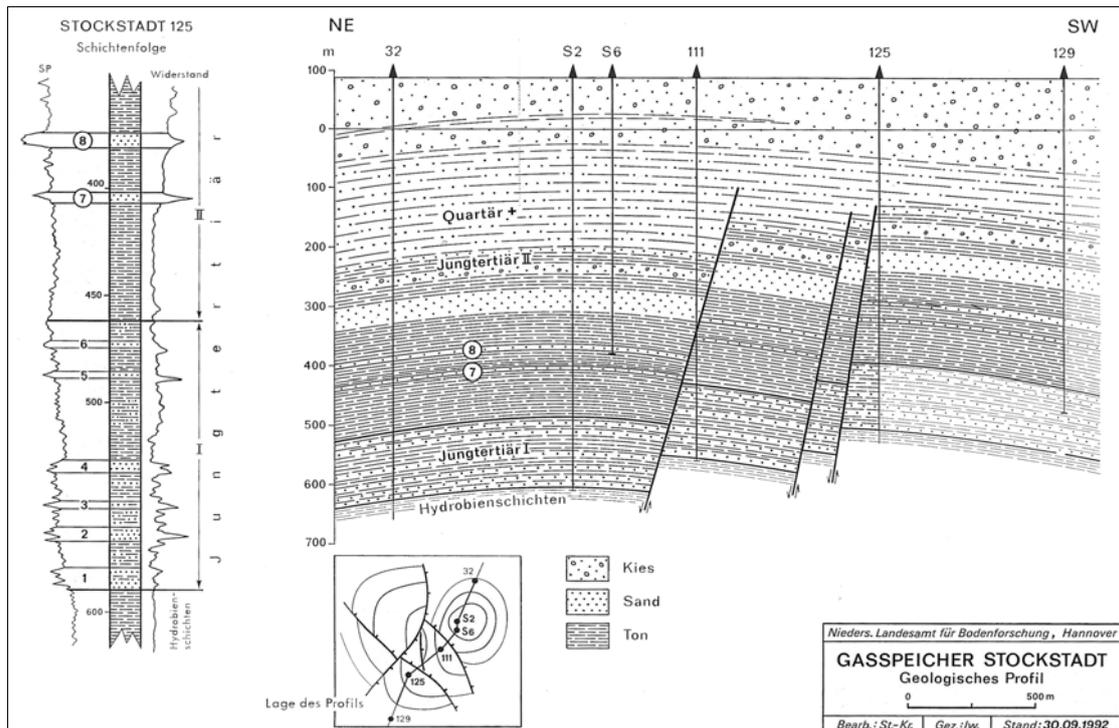


Abb. 33: Profil des Gasspeichers Stockstadt (SEDLACEK et al. 1993)

### 7.3 Bewertung der Situation in Hessen

Bereits existierende Erdöl- und Ergasfelder haben den Vorteil, dass die Strukturen und Materialeigenschaften bekannt sind. Dies ist auch in Hessen der Fall (ANDRES & SCHAD 1959; KUPFAHL et al. 1972; SCHARPFF 1977; FINKENWIRTH 1984). Allerdings sind die Daten wie Seismik und Bohrdaten zum Teil recht alt und nach den Kriterien, die für die CO<sub>2</sub> Speicherung wichtig sind, nicht unbedingt zu verwenden. Die in Hessen bekannten Felder sind auf der Karte (siehe Abb. 31 und 35b) zu finden. Zusammengefasst gibt es folgende für die CO<sub>2</sub> Speicherung günstigen bzw. ungünstigen Eigenschaften in Hessen:

#### Günstige Eigenschaften:

- Zweidimensionales Datenmaterial aus der Kohlenwasserstoffexploration ist vorhanden bzw. wird auch im Zusammenhang mit der Exploration nach „Tiefer Geothermie“ ermittelt werden.
- Bewiesene Speichersicherheit, da diese Felder über geologische Zeiträume dicht waren.

#### Ungünstige Eigenschaften:

- Die Kohlenwasserstofffelder liegen im Oberrheingraben, die die aktivste Hessische Erdbebenregion ist.

- Konkurrierende Nutzung: 2 Erdgasfelder werden als Erdgasspeicher genutzt. Es gibt einige Erlaubnisfelder zum Aufsuchen von Erdwärme im hessischen Oberrheingraben.
- Die Felder sind für eine langfristige Speicherung zu klein (siehe Abb. 32).

## 8 Kohlenlagerstätten

Eine weitere Möglichkeit der CO<sub>2</sub>-Sequestrierung bieten stillgelegte Kohlengruben und tiefe, nicht abbauwürdige Kohlenflöze. Da die großen CO<sub>2</sub>-Emittenten wie kohlenbefeuerte Kraftwerke und Stahlwerke oftmals in Nähe von Kohlenlagerstätten liegen, sind die entstehenden Transportkosten als eher niedrig anzusehen.

### 8.1 Prozesse

Grundsätzlich kommen 3 Prozesse in Frage:

- Die Speicherung in **Schächten und Stollen** nach deren Stilllegung setzt voraus, dass die Hohlräume hochdruckresistent abgedichtet sind, so dass das CO<sub>2</sub> nicht entweichen kann. In Untersuchungen im Rahmen des europäischen GESTCO-Projektes 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. Durch die Injektion von CO<sub>2</sub> steigt 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 CO<sub>2</sub> im **Grubenwasser** gefluteter Stollen setzt aufgrund der physikalischen und chemischen Eigenschaften des CO<sub>2</sub> größere Tiefen voraus. Allerdings beträgt das Speicherpotenzial im 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 RWTH Aachen beschäftigt sich mit Untersuchungen zur Speicherung von CO<sub>2</sub> in ehemaligen Bergwerken bei niedrigem Druck (vorwiegend die Lösung in Grubenwasser sowie die Adsorption an die Kohle selbst).
- Die dritte Möglichkeit ist die **Adsorption** des CO<sub>2</sub> an **nicht abbaubare 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 CO<sub>2</sub> an die Oberfläche der Kohlematrix adsorbiert werden. Die Adsorptionskapazität ist sowohl abhängig von den Kohleeigenschaften 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. So erhöht sich die Adsorptionskapazität mit steigendem Druck (bis in eine Tiefe von ca. 300 m (PIESSENS & DUSAR 2002)), wird aber mit steigender Temperatur wieder geringer (in Tiefen über 300 m). Das von der EU geförderte Projekt RECOPOL untersucht die Speicherung des CO<sub>2</sub> in den Flözen des schlesischen Kohlenbeckens in Polen.

Häufig ist an die Kohle Gruben- oder Flözgas in Form von Methan (CH<sub>4</sub>) gebunden. Da CO<sub>2</sub> eine größere Affinität zur Kohle als Methangas hat, wird dieses verdrängt und kann als Energiequelle genutzt werden (CO<sub>2</sub> Enhanced Coal Bed Methane Recovery). Theoretisch werden dabei 2 Moleküle CO<sub>2</sub> gegen 1 Molekül CH<sub>4</sub> ausgetauscht. Methan hat eine geringere Viskosität als CO<sub>2</sub> und ist daher sehr viel mobiler. Es sollte auf keinen Fall in die Atmosphäre gelangen, da es ein etwa 21 mal höheres Treibhauspotenzial aufweist als CO<sub>2</sub> (PLOETZ 2003). Diese Verfahren sind noch nicht ausgereift und werden in Pilotprojekten u. a. in den bis 10 m mächtigen, permeablen Kohlenflözen im San Juan Becken (Colorado, USA (ECBM)) untersucht.

Ein Nachteil all dieser Methoden ist, dass die momentan aus technischen Gründen noch nicht abbauwürdigen Kohlenflöze auch in Zukunft nicht mehr zur Kohlegewinnung nutzbar gemacht werden können, da sonst das CO<sub>2</sub> wieder freigesetzt wird.

## **8.2 Kohlenvorkommen in Hessen**

Steinkohle kommt in Hessen nicht vor. Braunkohle ist in den eozänen, oligozänen, miozänen und pliozänen Ablagerungen der Hessischen Tertiärsenke zu finden (Abb. 34). Der Nordhessische Braunkohlenbergbau ist der älteste Deutschlands (CHRISTOPHER 1993). Seit 1555 wurde am Meißner Braunkohle abgebaut. Mit einem Heizwert von 11.600-12.500 kJ/kg ist es außerdem die hochwertigste Braunkohle Deutschlands. Sehr unterschiedlich sind jedoch das Alter, die Mächtigkeiten der jeweiligen Flöze sowie die Einschaltungen und Zwischenmittel. Eozäne Braunkohle gibt es u. A. in Borken, Ihringhausen, Oberkaufungen und Glimmerode sowie am Hirschberg und Habichtswald. Die Kohle wurde sowohl im Tagebau als auch im Tiefbau gefördert. Nach dem durch eine Kohlenstaubexplosion herbeigeführten Grubenunglück 1988 in Stolzenbach bei Borken 51 Bergleute umgekommen sind, wurde der untertägige Abbau dort eingestellt. Obwohl die Kohle sehr hochwertig ist und die Flöze eine Mächtigkeit von durchschnittlich immerhin 8 m haben, war die Weiterführung des Tiefbaus auch nicht mehr wirtschaftlich. Das lag vor allem an dem extrem hohen Abraum-Kohleverhältnis. Die ober- und untertägigen Abbauflächen wurden mittlerweile landwirtschaftlich und wasserwirtschaftlich rekultiviert. Unteroligozäne Kohle wurde am Stellberg, Belgerkopf sowie bei

Glimmerode und Burghasungen angetroffen. Sie ist in der Regel von schlechterer Qualität, weist häufig tonig-sandige Einschaltungen auf und die nur 0,5 bis 2 m mächtigen Flöze keilen oft nach geringer Erstreckung aus. Oberoligozäne Kohle wurde am Meißner, Hirschberg, Stellberg, Belgerkopf, Heiligenberg, Habichtswald sowie bei Ostheim, Glimmerode und Frielendorf abgebaut und obermiozäne Braunkohle am Habichtswald und um Kassel. Im Kasseler Braunkohlenrevier sind die Flöze meist stark tektonisch zerstückelt und nur dann erhalten, wenn sie von Basalt überlagert sind. Im Hangenden sind tonige, sandige und tuffitische Horizonte zu finden. Das Hauptflöz kann lokal eine Mächtigkeit von bis zu 12 m erreichen, ist jedoch meist geringer als 6 m. Der Abbau reichte immerhin bis in eine Tiefe von 130 m unter Gelände (Kaufunger Senke). Bei Altmorschen, Melsungen und Wolfhagen sind die maximalen Flözmächtigkeiten mit kleiner 3,5 m sogar noch geringer. Viele Vorkommen sind bereits ausgekohlt (z. B. Ronneberg), andere hingegen enthalten noch gute Vorräte, die im Tiefbau noch gefördert werden könnten (z. B. Stellberg).

Im Wächtersbacher Braunkohlenrevier kann die vor- und zwischenbasaltische Kohle maximal 10 m mächtig werden, lokal aber auch ganz fehlen (Durchschnitt 3 m). Sie kommt in einer maximalen Tiefe von 74 m vor. Im Büdinger Wald steht hochwertige Kohle in einer Mächtigkeit von immerhin 3 m an. Bei Gelnhausen ist das bergbaulich genutzte Braunkohlengebiet weitgehend tektonisch eng begrenzt. Die Kohle weist eine stark wechselnde Ausprägung von tonig-feinkohlig bis grobstückig-holzreich auf. Auf Blatt Schlüchtern gibt es zahlreiche unterschiedlich mächtige (maximal 4-6 m) Flöze, die häufig linsenförmig ausgedünnt oder flexurartig verbogen sind. Schächte reichten hier bis in eine Tiefe von 65 m (Rückers). Auch zwischen Eiterfeld und Neuohf gibt es mehrere, bis 3 m mächtige Flöze. Der miozäne und pliozäne Ablagerungsraum war kleinräumig in Schwellen und Tröge aufgeteilt, so dass die Kohle nicht überall abgelagert wurde. Durch zahlreiche Verwerfungen sind die Flöze häufig nicht durchgängig, sondern an Staffelbrüchen bis zu 20 m versetzt. Auf engem Bereich variiert die Lagerung, Mächtigkeit und Ausprägung der recht unreinen Kohle so stark, dass ein wirtschaftlicher Bergbau meist nicht möglich war (STECKHAN 1952). In der Rhön (Sieblos) wurde nur minderwertige Kohle (geringer Heizwert) in ungünstiger Flözlagerung und -mächtigkeit (2,5-4,5 m) gefördert. Mittlerweile sind fast alle Schächte und Stollenmundlöcher verstürzt.

Die Wetterauer Kohle weist mit 5.900 kJ/kg den schlechtesten Heizwert aller deutschen Kohlen auf (CHRISTOPHER 1993). Die Ausprägung der verschiedenen Kohlentypen, die mit Toneinschaltungen wechsellagern, ist horizontal sehr unterschiedlich und außerordentlich differenziert (BOENIGK et al. 1977). Aufgrund der günstigen Lagerungsverhältnisse und der wenigen Überdeckung wurde die durchschnittlich 9 m mächtige, pliozäne Kohle dennoch gefördert. Mittlerweile sind die Vorräte verbraucht und das Kraftwerk in Wölfersheim wurde 1991 vom Netz genommen.



# Braunkohlenvorkommen



## in Hessen

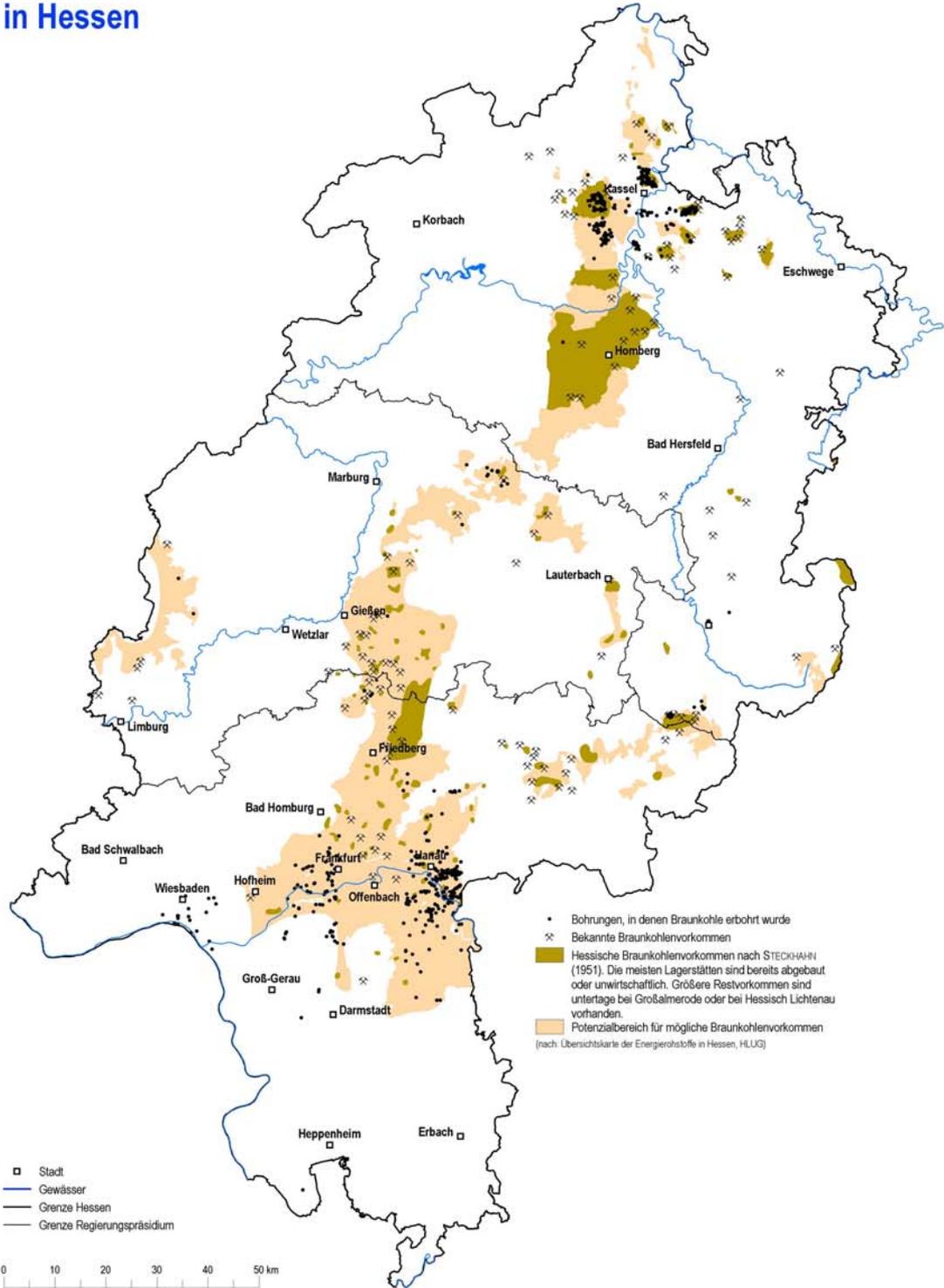


Abb. 34: Braunkohlenvorkommen in Hessen

Rund um den Vogelsberg gibt es mehrere kleine Braunkohlenvorkommen, die sehr gute Kohle aufweisen, aber meist nur geringmächtig ( $< 1,5$  m) sind (Alsfeld, Hessenbrücker Hammer (Grünberg), Beuern, Altschlirf, Cleeburg). Lediglich bei Bad Salzhausen, kann die Blätter- und Glanzkohle lokal Mächtigkeiten bis zu 15 m erreichen.

Außerdem gibt es noch Braunkohlenvorkommen bei Haiger und Breitscheid (Westerwald), im Maintal bei Seligenstadt, bei Hanau, Frankfurt, Hofheim, Hochheim und Ober-Erlenbach, die zwar z. T. eine gute Qualität, aber nur eine geringe Mächtigkeit aufweisen.

### **8.3 Bewertung der Situation in Hessen**

- Die in Hessen vorkommenden Braunkohlenflöze und -schächte befinden sich alle in zu geringer Tiefe, so dass keine effektive Speicherung von dichtem CO<sub>2</sub> möglich ist. Die Deckschichten sind nicht mächtig genug, um sicher abzudichten.
- Die Flöze sind häufig zu gering mächtig ( $< 5$  m).
- Keine Angaben über Porositäten und Permeabilitäten.
- Starke tektonische Beanspruchungen, Versätze, häufige Wasserzutritte.
- Laterale Kontinuität nicht gegeben.
- Flöze sind häufig überbaut (z. B. in Oberkaufungen)
- Ehemalige Kraftwerke in Kassel, Eschwege, Borken und Wölfersheim zwischenzeitlich stillgelegt.

## **9 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 söhlig gelagerten Werra-Steinsalz, das hier durch Auffaltungen erhöhte Mächtigkeiten aufweist. Salzbergwerke eignen sich sehr gut als Speicher für CO<sub>2</sub>-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 Untertagedeponierung. Herfa-Neurode wird z.B als Untertage-Deponie für besonders überwachungsbedürftige Abfälle von Verbrennungsanlagen, der metallverarbeitenden und

chemischen Industrie genutzt.

## 9.1 Salzlagerstätten in Hessen

Das hessische Kalirevier erstreckt sich von Heringen im Norden bis nach NeuhoF 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 1.000 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 Ablaugungsfläche, dem Salzhang (LAEMMLEN 1975).

In Reckrod, Landkreis Fulda, wurden 3 künstliche Hohlräume in 800 - 1.500 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 2 Kavernen nicht vollständig und regelmäßig ausgesolt werden. Es wurde nur ein Volumen von ca. 385.000 m<sup>3</sup> pro Kaverne erreicht, so dass Ende 2000 eine dritte Kavernenbohrung abgeteuft wurde, um das angestrebte Volumen von 1.000.000 m<sup>3</sup> 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 gewährleistet werden kann, sondern im Einzelfall gesondert überprüft werden muss. Besonders das Vorhandensein von Störungen und Basaltgängen begünstigen das Entweichen von Gasen. Im Bereich Reckrod traten Durchlässigkeiten zwischen den Kavernen auf (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).

## 9.2 Bewertung der Situation in Hessen

- Die Salzkavernen in Hessen liegen in weiten Bereichen nicht in für die CO<sub>2</sub>-Speicherung ausreichender Tiefe vor.
- Die Ausdehnung und Kapazitäten der sind gering.
- Eine Speichersicherheit kann aufgrund der lithologisch stark variierenden Deckschichten und dem möglichen Auftreten von Störungen und Basaltgängen nicht generell gewährleistet werden.

- Konkurrierende Nutzung durch die Speicherung von Erdgas in 3 Kavernen bei Reckrod.
- Konkurrierende Nutzung durch Einlagerung von besonders überwachungsbedürftigen Abfällen.

## 10 Ozeanspeicherung

Eine grundsätzliche mögliche Maßnahme zur Verminderung des CO<sub>2</sub>-Anstiegs in der Atmosphäre ist die Speicherung in den Weltmeeren. Verschiedene Möglichkeiten werden v.a. in den USA, Japan und Norwegen seit Ende der 70er Jahren diskutiert und erforscht.

### 10.1 Methoden der Ozeanspeicherung

Direkt eingebrachtes flüssiges CO<sub>2</sub> löst sich im Meerwasser in einer Meerestiefe von ca. 1.000 Metern. Durch die daraus resultierende Erhöhung der Dichte sinkt es in größere Tiefen ab und kann sich am Meeresgrund in Depressionen sammeln. Aufgrund von Zirkulationen und Strömungen scheint es jedoch nur eine mehr oder weniger kurzfristige Speicherung zu sein. Eine längerfristige Versenkung könnte mit Hilfe von Trockeneisblöcken von Schiffen aus erfolgen. Die voraussichtliche Rückhaltezeit des CO<sub>2</sub> im Meerwasser ist spekulativ.

Mit Hilfe von zusätzlichem künstlichem Nährstoffeintrag in Form von Phosphaten und Nitraten könnte eine Erhöhung der Biomasse (z. B. Plankton) erreicht werden, die zusätzliches CO<sub>2</sub> assimiliert und bei der anschließenden Sedimentation bindet. Erste Versuche des Alfred-Wegener Institutes erscheinen jedoch aufgrund der mit einhergehender erhöhten Produktion von Methangas als wenig Erfolg versprechend.

Es besteht noch ein erhöhter Forschungsbedarf im Bezug auf die Veränderungen des Meerwassers sowie deren Auswirkungen. Eine Verringerung des derzeitigen pH-Wertes führt zu einer verstärkten Karbonatlösung, die in größerer Meerestiefe mit steigendem Wasserdruck und erhöhter CO<sub>2</sub>-Lösung noch ansteigt. Die Auswirkungen auf marine Lebensgemeinschaften und weiterer geochemischer Reaktionen sind nicht abschätzbar. Störungen des sensiblen Wirkungsgefüges von Lebensgemeinschaften und den Strömungssystemen können großen Einfluss auf die Klimawirkung der Ozeane nehmen.

### 10.2 Bewertung der Situation in Hessen

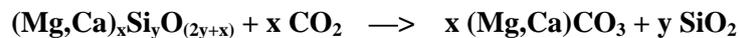
- Für Hessen steht diese Form der CO<sub>2</sub>-Speicherung selbstverständlich nicht zur Verfügung.
- In Deutschland ist die Ozeanspeicherung gesetzlich ausgeschlossen.

# 11 Mineralisierung

Seit Beginn der 90er Jahre gibt es, besonders in Japan und den USA, Untersuchungen über die dauerhafte Bindung von CO<sub>2</sub> durch Mineralumwandlungen in Gesteinen. Hierbei werden die natürlichen Vorgänge der Gesteinsverwitterung simuliert.

## 11.1 Prozesse

Bei der so genannten Karbonatisierung entstehen durch die Reaktion von CO<sub>2</sub> mit Mg-, Fe-, Ca- sowie Alumosilikaten Karbonate:



Es entstehen Minerale, die auch natürlich vorkommen können und als stabile Festkörper das enthaltene CO<sub>2</sub> über lange geologische Zeiträume (Millionen Jahre) permanent binden. Mg-Silikate (z. B. Olivin Mg<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> (Forsterit)) haben sich hierbei als am reaktivsten erwiesen (RADGEN et al 2005). Die Reaktion verläuft exotherm, so dass hier zusätzlich Energie gewonnen werden könnte. Ungünstig ist der sehr langsame Reaktionsverlauf bis zu mehreren 100.000 Jahren. Quarzsandsteine, die meist guten Porositäten und Permeabilitäten aufweisen, sind arm an reaktiven Mineralen.

In Nordamerika werden Flutbasaltdecken auf ihre Eignung untersucht. Das einzige derartige hessische Vorkommen, der Vogelsberg, wird zur Trinkwasserversorgung der Rhein-Main-Region genutzt und steht nicht zur Verfügung. Denkbar wäre hier die Nutzung des beim Abbau des Basalts anfallenden Gesteinsmehls. Jedoch werden zur Bindung von 1 Tonne CO<sub>2</sub> bei vollständiger Reaktion theoretisch 1,6 Tonnen, in der Praxis jedoch bis zu 10 Tonnen Olivin benötigt (RADGEN et al 2005). Bei einem Olivingehalt von maximal 25 Vol. % (meist < 15 Vol. %) Olivin im Basalt würde etwa mindestens die 40fache Menge des zu bindenden CO<sub>2</sub> benötigt werden. Die „Mineralisierung“ zu Magnesiumcarbonat findet bei einem Druck von 340 bar und Temperaturen von 500 °C statt (IPCC, BLOHM et al 2006). Es ist daher ein beträchtlicher zusätzlicher Energieaufwand nötig.

## 11.2 Bewertung der Situation in Hessen

- Sehr langsamer Reaktionsablauf.
- Die Gewinnung der erforderlichen Mengen Silikate, deren Transport, Aufbereitung, Lagerung sowie der Karbonatisierungsvorgang und die anschließende Entsorgung geht mit einem hohen Energie- und Kosteneinsatz einher und ist daher nicht wirtschaftlich.

## 12 Zusammenfassung

Im Rahmen des integrierten Klimaschutzprogramms für Hessen (= **INKLIM 2012**) 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 CO<sub>2</sub> untersucht.

In der vorliegenden Studie wurden die verschiedenen Speichermöglichkeiten in Hessen (Speicherung in Ozeanen, 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.

Für **Deutschland** kommt das Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH bei der Bewertung von Speichermöglichkeiten für CO<sub>2</sub> anhand ausgewählter Kriterien zu folgenden Ergebnissen (siehe Tabelle 5).

Tab. 5: Bewertung geologischer Speicheroptionen in Deutschland (FISCHEDICK et al. 2007)

Option	Kapazität in [Gt]	Langzeitstabilität	Kosten*	Stand der Technik	Nutzungskonflikte	Allgemeine Risiken
Ausgeförderte Gasfelder	+ 2,3–2,5**	+	+	+ (+)	–	+
Tiefe saline Aquifere	++ 12–28**	+	--	+	–	(+)
Tiefe Kohleflöze	+ (+) 3,7–16,7	+	--	–	–	–
Ausgeförderte Ölfelder	-- 0,11	+	++	++	–	+
Salzkavernen	-- 0,04	--	k. A.	+	--	--
Stillgel. Kohlebergwerke	+ 0,78	--	--	--	--	–

\* Die Kostenbewertung beinhaltet nur die Speicherkosten ohne Abscheidung, Verdichtung und Transport (nach ECOFYS 2004, BGR, eigene Ergänzungen)

\*\* Zahlen nach May et al. 2005

Bewertungshinweise:

- Kriterium wird negativ/bzw. als sehr problematisch eingestuft
- noch grundsätzliche Schwierigkeiten bestehen, sind aber ggf. lösbar
- + gute Bewertung bzw. geringe Hindernisse
- ++ sehr gute Bewertung
- () Klammern geben Unsicherheiten an bzw. müssen hier Einzelfallprüfungen stattfinden
- k.A. keine Angabe

Danach eignen sich ausgeförderte Erdöl- und Erdgasfelder, sofern sie eine genügend große Kapazität aufweisen, nach dem heutigen Stand der Forschung am besten für die Speicherung von CO<sub>2</sub>. Die Eignung tiefer salinärer Aquifere wird aufgrund der nicht abschätzbaren Kosten als problematisch eingestuft. Von der Einspeisung in Salzkavernen bzw. stillgelegten Kohlenbergwerken wird aufgrund fehlender Langzeitstabilität abgeraten.

### **Für Hessen kommt diese Vorstudie zu folgendem Schluss:**

**1. Gebiete, die sich nicht für die Speicherung von CO<sub>2</sub> 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.

### **2. 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 CO<sub>2</sub> in die **Ozeane** wird von der Bundesregierung aus ökologischen Gründen generell ausgeschlossen.

Künstlich geschaffene Hohlräume in **Salzstöcken** oder aufgegebenen **Kohlenbergwerken** werden vor allem aus Kapazitäts- und Sicherheitsgründen nicht für die Speicherung von CO<sub>2</sub> in Erwägung gezogen (Gemeinsamer Bericht des BMWi, BMU und BMBF für die Bundesregierung vom September 2007). 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 3 potenziell geeignete Kavernenspeicher, die allerdings zur Erdgasspeicherung genutzt werden.

### **3. In Hessen bestehen kurz- und mittelfristig nutzbare Möglichkeiten zur Speicherung von CO<sub>2</sub> in erschöpften Erdöl- und Erdgaslagerstätten und in salinaren Aquiferen.**

Die Lagerstättenverhältnisse und das Speicherpotenzial der **Erdöl- und Erdgasfelder** im Oberrheingraben sind in der Regel sehr gut dokumentiert. Dabei wird angenommen, dass das ursprünglich von Erdgas erfüllte Porenvolumen vollständig ( $\pm$  ca. 18 %) für die Speicherung von CO<sub>2</sub> genutzt werden kann. 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.

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 Tabelle 4 hingewiesen, in der 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 CO<sub>2</sub>-Speichermöglichkeiten mit der dazu erforderlichen Tiefenlage ermittelt (siehe Abb. 35 a):

- Oberrheingraben: Rotliegend und Tertiär (Pechelbronn-Schichten)
- Hessische Senke (Raum Kassel, Werra-Kali-Gebiet, Vogelsberg und Hohe Rhön): Rotliegend, Zechstein (Plattendolomit), Mittlerer Buntsandstein (Volpriehausen-Sandstein)

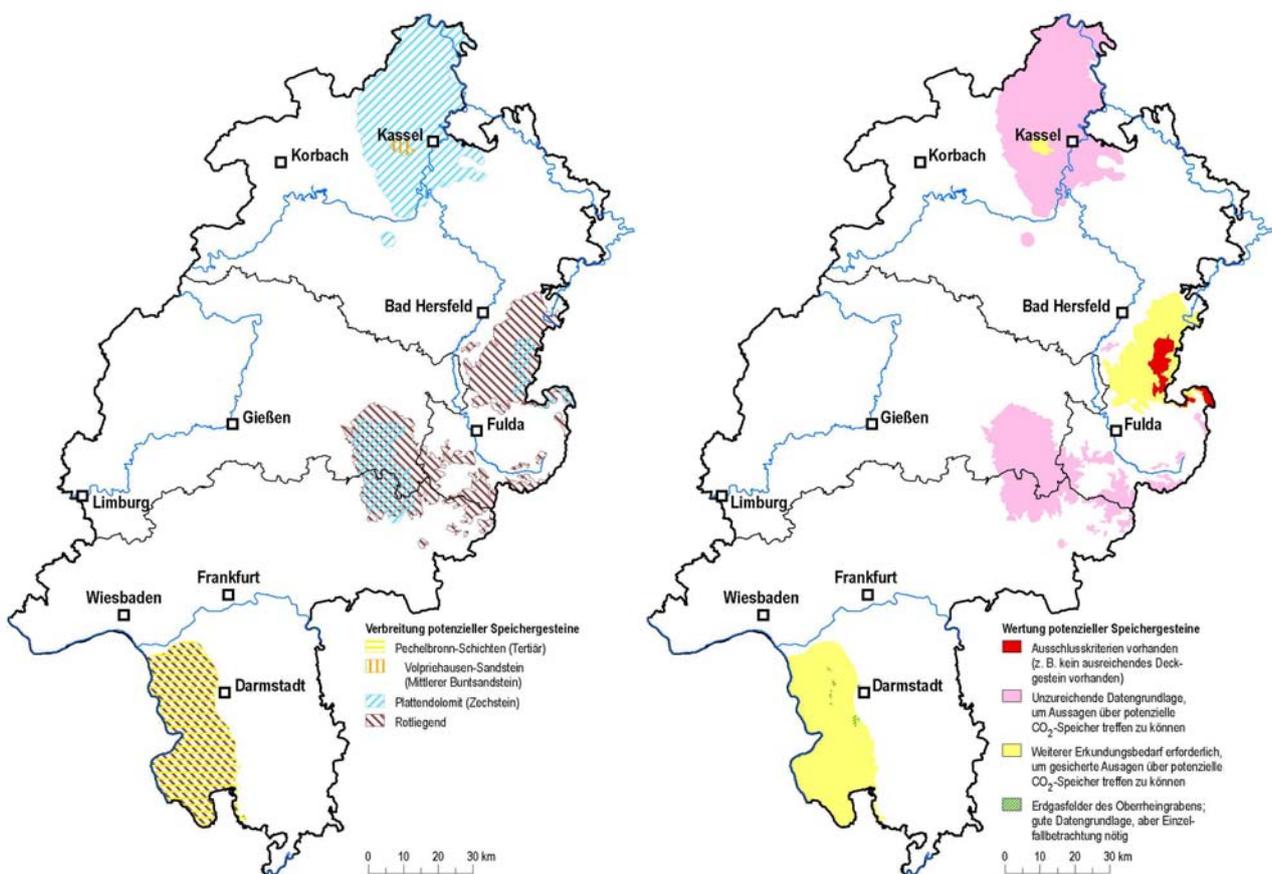


Abb. 35 a und b: Potenzielle CO<sub>2</sub>-Speicher in Hessen und ihre Wertung

Als nächster Schritt wurden diese Flächen nochmals bewertet. Dabei wurde unterschieden zwischen (siehe Abb. 35 b):

- Dunkelrot: Ausschlusskriterien vorhanden (z. B. kein ausreichendes Deckgestein vorhanden)
- Rosa: unzureichende Datenlage (keine Bohrungen), um Aussagen über ein Potenzial treffen zu können
- Gelb: weiterer Erkundungsbedarf bzw. vertiefende Betrachtung erforderlich

- Grün schraffiert: potenziell gute Speichermöglichkeiten (hauptsächlich Erdgas- und Erdölfelder des Oberrheingrabens), aber Einzelfallbetrachtung und konkurrierende Nutzung ist noch zu prüfen

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 Pechelbronn-Schichten im Oberrheingraben betrifft.

### **Speicherkapazitäten**

Um ein Gefühl für das Speichervermögen zu bekommen, wird immer von einem Bedarf eines „kleinen“ 500 MW-Kohlekraftwerks mit 10.000 t pro Tag CO<sub>2</sub> (IPCC-Report) ausgegangen. So wurde beispielhaft (Plattendolomit im Werra-Kali-Revier) für die salinaren Aquifere ein maximales Speichervermögen von 12.420.000 t CO<sub>2</sub> berechnet, welches in nicht einmal 4 Jahren erschöpft wäre.

### **Zusammenfassend können folgende Aussagen für Hessen getroffen werden:**

- Die Erdöl- und Erdgasfelder im Oberrheingraben eignen sich, abgesehen von den geringen Kapazitäten, recht gut zur Einlagerung von CO<sub>2</sub>, hier ist jedoch immer eine Einzelfallbetrachtung notwendig.
- Bei den salinaren Aquiferen sind detaillierte Untersuchungen bezüglich flächenhafter Ausdehnung und Kapazitäten notwendig (z. B. Auswertung der Seismik). Allerdings gibt es für große Kohlekraftwerke in Hessen keine ausreichenden Speicher. Es sollte untersucht werden, ob in Hessen kleinere CO<sub>2</sub>-Quellen bzw. Anlagen (z. B. Chemieanlagen) sich für die doch kleinen Felder eignen.

### **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 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. 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. Allerdings sind Tiefbohrungen, die nur im wissenschaftlichen Interesse liegen, kaum finanzierbar (bei Bohrkosten von ca. 1.000 € pro m ist für jede Bohrung für die hier angesprochenen Fragestellungen ca. 1 Million € zu veranschlagen). Um die erforderlichen Wissenslücken im Bereich eines potenziellen Speicherstandortes zu füllen, wird mit Kosten für die seismische Exploration (2D und 3D Seismik) von mehreren 100.000 € zu rechnen sein. 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 CO<sub>2</sub>) und ihrer Wechselwirkungen mit dem umgebenden Material erfolgen.

### **Danksagung:**

Der Dank gilt Roland Becker, Armin Grubert, Michaela Dersch-Hansmann, Hans-Gerhard Fritsche, Nicola Hug, Martin Hottenrott und Gudrun Radtke für die fachliche Unterstützung und Michaela Hoffmann für die Umsetzung bzw. Aufbereitung der Karten. Besonderer Dank gilt Herrn Franz May für die nette Beratung und Einführung in die Thematik sowie Matthias Kracht (auch für Kaffee und Kekse ☺).

## 13 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 CO<sub>2</sub> in einem Kraftwerksprozess und anschließende Speicherung in geologischen Strukturen.

**CO<sub>2</sub>-Speicherung oder CO<sub>2</sub>-Sequestrierung:** Dauerhafte (möglichst > 10.000 Jahre) Endlagerung oder Deponierung von CO<sub>2</sub>, welches bei Stromerzeugung durch Verbrennung fossiler Energien entsteht.

**Durchlässigkeit:** Die **Permeabilität** und der **Durchlässigkeitsbeiwert (k<sub>f</sub>-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.

**Europäischer Emissionshandel:** Seit 2005 sind die Mitgliedsländer der Europäischen Union durch die EU-Emissionshandels-Richtlinie verpflichtet, jeweils zu Beginn einer Emissionshandelsperiode einen Nationalen Allokationsplan (NAP) vorzulegen, um die im Kyoto-Protokoll festgelegte Reduktion von Treibhausgasen zu erreichen. Darin wird festgeschrieben, wieviel Treibhausgase jeder größere Emittent eines Landes in einem bestimmten Zeitraum ausstoßen darf. Emittiert ein Unternehmen mehr als erlaubt, muss es bei einer anderen Firma, einem Broker oder an einer Energiebörse (z. B. EXAA) Emissionsrechte zukaufen.

**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 hervorgegangen 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 Grad Celsius 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.

**Hydrostatischer Druck:** Summiert sich innerhalb des Grundwasserkörpers aus dem atmosphärischen Druck, der auf dem Grundwasser lastet und dem Gewicht der überlagernden Wassersäule [Maßeinheit: bar (1 bar = 10,19716 m Wassersäule =  $10^5$  Pascal)].

**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, dass zur Erfüllung der Treibhausgasminde rung nach Ratifizierung des Kyoto-Protokolls beitragen soll ([www.hmulpv.hessen.de](http://www.hmulpv.hessen.de), [www.hlug.de](http://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 global Erwärmung beurteilen und Vermeidungsstrategien zusammentragen soll.

**Kapillare:** Bezeichnung für kleine bzw. kleinste Hohlräume, in denen auf Grund der Adsorptionskräfte Flüssigkeiten auch entgegen der Schwerkraft wandern können.

**Kapillarer Schwellendruck:** Derjenige Druck, bei dem das in einem wassergesättigten Gestein unter Lagerstättenbedingungen injizierte Gas das in den Gesteinskapillaren gebundene Wasser verdrängt.

**Kritischer Punkt:** Thermodynamischer Zustand eines Stoffes, der sich durch Angleichen der Dichten der flüssigen Phase und Gasphase kennzeichnet. Oberhalb des kritischen Punktes sind Flüssigkeit und Gas nicht zu unterscheiden, man spricht von überkritischem Zustand.

**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.

**Mediandurchmesser:** Diejenige Korngröße, ober- und unterhalb derjenigen 50 Gewichtsprozent der betreffenden Gesteinsprobe liegt.

**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 CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub> 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 (H<sub>2</sub>O), Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>), Methan (CH<sub>4</sub>), Distickstoffoxid (Lachgas, N<sub>2</sub>O), Schwefelhexafluorid (SF<sub>6</sub>), Ozon (O<sub>3</sub>) und Fluor-Chlor-Kohlenwasserstoffen (FCKW) können aufgrund ihrer chemischen Natur in unterschiedlichem Ausmaß die Wärmestrahlung absorbieren und so die Wärme in die Atmosphäre abgeben.

## 14 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**; Industrieverlag von Hernhaussen K.G., Hamburg
- BACHU, ST. (2003): Screening and ranking of sedimentary basins for sequestration of CO<sub>2</sub> in geological media in response to climate change. – Environmental Geology, **44**: 277-289
- BECKER, F. (2002): Zechsteinkalk und Unterer Werra-Anhydrit (Zechstein 1) in Hessen: Fazies, Sequenzstratigraphie und Diagenese. – Geol. Abh. Hessen, **109**, Wiesbaden
- BECKER, R.E. & KULICK, J. (1999): Erläuterungen zur geologischen Karte von Hessen 1:25.000, Bl. 4923 Altmorschen. – 394 S.; Wiesbaden
- BLOHM, M.; ERDMENGER, CH. GINZKY, H.; MARTY, M.; BECKERS, R.; BRIEM, S.; CLAUSEN, U.; LOHSE, CH.; RECHENBERG, J.; SCHÄFER, L. & STERNKOPF, R. (2006): Technische Abscheidung und Speicherung von CO<sub>2</sub> – nur eine Übergangslösung. – Climate Change – Positionspapier des Umweltbundesamtes zu möglichen Auswirkungen, Potenzialen und Anforderungen
- BMWi, BMU & BMBF (2007): Entwicklungsstand und Perspektiven von CCS1-Technologien in Deutschland. – Gemeinsamer Bericht des BMWi, BMU und BMBF für die Bundesregierung (19. September 2007)
- BOENIGK, W.; VON DER BRELIE, G.; BRUNNACKER, K.; KEMPF, E.K.; KOČI, A.; SCHIRMER, W.; STADLER, G.; STREIT, R. & TOBIEN, H. (1977): Jungtertiär und Quartär im Horloff-Graben/Vogelsberg. – Geol. Abh. Hessen, **75**: 80 S., Wiesbaden
- BOO, R.; POLAK, S.; ZWEIGEL, P.; LUNDIN, E.; LINDEBERG, E. & OLESEN, O. (2006): Storage potential for CO<sub>2</sub> in Mid-Norway - results from the CO2STORE project. – GHGT-8, June 2006, Trondheim
- BOO, R.; ZWEIGEL, P.; POLAK, S. & LINDEBERG, E. (2005): Potential risks associated with CO<sub>2</sub> storage, Case Study Mid-Norway, CO2STORE project. – NGU Report, **043**: 27 S.
- BRUNE, ST.; MAY, F.; FABER, E.; GERLING, J. P.; KRULL, P. & KROOß, B. M. (2002): FuE Initiativen zur CO<sub>2</sub>-Speicherung. – VDI-Berichte **1714**: 207–216

- CHADWICK, A.; ARTS, R.; BERNSTONE, CH.; MAY, F.; THIBEAU, S. & ZWEIGEL, P. (2007): Best Practice for the Storage of CO<sub>2</sub> 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**, Verlag im Biebental
- DERER, C.E. (2003): Tectono-Sedimentary Evolution of the Northern Upper Rhinegraben (Germany) with special regards to the early-synrift stage. – Dissertation Rheinische Friedrich-Wilhelm Universität Bonn
- DERER, C.E.; SCHUMACHER, M.E. & SCHÄFER, A. (2005): The northern Upper Rhine Graben: Basin geometry and early syn-rift tectono-sedimentary evolution. – Internal Journal of Earth Sciences, **94**: No. 4, Springer
- 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. (1964): Die Grenze Zechstein - Buntsandstein in der südlichen Randfazies. – Notizbl. hess. L.-Amt Bodenforsch., **98**: 81-92, Wiesbaden
- DIEDERICH, G.; FINKENWIRTH, A.; HÖLTING, B.; KAUFMANN, E.; RAMBOW, D.; SCHARPFF, H.-J.; STENGER-RUTKOWSKI, W. & WIEGAND, K. (1991): Hydrogeologisches Kartenwerk Hessen 1:300.000. – Geol. Abh. Hessen, **95**: 83 S., Wiesbaden
- DOEBL, F. (1967): The Tertiary and Pleistocene Sediments of the Northern and Central part of the Upper Rhinegraben. – The Rhinegraben Progress Report
- DÜRBAUM, H. J.; MATTHESS, G. & RAMBOW, D. (1969): Untersuchungen der Gesteins- und Gebirgsdurchlässigkeit des Buntsandstein in Nordhessen. – Notizbl. hess. L.-Amt Bodenforsch., **97**: 258-274; Wiesbaden
- DURHAM, L.S. (2007): Coralling CO<sub>2</sub>: A Win-Win for Oil. – EXPLORER Correspondent, 5 S.
- EBIGBO, A.; CLASS, H. & HELMIG, R. (2006): CO<sub>2</sub> Leakage through an Abandoned Well: Problem-Oriented Benchmarks. – Kluwer Academic Publishers, 24 S.
- 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

- KOSAAB - KOORDINIERUNGS-AUSSCHUSS SALZABWASSER HESSEN-THÜRINGEN (1994): Sonderbericht Diffuse Einträge von Salzwasser in die Werra - 1994. – Thüringer Ministerium für Landwirtschaft, Naturschutz und Umwelt, Erfurt
- 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
- FISCHEDICK, M.; ESKEN, A.; LUHMANN, H.J.; SCHÜWER, D. & SUPERSBERGER, N. (2007): Geologische CO<sub>2</sub>-Speicherung als klimapolitische Handlungsoption. – Wuppertal Spezial, **35**; Wuppertal Institut für Klima, Umwelt Energie GmbH im Wissenschaftszentrum NRW
- FORSTER, A.; NORDEN, B.; ZINCK-JORGENSEN, K.; FRYKMAN, P.; KULENKAMPFF, J.; SPANGENBERG, E.; ERZINGER, J.; ZIMMER, M.; KOPP, J.; BORM, G.; JUHLIN, CH.; COSMA, C.-G. & HURTER, S. (2006): Baseline characterization of the CO<sub>2</sub>SINK geological storage site at Ketzin, Germany. – Association of Petroleum Geologists/Division of Environmental Geosciences, **13**: No 3, 141-161
- FRANGEUL, J.; NGHIEM, L.; CAROLI, E. & THIBEAU, S. (2004): Sleipner/Utsira CO<sub>2</sub> Geological Storage Full Field Flow and Geochemical Coupling to Assess the Long Term Fate of the CO<sub>2</sub>. – Abstract AAPG Annual Meeting, 1
- FRITSCH, H.-G. (2000): Geologische Beratung zum Erdgaskavernenspeicher Reckrod. – Jahresbericht 2000 des Hessischen Landesamtes für Umwelt und Geologie, 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, H.-G. & KRACHT, M. (2007): Geothermische Potenziale und Seismizität in Hessen. – 2. Tiefe Geothermie-Forum, 4.9.2007 Darmstadt
- FÜCHTBAUER, H. (HRSG.) (1988): Sedimente und Sedimentgesteine. – Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart
- 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 AKTINUNDE, O.; MUKERJI, T. & URBAN, J. (2004): Predicting Pressure and Saturation Changes From Elastic Wave Velocities in a CO<sub>2</sub>-Flooded Coal Bed Methane: A Modeling

Study. – Tagungsbeitrag AAPG Annual Meeting, S. 18-21

HUG, N. (2004): Sedimentgenese und Paläogeographie des höheren Zechstein bis zur Basis Buntsandstein in der Hessischen Senke. – Geol. Abh. Hessen, **113**, Wiesbaden

KÄDING, K.-CH. (2000): Die Aller-, Ohre-, Friesland- und Fulda-Folge (vormals Bröckelschiefer-Folge). – Kali und Steinsalz **13**: Nr. 14

KOWALCZYK, G. (1983): Das Rotliegende zwischen Taunus und Spessart. – Geol. Abh. Hessen, **84**: 99 S.; Wiesbaden

KULICK, J.; LEIFELD, D.; MEISL, S.; PÖSCHL, W.; STELLMACHER, 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

KUPFAHL, H.-G. (1981): Erläuterungen zur geologischen Karte von Hessen 1:25.000, Bl. 4723 Oberkaufungen. – 212 S., Wiesbaden

KUPFAHL, H.-G.; MEISL, S. & KÜMMERLE, E. (1972): Erläuterungen zur geologischen Karte von Hessen 1:25.000, Bl. 6217 Zwingenberg a.d. Bergstraße. – 276 S., Wiesbaden

LAEMMLEN, M. (1975): Erläuterungen zur geologischen Karte von Hessen 1:25.000, Bl. 5225 Geisa. – 272 S., Wiesbaden

LEBMANN, B. & WIEGAND, K. (1998): Der vulkanische Vogelsberg als Beispiel für ein mehrschichtiges Grundwasserstockwerkssystem. – Geol. Jb. Hessen, **126**: 81-92, Wiesbaden

LEBMANN, B.; WIEGAND, K. & SCHARPFF, H.-J. (2001): Die Hydrogeologie des vulkanischen Vogelsberges. – Geol. Abh. Hessen, **108**: 144 S., Wiesbaden

MARELL, D. (1989): Das Rotliegende zwischen Odenwald und Taunus. – Geol. Abh. Hessen, **89**: 128 S., Wiesbaden

MAY, F. & KRULL, P. (2004): Work Package 2, Study area A: North Germany - GESTCO final report

MEIER, L. (1989): Ein Modell für die Tiefenstruktur und Kinematik im Bereich des nördlichen Oberrheingrabens. – Dissertation, Universität 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
- MÖBUS, H.-M. (2004): Allochthone Triasschollen am Unterwerrasattel als Schlüssel zum Verständnis saxonischer Grabentektonik. – Dissertation, 197 S., Phillips- Universität Marburg
- MÖLLER, H. (1985): Petrographie und Fazies des Plattendolomits (Leine-Karbonat, Ca<sub>3</sub>) 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
- PIESSENS, K. & DUSAR, M. (2002): Feasibility of CO<sub>2</sub> sequestration in coal mines. – GESTCO Project, Work package 2, Study F
- PLOETZ, CH. (2003): Sequestrierung von CO<sub>2</sub>: Technologien, Potenziale, Kosten und Umweltauswirkungen. – Materialien, WBGU: Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung, Globale Umweltveränderungen
- 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. & KNOFF, ST. (2005): Bewertung von Verfahren zur CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Deponierung. – Climate Change, Umweltbundesamt
- RADTKE, G. & MARTINI, E. (HRSG.) (2007): Die Bohrungen Wallau im nordöstlichen Mainzer Becken (Rotliegend, Pechelbronn-Gruppe, Bodenheim-Formation). – Geol. Abh. Hessen, **116**: 273 S. Wiesbaden
- REICHLER, D., HOUGHTON, J., BENSON, J. ET AL. (1999): Carbon Sequestration - Research and Development. – Office of Science, Office of Fossil Energy, U.S. Dep. of Energy
- RÖSING, F. (1969): Erläuterungen zur geologischen Karte von Hessen 1:25.000, Bl. 4622 Kassel-West. – 205 S., Wiesbaden
- SCHARPFF, H.-J. (1977): Erläuterungen zur geologischen Karte von Hessen 1:25.000, Bl. 6316 Worms. –

282 S., Wiesbaden

- SCHRAFT, A. & RAMBOW, D. (1984): Vergleichende Untersuchungen zur Gebirgsdurchlässigkeit im Buntsandstein Osthessens. – Geol. Jb. Hessen, **112**: 235-261, Wiesbaden
- SCHULZ, H.-M.; MAY, F.; GERLING, J. P.; KOSINOWSKI, M.; KRÜGER, M.; FABER, E.; POPPENBURG, J. & TESCHNER, M. (2007): CO2GeoNet: A European Network of Excellence on Geological Storage of CO<sub>2</sub>. – DGMK/ÖGEW Frühjahrstagung 2007, Celle
- 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**, 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 Rheinischen 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
- VOSTEEN, H.-D. (2005): CSEGR - Carbon Sequestration with Enhanced Gas Recovery. – BGR

# 15 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Vereinfachtes Phasendiagramm des Kohlenstoffdioxids (Quelle: Wikipedia)	7
Abb. 2: Abhängigkeit der Dichte des CO <sub>2</sub> von verschiedenen Einflussfaktoren (verändert nach CHADWICK et al. 2007)	8
Abb. 3: Abnahme der Sandsteinporosität (an ausgewählten Gesteinen) mit zunehmender maximaler Versenkungstiefe, in Abhängigkeit vom Mediandurchmesser der Einzelkörner (FÜCHTBAUER et al. 1988)	9
Abb. 4: Überblick über die Möglichkeiten der CO <sub>2</sub> -Speicherung	10
Abb. 5: Deutsche Akteure der CO <sub>2</sub> -Rückhaltung (RADGEN et al. 2005)	14
Abb. 6 a und b: Bohrungen mit einer Teufe > 500 m aus dem Archiv des HLUg	17
Abb. 7: Konstruktion der Speichergesteins-Oberflächen mit Hilfe der Geologischen Übersichtskarte 1:300.000, des Digitalen Höhenmodells und der Bohrungen	18
Abb. 8: Digitales Höhenmodell von Hessen	19
Abb. 9: Geologische Übersichtskarte (GÜK 300) von Hessen (links), Ausschlussgebiete für CO <sub>2</sub> -Speicherung sind weiß dargestellt (rechts)	20
Abb. 10: Gefaltete und gestörte Gesteinsschichten des Devon im Rheinischen Schiefergebirge (Foto: KÖTT)	21
Abb. 11: Verbreitung des potenziellen Rotliegend-Speichers und Tiefenlage der Grenze Rotliegend-Zechstein	23
Abb. 12: Ausschnitt aus der Karte: Paläogeographie zur Zeit des Rotliegend (KULICK et al. 1984) mit Bohrungen, die ins Rotliegend reichen sowie die angetroffene Lithologie (runde Symbole = Konglomerate und Sande)	24
Abb. 13: Basaltgänge im Salzbergwerk Merkers (Foto: FRITSCHÉ)	25
Abb. 14: Geologische Profile durch den Vogelsberg (EHRENBERG & HICKETHIER 1985). Deutlich ist hier die unterschiedliche Höhenlage des Rotliegend (dunkelorange) und Zechstein (blau) zu sehen.	26
Abb. 15: Der Schollenbau der Basaltbasis des Vogelsberges (EHRENBERG & HICKETHIER 1985)	26
Abb. 16: Paläogeographie des Zechstein mit Schwellen und Trögen (KULICK et al. 1984)	28
Abb. 17: Bohrprofilsäule der Bohrung Wilhelmshöhe I (Kassel) mit den potenziellen Speicher-(Pfeil) und Deckschichten (Klammer)	29
Abb. 18: Verbreitung und Tiefenlage der Oberkante des potenziellen Speichers Plattendolomit (zCa <sub>3</sub> )	30
Abb. 19: Die Mächtigkeit der Deckschichten (Zechstein 4-7 und Unterer Buntsandstein) in Bereichen, in denen die Oberkante Plattendolomit tiefer als 800 m u. GOK liegt.	31
Abb. 20: Mächtigkeit des Plattendolomits (LAEMMLEN 1975)	33
Abb. 21: Geologisches Profil Blatt Geisa (LAEMMLEN 1975)	33

Abb. 22: Bohrprofilsäule mit den potenziellen Speicher-(Pfeil) und Deckschichten (Klammer)	34
Abb. 23: Verbreitung und Tiefenlage der Oberkante des potenziellen Speichers Volpriehausen-Sandstein	36
Abb. 24: Seismisches Profil durch den Oberrheingraben (bei Worms) zeigt die schollenartige Zerstückelung der Gesteinseinheiten (DERER 2003)	38
Abb. 25: Nebeneinanderstellung verschiedener Bohrungen ins Rotliegend des Oberrheingrabens (MÜLLER 1996 nach MARELL 1989), deutlich sichtbar die unterschiedliche Höhenlage und Ausprägung der Gesteine	39
Abb. 26: Lithologisches Profil durch die Pechelbronn-Gruppe (GAUPP & NICKEL 2001)	41
Abb. 27: Schematisches Querprofil durch den nördlichen Oberrheingraben (GAUPP & NICKEL 2001)	42
Abb. 28: Vereinfachter Profilschnitt durch die Hessische Senke mit den für die CO <sub>2</sub> -Speicherung relevanten geologischen Einheiten, basierend auf den Bohrdaten des HLUG bzw. den daraus konstruierten Tiefenlinienplänen (Rastern)	43
Abb. 29: Schematischer Überblick über die unterschiedlichen Fallenstrukturen bei Kohlenwasserstoffen (RADGEN et al. 2005, nach Mobil Oil AG 1983)	47
Abb. 30: Verdrängung des Öls (grün) bzw. Lösung in Öl durch CO <sub>2</sub> (gelb) im Porenraum eines Gesteins (DURHAM 2007)	48
Abb. 31: Tektonische Strukturen einiger Erdgasfelder im Oberrheingraben (KUPFAHL et al. 1972)	49
Abb. 32: Größe der Deutschen Erdgasfelder (MAY 2007)	50
Abb. 33: Profil des Gasspeichers Stockstadt (SEDLACEK et al. 1993)	51
Abb. 34: Braunkohlenvorkommen in Hessen	55
Abb. 35 a und b: Potenzielle CO <sub>2</sub> -Speicher in Hessen und ihre Wertung	62

## 16 Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Möglichkeiten der CO <sub>2</sub> -Reduzierung.....	5
Tab. 2: Eigenschaften der Speicher- und Deckschichten (nach CHADWICK et al. 2007).....	16
Tab. 3: Ausschnitt aus der Tabelle der zur Bearbeitung hinzugezogenen Bohrungen (komplette Tabelle siehe Anhang 2).....	18
Tab. 4: Übersicht und Wertung der potenziellen Speicher- und Deckgesteine in Hessen .....	45
Tab. 6: Bewertung geologischer Speicheroptionen in Deutschland (FISCHEDICK et al. 2007).....	60