

Brandenburg. geowiss. Beitr.	Cottbus	16 (2009), 1/2	S. 1-18	7 Abb., 45 Lit.
------------------------------	---------	----------------	---------	-----------------

Geologische Möglichkeiten für die CO₂-Speicherung in Brandenburg

Geological opportunities for underground storage of CO₂ in Brandenburg (Germany)

THOMAS HÖDING, MICHAEL GÖTHEL & WERNER STACKEBRANDT

1. Einleitung

Die Diskussion um Ursachen und Konsequenzen des Klimawandels hat in den letzten Jahren verstärkt zur Untersuchung der Rolle des durch die Tätigkeit des Menschen freigesetzten Kohlendioxids (CO₂) in diesem Prozess geführt. Unstrittig ist heute, dass die erhöhte CO₂-Konzentration in der Erdatmosphäre die Erwärmung der Erdoberfläche und damit den Treibhauseffekt beschleunigt. Es ist daher notwendig, die globalen CO₂-Emissionen noch in diesem Jahrhundert substantiell zu senken. Diese Aufgabe stellt sich auch ganz konkret für das Land Brandenburg. Die auf der Nutzung der heimischen Braunkohle basierende Stromerzeugung ist einerseits mit beträchtlichen CO₂-Emissionen verbunden, andererseits bekennt sich die Landesregierung aufgrund der großen Wertschöpfungsmöglichkeiten aus heimischen Rohstoffen sowie der strukturellen und arbeitsmarktpolitischen Bedeutung für das Land eindeutig zu diesem Industriezweig.

Aus diesem Zusammenhang heraus kann die Entwicklung und Einführung der CCS-Technologie ein wichtiger Baustein für die Erreichung der politisch formulierten Klimaziele wie auch für die künftige breite Akzeptanz der Stromerzeugung aus brandenburgischer Braunkohle darstellen. CCS steht für „carbon dioxide capture and storage“, das heißt für die Abtrennung des CO₂ aus den Verbrennungsgasen von Kraftwerken und seine nachfolgende Einlagerung in geologische Formationen und Strukturen. Die Anwendung dieser Technologie eröffnet die sonst eher seltene Möglichkeit, weiteres Wirtschaftswachstum von stetig steigenden CO₂-Emissionen zu entkoppeln.

Im folgenden Beitrag werden die aufgrund des strukturellen Baus des tieferen Untergrundes im Land Brandenburg vorhandenen Möglichkeiten einer CO₂-Speicherung dargestellt und es wird auf aktuelle Entwicklungen verwiesen.

2. Gesetzliches Regelwerk zur CO₂-Speicherung

Der Vorschlag der Kommission für eine CCS-Richtlinie vom 23.01.2008 wurde durch das Europäische Parlament

am 17.12.2008 sowie den Rat der Europäischen Union am 06.04.2009 angenommen. Mit der Richtlinie wird auf europäischer Ebene ein Rechtsrahmen für die umweltverträgliche geologische Speicherung von CO₂ als Beitrag zur Bekämpfung des Klimawandels und zum Zwecke der Vermeidung negativer Auswirkungen und Risiken für die Umwelt und die menschliche Gesundheit geschaffen (EU-RL 2008).

Die Richtlinie regelt u. a. den territorialen Geltungsbereich, enthält Begriffsbestimmungen und nennt in Anhang I zu untersuchende Kriterien für die Feststellung der Tauglichkeit geologischer Formationen als Speicher. Genehmigungsanträge für Speicher, die nach Feststellung einer Speichertauglichkeit sowie nach Vorlage umfangreicher Pläne zu Betrieb, Überwachung, Korrekturmaßnahmen und Nachsorge zulassungsreif sind, sowie Entwürfe von Speichergenehmigungen, sind der EU-Kommission zuvor zum Zwecke der Abgabe einer Stellungnahme einzureichen.

Die Richtlinie bestimmt den Übergang aller rechtlichen Verpflichtungen nach regulärer Schließung eines Speichers vom Betreiber an die jeweils zuständige Behörde, sofern eine Mindestfrist (gemäß der Richtlinie in der Regel 20 Jahre) verstrichen ist und der Betreiber langfristig die Stabilität und Sicherheit der Speicherstätte nachweist.

Weitere wichtige Forderungen der EU-Richtlinie bestehen u. a. im Nachweis finanzieller Sicherheiten durch potentielle Betreiber (Art. 19), die Benennung bzw. Schaffung einer oder mehrerer zuständiger Behörden, die für die Aufgaben im Rahmen der Richtlinie zuständig sind (Art. 23) und die Schaffung eines Registers aller erteilten Speichergenehmigungen sowie aller geschlossenen Speicherstätten.

Die Richtlinie gilt nicht für die geologische Speicherung von CO₂ zu Forschungszwecken mit einem geplanten Gesamtspeichervolumen von weniger als 100 kt.

Im Standpunkt des Europäischen Parlaments zur CCS-Richtlinie wird auf die Stellung der CCS-Technologie innerhalb eines geplanten Maßnahmenpaketes zur Begrenzung des globalen Klimawandels verwiesen (DAVIES 2008).

Die Abscheidung und geologische Speicherung von CO₂ wird dabei als Brückentechnologie eingestuft, die zur Abschwächung des Klimawandels beitragen soll. Sie soll ausdrücklich nicht dazu führen, dass Bemühungen zur För-

derung von Energiesparmaßnahmen, von erneuerbaren Energien und von anderen sicheren und nachhaltigen kohlenstoffarmen Technologien verringert werden.

Im Standpunkt des Parlaments werden vorläufige Schätzungen benannt, die die Unterstützung der CCS-Technologie durch private, nationale und europäische Akteure vorausgesetzt, eine Speicherung von 7 Mio t CO₂ bis 2020 und bis zu 160 Mio t CO₂ bis zum Jahre 2030 für möglich halten. Hinter diesen Zahlen steht die Einschätzung, dass die CCS-Technologie etwa ab dem Jahr 2020 in großtechnischem Maßstab einsatzfähig sein kann (IZ KLIMA 2008).

Hervorgehoben werden soll im Hinblick auf die weiter unten dargestellten Aktivitäten im Land Brandenburg die Empfehlung für die Mitgliedsstaaten, die in ihrem jeweiligen Hoheitsgebiet verfügbaren Speicherkapazitäten zu bewerten.

Zur Einführung der CCS-Technologie in Deutschland und damit auch im Land Brandenburg ist nunmehr die Umsetzung der EU-Richtlinie in nationales Recht und die Benennung der in Deutschland bzw. in den einzelnen Bundesländern zuständigen Behörde(n) notwendig. Zum Zeitpunkt des Redaktionsschlusses, dem die vorliegende Publikation unterlag, war die Umsetzung in nationales Recht der Bundesrepublik Deutschland noch nicht abgeschlossen. Der im Bundeskabinett gebilligte Entwurf eines Speichergesetzes erfordert die Zustimmung durch Bundestag und Bundesrat. Darüber hinaus sind Zuständigkeitsregelungen auf der Länderebene zu schaffen. Über die sich hieraus ergebenden Konsequenzen für das Land Brandenburg wird in einem künftigen Beitrag zu diskutieren sein.

Unabhängig von den Gesetzesinitiativen auf allen Ebenen existieren derzeit eine Reihe von Forschungsprojekten und Antragsaktivitäten in Richtung auf CO₂-Speicherung auch im Land Brandenburg (vgl. Pkt. 4), die insbesondere unter Anwendung der Regelungen des Bundesberggesetzes bereits zugelassen wurden oder zu denen die bergrechtlichen Verfahren derzeit anhängig sind.

3. Speichermöglichkeiten im geologischen Untergrund

3.1 Potenziell geeignete Strukturen und Speicherhorizonte

Die vorliegende Arbeit übergeht die beiden ersten Schritte der CCS-Technologie, die Abscheidung des CO₂ und seinen Transport zu einer Speicherstätte und ist auf den dritten Schritt, die Möglichkeiten der Speicherung in geeigneten Horizonten des tieferen Untergrunds, fokussiert. Nur unter der Voraussetzung einer sicheren und dauerhaften Speicherung des CO₂ kann die CCS-Technologie überhaupt ihren Beitrag zum Klimaschutz leisten. Dies setzt neben der Identifizierung von Speichergesteinen, der Formulierung von Konditionen und der umfassenden geologischen Erkundung sowohl der eigentlichen Speicherhorizonte als auch der diese abdeckenden Schichtenfolgen eine Reihe von Untersuchungen zur Wechselwirkung zwischen den Speichergesteinen samt den sie erfüllenden Medien und dem CO₂ voraus.

Die Rahmenbedingungen zur Bestimmung der Eignung geologischer Schichtenfolgen zur CO₂-Speicherung werden in den Fachgremien zurzeit intensiv diskutiert.

Um ein gegebenes unterirdisches Speichervolumen effektiv ausnutzen zu können, verbietet sich die Speicherung von CO₂ in seiner gasförmigen Phase, es wird daher im sogenannten überkritischen Aggregatzustand injiziert. Da die Phasentübergänge von reinem CO₂ druckabhängig sind, muss es, um den stark volumenverringerten überkritischen Zustand beizubehalten, in Gesteine in mindestens 800 m Tiefe verbracht werden. Erst hier ist der Druck der überlagernden Gesteinsmassen ausreichend, den überkritischen Zustand langfristig stabil zu halten. „Verunreinigungen“ des CO₂, wie sie nach einer großtechnischen Abtrennung im Kraftwerksbetrieb zu erwarten sind, lassen die Mindestteufenanforderung für eine reale Speicherung auf wahrscheinlich ca. 1000 m ansteigen. In der vorliegenden Arbeit wird durchgängig auf die in den derzeitigen Initiativen und Projekten zumeist angeführte Mindestteufe von 800 m Bezug genommen.

Neben dieser eigentlichen Speicherformation muss in deren Hangendem mindestens eine abdeckende Gesteinsbarriere vorhanden sein, die undurchlässig für Gase und Flüssigkeiten ist. Die bisherigen Konzepte in Brandenburg gehen darüber hinaus vom Vorhandensein gleich mehrerer abdichtender Schichten in unterschiedlichen Teufenbereichen aus (vgl. 3.2).

Über dem ersten Abdeckhorizont sollte ein Indikatorhorizont benannt und mit Messgeräten ausgestattet werden, die eventuelle Leckagen so frühzeitig anzeigen, dass noch vor einem Austritt von CO₂ an der Oberfläche technische Maßnahmen zur Verhinderung dieses eingeleitet werden können.

Ein weiteres relevantes Kriterium für die Ausweisung eines geologischen Speichers ist die weitgehende Freiheit des Deckgebirges von bruchtektonischen Störungen, die dem gespeicherten CO₂ Wegsamkeiten in Richtung Erdoberfläche (Druckgefälle) ermöglichen könnten. Dies stellt gerade im Bereich der Mitteleuropäischen Senke und damit auch in Brandenburg ein sehr ambitioniertes Kriterium dar, da die episodenhaft verstärkten und langanhaltenden Senkungsbebewegungen wie auch die gravitationsbedingten Bewegungen des Salinars ein reiches tektonisches Inventar evozierten. Dieser Umstand erfordert demzufolge bei der geologischen Erkundung von Speicherstrukturen den Nachweis der Dichtigkeit auch in Bereichen, die von Bruchstörungen durchzogen sind, z. B. durch Verheilung dieser durch Salz oder Ton.

Generell werden derzeit international drei Hauptrichtungen der Erfassung, Erforschung und Bewertung von geologischen Speichermöglichkeiten für CO₂ verfolgt:

- die Speicherung von CO₂ in ausgeförderten Öl- und Gaslagerstätten
- die Speicherung von CO₂ in tiefen, nach dem derzeitigen Stand der Technik nicht gewinnbaren Kohleflözen und
- die Speicherung von CO₂ in tiefe, mineralisiertes Schichtwasser führenden Aquiferen (in der Literatur oft auch als saline bzw. salinare Aquifere bezeichnet),

vgl. dazu beispielsweise MAY et al. (2003), IPCC (2005), BMWI (2007) und KNOPF (2007).

Die Injektionen von CO₂ in fördernde Öl- und Gaslagerstätten mit dem Ziel der Steigerung des Ausbringens von Kohlenwasserstoffen (Enhanced gas and oil recovery) stellen ein Übergangsszenario dar, in dem die Steigerung der Kohlenwasserstoffproduktion in Lagerstätten während eines

Das geologische Inventar betreffend, sind im Land Brandenburg alle drei der oben genannten Speicheroptionen potenziell möglich. Ihre Realisierungschancen werden nachfolgend kurz diskutiert.

Durch die intensive Exploration auf Kohlenwasserstoffe auf dem Gebiet des Landes Brandenburg, die insbesondere

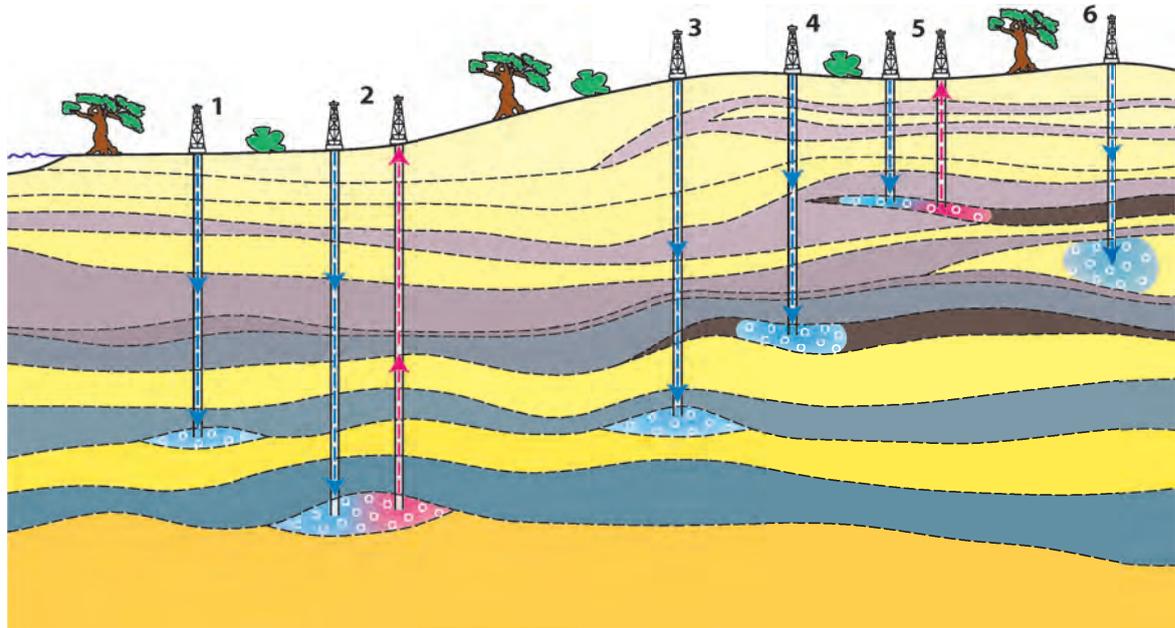


Abb. 1

Optionen für die CO₂-Speicherung in tiefliegenden geologischen Formationen (verändert, nach Cook 1999 und IPCC 2005)

1 – mineralisierte Schichtwasser führende Aquifere („saline Aquifere“); 2 – Steigerung der Öl- und Gasförderung durch CO₂-Injektion; 3 – ausgeförderte Öl- und Gaslagerstätten; 4 – Speicherung in tiefen, derzeit nicht gewinnbaren Kohlenflözen; 5 – Methangewinnung („Kohlengas“) über CO₂-Injektion in Kohlenflöze; 6 – Speicherung in weiteren geeigneten Gesteinsformationen (Ölschiefer, klüftige Basalte o. ä.)

Fig. 1

Geological storage options for CO₂ (modified, after Cook 1999 and IPCC 2005)

1 – deep unused saline water-saturated reservoir rocks; 2 – use of CO₂ in enhanced oil recovery; 3 – depleted oil and gas reservoirs; 4 – deep unmineable coal seams; 5 – use of CO₂ in enhanced coal bed methane recovery; 6 – other suggested options (basalts, oil shales, cavities)

späten Produktionsstadiums mit dem klimapolitischen Ziel der CO₂-Speicherung verbunden wird. Auch die Methangewinnung aus Kohleflözen ist nach diesem Prinzip möglich. Da sich viele Kohlenwasserstoff-Lagerstätten, insbesondere Erdgasfelder, im Norden Deutschlands im so genannten

späten Produktionsstadium befinden, bieten sich hier für Deutschland perspektivisch Möglichkeiten zur CO₂-Speicherung in größerem Maßstab an (KNOPF 2007). Theoretisch möglich ist ferner die Speicherung von CO₂ in Kavernen oder abgeworfenen Bergwerken. Aufgrund von Sicherheitsbedenken (vor allem größere Gefahr eines raschen Ausströmens von CO₂ im Havariefall gegenüber anderen Speicherkonzepten) werden diese Wege derzeit jedoch nicht verfolgt.

seit den 1960er Jahren stattfand, konnten eine Reihe von Öl- und Gaslagerstätten nachgewiesen werden, die sich territorial im Südosten des Landes konzentrieren, und zwar am Südrand der Norddeutschen Senke, einer Teilsenke der Mitteleuropäischen Senke (SCHRETZENMAYR 1998, HÖDING et al. 2007). Ziele der Exploration waren mesozoische Horizonte, das Staßfurt-Karbonat (Ca2) des tieferen Zechsteins sowie das Oberrotliegend. Im Mesozoikum waren die Sucharbeiten nicht erfolgreich, im Oberrotliegend konnte östlich von Berlin eine stickstoffreiche Erdgaslagerstätte nachgewiesen werden. Hauptziel und Hauptfundformation war jedoch das Staßfurtkarbonat (Ca2). So wurden seit 1960 insgesamt 29 Erdöl- und Erdgaslagerstätten nachgewiesen, die hauptsächlich an strukturelle Fallen unterschiedlicher Genese

gebunden sind. Sie stehen mit den Faziesbereichen Lagune, Karbonatsandbarre und Inselstrukturen im Lagunenhang zum epikontinentalen marinen Zechstein-Becken im Zusammenhang („off-platform“-Hochlagen).

Genetisch bedingt sind diese Lagerstätten relativ klein, wenngleich sich insbesondere die Öllagerstätten als sehr zuflussstark erwiesen. Derzeit erfolgt in Brandenburg eine Förderung nur noch am Standort Kietz (Landkreis Märkisch-Oderland). Die Förderung von Kohlenwasserstoffen aus anderen brandenburgischen Lagerstätten wurde um 1998 aufgrund mangelnder Wirtschaftlichkeit infolge des damals sehr niedrigen Ölpreises auf dem Weltmarkt eingestellt.

Bergrechte auf Kohlenwasserstoffe bestehen nach wie vor. Im Zuge des Ölpreishochs von 2007/2008 bekundeten mehrere international agierende Ölfirmen auch wieder Explorationsinteresse in Brandenburg.

Kohlenwasserstoff-Lagerstätten erfüllen im Hinblick auf die Langzeitstabilität von CO₂-Einlagerungen die notwendigen Anforderungen, da sie ihren Lagerstätteninhalt ja bereits ebenfalls langfristig in der jeweiligen Struktur binden konnten. Dies gilt zumindest für durch CO₂-Einlagerung aufgebaute Druckverhältnisse bis zum initialen Lagerstättendruck. Auch im Hinblick auf die Teufe sind die brandenburgischen Kohlenwasserstoff-Lagerstätten für eine CO₂-Speicherung potenziell geeignet: der Top der bekannten Strukturen liegt bei fast allen bekannten Strukturen tiefer als 1 000 m unter HN.

Der Nachteil der brandenburgischen Kohlenwasserstoff-Lagerstätten besteht in ihrer geringen Größe. Nach derzeitigem Kenntnisstand bieten lediglich die Strukturen von Märkisch-Buchholz (Landkreis Dahme-Spreewald, Struktur im Ca2) und Fürstenwalde (Landkreis Märkisch-Oderland, Struktur ebenfalls im Ca2) ein nennenswertes Volumen für eine CO₂-Speicherung. Die Lagerstätte Märkisch-Buchholz ist bisher noch nicht in Nutzung gegangen. Dessen ungeachtet sind durch den Inhaber des Bergwerkseigentums jedoch seit den 1990er Jahren weitergehende Untersuchungen im Hinblick auf die Eignung der Struktur für unterirdische Speicherzwecke erfolgt.

Damit ist zu konstatieren, dass eine alleinige CO₂-Speicherung in Kohlenwasserstoff-Lagerstätten in Brandenburg derzeit nicht realistisch ist. Die abgeworfenen Lagerstätten sind zu klein, als dass sich eine neuerliche Untersuchung, der Ausbau als Speicher oder gar ein Pipelinebau zur jeweiligen Struktur rechnen würden. Aus der eventuell geeigneten Lagerstätte Märkisch-Buchholz ist der Lagerstätteninhalt bisher nicht ausgefördert worden und Eignungsuntersuchungen für eine CO₂-Speicherung sind dort bestenfalls langfristig denkbar. Mittelfristig praktiziert werden könnte – sicher auch in Abhängigkeit von der künftigen Entwicklung des Ölpreises und den Ergebnissen spezieller diesbezüglicher Untersuchungen – die Injektion von CO₂ in Öl- und Gaslagerstätten zur Stimulation der Produktion.

Ebenfalls für die Zukunft in Brandenburg als unwahrscheinlich anzusehen ist die zweite genannte Hauptrichtung der CO₂-Speicherung in tiefen, nach dem derzeitigen Stand der

Technik nicht gewinnbaren Kohleflözen, obwohl solche auch in Brandenburg vorhanden sind. War nämlich der seit der Obertrias auftretende Salinardiapirismus während der Ablagerung der braunkohlenführenden Formationen aktiv, so entstanden die Braunkohlenlagerstätten-Typen der Salzkissen-Zwischensenken und der Salzdiapir-Randsenken (vgl. GÖTHEL 2004). Der Massenausgleich der Salzabwanderung zu Salzkissen, aus denen sich im Zuge des weiteren Dichteausgleichs Salzdiapire entwickeln konnten, führte zur Bildung von primären und sekundären Randsenken, deren kontinuierlicher Vertiefung und gleichzeitigen Auffüllung. Fanden die Vertiefungen während der Vermoorung statt, wurde selten das Braunkohlenflöz mächtiger, sondern vielmehr die Vermoorung unterbrochen. Letzteres führte zu erheblichen Flözaufspaltungen, insbesondere in Salzdiapir-Randsenken.

Randsenken-Vertiefungen, die im Känozoikum während der Vermoorungen stattfanden, sind in der Prignitz von den Diapiren Helle und Wredenhagen und um Berlin von den Diapiren Dollgow, Wulkow, Grüneberg, Storkow, Schönwalde, Blankensee, Sperenberg und Mittenwalde sowie im Grenzbereich zu Sachsen-Anhalt von den Diapiren Demsin und Mahlitz bekannt und geologisch und geophysikalisch erkundet. Wegen der enormen Vertiefung der Salzdiapir-Randsenken und der Absenkung der Flöze ist der Inkohlungsgrad entsprechend höher als in Gebieten primär horizontaler Lagerung. Besonders gut sind die Verhältnisse der Randsenken des Salzdiapirs Mittenwalde erkundet. Beispielsweise befindet sich hier die Basis der Lockergesteine des Känozoikums in über 1000 m Tiefe, das tiefste Braunkohlenflöz (Flöz 4.1), in 5 Bänke aufspaltend, in etwa 700 m Tiefe und das mächtigste Flöz (Flöz 3), mit über 19 m Mächtigkeit, in etwa 330 bis 380 m Tiefe (vgl. NESTLER et al. 2005).

Trotz dieser für Braunkohlenlagerstätten Brandenburgs beeindruckenden Zahlen liegen die Kohleflöze noch immer nicht tief genug, als dass hydrostatischer und petrostatischer Druck ausreichen würden, das CO₂ in seinem verdichteten Zustand stabil zu halten. Ferner ist die flächenhafte Ausdehnung der mehrfach aufgespaltenen Flöze insgesamt zu gering, um nennenswerte Speichervolumina zu erreichen.

Weitere Kriterien, die eine Nutzung von Randsenken-Lagerstätten als CO₂-Speicher ausschließen, liegen im hydraulischen Regime des Gebirgsverbandes und im weitgehenden Fehlen geeigneter, langfristig dichter Deckschichten begründet. Der Vollständigkeit halber zu erwähnen ist noch der stark eingeschränkte physikochemische Effekt adsorptiver Bindung von CO₂-Molekülen an die Kohle. Da die Kohleflöze brandenburgischer Randsenkenlagerstätten noch Wassergehalte von über 50% aufweisen, sind die Kohlepartikel in der Regel vollständig mit Wasser benetzt. Eine adsorptive Bindung von CO₂ an Kohle, ein in anderen Kohleflözen auf der Erde zu beobachtender zusätzlicher positiver Effekt, tritt somit nur sehr untergeordnet auf.

Ebenfalls für eine Speicherung ungeeignet sind die Steinkohlen-/Anthrazitflöze in der Werenzhainer Mulde an der Stadtgrenze bzw. nördlich von Doberlug-Kirchhain (Landkreis Elbe-Elster).

Die gleichnamige Lagerstätte wurde in den 1930er bis 1950er Jahren geologisch erkundet. Ein Untersuchungsschacht sowie ein Untersuchungsquerschlag wurden in den 1950er Jahren mit der 407 m-Sohle aufgefahren. Hier würden sich zwar Wassergehalt (unter 15 %) und Adsorptionsvermögen der Kohle besser gestalten (Kohlenstoffgehalt mehr als 91 %), jedoch sind weder ausreichend dichte Deckschichten vorhanden noch die erforderliche Teufe gewährleistet. Über die langfristigen Perspektiven dieser Lagerstätte können derzeit keine gesicherten Aussagen getroffen werden. Somit verbleibt als zu untersuchende Haupttrichtung nur die Einspeicherung von CO₂ in tiefe mineralisiertes Schichtwasser führende Aquifere (saline Aquifere).

3.2 Saline Aquifere

Die Möglichkeit der Speicherung von CO₂ in tiefen, mineralisiertes Schichtwasser führenden Aquiferen (saline Aquifere) erfordert in erster Linie das Vorhandensein entsprechender poröser Sedimentgesteine in geeigneten geologischen Positionen. Diese Voraussetzung trifft – grob gesprochen – für weite Areale des zentralen und nördlichen Brandenburgs zu. Diese Gebiete befinden sich regionalgeologisch in der Norddeutschen Senke, einem Teilgebiet der Mitteleuropäischen Senke, die eines der größten Ablagerungsbecken weltweit darstellt. Die Beckensedimente sind zum Teil mehr als 5000 m mächtig und umfassen die gesamte Abfolge der postvariszischen Senkenfüllung seit dem Ober-Karbon bis zur Kreide sowie ebenfalls Formationen känozoischer Sedimente. Saline Aquifere finden sich in vielen Schichten des Mesozoikums, besonders ausgeprägt in Form mehrerer Sandstein-Schichtglieder im Buntsandstein, im Keuper, im Lias, im Dogger und in der Unter-Kreide. Aufgrund ihrer Tiefenlage und des Salzgehalts sind diese Aquifere nicht für eine Trinkwassergewinnung relevant, jedoch für andere Nutzungen interessant. An einigen Positionen erfolgt eine Solegewinnung aus derartigen Aquiferen für balneologische Nutzungen (z. B. Bad Wilsnack, Templin, Bad Saarow, Burg), auch befinden sich in ihnen verschiedene Projekte der tiefen Geothermie in der Vorbereitung oder im Testbetrieb.

Die Hauptvorkommen mineralisierter Schichtwasser führender Aquifere auf dem Gebiet Brandenburgs lassen sich stratigraphisch in folgenden Komplexen zusammenfassen (vgl. auch DIENER et al. 1984, GÖTHEL 2006, FELDRAPPE et al. 2008):

- Sandsteine des Oberrotliegend II (Perm)
- Sandsteine des Mittleren Buntsandsteins (Trias)
- Schilfsandstein-Formation des Mittleren Keupers (Trias)
- Rhät-/Lias-Sandsteine (obere Trias bis unterer Jura)
- Aalen/Unter-Bajoc-Sandsteine des basalen Doggers (Jura)
- Neokom-Sandsteine der Unter-Kreide (Kreide).

Bei den Eignungsuntersuchungen der Aquifere Brandenburgs auf eventuelle CO₂-Speicherung sind eine Reihe weiterer Kriterien heranzuziehen, von denen die Abwesenheit von aktiven und offenen Bruchstörungszonen sowie die Existenz von Abdichtungshorizonten die wichtigsten sind. Als abdichtende Gesteinsschichten im Hangenden dieser Aquifere können – z. T. zu Komplexen zusammenfassbar – Gesteine folgender Einheiten betrachtet werden (vor allem Salzschichten, ungeklüftete Anhydrite und Gipse, Tonsteine und Tone):

- Zechstein-Salinar (Perm)
- Röt-Formation des Oberen Buntsandsteins (Trias)
- Salinar des Mittleren Muschelkalks (Trias)
- Oberer Gipskeuper (Trias)
- einzelne Schichten des Lias und Doggers (Jura)
- regional z. T. Obere Unter-Kreide (Kreide)
- Rupelton-Formation (Tertiär).

Die detaillierte Untersuchung zur stofflichen und strukturellen Charakteristik dieser potenziellen Abdichtschichten (cap rocks) in Bezug auf jedes einzelne geplante Speichervorhaben ist unabdingbar.

Am geeignetsten für eine CO₂-Speicherung sind potenziell die Verbreitungsbereiche von Aquiferen, die über natürlichen Aufwölbungen im Untergrund lagern. In derartigen, vor allem aus Sandsteinen bestehenden Poren-Grundwasserleitern lässt sich die Ausbreitung des verpressten CO₂ in den Aufwölbungskuppeln des jeweiligen Aquifers am effektivsten kontrollieren.

Derartige Aufwölbungen (Antiklinalen) entstanden durch Fließbewegungen im Salinarstockwerk. Das Salzfließen kann entweder autonom und nur dem gravitativen Ausgleich folgend ablaufen, oder tektonisch angeregt werden. Es bedingt zum einen Salzabwanderungsgebiete mit verminderter Mächtigkeiten und zum anderen Salzzuwanderungsgebiete mit erhöhten Salinarmächtigkeiten. Die Entwicklung der Salzzuwanderungsgebiete schreitet in der Erdgeschichte über die Entwicklung von Salzkissen zu Salzstöcken und letztendlich zu pilzförmigen Salzdiapiren fort. Sie ermöglichte die Bildung von natürlichen Aufwölbungen mit Kuppelbildungen im Bereich der Speicherhorizonte (Aquifere) im Top der Salinarstrukturen (suprasalinartektonische Strukturen, vgl. Abb. 5) sowie im Salinar selbst (intrasalinare Strukturen, die insbesondere in Salzdiapiren zu chaotisch gefalteten und gestörten Lagerungsverhältnissen führen), vgl. ZIEGENHARDT 1976a, 1976b.

Abbildung 2 zeigt anhand einer 3D-Darstellung die aus den soeben umrissenen Vorgängen des Salzfließens resultierende Zechsteinoberfläche in Brandenburg. Eine Zuordnung nach vorwiegend gravitativ oder tektonisch verursachter Strukturgenese ist häufig allein schon aus der Konturierung der Salzstrukturen möglich (STACKEBRANDT 2002). Neben den durch Salzfließbewegungen entstandenen Strukturen sind für die hier verfolgte Fragestellung auch so genannte Schildkrötenstrukturen von Interesse, die passiv durch das

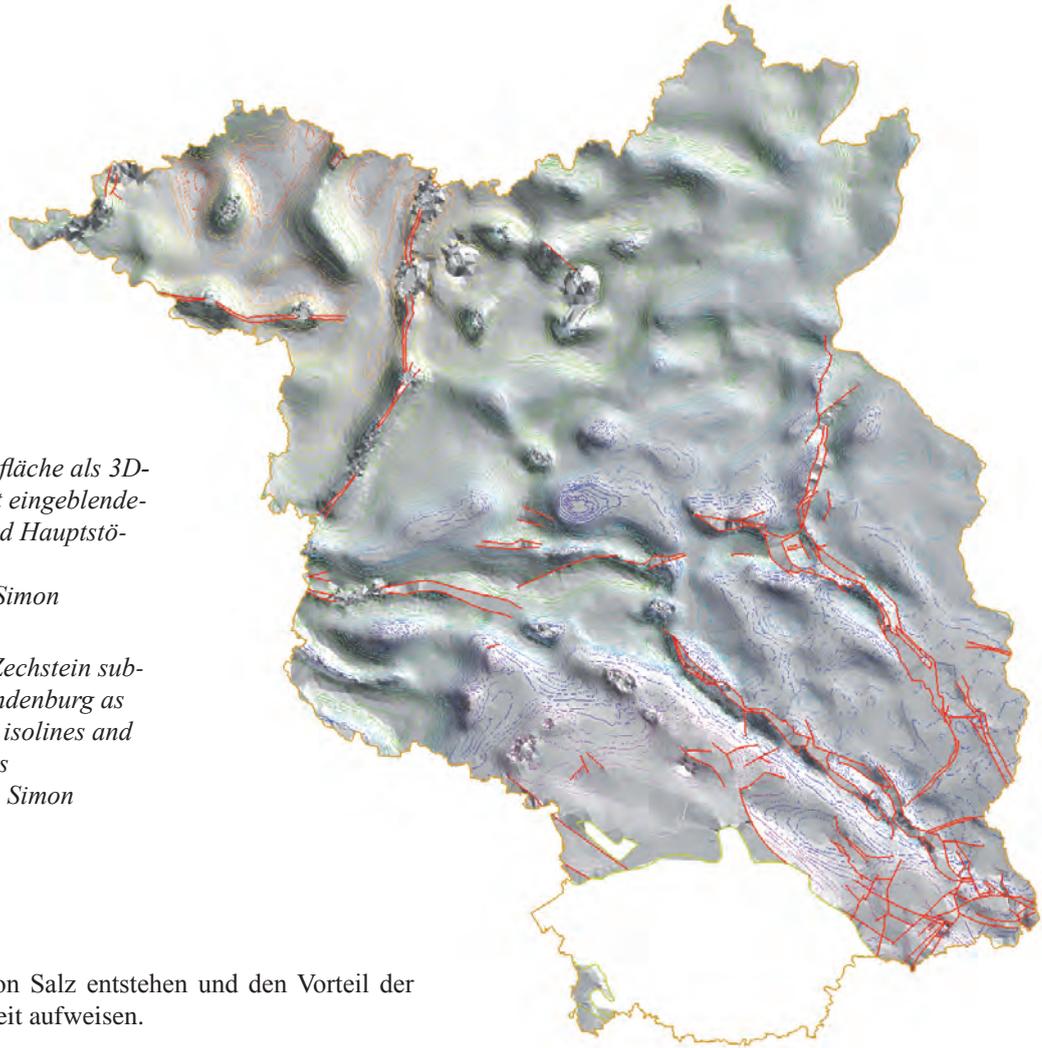


Abb. 2
Zechstein-Oberfläche als 3D-Darstellung mit eingebundenen Isolinien und Hauptstörungen
Bearbeiter: A. Simon

Fig. 2
Surface of the Zechstein subdivision in Brandenburg as a 3D-view with isolines and main fault zones
processed by A. Simon

laterale Abfließen von Salz entstehen und den Vorteil der relativen Ungestörtheit aufweisen.

Für die Konzeption von Speicherregimen in derartigen Strukturen können auch langjährige Erfahrungen bei der Speicherung von Kohlenwasserstoffen wie Erdgas genutzt werden. Zur Speicherung von Erdgas werden bereits seit Jahrzehnten poröse Sandsteinspeicher (Porenspeicher) im tiefen Untergrund genutzt (u. a. Gasspeicher Berlin-Spandau, Gasspeicher Buchholz).

Andererseits werden diese Speichermedien wirtschaftlich bereits ebenso von technisch unterschiedlichen Verfahren der Tiefengeothermie aber auch zur Erschließung von Thermalsole in Brandenburg benötigt. Ein Kriterium für Vorrangentscheidungen zugunsten von CO₂-Einlagerung oder tiefer Geothermie könnte u. a. die Feststellung des Wärmefflusses in den jeweils interessierenden Gebieten sein. Damit könnten Bereiche mit erhöhtem Wärmeffluss vorzugsweise als Geothermie-Standorte genutzt werden, denn für die CO₂-Einlagerung ergibt sich kein unmittelbarer Vorteil aus einem überdurchschnittlichen Temperaturniveau (LEMPP 2008). Neben den weiter unten erwähnten geologischen Eigenschaften eines Speichers sollte nach LEMPP (2008) das Nutzungsvolumen eines Speichers als vorrangiges Qualitätsmerkmal zugunsten einer CO₂-Speicherung angesehen werden, da für ein Speicherprojekt mit Anschluss an ein Kraftwerk ein

erheblicher Mengenanfall an CO₂ zu erwarten ist und damit auch Rentabilitätsberechnungen in die Entscheidung für oder gegen ein Speicherprojekt einfließen.

Sich abzeichnende Nutzungskonflikte können durch politische Vorrangentscheidungen sowie durch die Aufstellung und Durchsetzung von Regeln einer unterirdischen Raumordnung entschieden werden.

Die prinzipielle Eignung der Schichtenfolge Brandenburgs in Bezug auf CO₂-Einlagerungsmöglichkeiten ergibt sich aus der wechselvollen geologischen Entwicklung der Norddeutschen Senke, deren Füllung zu großen Teilen den Untergrund Brandenburgs einnimmt. Im Ergebnis der tektonisch kontrollierten Einsenkung treten in Superposition zu-

Abb. 3
Stratigraphische Einordnung prinzipiell nutzbarer Speicherhorizonte (Aquifere – gelb), zur Lage des Zechsteinsalinars (blau) und zur generellen Begrenzung von Süßwasser- und Salzwasserstockwerk durch den unteroligozänen Rupelton (lila); Bearbeiter: M. Göthel, Mai 2009

Fig. 3
Stratigraphic scheme of deep unused saline water-saturated reservoir rocks with storage options for CO₂ (yellow), situation of the saline Zechstein (blue) and general division of saline and fresh water floors by the Rupelian clay (lilac); processed by M. Göthel, May 2009

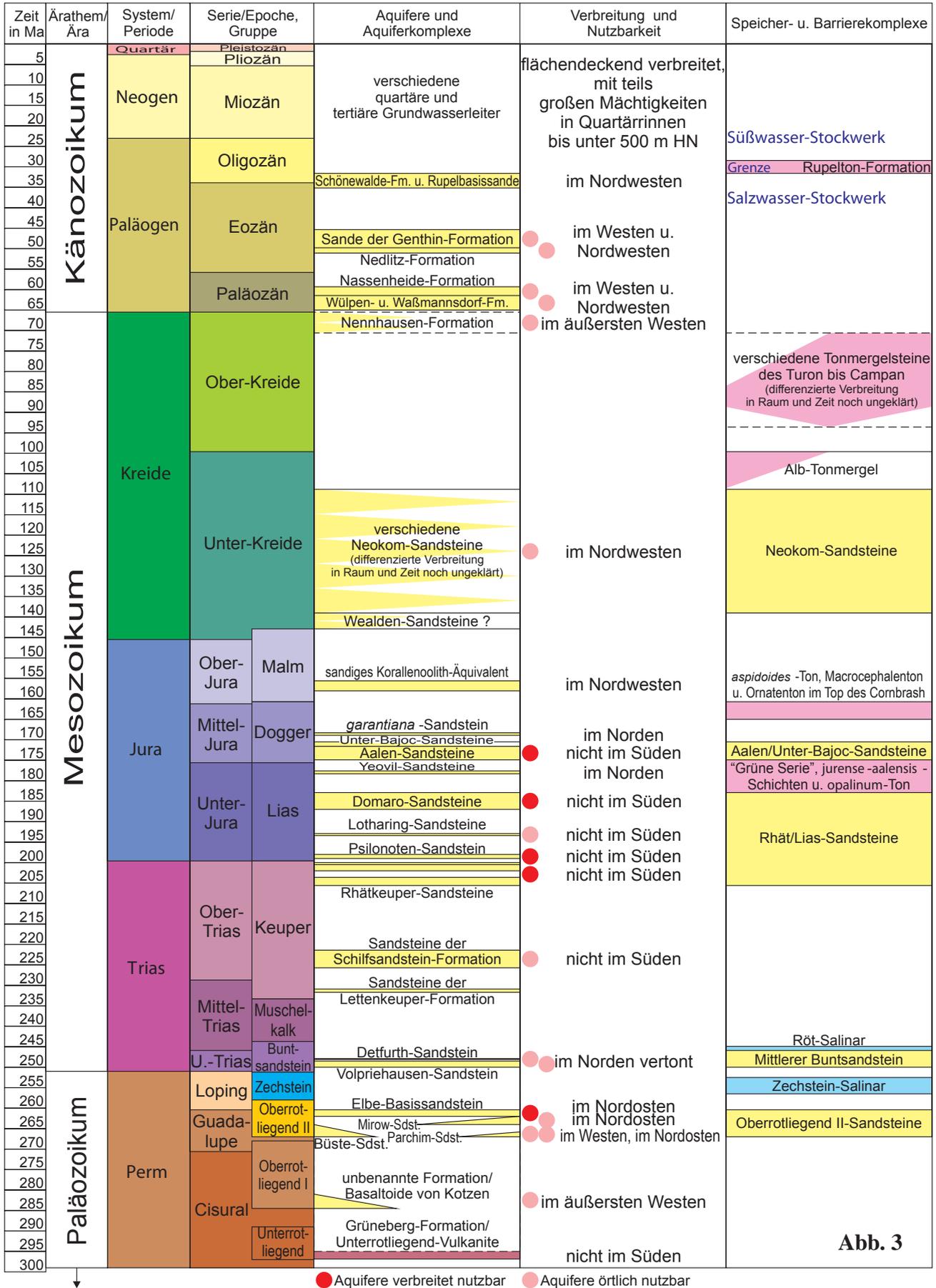


Abb. 3

● Aquifere verbreitet nutzbar ● Aquifere örtlich nutzbar

einander sowohl potenzielle Einlagerungshorizonte als auch potenzielle Deckschichten auf. Auf die näheren Bildungs-umstände der Senke wird hier nicht eingegangen, hierzu sei u. a. auf LITKE et al. (2008) bzw. SCHWAB (1985) verwiesen. Die mehrere tausend Meter umfassende Schichtenfolge der Norddeutschen Senke hat SCHWAB (1985) anhand dominie-render genetischer Kriterien in Stadien zusammengefasst (postvariszische Anlage, Hauptabsenkung vom Rotliegend bis in die obere Trias, Differenzierungsstadium bis in die Unter-Kreide und Stabilisierungsstadium seit der Ober-Krei-de). Auf der Grundlage unterschiedlichen mechanischem Verhaltens lässt sich aus dieser Schichtenfolge je nach Lage der bei Belastung und Beanspruchung fließfähigen Salze auch der so genannte disharmonische Stockwerksbau ableiten, dem wegen seiner Bedeutung für die Strukturbildung Aufmerksamkeit geschenkt werden muss und der sich in –

von oben nach unten – suprasalines Stockwerk, salinanes Stockwerk und subsalines Stockwerk gliedern lässt.

Über bzw. zwischen den Speicherhorizonten lagernde ab-dichtende Horizonte, wie Tonsteine und Salinalgesteine (im Wesentlichen Steinsalz, Anhydrit, Gips) ermöglichen deren Abdeckung. Sowohl Speicherhorizonte als auch abdichten-de Horizonte können durch bruchtektonische Strukturen, die durch die Aufwölbung selbst, aber auch durch zusätzli-che Aktivierungen regionaler, meist älter angelegter Bruch-störungssysteme, unterbrochen werden, was eine genaue standortbezogene Modellierung der einzelnen CO₂-Versen-kungsobjekte erfordert.

Es ist davon auszugehen, dass quasi alle aktiven Salzkissen-strukturen über mehr oder weniger ausgeprägte Scheitelein-brüche verfügen. Diese können Versätze der Schichten auch

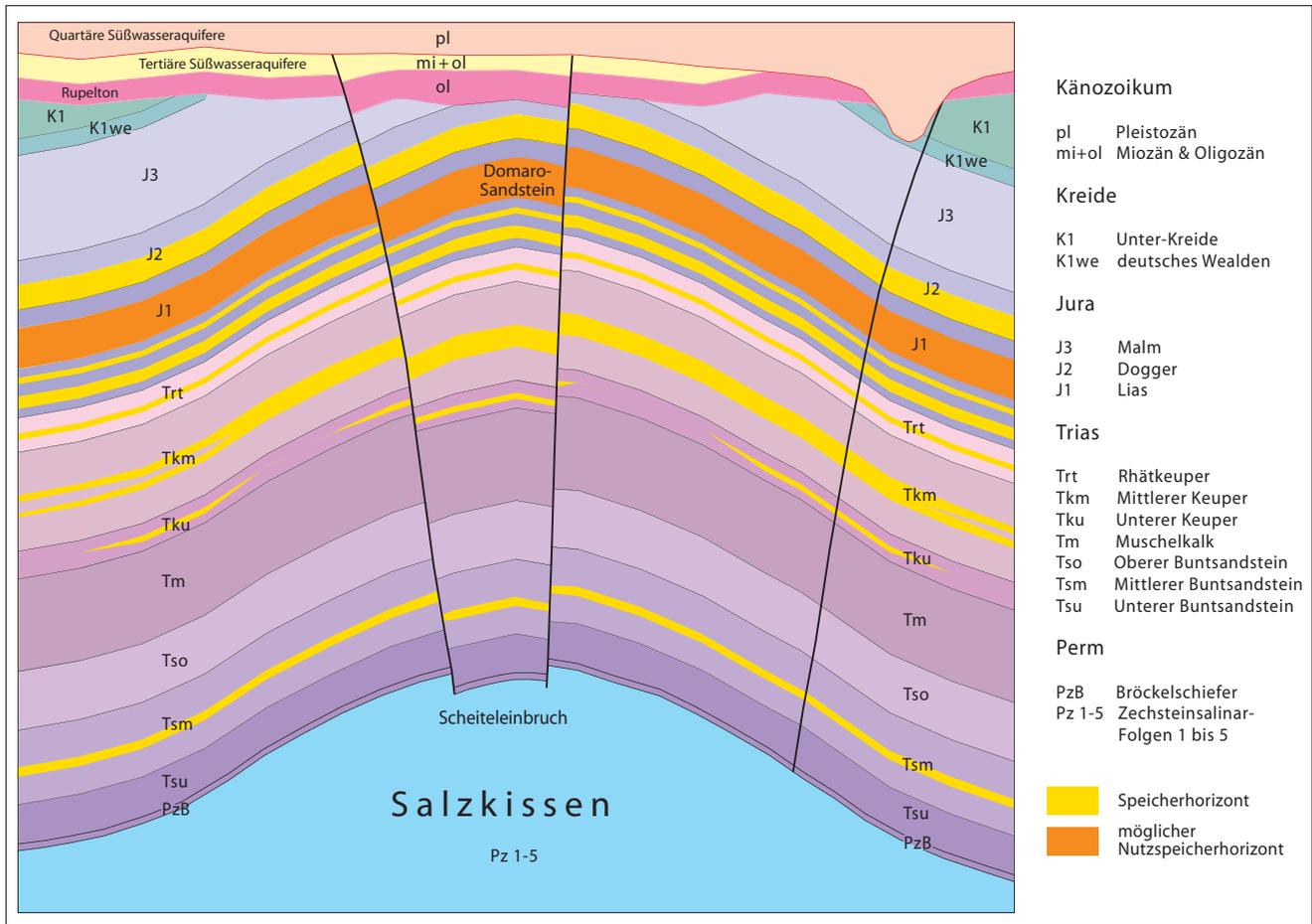


Abb. 4
 Schema des Aufbaus einer Salzkissenstruktur mit Darstellung des Salzkissens (blau), von Speicherhorizonten (Aquiferen – gelb) einschließlich eines Nutzspeicherhorizonts (orange) im mesozoischen Deckgebirge sowie die Begrenzung von Süßwasser- und Salzwasserstockwerk durch den unteroligozänen Rupelton (lila). Man beachte den typischen Scheiteleinbruch nahe des Tops der Struktur

Fig. 4
 Scheme of a salt pillow structure with the salt pillow itself (blue), some water-saturated reservoir horizons (aquifers – yellow), an especially qualified reservoir horizon in the Mesozoic superstructure (orange coloured) and general division of saline and fresh water floors by the Rupelian clay (lila). Note the typical crest fault near the top of structure

in den ausgewählten Speicherhorizonten verursachen. Dass diese nicht zwangsläufig zu Undichtigkeiten führen, sondern die durch Scheiteleinbrüche verursachten Versatzflächen durch „Heilungsprozesse“ abgedichtet wurden, zeigt beispielsweise der Berliner Erdgasspeicher der GASAG im Top der Salzkissenstruktur Spandau, die im Bereich der Speicherhorizonte Versatzbeträge von mehreren Dutzend Metern aufweist.

Als weitere relevante Kriterien, die die Eignung derartiger Strukturen für eine CO₂-Speicherung bestimmen, werden nach derzeitigem Kenntnisstand betrachtet und dementsprechend bei allen aktuellen Untersuchungsprogrammen zugrunde gelegt (vgl. auch Pkt. 3.1 und Projektkriterien „Speicherkataster“ unter Pkt. 4):

- Tiefenlage der Speichergesteinsformation größer als 800 m
- Mächtigkeit der Speichergesteinsformation größer als 10 m
- Nutzporosität der Speichergesteine größer als 10 %
- Permeabilität der Speichergesteine größer als 10 mD
- Resultierende Mindestspeicherkapazität (Clusterkapazität) größer als 40 Mio t CO₂
- Tiefenlage der Basis von Barrieregesteinskomplexen größer als 800 m
- Mächtigkeit abdeckender Barrieregesteinskomplexe größer als 20 m.

In eine hypothetische Kategorie „besonders gut geeignet“ können potenzielle Einlagerungsformationen eingeordnet werden, die folgende Eigenschaften aufweisen:

- Tiefenlage der Speichergesteinsformationen 1 000 bis 2 500 m
- Nettomächtigkeit der Speichergesteinsformationen größer 50 m
- Nutzporosität der Speichergesteine größer 20%.

Zum Verhalten des injizierten CO₂ in saline Aquifere bestehen folgende Vorstellungen, die derzeit beispielsweise im Projekt „CO₂-Sink“ (vgl. Pkt. 4) überprüft und präzisiert werden:

- Das injizierte CO₂ ist leichter als die die Aquifere ausfüllende Sole. Demnach kommt es zunächst zu einer Verdrängung von Sole und zur Sammlung des CO₂ in den Topbereichen der als Speicherstrukturen genutzten Antiklinalen.
- Bei zunehmender Verweilzeit des CO₂ im Aquifer erfolgt in steigendem Maße eine Lösung in der Sole, mit der eine Verminderung des pH-Wertes verbunden ist.
- Aufgrund der hohen Salinität der Aquiferwässer kann es zu Ausfällungen von Halit während der CO₂-Einspeicherung kommen. Dieser wird aber nachfolgend größtenteils wieder gelöst (MAY et al. 2004, OBST 2008).
- Ein weiterer zu erwartender Vorgang ist die Mineralneubildung insbesondere von Kalziumkarbonaten (Calcit) aufgrund des Vorhandenseins freier Kalziumionen.

In diesem Vorgang liegt gleichzeitig ein Risiko für das jeweilige Speichervorhaben, denn eine massenhafte Mineralneubildung entlang von Eindring- oder Wechselwirkungsfronten innerhalb des Aquifers kann zum Verschluss des Speichers führen und damit zum Ende einer möglichen CO₂-Einlagerung, zumindest jedoch zu aufwendigen technischen Aktivitäten zur Wiederertüchtigung des Speichers.

- Schließlich ist damit zu rechnen, dass CO₂ in adsorptiver Weise bzw. durch kapillare Bindung in Mikroporen der Aquifergesteine festgehalten wird.

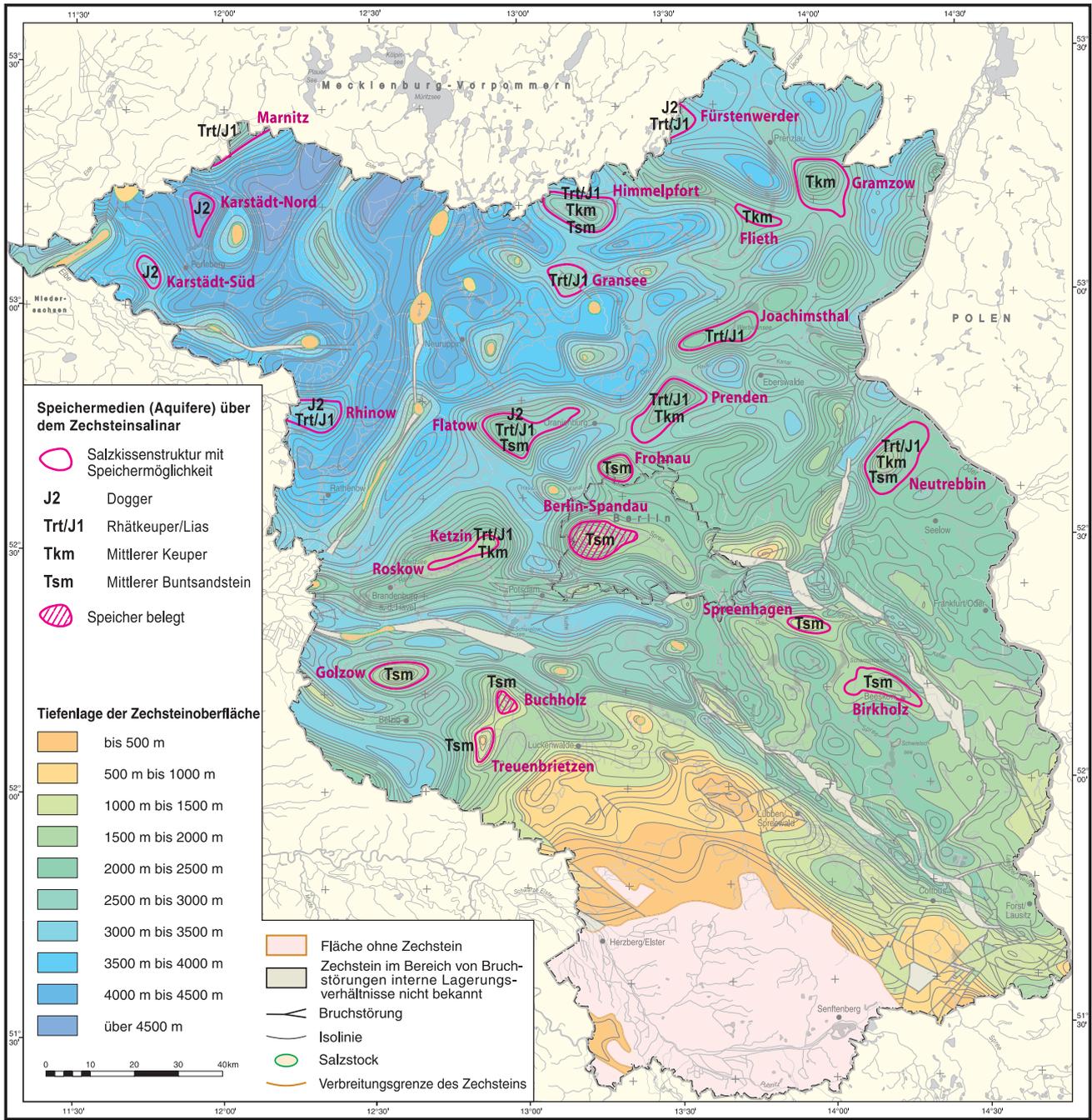
Alle diese Prozesse führen dazu, dass die „Bindung“ des injizierten CO₂ im Nutzaquifer mit der Zeit immer fester wird. Also kann auch im Falle einer Havarie (beispielsweise durch Korrosion an Bohrungen) oder entgegen aller Untersuchungen doch auftretender Undichtheiten an bruchtektonischen Störungen mit fortschreitender Zeit tendenziell immer weniger CO₂ aus einem Speicher austreten.

Aus der Analyse des Kenntnisstands über die Verbreitung von Salinarstrukturen, kombiniert mit dem Vorkommen hinreichend permeabler Sandsteinaquifere in diesen Strukturen und der Existenz von abdichtenden Schichten in deren Hangendem, entstand die in Abbildung 5 gezeigte Karte der Salzkissenstrukturen mit potenziellen Speichermöglichkeiten im Untergrund. Dabei ist zu beachten, dass die Strukturen Buchholz und Berlin-Spandau bereits durch Erdgasspeicher belegt sind. In der Struktur Roskow-Ketzin befindet sich das Forschungsprojekt CO₂-Sink des GFZ (vgl. Pkt. 4).

Die Auswertung vorhandener Daten, insbesondere des Erdölerkundungsprogramms der DDR, sowie systematische Kartierungsarbeiten des Geologischen Dienstes in Brandenburg führten bereits 1993 zur Ausweisung einer Reihe von Aquiferstrukturen mit potenzieller Eignung für die Untergrundspeicherung (BEER & ECKHARDT 1993, MANHENKE & BEER 2004). Die Nutzungsvorstellungen bezogen sich zum damaligen Zeitpunkt jedoch hauptsächlich auf die Untergrundspeicherung von Erdgas. Daher wurden in die Aufstellung lediglich prognostisch geeignete Aquiferstrukturen bis zu einer Tiefe von 1400 m aufgenommen. Unter dem CO₂-Speicheraspekt mit seinen Tiefenanforderungen sind weitere – tiefer gelegene – Aquifere in den bereits 1993 genannten Strukturen betrachtungsrelevant geworden.

Im Süden Brandenburgs existieren, bedingt durch die geringe Tiefenlage des Grundgebirges, nur Speichermöglichkeiten im Mittleren Buntsandstein (Vetschauer Keupermulde). Der Grundgebirgsausstrich der präkänozoischen Oberfläche lässt im äußersten Süden Brandenburgs keine Speicherung zu.

Aus den Darstellungen in Abbildung 3 und Abbildung 5 ist ersichtlich, dass die geeignetsten Speicherhorizonte in Brandenburg sich auf Sandsteinschichten der Trias und des Jura konzentrieren. Besonders hinsichtlich ihrer Teufenlage und petrographischen Eigenschaften geeignet sind dabei die Sandsteine des Mittleren Buntsandsteins, auf die auch



Kartengrundlage: Topographische Karte, Land Brandenburg, Maßstab 1 : 1 000 000 Nutzung mit Genehmigung des Landesvermessungsamtes Brandenburg, Nummer: GB 107/01

Abb. 5
 Übersicht über die Verbreitung von Salzkissenstrukturen nach der Tiefenlage der Oberfläche des Zechsteinsalinar.
 Diese Strukturen könnten zur CO_2 -Speicherung im Suprasalinarstockwerk bzw. dem mesozoischen Deckgebirge geeignet sein.
 Geologische Bearbeitung H. Beer, W. Stackebrandt

Fig. 5
 Map of salt pillow structures in Brandenburg, identified by evaluation of the surface of the saline Zechstein.
 These structures could be potential suitable for underground storage of CO_2 in the Suprasalinar or in the Mesozoic super-structure respectively.
 Geological model by H. Beer, W. Stackebrandt

in zahlreichen Vorstudien zu CO₂-Speicherprojekten aufmerksam gemacht wird (z. B. MÜLLER et al. 2003, KNOFF 2007). In vier eustatisch kontrollierten Zyklen des Mittleren Buntsandsteins wurden Volpriehausen-, Detfurth-, Hardeggen- und Solling-Folge abgelagert, die jeweils mit mittel- bis feinkörnigen Basissandsteinen beginnen und zum Hangenden hin in Wechselfolgen von Silt- und Tonsteinen übergehen (GÖTHEL 2006). Die fein- und mittelkörnigen Sandsteine an der Basis dieser Zyklen lassen sich über das gesamte Verbreitungsgebiet innerhalb der Norddeutschen Senke verfolgen. Ihre gröbste Ausbildung ist jedoch nahe der primären Beckenränder zu erwarten. Der Datenlage nach bieten diese Sandsteine gute potenzielle Speichermöglichkeiten. Die Mächtigkeit der gesamten Schichtenfolge des Mittleren Buntsandsteins kann in Brandenburg durchaus 300-350 m erreichen. Innerhalb eines solchen Schichtpaketes kann mit Speicherhorizonten von insgesamt mehr als 50 m (Clustermächtigkeit) gerechnet werden.

Die Tiefenlage potenziell geeigneter saliner Aquifere nimmt in Brandenburg generell nach Norden und insbesondere nach Nordwesten hin zu (in Richtung Zentrum der Mitteleuropäischen Senke). Die Tiefenlage des Mittleren Buntsandstein erreicht nördlich der Linie Herzberg/Elster-Burg-Senftenberg die erforderlichen Mindestwerte von 800 m, während die Sedimente des Rhät/Lias-Speicherkomplexes ihre geschlossene Verbreitungsgrenze nach Süden bei Luckenwalde-Lübben/Spreewald haben. Die geforderte Tiefenlage weisen sie erst bei Belzig und südlich und südöstlich von Berlin auf, ebenfalls mit zunehmender Tiefenlage in Richtung Senkenzentrum. Die Ablagerungen des Doggers und des Unter-Kreide-Speicherkomplexes sind großflächig nur in Nordbrandenburg verbreitet. Durch die auftretenden Salinarstrukturen, Salzkissen und Salzstöcke und die daran gebundenen Senken ist die Tiefenlage stark differenziert und weist Unterschiede von mehr als 1000 m bei nur wenigen Kilometern lateraler Entfernung auf.

Unter Berücksichtigung der erforderlichen Mindestteufen für eine CO₂-Versenkung werden einige der in Abbildung 5 dargestellten Strukturen die notwendigen Anforderungen nicht erfüllen. Dies ist z. B. bei der Struktur Treuenbrietzen der Fall, in der sich die potenziellen Speicherhorizonte des Buntsandsteins in Teufen von nur etwa 500 m unter der Geländeoberfläche befinden. Auch die für die Salzkissenstruktur Marnitz (deren weitaus größter Teil im Bundesland Mecklenburg-Vorpommern liegt) zunächst in Betracht gezogenen potenziellen Speicherhorizonte des Rhät/Lias sind bei Teufenlagen von ca. 300 m zu flach gelagert. Darüber hinaus sind die potenziell geeigneten Neokom-Sandsteine (Unter-Kreide), falls ausgebildet, in weiten Teilen Brandenburgs nicht in den gewünschten Teufenbereichen anzutreffen.

Zwar liegen zum strukturgeologischen Werdegang des Gesamtgebietes bereits gute Kenntnisse vor, dies betrifft jedoch nicht den Deformationszustand der Einzelstrukturen. Hierzu sind detaillierte weitere Untersuchungen erforderlich, die sowohl die Frage der strukturgeologischen Anre-

gung als auch das tektonische Inventar aller dieser Strukturen betreffen. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt liegen noch keine ausreichenden Informationen vor, als dass eindeutige Aussagen zur Machbarkeit eines Speichervorhabens getroffen werden könnten.

In die Bewertung des Gefährdungspotenzials einzubeziehen ist darüber hinaus die neotektonische Beanspruchung des Untersuchungsgebietes, die sich durch fortgesetzte regionale Einsenkung der Central European Subsidence zone, glazialisostatische Reaktivierungen von Störungen und Salzstrukturen etc. bemerkbar macht und durch die potenzielle Migrationspfade angelegt werden können (vgl. GARETZKY et al. 2001, STACKEBRANDT 2004, 2005, SIROCKO et al. 2008).

Grundlage für eine Erstbewertung zur potenziellen Eignung derartiger Strukturen unter dem Blickwinkel des heute aktuellen Nutzungsvorhabens einer CO₂-Speicherung ist die Auswertung des bereits vorliegenden Datenmaterials zu diesen Strukturen, das hauptsächlich aus der Kohlenwasserstofferkundung seit den 1960er Jahren stammt. Neben Bohrdaten mit ausführlicher Schichtenaufnahme, petrographischen, mineralogischen und gesteinsphysikalischen Bewertungen sowie neben der noch heute gewährleisteten Zugänglichkeit zu archiviertem Kernmaterial aus diesen Bohrungen sind für fast alle benannten Salzkissenstrukturen geophysikalische Untersuchungen (2D-Seismik) durchgeführt worden. Diese müssen ebenso wie die bohrlochphysikalischen Messungen nachinterpretiert werden.

Dessen ungeachtet sind bei jedem für die Zukunft geplanten konkreten Speichervorhaben umfangreiche geologische Erkundungsarbeiten (Bohrungen, Seismik) und Modellierungen (dynamische Reservoirmodelle, Strukturgeologie) zwingend erforderlich.

Für die mesozoischen Sandsteine in den potenziellen Speicherstrukturen auf dem Gebiet Brandenburgs können durch vorliegende Untersuchungen Porositäten zwischen 9 und 30% postuliert werden. Für die Sandsteine des Mittleren Buntsandsteins geben DIENER et al. (1984) Porositäten zwischen 9 und 25 % an. Da die Porositäten punktuell, also durch Bohrungen ermittelt wurden, muss in Speicherstrukturen mit Bereichen geringerer nutzbarer Porosität infolge stärkerer Zementation durch Bindemittel gerechnet werden. Wesentlich höhere Porositäten dürften dagegen nicht vorkommen, da auch bei primärem Vorliegen größerer Sandsteinpartikel die größeren Porenräume durch Kompaktion und unter dem hohen petrostatischen und hydrostatischen Druck in der Zeit seit dem Mesozoikum durch Umkristallisation verringert worden wären.

Bei der Modellierung von Speichervolumenpotenzialen in Aquiferen sind absolute Porosität und durchflusswirksamer Hohlraumanteil voneinander zu unterscheiden. Neben geschlossenen Poren in Aquiferen sind beispielsweise auch Haftwasseranteile nicht zum frei beweglichen Wasser in Aquiferen hinzuzurechnen (BMU 2009). Inwieweit sich auf der Zeitachse diesbezüglich Veränderungen im Sinne ansteigender kapillarer Bindungen von CO₂ in Mikroporen der Aquifergesteine ergeben – wie weiter oben bei den Modellvorstellungen zum Verhalten von injiziertem CO₂ in

Aquiferen beschrieben – bleibt weiteren Untersuchungen vorbehalten.

Konstitutiv für die dynamische Modellierung von Speicherreservoirs in salinen Aquiferen ist ferner die Kenntnis des Salzgehalts der Formationswässer, da dieser Einfluss auf die Dichte und damit auf den im Reservoir herrschenden hydrostatischen Druck ausübt. Nach HOTH et al. (1997) kann für die salinen Aquifere des Mittleren Buntsandsteins mit einem Salzgehalt von 80-360 g/l gerechnet werden. Die derzeit in Brandenburg verfolgten Projekte für eine CO₂-Speicherung gehen in erster Annahme von Salinitäten im Bereich von 200-350 g/l aus, mit höheren Salzkonzentrationen als 350 g/l wird nicht gerechnet. Chemisch handelt es sich bei den zu erwartenden Solen um Wässer vom Na-Ca-Mg-Typ 1 mit untergeordneten Anteilen an Eisen und Jod (vgl. auch MANHENKE et al. 1999).

Zu diskutieren ist neben der offensichtlichen Eignung mesozoischer saliner Aquifere für die CO₂-Speicherung vor allem eine potenzielle Nutzung von Speicherhorizonten im Subsalinar. Diese wären auf dem Gebiet des Landes Brandenburg hauptsächlich in Sedimenten des Oberrotliegenden (Perm) zu finden. Insbesondere der Elbe-Basissandstein (Oberrotliegend II) ist in Brandenburg flächenmäßig weit aushaltend. Regional verbreitet sind ferner Mirow- und Parchim-Sandstein der Havel-Subgruppe im Norden des Landes sowie der Büstesandstein im Westen Brandenburgs (alle Oberrotliegend II). Die Tiefenlage des Oberrotliegend II erreicht bereits weit im Süden des Landes Brandenburg, etwa an der Linie Herzberg-Senftenberg, die erforderlichen Mindestwerte von 800 m. In Richtung Norden/Nordwesten hin tauchen diese Gesteine bis auf über 4000 m Tiefe ab. Die genannten Sandsteine weisen allerdings überwiegend keine ausreichende Porosität auf, nach vorliegenden Daten liegt sie fast durchgehend unter 10%. Ferner sind sie hinsichtlich ihrer lithologischen Homogenität kaum erkundet, so dass hier eventuell eine CO₂-Einlagerung in Kluftaquiferen bruchtektonisch entstandener Strukturen zu bevorzugen wäre. Die technische Erschließbarkeit dieser würde sich jedoch – bei fraglicher Volumenverfügbarkeit – auch aufgrund der beträchtlichen Teufenlagen wesentlich aufwändiger gestalten als bei suprasalinar-tektonischen oder intrasalinar-tektonischen Speichertypen. Auch reduziert sich mit zunehmender Tiefe zwangsläufig der verfügbare Erkundungs- und Kenntnisstand, wodurch sich wiederum auch das Risiko für konkrete Vorhaben einer CO₂-Versenkung erhöht.

Entscheidend für die Nutzung tiefer Aquifere ist letztendlich die durchgehend sichere Lagerung des CO₂, da schon geringe Leckagen langfristig zu einem Entweichen großer Mengen des gespeicherten CO₂ führen können. Neben dieser allgemeinen Einschätzung der Möglichkeiten zur CO₂-Speicherung in Brandenburg anhand des geologischen Tiefenbaus ist es nicht Gegenstand der vorliegenden Arbeit, die letztendliche Eignung einzelner spezifischer Speicherstrukturen zu betrachten. Zu diesem Zwecke sind, wie mehrfach erwähnt, sehr detaillierte Auswertungen aller

vorliegenden Erkundungsdaten sowie weitere geologische Erkundungsarbeiten an den interessierenden Strukturen notwendig. Systematische Arbeiten in derartige Richtungen wurden in den letzten Jahren auch in Brandenburg von interessierten Industrieunternehmen beauftragt und durch renommierte geotechnisch spezialisierte Firmen bzw. durch die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) durchgeführt (z. B. KNOPF & GERLING 2007, MÜLLER et al. 2009) bzw. sind Gegenstand der unter Pkt. 4 beschriebenen Aktivitäten.

4. Aktuelle Entwicklungen auf dem Gebiet der CO₂-Speicherung in Brandenburg

Sowohl international als auch in Deutschland und speziell im Land Brandenburg sind derzeit eine ganze Reihe von Aktivitäten zur Entwicklung der CCS-Technologie zu beobachten, die teils parallel zueinander verlaufen, ebenso jedoch auch aufeinander aufbauen bzw. sich gegenseitig bedingen.

Auf den Stand und die zu erwartende Abfolge beim Erlass **gesetzlicher Regelungen** zur CCS-Technologie wurde bereits unter Pkt. 2 verwiesen.

Von der EU-Richtlinie sind nach Artikel 2 Speicherungen zu Forschungszwecken und Speicher mit einem Volumen von weniger als 100 kt ausgenommen. Damit werden, unabhängig vom weiteren Rechtssetzungsprozess, die Zulassung und der Betrieb von Demonstrations- und Forschungsvorhaben gewährleistet. Ein derartiges Forschungsobjekt besteht mit „CO₂-Sink“ im Land Brandenburg, das von einem komplexen Forschungskonsortium unter Federführung des Geoforschungszentrums Potsdam (GFZ) in Ketzin betrieben wird. Ketzin bietet für ein solches Vorhaben gleich mehrere Vorteile. Im Zuge der Erkundung und des (inzwischen eingestellten) Betriebes eines Untergrundspeichers am selben Ort ist der geologische Erkundungsstand zur Speicherstruktur Roskow-Ketzin sehr gut. Die vor Ort vorhandene Infrastruktur konnte nach nur geringen Umbauten weiterverwendet werden. Ferner wirkt sich die räumliche Nähe zur federführenden Einrichtung des Projektes (GFZ) positiv aus. An dem Projekt sind weitere 18 Partner aus 9 Ländern beteiligt (FÖRSTER et al. 2006).

Im Projekt „CO₂-Sink“ sollen in erster Linie Mechanismen und Wechselwirkungen der CO₂-Speicherung in einer in einem kontinentalen Sedimentbecken gelegenen suprasalinen Struktur untersucht werden, deren Speicherhorizonte salzwassergefüllt sind. Besonderes Augenmerk richtet sich dabei auf mögliche Karbonatisierungen durch Porenausfällungen von Kalziumkarbonaten, die im Extremfall eine Verdichtung und nachfolgende Blockade der Speicherhorizonte zur Folge haben können.

Durch die Anwendung von Methoden der Oberflächen- und Bohrlochseismik in verschiedenen Phasen der CO₂-Speicherung sollen ferner Bruchstörungssysteme sicher erkannt und

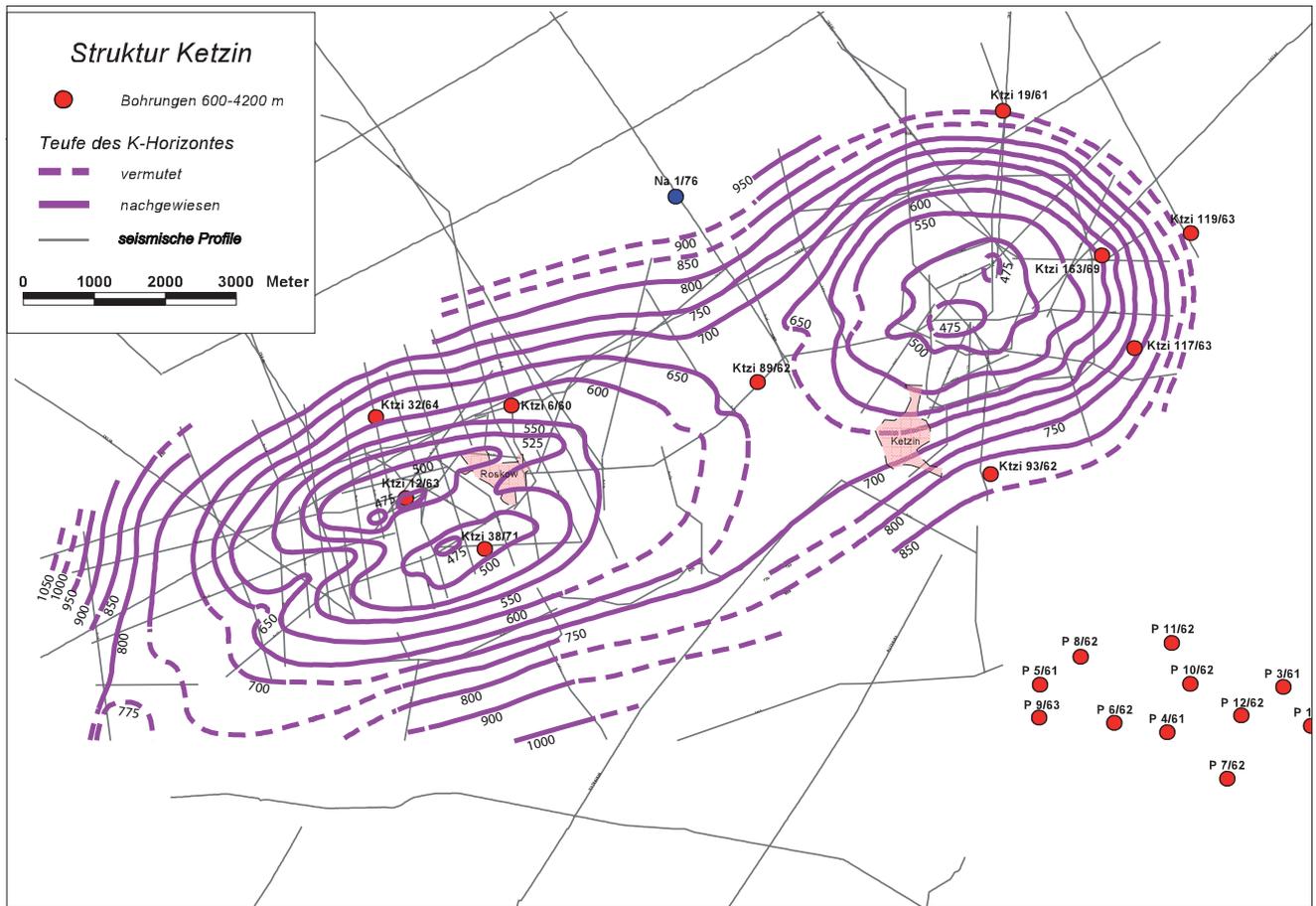


Abb. 6

Teufenlage des reflexionsseismischen K-Horizontes (lila) in der Zechstein-Salinarkissenstruktur Roskow-Ketzin, der durch Ausbildung eines Sulfathorizontes (Heldburg-Gips) eine stratigraphische Grenze im Mittleren Keuper markiert und die Modellierung der Tiefenlage des 80 bis 100 m darunter lagernden Speicherhorizonts (Sandstein der Stuttgart- bzw. Schilfsandstein-Formation), in dem das CO₂ versenkt wird, ermöglicht. Der Erkundungsgrad wird durch die Lage der seismisch vermessenen Profile (grau) und Tiefbohrungen (rot) wiedergegeben.

Fig. 6

Salt pillow structure Roskow-Ketzin: subsurface contour of the K-horizon (lilac) by seismic reflection technique. This horizon marks a stratigraphic border in the middle Keuper by forming a sulphate bed (Heldburg gypsum). So the reservoir rocks for CO₂ (sandstones of the Stuttgart- and Schilfsandstein-formation) which are situated 80 to 100 m below this horizon can be modeled. Note the position of deep drillings (red) and seismic profiles (grey) as a grade of knowledge about this structure

deren Dichtigkeit nachgewiesen sowie eine Charakterisierung der räumlichen Verteilung der Speichereigenschaften in verschiedenen Maßstäben vorgenommen werden.

Weitere Arbeiten in diesem Projekt beinhalten eine Gefährdungsabschätzung bezüglich einer möglichen CO₂-Ausbreitung im flacheren Untergrund (Känozoikum). Dafür wird ein hydrogeologisches Modell für den oberflächennahen Bereich über der Speicherstruktur erarbeitet und ein entsprechendes geochemisches Monitoring realisiert (GFZ 2005). Im Juni 2008 startete nach entsprechenden Vorbereitungen die Injektion von CO₂ am Standort Ketzin.

Die erforderlichen Genehmigungen für das Speicherprojekt wurden durch das Landesamt für Bergbau, Geologie

und Rohstoffe Brandenburg (LBGR) auf der Grundlage des Bergrechts erteilt.

Im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgelegten Programmes COORETEC (CO₂-Reduktionstechnologien) werden durch die BGR in enger Kooperation mit den staatlichen geologischen Diensten der Bundesländer die Informationen über unterirdische Porenspeicherräume in Deutschland im Projekt „Speicher-Kataster“ erfasst.

Ziel ist die Schaffung einer umfassenden und einheitlichen Datengrundlage zu möglichen Speicher- und entsprechen-

den Barrieregesteinschichten, um eine fundierte Aussage über die Gesamtspeicherkapazität tiefer salinärer Aquifere in den Bundesländern vornehmen zu können.

In Brandenburg werden dazu in einem ersten Schritt Potenzialkarten im Maßstab 1 : 1 000 000 für fünf ausgewählte Speichergesteinskomplexe und sechs Barrieregesteinskomplexe erstellt (vgl. auch Abb. 3). Dies betrifft die potenziellen Speicherkomplexe Oberrotliegend II, Mittlerer Buntsandstein, Rhät/Lias, Dogger und Unter-Kreide sowie potenzielle Barrieregesteinskomplexe im Zechstein-Salinar, Röt-Salinar, Lias, Dogger, in der Kreide sowie den Rupelbarrierekomplex (BEBIOLKA et al. 2009).

Als Kriterien für das Speicherpotential gehen folgende Charakteristika ein: Mächtigkeit der geeigneten Speichergesteine in den jeweiligen Speicherkomplexen > 10 m, Tiefenlage der Speicherkomplexoberfläche > 800 m unter Geländeoberfläche, Porosität der Speichergesteine >10% und Permeabilität der Speichergesteine > 10 mD.

Als Barrieregesteinskomplexe werden mächtige Tonsteinhorizonte und Salinarablagerungen angesehen. Die für die kartographische Darstellung in Frage kommenden Barrieregesteine in einem Barrieregesteinskomplex sollen Mächtigkeiten > 20 m aufweisen, die Tiefenlage der Basis der Barrieregesteine muss tiefer als 800 m unter der Geländeoberfläche liegen.

Als Grundlage für die Erstellung der Potenzialkarten werden digitale Horizontkarten aus dem „Atlas zur Geologie von Brandenburg“ (STACKEBRANDT & MANHENKE 2002), die „Tiefenlinienkarte der Zechsteinoberfläche 1 : 300 000 des Landes Brandenburg“ (BEER 2000), Arbeitskarten aus dem Projekt „Geotektonischer Atlas Norddeutschland“ (BGR), sowie Daten bzw. digitalisierte Horizontkarten auf der Grundlage des Kartenwerkes „Geologische Grundlagen für die Geothermienutzung in Nordostdeutschland 1 : 200 000“ verwendet, sowie ein Abgleich mit dem „Reflexionsseismischen Kartenwerk der DDR“ durchgeführt. Zur Ermittlung der Mächtigkeiten und von Porositätswerten ist die Recherche im Bohrdatenarchiv des LBGR Brandenburg unerlässlich.

Ein zweiter Arbeitsschritt umfasst die detaillierte kartographische Darstellung potenziell geeigneter Speicher- und Barrieregesteinskomplexe im Maßstab 1 : 300 000 sowie die weitergehende Beschreibung der Gesteine. Hier gehen Daten zur Petrographie, Stratigraphie, Genese und heutigen Ausdehnung (Flächengröße) ein. Soweit vorhanden, werden petrophysikalische, geochemische und mineralogische Gesteinsdaten, bohrlochgeophysikalische Daten, Angaben über die Temperatur- und Druckbedingungen in den Komplexen sowie Charakteristika der Formationswässer aus der Bohrerkundung erfasst. Dazu werden auch Recherchemöglichkeiten an archivierten Bohrkernen im Bohrkern- und Probenarchiv des LBGR in Wünsdorf genutzt.

In einem späteren Stadium des Projektes ist die spezielle Bearbeitung noch zu bestimmender regionaler Speicherstrukturen vorgesehen, die zur Erarbeitung räumlich differenzierter großmaßstäblicher Strukturmodelle führen sollen.

Im Zusammenhang mit der Bedeutung der Rückhaltefunktion geologischer Barrieren und der jeweils sehr individuellen Ausprägung der Speicherstandorte sind künftig einheitliche untergesetzliche Normen und Kriterien für die untertägige Einlagerung zu formulieren. Aus diesem Grunde wurde bei der BGR das Projekt **STABILITY** (CO₂ Storage ability of deep geological formations) angesiedelt, an dem auch interessierte geologische Landesdienste mitarbeiten. Einer der Schwerpunkte in diesem Projekt ist die Einschätzung der Integrität von verfüllten Altbohrungen bei einer CO₂-Speicherung. Besonders zu untersuchen sind hierbei Mechanismen der Karbonatisierung der Bohrungszementation, die Anbindung der Zementation an die Rohrtour und die Korrosion von Stahl durch CO₂ (VON GOERNE 2009, frdl. mdl. Mitt.). Weitere Schwerpunkte bestehen in der Erstellung eines Einlagerungskonzeptes, der Entwicklung methodischer Mindestanforderungen an ein Standortauswahlkonzept und der Erstellung von generischen Monitoringkonzepten.

Durch Industrieunternehmen wurden beim LBGR Brandenburg bereits vor dem Inkrafttreten nationaler Gesetzesregelungen zur CO₂-Speicherung **Anträge auf Erteilung von Erlaubnissen** zur Aufsuchung bergfreier Bodenschätze zu gewerblichen Zwecken im Sinne von § 3 Abs. 3 Bundesberggesetz (BBergG) gestellt.

Diese Anträge, die von der Vattenfall Europe Mining AG für das Erlaubnisfeld „Birkholz-Beeskow“ (Landkreis Oder-Spree) und von der Verbundnetz Gas AG für das Erlaubnisfeld Neutrebbin (Landkreis Märkisch-Oderland) eingereicht wurden, zielen auf die Erkundung des Bodenschatzes „Sole“ in salinen Aquiferen im Hangenden bekannter Salzkissenstrukturen ab. Im Zuge der Erkundung sollen die jeweiligen Strukturen auch im Hinblick auf eine CO₂-Speicherung untersucht werden (VEM 2009).

Die beantragten Erlaubnisfelder decken die in Abb. 5 dargestellten potenziellen Speicherstrukturen weiträumig ab. Die Zulässigkeit einer derartigen Verfahrensweise wurde durch ein Rechtsgutachten (DAMMERT & LANG 2008) bestätigt.

Es ist zu erwarten, dass der nach Planung der beantragenden Unternehmen noch für 2009 beabsichtigte Beginn der Aufsuchungsarbeiten gemäß § 7 Bundesberggesetz zugelassen werden kann. In künftigen Erkundungsschritten sollte dann das nationale Kohlendioxid-Speichergesetz (KSpG) die Grundlage von Zulassungen darstellen. Laut vorliegendem Gesetzentwurf ist eine derartige Überleitung von auf bergrechtlicher Grundlage begonnenen Erlaubnisverfahren möglich.

Die genannten Anträge befinden sich seit März 2009 im Beteiligungsverfahren der Träger öffentlicher Belange (TÖB). Inhaltlich stellen sie eine kompakte Zusammenfassung der beabsichtigten Arbeiten zur Erkundung der potenziellen Speicherstrukturen dar. Für die reale Durchführung dieser Arbeiten (z. B. Seismik, Bohrprogramm) sind durch die Antragsteller künftig jeweils weitere Betriebspläne einzureichen.

Eine Einspeisung von CO₂ findet in allen diesen Erkundungsetappen noch nicht statt.



Abb. 7
Pilotanlage für ein Braunkohlkraftwerk mit CO₂-Abscheidung am Standort Schwarze Pumpe (Foto: Vattenfall Europe Mining & Generation)

Fig. 7
Pilot construction of a lignite (brown coal) power station with CO₂-separation in Schwarze Pumpe (Photo: Vattenfall Europe Mining & Generation)

Neben diesen beiden Anträgen ist in der Zukunft mit weiteren Interessenten für CO₂-Speicherung in salinen Aquiferen auf dem Gebiet des Landes Brandenburg zu rechnen, die ähnliche Anträge vorlegen werden.

Auch Anträge zur CO₂-Verpressung bei gleichzeitiger Ausbeutung der wegen zu geringer Drücke in den Lagerstätten verbliebenen Kohlenwasserstoffe sind künftig zu erwarten (**enhanced oil and gas recovery**). Derartige Konzepte bieten sich beispielsweise für die Lagerstätten Döbern (Landkreis Spree-Neiße, klüftig-kavernöses Staßfurt-Karbonat, Ca₂ der Lausitzer Lagune) und Mittweide (Landkreis Oder-Spree, Staßfurt-Karbonatsandbarre) sowie für weitere Öllagerstätten des klüftig-kavernösen Staßfurt-Karbonats (Ca₂) der Lausitzer Lagune an (vgl. ROCKEL & ZIEGENHARDT 1979, PLEIN 1994).

Perspektivisch könnten auch Anträge auf eine CO₂-Speicherung im Subsalinar-Stockwerk anstehen (Sandsteine des Ober-Rotliegenden), wobei gleichzeitig eine Ausbeutung von bisher unwirtschaftlichen Erdgas-Lagerstätten in Betracht gezogen werden kann.

Gleichzeitig zu diesen Aktivitäten, die der Kenntnisverdichtung zu Speicherstrukturen bzw. der Erforschung der Wirk-

mechanismen bei der CO₂-Einlagerung dienen, werden die Techniken zur Abscheidung des CO₂ im **Kraftwerksprozess** untersucht.

Zu diesem Zweck hat der bedeutendste Stromerzeuger in Brandenburg, die Vattenfall Europe Mining & Generation am Standort Schwarze Pumpe im Jahr 2008 die weltweit erste Pilotanlage für ein Braunkohlkraftwerk mit CO₂-Abscheidung in Betrieb genommen. Die Anlage arbeitet nach dem Oxyfuel-Verfahren, wobei Braunkohle in einer Mischung aus Sauerstoff und im Kreislauf geführtem Kohlendioxid unter Vorhandensein von Wasserdampf verbrannt wird. Nach dem Verbrennungsprozess erfolgt eine Rauchgasreinigung, in der Schwefeloxide, Feinstaub und andere Schadstoffe abgeschieden werden, anschließend wird das Wasser auskondensiert. Zurück bleibt das konzentrierte CO₂, das mit Hilfe von Verdichtern verflüssigt wird. Die Anlage verfügt über eine thermische Leistung von 30 Megawatt. Mit dieser Anlage wurde im Pilotmaßstab der Nachweis für die Funktionsfähigkeit der Oxyfuel-Technologie erbracht.

Mit Hilfe der aus dem Betrieb dieser Pilotanlage gewonnenen Erkenntnisse soll bis 2015 in Jämschwalde, auf dem Gelände des dort existierenden Kraftwerkes, ein Demonstrationskraftwerk mit Elektroenergieerzeugung gebaut

werden, das über eine ca. zehnfach höhere Leistung als die Pilotanlage verfügt.

Das Unternehmen ist bestrebt, die Technologie etwa bis 2020 zur großtechnischen Serienreife zu führen.

Diese Planungen decken sich mit der Schätzung der Europäischen Union zur Zeitachse der Entwicklung der CCS-Technologie in Europa (vgl. DAVIES 2008).

Zusammenfassung

Die Speicherung von CO₂ im tiefen Untergrund ist im Hinblick auf die politisch geforderten Konsequenzen aus dem Klimawandel einer der möglichen Handlungsansätze.

Brandenburg hat mit seiner Lage im Verbreitungsgebiet der Mitteleuropäischen Senke, einem der größten Ablagerungsbecken weltweit, gute geologische Voraussetzungen für die CO₂-Speicherung in mineralisierten Schichtwasser führenden Aquiferen. Demgegenüber stehen die Möglichkeiten zur Speicherung in ausgeförderten Kohlenwasserstoff-Lagerstätten stark zurück, eine Speicherung in Kohlenflözen ist nach dem derzeitigen Stand der Technik nicht möglich.

Die vorhandenen Kenntnisse über die regionale Verteilung, über das Tiefenniveau von Speicherhorizonten sowie über deren Ausbildung stammen aus Kartenwerken von seismischen Reflexionshorizonten, aus Tiefbohrungen sowie daraus gewonnenen Bohrkernen und durchgeführten bohrlochgeophysikalischen Messungen, die in früheren Jahrzehnten im Zuge inhaltlich völlig anders ausgerichteter Erkundungsprogramme erarbeitet wurden.

Diese Kenntnisse ermöglichen eine fundierte Vorauswahl potenzieller Speicherstandorte. Eine detaillierte Einzelerkundung dieser Strukturen ist nichtsdestotrotz zwingend erforderlich. Insbesondere müssen durch aufwendige Modellierungen Aussagen zur Langzeitsicherheit derartiger Speicher getroffen werden.

Im Falle der Nutzung von Speicherstrukturen für eine CO₂-Einlagerung können sich Nutzungskonflikte zu anderen Ansprüchen an den tieferen Untergrund ergeben. So wäre eine gleichzeitige Erdgasspeicherung nicht möglich, Wechselwirkungen mit Vorhaben der tiefen Geothermie oder der Solennutzung müssten im Zuge einer unterirdischen Raumordnung untersucht und die Arbeitsregimes abgestimmt werden.

Summary

The storage of CO₂ in the deep underground is one of the possible procedures to fulfil the political demands of working against climate changing. Brandenburg, which is situated in the area of the Middle European basin, one of the greatest sedimentary basins of the world, has good geological conditions for the underground storage of CO₂, especially in deep saline aquifers. The potential storage capacities in depleted oil and gas reservoirs are much smaller whereas a storage in deep unmineable coal seams is not possible with current technologies.

The Geological Survey of Brandenburg has a broad knowledge concerning the regional allocation, the depths of stor-

age horizons and their petrographic character. This knowledge has its origin in the extensive drilling campaigns and seismic explorations of the last four decades of the 20th century.

It can be used to determine some potential suitable underground structures for CO₂-storage. However, a detailed exploration in the case of every single potential structure is necessary imperative. One of the main tasks in modeling these structures is a statement to the long term compactness of the structures.

In the case of using some structures for underground storage of CO₂ some conflicts to other applications in the deep underground are possible. So the storage of natural gas is impossible in the same structures and negative interactions are thinkable with deep geothermal projects and salt brine production. Such conflicts could be coordinated and minimized by instruments of a state underground planning.

Literatur

BEBIOLKA, A., GÖTHEL, M., HÖDING, T. & K. REINHOLD (2009): Das CO₂-Speicherkataster für Brandenburg: Zielsetzung, Methodik, erste Ergebnisse. - (im Druck)

BEER, H. & G. ECKHARDT (1993): Karte der tiefliegenden Bodenschätze des Landes Brandenburg 1 : 300 000, mit Erläuterungen. - 21 S., 1 Kt., Kleinmachnow (unveröff.)

BEER, H. (2000): Geologische Karte des Landes Brandenburg 1 : 300 000 – Tiefenlinienkarte der Zechsteinoberfläche. - LBGR, Kleinmachnow

BMU (Hrsg.) (2009): Nutzungsmöglichkeiten der tiefen Geothermie in Deutschland. - Bericht Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, 73 S., Berlin

BMW, BMU & BMBF (Hrsg.) (2007): Entwicklungsstand und Perspektiven von CCS-Technologien in Deutschland. - Gemeinsamer Bericht des BMW, BMU und BMBF für die Bundesregierung, 26 S., Berlin

COOK, P. J. (1999): Sustainability and nonrenewable resources. - *Environmental geosciences* 6, 4, S. 185-190, Menasha

DAMMERT, B. & M. LANG (2008): Rechtsgutachten zur Genehmigung von Aufsuchungen sowie von Untersuchungen des Untergrundes auf seine Eignung zur Speicherung von CO₂. - Gutachten, 31 S., Leipzig (unveröff)

DAVIES, C. (Berichterstatter) (2008): Legislative Entschließung und Standpunkt des Europäischen Parlaments vom 17. Dezember 2008 zu dem Vorschlag für eine Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates über die geologische Speicherung von Kohlendioxid. - Strasbourg

DIENER, I., KATZUNG, G., KÜHN, P., OELSNER, C., GLÄSER, S., HURDIG, E., SCHNEIDER, D. & J. ZSCHERNIG (1984): Geo-

- thermie-Atlas der Deutschen Demokratischen Republik.
- ZGI Berlin
- EU-RL (2008): EU-Richtlinienvorschlag über die geologische Speicherung von Kohlendioxid und zur Änderung der Richtlinien 085/337/EWG und 96/61/EG des Rates sowie der Richtlinien 2000/60/EG, 2001/80/EG, 2004/35/EG, 2006/12/EG und der Verordnung (EG) Nr. 1013/2006 vom 17.12.2008, Brüssel
- FELDRAPPE, H., OBST, K. & M. WOLFGRAMM (2008): Die mesozoischen Sandsteinaquifere des Norddeutschen Beckens und ihr Potential für die geothermische Nutzung. - Z. Geol. Wiss. **36**, 4-5, S. 199-222, Berlin
- FÖRSTER, A., NORDEN, B., ZINCK-JORGENSEN, K., FRYKMAN, P., KULENKAMPF, J., SPANGENBERG, E., ERZINGER, J., ZIMMER, M., KOPP, J., BORM, G., JUHLIN, C., COSMA, C. & S. HURTER (2006): Baseline characterization of the CO₂SINK geological storage site at Ketzin, Germany. - Environmental Geosciences **13**, 3, S. 145-161, Menasha
- GARETZKY, R. G., LUDWIG, A. O., SCHWAB, G. & W. STACKEBRANDT (2001): Neogeodynamics of the Baltic Sea Depression and adjacent areas. Abridged version. - Brandenburg. geowiss. Beitr. **8**, 1, explanatory notes & neogeodynamic maps 1-8, Kleinmachnow
- GFZ (Hrsg.) (2005): CO₂-Sink: Unterirdische Speicherung von Kohlendioxid. - Geoforschungszentrum Potsdam, 4 S., Potsdam
- GÖTHEL, M. (2004): Stratigraphie des Känozoikums in Brandenburg mit spezieller Berücksichtigung des Braunkohlenreviers Lausitz. - Brandenburg. geowiss. Beitr. **11**, 1/2, S. 149-168, Kleinmachnow
- GÖTHEL, M. (2006): Fortschritte bei der Unterscheidung von Aquiferen der Trias u. im Jura Brandenburgs unter spezieller Berücksichtigung der Sequenzstratigraphie. - Brandenburg. geowiss. Beitr. **13**, 1/2, S. 91-115, Kleinmachnow
- HÖDING, T., ANDREAE, A., BENISCH, H.-J., GÖTHEL, M., GRUNERT, U., KOPP, J., LUDWIG, F., NESTLER, P., RENKERT, B., SITSCHICK, H., STACKEBRANDT, W., THIEM, H.-G. & E. WETZEL (2007): Mineralische Rohstoffe und Energierohstoffe im Land Brandenburg. Rohstoffbericht Brandenburg 2007. - Brandenburg. geowiss. Beitr. **14**, 2, S. 5-110, Kleinmachnow
- HOTH, P., SEIBT, A., KELLNER, T. & E. HUENGES (1997): Geowissenschaftliche Bewertungsgrundlagen zur Nutzung hydrothermalen Ressourcen in Norddeutschland. - Scientific Technical Report 97/15, GFZ, Potsdam
- http://www.vattenfall.de/www/vf/vf_de/225583xberx/228227umwel/228407klima/index.jsp, zugegriffen am 06.05.2009
- IPCC (2005): Underground geological storage. - In: IPCC special report on carbon dioxide capture and storage, 431 S., Cambridge
- IZ KLIMA (2008): CO₂-Abscheidung und -Speicherung als Beitrag zum weltweiten Klimaschutz. - 24 S., Berlin
- KNOPF, S. (2007): Bewertung unterirdischer CO₂-Speicherungsmöglichkeiten in der deutschen Region um Eisenhüttenstadt. - Studie, BGR, 75 S., Hannover (unveröff.)
- KNOPF, S. & J. P. GERLING (2007): Evaluation of the suitability of hydrocarbon reservoirs in North Germany and deeply buried aquifers in the regions of Schwedt and Wolfsburg for the underground storage of carbon dioxide. - Studie, BGR, 224 S., Hannover (unveröff.)
- LEMPP, C. (2008): Tiefe Geothermie und CO₂-Einlagerung im Nutzungskonflikt? - Geothermische Energie Nr. 59, **17**, 2, S. 7-10, Geeste
- LITKE, R., BAYER, U., GAJEWSKI, D. & S. NELSKAMP (eds.) (2008): Dynamics of complex intracontinental basin systems. - 520 S., Berlin, (Springer)
- MANHENKE, V., ECKHARDT, G. & W. ROCKEL (1999): Thermalsolebrunnen im Land Brandenburg. - Brandenburg. geowiss. Beitr. **6**, 1, S. 69-78, Kleinmachnow
- MANHENKE, V. & H. BEER (2004): Zur Karte der Tiefliegenden Bodenschätze/Geopotentiale des Landes Brandenburg im Maßstab 1 : 300 000. - Brandenburg. geowiss. Beitr. **11**, 1/2, S. 27-32, Kleinmachnow
- MAY, F., BRUNE, S., GERLING, J. P. & P. KRULL (2003): Möglichkeiten der unterirdischen Speicherung von CO₂ in Deutschland - eine Bestandsaufnahme. - Geotechnik **26**, 3, S. 162-172, Essen
- MAY, F., KRULL, P. & J. P. GERLING (2004): CO₂-storage scenarios in North Germany. - GESTCO project case studies, Studie, BGR, 50 S., Hannover (unveröff.)
- MÜLLER, C., MAY, F., KRULL, P., HOTH, P. & M. FISCHER (2003): Underground storage of carbon dioxide in deep saline aquifers. - Studie, BGR, 35 S., Hannover (unveröff.)
- MÜLLER, C., SCHÄFER, F., WIRTH, H., SCHUSTER, P. & M. FISCHER (2009): A potential CO₂-storage site in southeast Brandenburg. - Studie, BGR, 74 S., Hannover (unveröff.)
- NESTLER, P., HÖDING, T., GÖTHEL, M., SCHULZ, R. & H. SITSCHICK (2005): Geologisch-rohstoffwirtschaftliche Analyse des Rohstoffpotenzials Braunkohle in Brandenburg. - Abschlussbericht LBGR, 60 S., 6 Anl., Cottbus (unveröff.)

- OBST, K. (2008): Möglichkeiten der Unterspeicherung für Erdgas und CO₂ im Nordosten Deutschlands. - Z. geol. Wiss. **36**, 4-5, S. 281-302, Berlin
- PLEIN, E. (1994): Part 1: Europe and Asia, S. 139-192. - In: KULKE, H. (ed.): Regional petroleum geology of the world, Stuttgart (Borntraeger)
- ROCKEL, W. & W. ZIEGENHARDT (1979): Strukturelle Kriterien der Lagunenbildung im tieferen Zechstein im Raum südlich von Berlin. - Z. geol. Wiss. **7**, 7, S. 847-860, Berlin
- SCHRETZENMAYR, S. (1998): Erdöl-Erdgas-Exploration in Brandenburg - Historie; Ergebnisse, Kenntnisgewinn. - Brandenburg. geowiss. Beitr. **5**, 2, S. 9-18, Kleinmachnow
- SCHWAB, G. (1985): Paläomobilität der Norddeutsch-Polnischen Senke. - Habilitationsschrift Akademie der Wissenschaften der DDR, 196 S., Berlin
- SIROCKO, F., REICHERTER, K., LEHNE, R., HÜBSCHER, CH., WINSEMANN, J. & W. STACKEBRANDT (2008): Chapter 4.5: Glaciation, salt and the present landscape. - In: LITKE, R., BAYER, U., GAJEWSKI, D. & S. NELSKAMP (eds.): Dynamics of complex intracontinental basin systems. - 520 S., Berlin (Springer)
- STACKEBRANDT, W. & V. MANHENKE (Hrsg.)(2002): Atlas zur Geologie von Brandenburg. - 142 S., Kleinmachnow.
- STACKEBRANDT, W. & H. BEER (2002): Strukturgeologische Übersicht. - In: STACKEBRANDT, W. & V. MANHENKE (Hrsg.) (2002): Atlas zur Geologie von Brandenburg. - S. 68-69, Kleinmachnow
- STACKEBRANDT, W. (2004): Zur Neotektonik in Norddeutschland.- Z. geol. Wiss., **32**, 2-4, S. 85-95, Berlin
- STACKEBRANDT, W. (2005): Neotektonische Aktivitätsgebiete in Brandenburg (Norddeutschland). - Brandenburgische geowiss. Beitr. **12**, 1/2, S. 165-172, Kleinmachnow
- VEM (Hrsg.) (2009): Erkundung geologischer Formationen zur CO₂-Speicherung in Ostbrandenburg geplant. - Z. Bergbau **60**, 4, S. 146-147, Essen
- ZIEGENHARDT, W. (1976a): Bau und Genese salinartektonisch angelegter Strukturen des Staßfurtkarbonats im Zechstein der Lausitz. Teil 1: Charakteristik des Strukturbaus. - Z. f. angew. Geol. **22**, 1, S. 3-10, Berlin
- ZIEGENHARDT, W. (1976b): Bau und Genese salinartektonisch angelegter Strukturen des Staßfurtkarbonats im Zechstein der Lausitz. Teil 2: Strukturgenetische Interpretation. - Z. f. angew. Geol. **22**, 3, S. 107-113, Berlin

Anschriften der Autoren:

Dr. Thomas Höding
 Dipl.-Geol. Michael Göthel
 Dr. Werner Stackebrandt
 Landesamt für Bergbau, Geologie und
 Rohstoffe Brandenburg
 Inselstr. 26
 03046 Cottbus
thomas.hoeding@lbgr-brandenburg.de
michael.goethel@lbgr-brandenburg.de,
werner.stackebrandt@lbgr-brandenburg.de