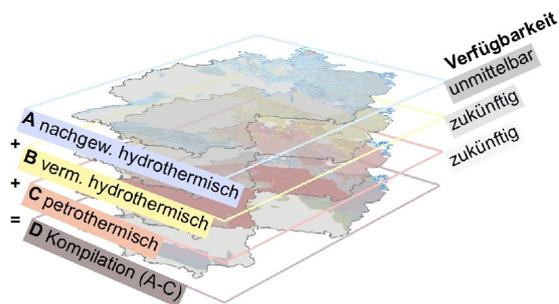


Geothermie-Atlas
zur Darstellung möglicher
Nutzungskonkurrenzen
zwischen CCS und
Tiefer Geothermie



– Endbericht –

Berichtszeitraum
01.10.2010 – 31.03.2013

**Leibniz-Institut für
Angewandte Geophysik**

und

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe

Geothermie-Atlas

**zur Darstellung möglicher Nutzungskonkurrenzen zwischen CCS und
Tiefer Geothermie**

– Endbericht –

Projektleiter:	Dr. Rüdiger Schulz (LIAG) Stefan Knopf (BGR)
Sachbearbeiter:	Dr. Evelyn Suchi Jan Dittmann
Zuwendungsgeber:	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit Projektträger Jülich (PtJ-EEN)
Förderkennzeichen:	0325257A/B
Laufzeit des Vorhabens:	01.10.2010 – 31.03.2013
Berichtsdatum:	15.04.2013
Archivnummer:	0131310

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des *Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit* unter dem Förderkennzeichen *0325257A/B* gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Autoren

Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik (LIAG):

SCHULZ, R. (Herausgeber, Kap. 1, 2, 5)

SUCHI, E. (Kap. 2, 5)

ÖHLSCHLÄGER, D. (Kartographie)

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR):

DITTMANN, J. (Kap. 3, 4)

KNOFF, S. (Kap. 3)

MÜLLER, C. (Kap. 1)

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	3
Empfehlungen.....	5
1 Projektbeschreibung.....	6
2 Potenzialgebiete für die Tiefe Geothermie	8
2.1 Definitionen und Kriterien.....	8
2.2 Datengrundlage und Methodik.....	12
2.3 Nachgewiesenes hydrothermisches Potenzial.....	16
2.3.1 Nordwestdeutschland.....	17
2.3.2 Nordostdeutschland	21
2.3.3 Hessen und nördlicher Oberrheingraben.....	23
2.3.4 Thüringer und Fränkisches Becken	24
2.3.5 Oberrheingraben	25
2.3.6 Süddeutsches Molassebecken.....	26
2.4 Vermutetes hydrothermisches Potenzial.....	28
2.4.1 Norddeutsches Becken (sedimentäres Rotliegend).....	28
2.4.2 Saar-Nahe-Becken (sedimentäres Rotliegend)	30
2.5 Petrothermisches Potenzial	31
2.5.1 Norddeutsches Becken (vulkanisches Rotliegend).....	31
2.5.2 Mittel- und Süddeutsches Kristallgebiet.....	31
2.5.3 Nordwestdeutschland (Mittlerer Buntsandstein)	32
2.5.4 Nordrhein-Westfalen (Namur A, B).....	32
2.6 Fazit.....	33
3 Potenzialgebiete für eine CO ₂ -Einlagerung.....	38
3.1 Rahmenbedingungen.....	38
3.2 Datengrundlage	39
3.3 Begriffserläuterungen.....	40
3.4 Kriterien für die Bewertung von Speicher- und Barrierekomplexen.....	41
3.5 Methodik	42
3.6 Potenzialgebiete	44
3.6.1 Stratigraphie der Speicher-Barriere-Komplexe	44
3.6.2 Verbreitung der Speicher-Barriere-Komplexe	46
3.6.3 Untersuchungswürdige Gebiete	51
3.7 Diskussion und Fazit.....	54
4 Störungen, Störungszonen und Störungssysteme	56
4.1 Definitionen und Eigenschaften	56
4.2 Datengrundlage	60
4.3 Übersichtskarte der Störungszonen.....	62
4.3.1 Methodik und Generalisierungsschritte.....	62
4.3.2 Attributierung der Störungszonen	64
4.3.3 Literatur-Datenbank.....	66

4.4	Strukturgebiete.....	68
4.5	Diskussion und Fazit.....	73
5	Kompilation der Karten und Bewertung.....	75
5.1	Aufbau und Beschreibung der Karten.....	75
5.1.1	Allgemeiner Aufbau der Karten.....	75
5.1.2	Inhalte der Karte A.....	79
5.1.3	Inhalte der Karte B.....	79
5.1.4	Inhalte der Karte C.....	79
5.1.5	Inhalte der Karte D.....	80
5.2	Ergebnisse und Bewertung.....	81
6	Literaturverzeichnis.....	86
6.1	Verwendete Literatur.....	86
6.2	Publikationen und Vorträge.....	98
6.2.1.	Vortragsveröffentlichungen (Proceedings).....	98
6.2.2.	Poster.....	98
6.2.3.	Vorträge.....	98
6.2.4.	Berichte.....	99
6.2.5.	Workshops.....	99
7	Glossar.....	100
	Abbildungsverzeichnis.....	105
	Tabellenverzeichnis.....	108
	Anlagen	

Zusammenfassung

Die Bundesregierung hat in ihrem Koalitionsvertrag vom 26.10.2009 unter dem Punkt Klimaschutz, Energie und Umwelt eine zeitnahe Umsetzung der EU-Richtlinie vereinbart, die die Abscheidung, den Transport und die Einlagerung von CO₂ (englisch: **C**arbon **D**ioxide **C**apture and **S**torage – CCS) regelt. In diesem Zusammenhang wurde ein Geothermie-Atlas beauftragt, um Nutzungskonkurrenzen zwischen CCS und Tiefer Geothermie darzustellen. Das Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik (LIAG) erhielt eine Zuwendung aus dem Energieforschungsprogramm für dieses Projekt und hat es in Kooperation mit der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) umgesetzt.

Schon heute wird der tiefere Untergrund unterschiedlich genutzt (z. B. Erdöl- und Erdgasgewinnung und -speicherung, Tiefe Geothermie); seine Nutzung wird in Zukunft durch den Ausbau bestehender Nutzungen und die Einführung neuer Nutzungsoptionen (z. B. CO₂-Einlagerung, Wasserstoffspeicherung) noch zunehmen, so dass von einer vermehrten konkurrierenden Nutzung auszugehen ist. Um erste Entscheidungshilfen zu liefern, konzentrierten sich die Forschungspartner auf die möglichen Nutzungskonflikte von Erdwärmennutzung und CO₂-Einlagerung.

Für den Standort Deutschland existierte bisher keine gemeinsame Darstellung der Nutzungspotenziale für geothermische Energie und für eine CO₂-Einlagerung. Dies wird erstmals im vorliegenden „Geothermie-Atlas“ mit vier Karten im Maßstab 1 : 1 000 000 geleistet. Dazu wurden die geothermischen Potenziale hinsichtlich ihrer Systeme (hydrothermisch, petrothermisch) und ihrer zukünftigen Verfügbarkeit bewertet:

- In der Karte mit *nachgewiesenem hydrothermischem Potenzial* werden Aquifere, die schon geothermisch genutzt werden oder deren Ressourcen berechnet worden sind oder deren Potenziale durch verschiedene Untersuchungen bereits belegt werden konnten, dargestellt. Diese Potenziale sind schon heute verfügbar und werden teilweise schon genutzt.
- Sind bis zum heutigen Zeitpunkt noch keine Projekte innerhalb der für eine Nutzung vorgesehenen Abfolge realisiert worden und liegt ausschließlich ein indirekter Erkundungsstand vor (z. B. durch Aufschlussanaloge), werden die betrachteten Horizonte in die Karte mit *vermutetem hydrothermischem Potenzial* aufgenommen. Diese Potenziale könnten mittelfristig genutzt werden, wenn die Eignung der Horizonte nachgewiesen wird, sind also erst zukünftig verfügbar.
- Gesteinsfolgen, die zur geothermischen Nutzung einer hydraulischen Stimulation bedürfen, werden in der Karte mit *petrothermischem Potenzial* erfasst. Projekte, die dieses Potenzial nutzen wollen, befinden sich zurzeit noch im Erprobungsstadium, so dass hier ebenfalls nur eine zukünftige Verfügbarkeit besteht.
- Durch die Kompilation der drei vorher genannten Karten entsteht die Karte des *gesamten geothermischen Potenzials*.

In Deutschland sind zwei Optionen zur CO₂-Speicherung relevant, einerseits erschöpfte Erdgasfelder und andererseits tiefe saline Aquifere. Für diese Optionen wurden im Projekt Speicher-Kataster Deutschland von der BGR und den Staatlichen Geologischen Diensten (SGD) untersuchungswürdige Speicher- und Barriere-

gesteinshorizonte für die CO₂-Einlagerung erfasst und bearbeitet. Auf dieser Basis wurden die Potenzialgebiete für eine mögliche CO₂-Einlagerung ausgewiesen.

Durch die Überlagerung des jeweiligen geothermischen Potenzials mit den untersuchungswürdigen Gebieten für eine CO₂-Einlagerung werden in den vier Karten die Gebiete dargestellt, in denen eine Nutzungskonkurrenz zwischen den beiden Optionen auftreten könnte. Eine mögliche Nutzungskonkurrenz existiert, wenn an einem Standort im Untergrund untersuchungswürdige Horizonte für die CO₂-Einlagerung vorkommen und ein Potenzial für eine geothermische Nutzung vorliegt. Diese Definition möglicher Nutzungskonkurrenzen beschränkt sich also nicht nur auf einen konkreten Zielhorizont, sondern auch auf Standorte mit unterschiedlichen Nutzungsoptionen in verschiedenen Zielhorizonten. Das bedeutet nicht, dass an konkreten Standorten eine stockwerksbezogene Nutzung des Untergrundes technisch unmöglich ist.

Zusätzlich zeigen die Karten, welche Gebiete nicht untersucht wurden bzw. welche Gebiete durch keine der Optionen nutzbar sind und welche Bereiche nur für eine der möglichen Nutzungen in Frage kommen.

Lediglich 19,9 % der Fläche von Deutschland sind als potenziell nicht nutzbar für mindestens eine der untersuchten Optionen eingestuft worden, bzw. wurden nicht untersucht. Geothermisch nutzbar, ohne Konkurrenz zur CO₂-Einlagerung, sind 37,3 % der Gesamtfläche. Eine mögliche konkurrierende Nutzung konnte für 41,7 % der Fläche von Deutschland festgestellt werden. Nur rund 1,2 % der Fläche ist für eine CO₂-Einlagerung untersuchungswürdig, ohne dass Konkurrenz zu einer geothermischen Option auftreten könnte.

Für eine vergleichende Bewertung der Nutzungsarten und eine mögliche Ausweisung von Vorzugsgebieten ist es jedoch nötig, zusätzliche geotechnische Kriterien und weitere Aspekte zu berücksichtigen; dies war nicht Inhalt dieses Projektes. Zusätzliche Aspekte könnten zum Beispiel Bevölkerungsdichte oder geeignete Energieabnehmer sein. In jedem Fall kann die Eignung des Untergrundes für eine der hier betrachteten geotechnischen Nutzungen erst nach einer intensiven standortspezifischen Erkundung festgelegt werden. Für den Einzelfall sind detaillierte Machbarkeitsstudien erforderlich.

Empfehlungen

Die Ergebnisse des Projektes stellen eine erste naturwissenschaftliche Grundlage für politische Entscheidungen für die Nutzung des tieferen Untergrundes dar. Eine detailliertere geographische und geometrische Erfassung der Gebiete mit einer möglichen Nutzungskonkurrenz zwischen Tiefer Geothermie und CCS erfordert Karten mit größeren Maßstäben und die Erhebung zusätzlicher geotechnischer Informationen. Bei der Erstellung von Karten mit Maßstäben 1 : 200 000 oder größer sollten die Staatlichen Geologischen Dienste der Bundesländer zwingend mit eingebunden werden, wobei man die Methode, die in diesem Projekt entwickelt wurde, maßstabsunabhängig einsetzen kann.

Da die Nutzung verschiedene Horizonte in verschiedenen Tiefenabschnitten betrifft, sollten in Zukunft zur Darstellung der möglichen Nutzungskonkurrenzen anstelle von zweidimensionalen, an die Oberfläche projizierten Karten dreidimensionale Untergrundmodelle eingesetzt werden. Für die nachgewiesenen hydrothermischen Potenziale liegen entsprechende 3D-Modelle im Geothermischen Informationssystem (GeotIS) vor, auf die interaktiv zugegriffen werden kann (www.geotis.de).

Die Methode für die Darstellung der möglichen Nutzungskonkurrenzen zwischen Tiefer Geothermie und CCS kann auch auf andere Nutzungen übertragen werden. Darstellungen dieser Art können als Basisdaten zur Erstellung von Raumordnungskonzepten zur optimalen Nutzung des Untergrundes herangezogen werden und können Grundlagen für eine unterirdische Raumordnung darstellen. Ob ein unterirdisches Raumordnungsverfahren notwendig ist und wie es gegebenenfalls inhaltlich ausgestaltet wird, ist politisch zu entscheiden.

In dem Projekt erfolgte auch die bundesweite Erfassung und Beschreibung tieferreichender Störungssysteme. Regionale und überregionale Störungssysteme sind sowohl für die Tiefe Geothermie als auch für eine CO₂-Einlagerung von großer Bedeutung. Störungen können erhöhte Durchlässigkeiten aufweisen, wodurch die Zirkulation von Grundwässern im Bereich der Störungszone möglich ist. Solche zirkulierenden Grundwässer können geothermisch genutzt werden; dagegen wird man bei einer CO₂-Einlagerung solche Störungen meiden, um das Risiko einer Leckage zu minimieren.

Der in diesem Projekt entwickelte Ansatz für eine Attributierung von Störungszonen kann Grundlage für eine systematische und bundesweite Bewertung von Störungszonen sein. Allerdings besteht besonders hinsichtlich der hydraulischen Eigenschaften von Störungszonen noch erheblicher Forschungsbedarf, der bei der zukünftigen Forschungsplanung berücksichtigt werden muss.

1 Projektbeschreibung

Die Bundesregierung hat in ihrem Koalitionsvertrag unter dem Punkt Klimaschutz, Energie und Umwelt eine zeitnahe Umsetzung der EU-Richtlinie über „Abscheidung, Transport und Einlagerung von CO₂“ vereinbart. In diesem Zusammenhang wurde ein Geothermie-Atlas beauftragt, um Nutzungskonkurrenzen zwischen CCS und Tiefer Geothermie zu prüfen. Obwohl es sich im klassischen Sinn nicht um einen Geothermie-Atlas handelt, der ausschließlich geothermische Karten enthält, sondern um vier großformatige Karten, die die Nutzungspotenziale für Geothermie und untersuchungswürdige Gebiete für eine CO₂-Einlagerung darstellen, wurde der Begriff „Geothermie-Atlas“ beibehalten, aber in Anführungszeichen gesetzt. Der aus dem Koalitionsvertrag übernommene Begriff „CO₂-Einlagerung“ wird in dieser Studie im selben Sinne verwendet wie der im Kohlendioxid-Speicherungsgesetz (KSpG) verwendete Begriff „CO₂-Speicherung“.

Schon heute wird der tiefere Untergrund unterschiedlich genutzt (z. B. Erdöl- und Erdgasgewinnung und -speicherung, Tiefe Geothermie); seine Nutzung wird in Zukunft durch den Ausbau bestehender Nutzungen und der Einführung neuer Nutzungsoptionen (z. B. CO₂-Einlagerung, Wasserstoffspeicherung) noch zunehmen, so dass von einer vermehrten konkurrierenden Nutzung auszugehen ist. Um erste Entscheidungshilfen zu liefern, konzentriert man sich auf einige wenige Nutzungskonflikte wie Erdwärmennutzung und CO₂-Einlagerung.

Für den Standort Deutschland existierte bisher keine gemeinsame Darstellung der Nutzungspotenziale für geothermische Energie und CO₂-Einlagerung. Diese wurde im „Geothermie-Atlas“ im kleinen Maßstab umgesetzt.

Zusätzlich erfolgte bundesweit die Erfassung und Beschreibung tieferreichender überregionaler Störungssysteme. Die in diesem Projekt entwickelten Konzepte für eine Attributierung von Störungszonen sind Grundlage für eine systematische und bundesweite Bewertung von Störungszonen in Folgeprojekten.

Das Projekt wurde vom Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik (LIAG) in Kooperation mit der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR, Fachbereich 3.3: Nutzungspotenziale des tieferen Untergrundes, geologische CO₂-Speicherung) durchgeführt. Die Einstellung der wissenschaftlichen ProjektmitarbeiterInnen erfolgte am 01.06.2011 (LIAG) bzw. 06.06.2011 (BGR). Ab dem 19.09.2011 wurde das Projekt durch eine technische Mitarbeiterin unterstützt. Aufgrund der Zeitverzögerung bei den Einstellungen konnte das Projekt innerhalb des geplanten Zeitraumes (bis 30.06.2012) nicht abgeschlossen werden und wurde bis zum 31.03.2013 verlängert.

Zur Information über die Hintergründe und den Stand der Projektarbeiten, sowie um Möglichkeiten der Integration weiterer erhobener Daten abzuklären, wurden zwei Informationsveranstaltungen für die Staatlichen Geologischen Dienste (SGD) und interessierte Personen und Institutionen am 08.02.2012 und 06.11.2012 in Hannover abgehalten.

Die Bearbeitung der geothermischen Potenzialgebiete erfolgte durch das LIAG. Die Bereiche der CO₂-Einlagerung und die für beide Nutzungsoptionen wichtigen Informationen über Eigenschaften von Störungssystemen wurden von der BGR bearbeitet. Die Bewertung der natürlichen Gegebenheiten erfolgte zunächst getrennt für die beiden Nutzungsmöglichkeiten. In einem weiteren gemeinsamen Schritt wurden die Ergebnisse aus allen drei Teilbereichen zusammengeführt und verschnitten (Abb. 1.1).

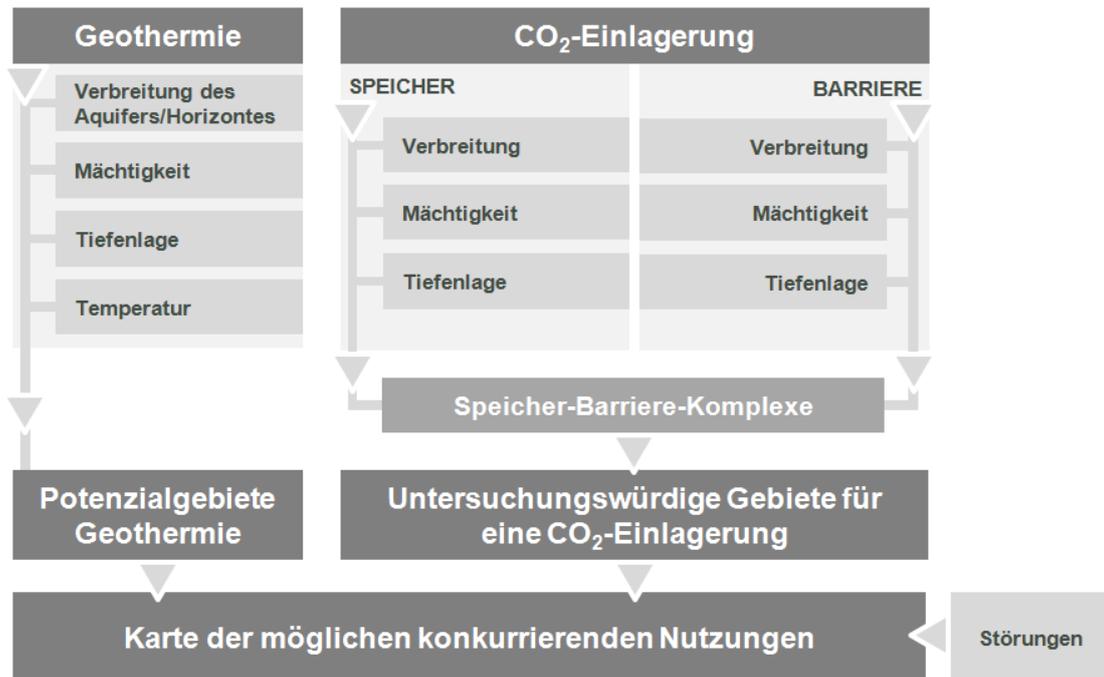


Abb. 1.1: Generelle Vorgehensweise und Ablaufschema der einzelnen Arbeitsschritte innerhalb des Projektes „Geothermie-Atlas“.

Die Projektbearbeitung erfolgte in vier Arbeitspaketen:

- Potenzialgebiete für die Tiefe Geothermie (Kap. 2),
- Potenzialgebiete für eine CO₂-Einlagerung (Kap. 3),
- Störungen, Störungszonen und Störungssysteme (Kap. 4),
- Kompilation der Karten und Bewertung (Kap. 5).

Nach Sichtung des vorliegenden Datenmaterials erfolgte das Einpflegen in ein Geographisches Informationssystem (GIS), mit dessen Hilfe die Harmonisierung der Datensätze und die Verarbeitung der Daten der drei Teilprojekte durchgeführt wurde. Für die abschließende Erstellung der Karten kam dieses System ebenfalls zur Anwendung.

Zusätzliche relevante Resultate, z. B. zur möglichen Nutzungskonkurrenz innerhalb einzelner Horizonte, wurden mittels weiterer ergänzender Abbildungen und Graphiken in diesen Bericht aufgenommen. Im Vordergrund steht hierbei eine schnelle Erfassbarkeit der Inhalte.

Die Ergebnisse stellen naturwissenschaftliche Grundlagen für politische Entscheidungsfindungen zur Nutzung des tieferen Untergrundes dar, ggf. bieten sie auch Elemente für eine unterirdische Raumordnung.

Für eine vergleichende Bewertung der beiden Optionen und eine mögliche Ausweisung von Vorzugsgebieten sind jedoch weitere Kriterien zu berücksichtigen, die nicht Inhalt des zu erstellenden Berichtes bzw. Kartenwerkes sein können. In jedem Fall kann die Eignung des Untergrundes für eine geotechnische Nutzung erst nach einer intensiven standortspezifischen Erkundung festgestellt werden. Für den Einzelfall sind weiterhin detaillierte Machbarkeitsstudien erforderlich.

2 Potenzialgebiete für die Tiefe Geothermie

2.1 Definitionen und Kriterien

Geothermische Energie ist die in Form von Wärme gespeicherte Energie unterhalb der Oberfläche der festen Erde (VDI-RICHTLINIE 4640). Synonyme sind Erdwärme oder auch Geothermie.

Geothermische Systeme lassen sich unter verschiedenen Gesichtspunkten klassifizieren. Wenn man gleichzeitig die Tiefe der Wärmegewinnung und die Nutzungsart der geothermischen Energie berücksichtigen will, bietet sich die Unterteilung in Tiefe und Oberflächennahe Geothermie an (PK TIEFE GEOTHERMIE, 2007).

Die *Oberflächennahe Geothermie* nutzt das Wärmeangebot im Bereich der Erdoberfläche bis ca. 400 m. Typische Systeme, meist in Verbindung mit einer Wärmepumpe, sind Erdkollektoren, Erdwärmesonden, Grundwasserbohrungen oder Energiepfähle. Per Definition wird die Tiefe Geothermie von der Oberflächennahen Geothermie abgegrenzt (meist bis 150 m, max. 400 m, vgl. VDI-RICHTLINIE 4640).

Die *Tiefe Geothermie* umfasst Systeme, bei denen die geothermische Energie über Tiefbohrungen erschlossen wird und deren Energie direkt (d. h. ohne Niveauanhebung) genutzt wird (STOBER et al., 2011). Im Tiefenbereich von ca. 400–1.000 m kann auch von *Mitteltiefer Geothermie* gesprochen werden, die einen Temperaturbereich von ca. 40 bis 60 °C abdeckt. Deshalb ist es üblich, von Tiefer Geothermie im eigentlichen Sinn erst bei Tiefen von über 1.000 m und Temperaturen oberhalb 60 °C zu sprechen (STOBER et al., 2011).

Bei *hydrothermischen Systemen* erfolgt die Nutzung des in einem tiefen Grundwasserleiter (Aquifer) vorhandenen Wassers direkt oder über Wärmetauscher zur Speisung von Nah- und Fernwärmenetzen, zur landwirtschaftlichen oder industriellen Nutzung oder für balneologische Zwecke. Beispiele sind Aquifere mit thermalem (> 20 °C), warmem (60–100 °C) oder heißem (> 100 °C) Wasser. Ab ca. 100 °C ist eine Verstromung möglich (STOBER et al., 2011).

Petrothermische Systeme nutzen zum überwiegenden Teil die im Gestein gespeicherte Energie unabhängig von wasserführenden Horizonten. Im Wesentlichen wird die im heißen, gering durchlässigen Gestein (hot dry rock – HDR) gespeicherte Energie genutzt, indem man durch hydraulische Stimulation einen unterirdischen Wärmetauscher schafft oder erweitert. Dabei müssen folgende Kriterien gleichzeitig erfüllt sein (SCHULZ, 2008):

- Der Produktionshorizont ist das Grundgebirge oder eine gering permeable Schicht (mit einer mittleren Permeabilität von weniger als 10^{-14} m^2).
- Die Produktionsbohrung liefert ohne eine hydraulische Stimulation keine wirtschaftlich relevante Schüttung. Als wirtschaftlich relevant werden Bohrungen mit einem Produktivitätsindex von mindestens $\text{PI} = 10^{-2} \text{ m}^3/(\text{MPa} \cdot \text{s})$ definiert.
- Der Produktivitätsindex muss mit hydraulischer Stimulation nachweislich mindestens um 50 % erhöht worden sein.

Die Gesteine für diese petrothermische Nutzung sollten Temperaturen von mehr als 150 °C aufweisen und befinden sich deshalb in Tiefen von mehr als 3.000 m (STOBER et al., 2011). Als Beispiel kann das Grundgebirge oder auch weiteres tiefes und undurchlässiges Gestein genannt werden. Die Energienutzung, die etwas umfassender nach aktueller Terminologie auch als Enhanced Geothermal System oder

Engineered Geothermal System (EGS) bezeichnet wird, dient meist zur Stromerzeugung.

Die Übergänge zwischen den einzelnen Systemen können fließend sein; die genannten Zahlenwerte zur Definition der verwendeten Parameter sind nicht als starre Kriterien aufzufassen.

Die Beurteilung von geothermischen Energiepotenzialen basiert auf dem im Untergrund gespeicherten *Wärmeinhalt*. Dies entspricht dem Vorgehen bei den nicht regenerierbaren Energierohstoffen (Erdöl, Erdgas usw.). Dort schätzt man ebenfalls die im Untergrund vorhandenen Vorräte des jeweiligen Energieträgers ab und klassifiziert diese als Ressourcen (technisch gewinnbar) oder Reserven (wirtschaftlich gewinnbar). Diese Definitionen lassen sich analog auf die geothermischen Energiepotenziale übertragen (s. Abb. 2.1).

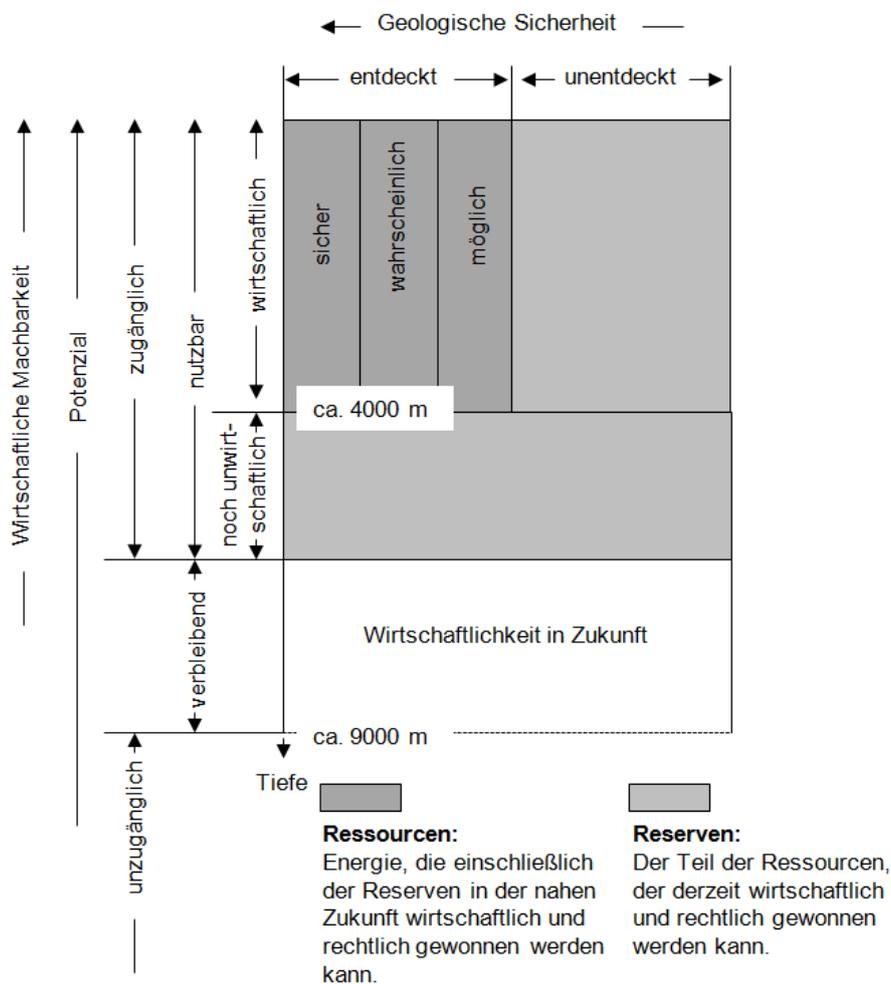


Abb. 2.1: McKelvey-Diagramm: Schaubild für geothermische Ressourcen und Reserven (verändert nach HAENEL & STAROSTE, 1988).

Unter *Ressourcen* wird der Anteil des zugänglichen Energievorrats verstanden, der sich beim gegenwärtigen Stand der Technik dem Untergrund entnehmen lässt und möglicherweise auch eine (zukünftige) wirtschaftliche Nutzung erwarten lässt.

Unter *Reserven* wird der Anteil der Ressourcen verstanden, der beim gegenwärtigen Preisniveau genutzt werden kann. Die Abschätzung der Reserven unterliegt stark marktabhängigen zeitlichen Schwankungen, da die Wirtschaftlichkeit für die geothermische Energienutzung durch hohe Investitionskosten bei relativ geringen Betriebskosten geprägt wird. Den Hauptteil der Investitionen tragen die Bohrkosten einschließlich des Bohrlochausbaus. Damit hängt die Wirtschaftlichkeit stark vom anzusetzenden Zinssatz und der Amortisationsdauer ab, aber auch von Kosten und Verfügbarkeit von Bohrmannschaften sowie von Stahlpreisen.

Wegen der starken marktabhängigen Schwankungen hat man bisher nur die hydrothermischen Ressourcen abgeschätzt und in Atlanten veröffentlicht (HAENEL & STAROSTE, 1988; HAENEL & HURTER, 2002). Die in der DDR entstandenen Karten und Darstellungen (KATZUNG, 1984; DIENER et al., 1984 ff; WORMBS et al., 1988 ff) enthielten keine quantifizierte Angaben zum gewinnbaren geothermischen Energieinhalt und wurden deshalb als Potenzialkarten bezeichnet.

Der in dem TAB-Bericht über die Möglichkeiten der geothermischen Stromerzeugung (PASCHEN et al., 2003) verwendete Begriff „technisches Potenzial“ entspricht in etwa dem Begriff *Ressource*. In diesem Bericht ist auch das Potenzial für die petrothermische Nutzung basierend auf den Arbeiten von JUNG et al. (2002) abgeschätzt worden.

Für die hier vorgestellten Karten des „Geothermie-Atlas“ werden die geothermischen Potenziale hinsichtlich ihrer Systeme (hydrothermisch, petrothermisch) und ihrer zukünftigen Verfügbarkeit bewertet:

- Aquifere, die schon geothermisch genutzt werden oder deren Ressourcen berechnet worden sind oder deren Potenziale durch verschiedene Untersuchungen bereits belegt werden konnten, werden in der Karte mit *nachgewiesenem hydrothermischen Potenzial* dargestellt.
- Sind bis zum heutigen Zeitpunkt noch keine Projekte innerhalb der für eine Nutzung vorgesehenen Abfolge realisiert worden und liegt ausschließlich ein indirekter Erkundungsstand vor (z. B. durch Aufschlussanaloge), werden die betrachteten Horizonte in die Karte mit *vermutetem hydrothermischen Potenzial* aufgenommen.
- Gesteinsfolgen, die zur geothermischen Nutzung einer Stimulation bedürfen, werden der Gruppe mit *petrothermischem Potenzial* zugerechnet.

Die Abgrenzung und graphische Darstellung der räumlichen Verbreitung der Potenzialgebiete und damit der für eine geothermische Nutzung relevanten Aquifere und Horizonte erfolgte anhand der in Tabelle 2.1 aufgeführten Kriterien, wobei die in der Literatur genannten und allgemein gebräuchlichen Größen verwendet wurden.

Tab. 2.1: Verwendete Kriterien zur Abgrenzung der für eine geothermische Nutzung geeigneten Gebiete (zusammengestellt nach Angaben von ROCKEL & SCHNEIDER (1992); ROCKEL et al. (1997); HUENGES et al. (1999); JUNG et al. (2002); PASCHEN et al. (2003)).

	Geothermisches Potenzial	
	hydrothermisch	petrothermisch
Lithologie	poröse, klüftige Sandsteine oder Karbonate	Magmatite, Metamorphite oder dichte Sedimentgesteine
Mächtigkeit	> 20 m	-
Temperatur	> 60 °C bzw. > 40 °C (Mitteltiefe Geothermie)	> 100 °C
Tiefenlage unter Geländeoberkante	< 7000 m	ab 3000 m < 7000 m
Porosität	> 20 %	-
Permeabilität	> 500 mD	-

2.2 Datengrundlage und Methodik

Wesentliche Parameter wie Verbreitung, Tiefenlage, Mächtigkeit und Temperatur der Nutzhorizonte, die aus porösen bzw. klüftigen oder karstigen Sandsteinen und Karbonaten bestehen, wurden aus vorhandenen, analog vorliegenden Karten entnommen (z. B. DIENER et al., 1988; DIENER et al., 1990b; DIENER et al., 1991; DIENER et al., 1992a, c; BEUTLER et al., 1994), georeferenziert und in digitaler Form als separate GIS-Shape-Dateien in das System eingepflegt. Alternativ wurden die Parameter aus bereits digital verfügbaren Datenbeständen ausgelesen (z. B. BALDSCHUHN et al., 2001; SCHULZ et al., 2007; DOORNENBAL & STEVENSON, 2010), entsprechend modifiziert und kompiliert.

Die Abbildung der Temperatur erfolgte als Isoliniendarstellung, wobei die sich ergebenden Flächen mit dem jeweils entsprechenden Wertebereich attribuiert wurden. Zur besseren Übersicht erfolgte eine Kategorisierung in die Klassen 40 bis 60 °C (Mitteltiefe Geothermie) bzw. 60 bis 100 °C; ab 100 °C wurde die Einteilung in 30 °C Schritten fortgeführt.

Für Gebiete, die ein petrothermisches Potenzial beinhalten, wurden Horizonte mit Temperaturen oberhalb 100 °C berücksichtigt. Bereiche, in denen ab 3.000 m Tiefe kristalline Gesteine vorliegen, die bei einem angenommenen durchschnittlichen geothermischen Gradienten (ca. 3 K/100 m) mindestens 100 °C erreichen, wurden ebenfalls berücksichtigt.

Die Temperaturermittlung erfolgte für einige Gebiete (hauptsächlich Ostdeutschland) auf Basis der Temperaturkarte 1.500 m u. Gelände unter Zuhilfenahme verfügbarer Temperaturdaten aus Bohrungen, lithologischer Profile und reflexionsseismischen Kartenmaterials (DIENER et al., 1884; DIENER et al., 1989). Für weitere Gebiete (hauptsächlich Nordwestdeutschland) wurde die Temperatur unter Verwendung des am LIAG entwickelten Fachinformationssystem (FIS) Geophysik (KÜHNE et al., 2003; KÜHNE & GORLING, 2009) bestimmt. Anschließend fand eine Interpolation der Daten auf die Horizonttiefe statt.

Weitere Temperaturangaben wurden durch eine Projektion der Temperatur auf die interpolierte Horizontoberfläche (minimal erreichbare Temperatur) oder Horizontbasis (maximal erreichbare Temperatur) unter Verwendung des im Geothermischen Informationssystem für Deutschland (GeotIS) erstellten 3D-Temperaturmodells (AGEMAR et al., 2012) ermittelt. Dazu war eine vorhergehende Modifizierung der Eingangsdatensätze für den Import in das Programm GOCAD (MALLET, 1992) nötig, in dem auch die anschließende Interpolation der Daten erfolgte.

Bei der Aufnahme der Mächtigkeiten wurden gegebenenfalls mehrere Sandsteinhorizonte zusammengefasst, z. T. auch als stratigraphieübergreifende Aquiferkomplexe, wobei die Mächtigkeit als Nettomächtigkeit angegeben wurde.

Aquifere oder Horizonte, die eine Mächtigkeit von weniger als 20 m und Temperaturen unterhalb 40 °C aufwiesen, wurden bei der Untersuchung der Verbreitungsgebiete zwar ermittelt und erfasst, fanden jedoch keinen Eingang in die abschließende Kartendarstellung. Die Abbildung 2.2 gibt einen schematischen Überblick über die angewendete Methodik. Nach Auskartierung der Mächtigkeits- und Temperaturwerte erfolgte der Verschnitt dieser zunächst getrennt voneinander aufgenommenen Informationen, was zu den resultierenden geothermischen Potenzialgebieten führte. Je nach den vorliegenden geologischen Gegebenheiten ist eine mehr oder weniger starke Reduzierung der untersuchten Gebiete zu verzeichnen (Abb. 2.3).

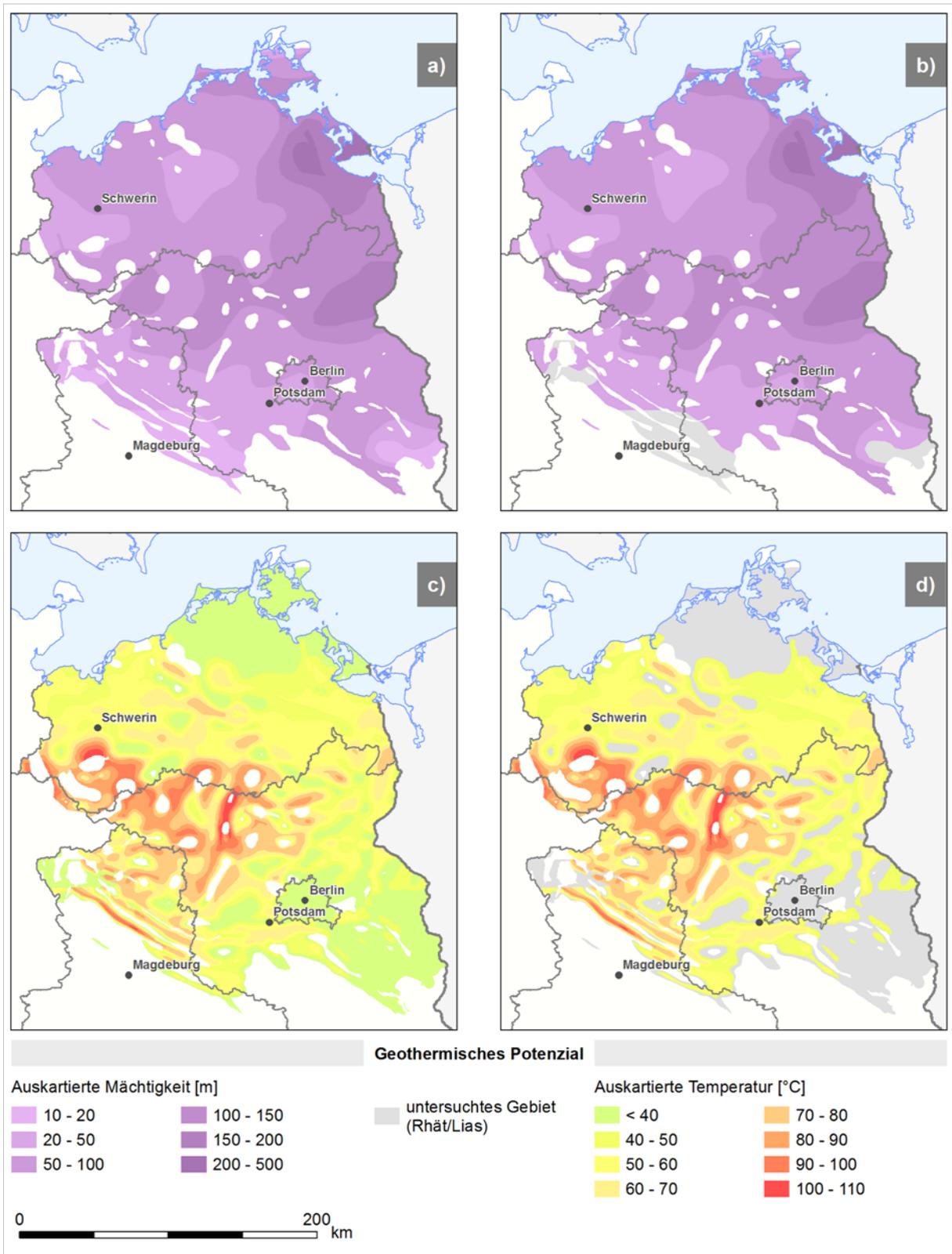


Abb. 2.2: Methodische Vorgehensweise bei der Aufnahme der Potenzialgebiete am Beispiel des Rhät-Lias-Aquiferkomplexes. a) Auskartierung der Mächtigkeit der Abfolge. b) Bereiche < 20 m Mächtigkeit werden nicht einbezogen. c) Auskartierung der Temperatur an der Basis der Abfolge. d) Bereiche mit einer Temperatur < 40 °C werden nicht einbezogen.

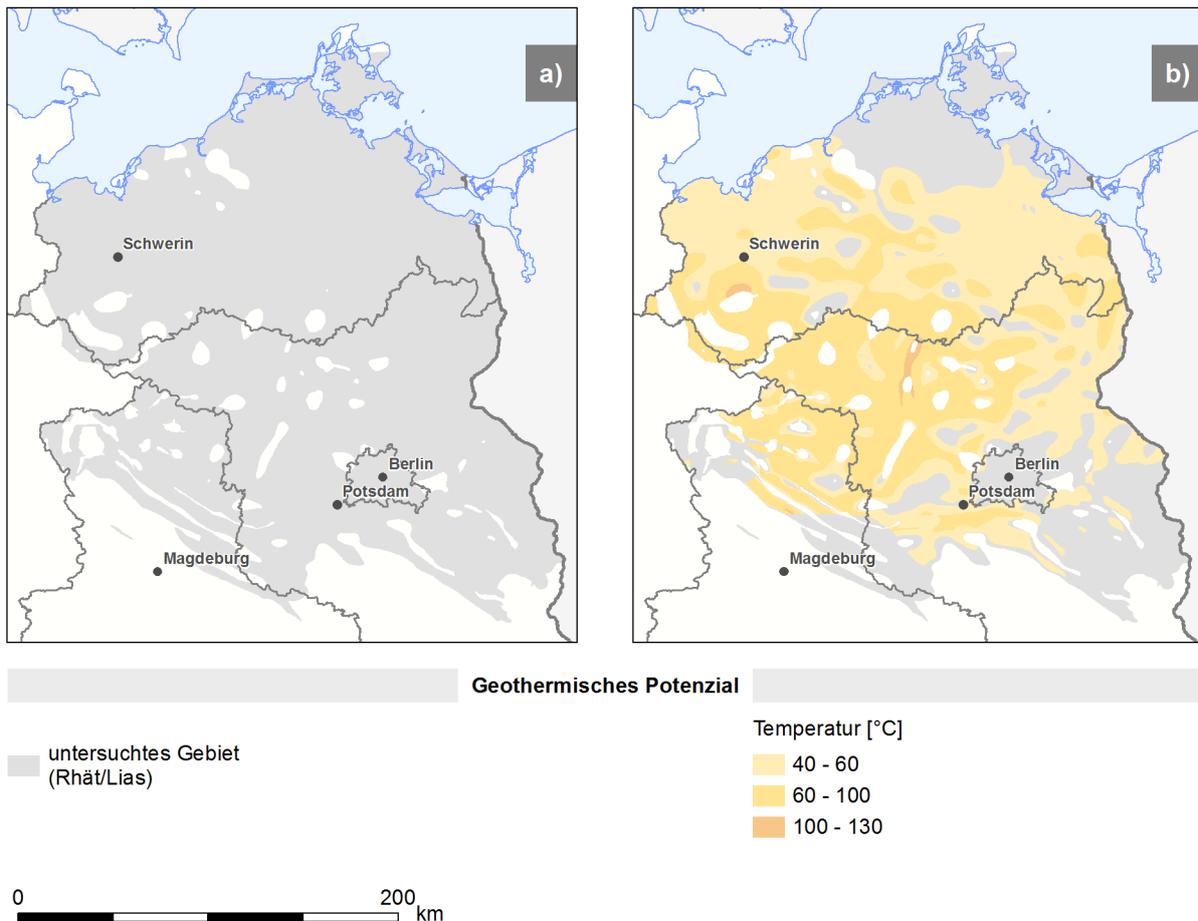


Abb. 2.3: Flächenminderung nach Anwendung der Kriterien am Beispiel des Rhät-Lias-Aquiferkomplexes. a) Untersuchte Fläche. b) Resultierendes geothermisches Potenzialgebiet mit Einteilung in Temperaturkategorien.

Bereiche unterhalb von 7.000 m wurden nicht untersucht, da wegen der hohen Bohrkosten eine wirtschaftliche Gewinnung von geothermischer Energie derzeit nicht möglich erscheint.

Soweit vorhanden, wurden Informationen zur Porosität und Permeabilität bei der Ermittlung der Potenzialgebiete einiger Regionen bereits berücksichtigt. Aufgrund der heterogenen Datenlage und der regional und faziell stark schwankenden Werte konnten diese Kenngrößen jedoch nicht detailliert und flächendeckend dargestellt werden. Generell ist jedoch mit zunehmender Tiefe eine Abnahme der Porositäten und Permeabilitäten zu erwarten.

Nach Abgrenzung der für eine geothermische Nutzung in Frage kommenden Abfolgen fand für die endgültige Kartendarstellung eine stratigraphieübergreifende Kompilation mit Projektion aller ermittelten Gebiete auf die Oberfläche statt. Die Temperaturinformationen wurden dabei so abgebildet, dass eine Projektion der erreichbaren Temperatur an einer Lokalität unabhängig vom jeweilig betrachteten Aquifer oder Horizont auf die Erdoberfläche erfolgte.

Zur besseren Übersicht wurden die Temperaturinformationen abschließend zu Temperaturintervallen zusammengefasst (Abb. 2.4, s. Kap. 5.1).

Eine kompilierte Darstellungsweise mit Projektion aller ermittelten Einheiten auf die Oberfläche wurde als notwendig erachtet, da eine konkurrierende Nutzung nicht nur bezüglich eines konkreten Zielhorizontes, sondern auch an Standorten mit unterschiedlichen Nutzungsoptionen für verschiedene Zielhorizonte bestehen kann.

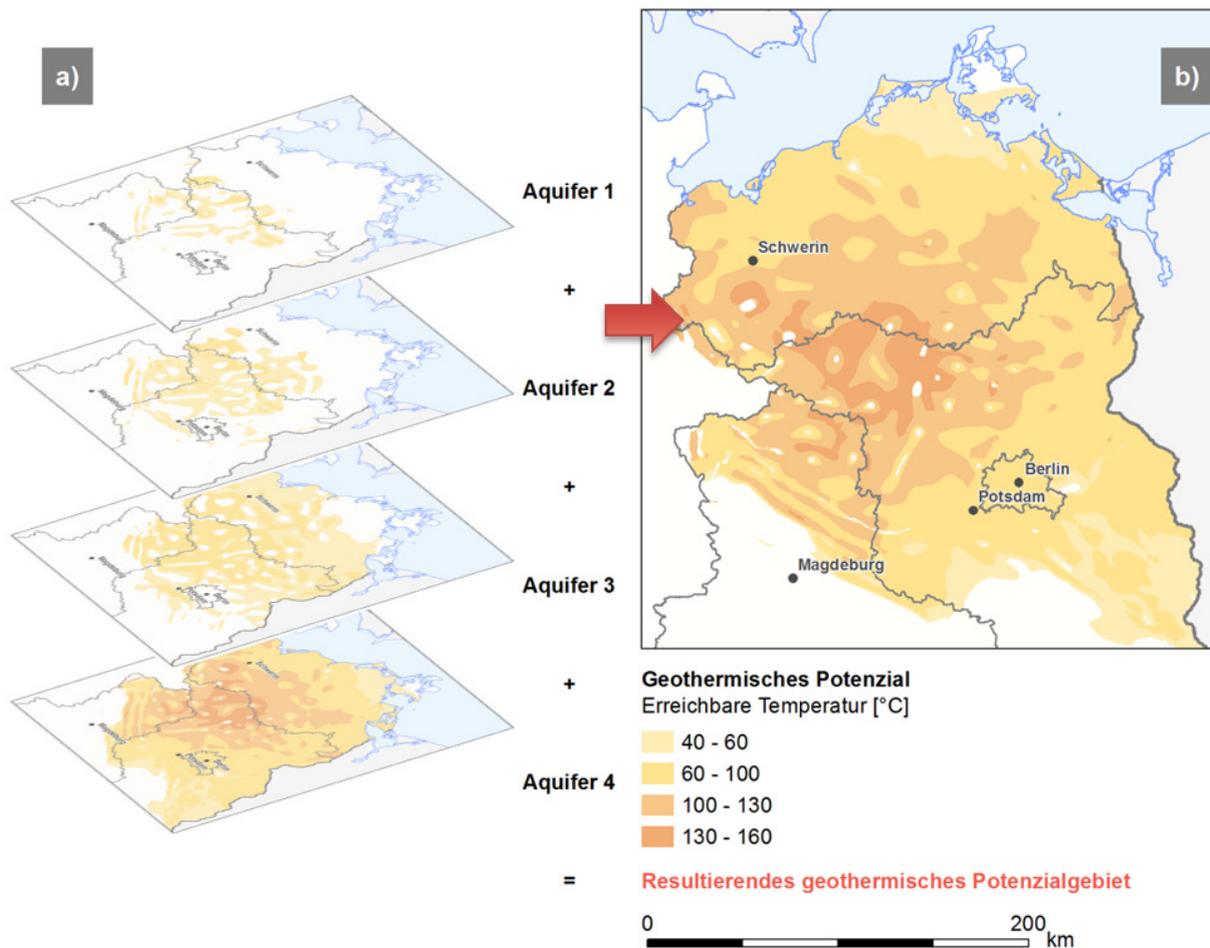


Abb. 2.4: Projektion der erreichbaren Temperatur auf die Oberfläche (Modellbeispiel). a) Separate Ausweisung der Temperatur aller relevanten Horizonte einer Lokalität. b) Kompilation und Projektion der maximal ermittelten Temperaturwerte auf die Erdoberfläche in der abschließenden Kartendarstellung.

2.3 Nachgewiesenes hydrothermisches Potenzial

Die Hauptverbreitungsgebiete mit nachgewiesenem hydrothermischem Potenzial sind das Norddeutsche Becken, der Oberrheingraben und das Süddeutsche Molassebecken (siehe auch Abb. 2.6a). Für die meisten Gebiete liegen Ressourcenabschätzungen (z. B. HAENEL & STAROSTE, 1988; HAENEL & HURTER, 2002) oder Potenzialkarten (KATZUNG, 1984; DIENER et al., 1984 ff; WORMBS et al., 1988 ff) vor. Zusätzlich konnten weitere Gebiete bearbeitet und bewertet werden.

Für die Erstellung der Verbreitungskarten von Aquifern in Norddeutschland sowie im Oberrheingraben konnten bereits erfasste oder veröffentlichte Daten oder Daten aus dem Geothermischen Informationssystem (GeotIS) (SCHULZ, 2009) übernommen werden. Sie reichen stratigraphisch vom Mittleren Buntsandstein bis zur Unterkreide.

Zur Darstellung der Potenziale im Süddeutschen Molassebecken konnte auf die in GeotIS vorhandenen Daten des Malm-Aquifers zurückgegriffen werden. Weitere Aquifere mit nachgewiesenem hydrothermischem Potenzial, die stratigraphisch die Einheiten von Muschelkalk bis Tertiär abdecken, wurden dem Bayerischen Geothermie-Atlas (BSTWIVT, 2010) entnommen.

Bekannte geothermisch nutzbare Horizonte befinden sich auch im nördlichen Oberrheingraben; hier erfolgte ein Abgleich sowie die Kompilation analoger und digitaler Daten. Es gingen Aquifere in die Darstellung ein, die stratigraphisch vom Buntsandstein bis in das Tertiär reichen.

Darüber hinaus bekannte Gebiete in Schleswig-Holstein, Hessen und Thüringen, die den Zeitabschnitt Rotliegend bis Tertiär umfassen, wurden anhand verschiedener Veröffentlichungen und Unterlagen der Staatlichen Geologischen Dienste aufgenommen (HAENEL & STAROSTE, 1988; LGRB, 2005; THOMSEN, 2011; HLUG, 2012; TLUG, 2012).

Neben den Regionen, die für die Tiefe Geothermie geeignet sind, rücken zunehmend Horizonte in geringeren Tiefen und mit geringeren Temperaturen (40–60 °C) in den Vordergrund, die permeable Sedimentgesteine aufweisen und ebenfalls geothermisch genutzt werden können (Mitteltiefe Geothermie). Die für diese Art der Nutzung in Frage kommenden Bereiche sind ebenfalls in die Darstellung aufgenommen worden. Geeignet erscheinende tertiäre Ablagerungen innerhalb des Norddeutschen Beckens wurden hinsichtlich ihrer thermischen Eigenschaften geprüft, konnten jedoch nicht die nötigen Kriterien erfüllen, um in die endgültige Kartendarstellung einzugehen. Neben den bereits untersuchten Gebieten sind Beckenstrukturen, über deren geothermische Eigenschaften sehr wenig bekannt ist, wie z. B. die Niederrheinische Bucht oder das Münsterländer Kreidebecken, hinsichtlich ihres Nutzungspotenzials genauer bewertet und geeignete Bereiche in ihrer räumlichen Verbreitung in die Darstellung des nachgewiesenen hydrothermischen Potenzials aufgenommen worden.

Die Auflistung der bearbeiteten Einheiten erfolgt entsprechend ihrer stratigraphischen Position von jung nach alt sowie nach Regionen unterteilt (vgl. Tab. 5.1).

2.3.1 Nordwestdeutschland

In diesem Abschnitt werden geothermisch relevante Aquifere beschrieben, die sich im westlichen Teil des Norddeutschen Beckens befinden und damit die Landesgebiete von Schleswig-Holstein, Hamburg, Niedersachsen und Bremen abdecken. Darüber hinaus wurden mit der Niederrheinischen Bucht und dem Münsterländer Kreidebecken auch mögliche Potenzialgebiete innerhalb Nordrhein-Westfalens aufgenommen.

2.3.1.1 Grafenberg-Schichten, Niederrheinische Bucht (Oligozän)

Innerhalb der Niederrheinischen Bucht lässt sich eine Verzahnung von marinen, überwiegend feinsandigen Schelfsedimenten im Nordwesten und vereinzelt Flözbildungen eines Küstentieflandes im Südosten feststellen (NICKEL, 2003). In Aufschlüssen am Westrand der Niederrheinischen Bucht beschreibt SCHENK (1998) die Walsum-Schichten als homogene, aufgrund starker Bioturbation strukturlose und gut sortierte Feinsande mit Schluff- und Tonanteilen; bei den darüber folgenden Lintfort-Schichten handelt es sich um eine distale Fazies mit tonig-siltigen Schelfsedimenten. Auf der Krefeld-Scholle in der nördlichen Niederrheinischen Bucht besteht das Chatt aus an der Basis glaukonithaltigen, sandigen Grafenberg-Schichten, die relativ gleichkörnig bleiben. In den Köln-Schichten der südlichen Teilschollen sind die Sedimentmächtigkeiten und die küstennahen Einflüsse größer (NICKEL, 2003). Das Verbreitungsgebiet der Grafenberger bzw. Meiersberger Feinsande markiert im Niederrheinischen Land die weiteste Meeresausbreitung im Tertiär. Es handelt sich um gleichkörnige, schluffige, glaukonitführende Feinsande von weißer bis gelboranger Farbe (KLÜNKER, 1997).

Zur Ermittlung und Darstellung der Temperaturverteilung für die Grafenberg-Schichten fand in Anlehnung an HAENEL & HURTER (2002) die Topfläche des Aquifers Verwendung (minimal zu erreichende Temperatur). Die Mächtigkeit der Grafenberg-Schichten wurde ebenfalls nach Angaben von HAENEL & HURTER (2002) dargestellt.

Neben der gesonderten Aufnahme der Grafenberg-Schichten wurde zusätzlich eine Temperaturprojektion auf die Basis des Tertiär der gesamten Niederrheinischen Bucht anhand der Darstellung der Tiefenlinien aus HAGER & PRÜFERT (1988) durchgeführt (maximal prognostizierte Temperatur).

Aufgrund der Randstaffeln der Niederrheinischen Bucht nimmt die Mächtigkeit der als Grafenberg-Schichten zusammengefassten Sedimente von Westen nach Osten stufenförmig ab (KLÜNKER, 1997). Die Abschätzung der Mächtigkeit des Oligozän für die Niederrheinische Bucht erfolgte anhand der Profildarstellung in KOENIGSWALD (1994) und ist als ausreichend zu bezeichnen. Für diese Schichten wurde deshalb nach Anlegen des Temperaturkriteriums das gesamte Verbreitungsgebiet der oligozänen Ablagerungen in die Darstellung aufgenommen, ohne eine detaillierte Aufgliederung nach der Mächtigkeit vorzunehmen.

2.3.1.2 Kalksandstein, Grünsandgruppe (Mitteloligozän – Eozän)

Mitteloligozäne bis eozäne Kalksandstein-Ablagerungen im nördlichen Niedersachsen (HINSCH, 1974; GTN, 2004) konnten für die Aufnahme in die Kartendarstellung nicht berücksichtigt werden. Dies ist auch für die Grünsandgruppe der Glinde-Formation (HINSCH, 1986) in Schleswig-Holstein der Fall. Obwohl die Temperaturprojektion auf die Basis des Mitteleozän bis Unteroligozän vorgenommen wurde (maxi-

mal prognostizierte Temperatur), konnte das Mindestkriterium von 40 °C an keiner Stelle erreicht werden.

2.3.1.3 Münsterländer Kreidebecken (Cenoman – Turon)

Nach MICHEL & STRUCKMEIER (1985) handelt es sich bei dem kretazischen Aquifer um einen rissigen, geklüfteten Kalkstein mit Sandsteineinschaltungen, wobei sich der Randbereich und das Zentrum im Salzgehalt des Formationswassers unterscheiden; zum Beckeninneren und mit zunehmender Tiefe steigt dieser an. Zur Ermittlung und Darstellung der Temperaturverteilung für diese Abfolge fand die Basis der Oberkreide Verwendung (maximal zu erreichende Temperatur), wobei die Angabe der Lage und Tiefe der Isobathen aus BALDSCHUHN et al. (2001) stammt. Die Mächtigkeit des Aquifers wurde anhand geologischer Profile (DROZDZEWSKI, 1995) abgeschätzt und als ausreichend im Sinn der Abgrenzungskriterien gewertet. Gemäß MICHEL & STRUCKMEIER (1985) beträgt die Mächtigkeit bis zu 400 m, so dass für diesen Aquifer nach Anwendung des Temperaturkriteriums das gesamte Verbreitungsgebiet in die Darstellung aufgenommen wurde, ohne eine gesonderte Ausweisung der Mächtigkeiten zu treffen.

2.3.1.4 Valangin-Sandstein (Unterkreide)

Die Ausbildung der Wealden- und Valangin-Sandsteine im zentralen Niedersachsen ist in den meisten Fällen identisch (s. Kap. 2.3.1.6) (BEUTLER et al, 1994). Zur Projektion der Temperatur wurde die Basis der marinen Unterkreide genutzt (maximal zu erreichende Temperatur), wobei die Angaben von BEUTLER et al. (1994) zur Lage und Tiefe der Isobathen Verwendung fanden. Daten zur Mächtigkeit der Einheit wurden aus BEUTLER et al. (1994) abgeleitet und zusammen mit der Abfolge der Wealden-Sandsteine in einer einzigen Nettomächtigkeitskarte als Aquiferkomplex dargestellt, der bei einer Mächtigkeit > 30 m ansetzt. Ein weiteres, westlicher gelegenes Verbreitungsgebiet des Valangin-Sandsteins wurde nach Angaben von HAENEL & STAROSTE (1988) aufgenommen. Die hier dargestellte Temperaturverteilung bezieht sich auf die Topfläche des Aquifers (minimal zu erreichende Temperatur). Es handelt sich bei der genannten Mächtigkeit um eine Nettomächtigkeit, die 70 bis 100 % der Gesamtmächtigkeit repräsentiert (HAENEL & STAROSTE, 1988).

2.3.1.5 Bentheimer Sandstein (Unterkreide)

Der Bentheimer Sandstein ist ein brauner bis roter fein- bis mittelkörniger Quarzsandstein, dessen Kornbindung weitgehend durch Kornverwachsung bewirkt wird. Gelegentlich tritt auch überwiegend dolomitisierter Kalk als Bindemittel auf (KEMPER, 1976). Zur Darstellung der Temperaturverteilung nach HAENEL & STAROSTE (1988) wurde die Topfläche des Aquifers herangezogen (minimal zu erreichende Temperatur). Auch für diese Einheit wird die in HAENEL & STAROSTE (1988) genannte Mächtigkeit als Nettomächtigkeit angegeben, die 70 bis 100 % der Gesamtmächtigkeit ausmacht.

2.3.1.6 Wealden-Sandstein (Unterkreide)

Stratigraphisch muss der „deutsche Wealden“ vom Wealden an seiner Typuslokalität in England unterschieden werden, daher ist die traditionsbedingt mit „Wealden“ bezeichnete Einheit dem stratigraphischen Begriff „Bückeberg-Formation“ zuzuordnen. Bei den Sandsteinen handelt es sich nach SCHULZ & RÖHLING (2000) um fluviatile Ablagerungen eines verflochtenen Fluss-Systems mit einem sehr heterogenen Faziesgefüge. Sie bestehen vorwiegend aus einem Wechsel von Feinsanden und Schluffen mit tonigen Lagen. Partienweise können sie konglomeratisch ausgebildet

sein. Es dominieren bei den Sandsteinen die fein- bis mittelkörnigen Varietäten mit typischer Flaserschichtung. Die Tonsteine des Wealden sind überwiegend mittel- bis dunkelgrau. Nach Westen stellen sich häufiger grünlichgraue Tonsteine und einzelne Karbonathorizonte ein. Die Korngröße innerhalb der einzelnen Sequenzen nimmt vom Liegenden zu Hangenden ab (BEUTLER et al, 1994).

Im Raum Bremen erfolgte die Temperaturprojektion innerhalb des perspektiven Gebietes auf die Basis der sandigen Unterkreide (maximal prognostizierte Temperatur), wobei Angaben aus GTN (2004) zu dessen Verbreitung sowie zur Lage und Tiefe der Isobathen verwendet wurden. Das Mächtigkeitskriterium kam in dieser Region aufgrund fehlender Daten nicht zur Anwendung. Je nach Position zu den halokinetischen Strukturen wechseln die Mächtigkeiten stark, wobei primäre Mächtigkeitsschwankungen durch Randsenkenbildungen wahrscheinlich sind (GTN, 2004). Nach RÖHLING & FRITZ (2000) sind im Gebiet Bremerhaven keine sandigen Unterkreide-Horizonte vorhanden.

In Zentralniedersachsen erfolgte die Temperaturprojektion auf die Basis des Wealden (maximal zu erreichende Temperatur), wobei Angaben zur Lage und Tiefe der Isobathen von BEUTLER et al. (1994) genutzt wurden. Informationen über die Mächtigkeit der Abfolge konnten ebenfalls aus BEUTLER et al. (1994) entnommen und zusammen mit der Einheit des transgredierenden Valangin in einer einzigen Nettomächtigkeitkarte als Komplex dargestellt werden, der bei einer Mächtigkeit > 30 m ansetzt.

Die für mitteltiefe geothermische Anwendungen in Fragen kommenden Bereiche der Sandsteine des Wealden und der marinen Unterkreide des westlichen Teils des Norddeutschen Beckens, deren Verbreitungsgebiete aus BALDSCHUHN et al. (2001) abgeleitet wurden, fanden ebenfalls eine Aufnahme in die Kartendarstellung. Über der nach HOTH et al. (1997) zunächst landfesten Unterlage des brackisch bis limnisch ausgebildeten Wealden entwickelte sich ein marines Milieu, in dem regional geringmächtiger Sandstein von Tonsteinen und Tonmergelsteinen der Unterkreide überlagert wurde (SCHÜTTE, 2005). Die Temperaturprojektion erfolgte auf die Basis des Oberen Jura/Wealden bzw. der Basis der Marinen Unterkreide (maximal zu erreichende Temperatur) nach Angaben von BALDSCHUHN et al. (2001). Nur der für die Ausweisung des Potenzials relevante Temperaturbereich von 40 bis 60 °C (Mitteltiefe Geothermie) ging in die Kartendarstellung ein, wobei die für die beiden stratigraphischen Einheiten zunächst getrennt ermittelten Flächen zusammengefasst wurden.

Eine weitere Charakterisierung und Untergliederung der Aquifere bezüglich ihrer Fazies oder Mächtigkeit wurde bei der Ausweisung der Gebiete nicht getroffen.

2.3.1.7 Dogger (Mitteljura)

Charakteristisch für den Dogger in Schleswig-Holstein ist die Einschaltung zahlreicher Sandschüttungen mit unterschiedlichen Mächtigkeiten und Korngrößen. Dogger-Sande können in den stratigraphischen Einheiten des Dogger beta bis epsilon angetroffen werden. Es handelt sich überwiegend um mürbe, mittel bis gut poröse Sandsteine (LANU, 2004). Für die Kartenaufnahme dieses Aquifers wurde die gesamte Abfolge betrachtet. Zur Projektion der Temperatur fand die Dogger-Basis Verwendung (maximal zu erreichende Temperatur). Die Angabe der Lage und Tiefe der Isobathen stammt aus BALDSCHUHN et al. (2001). Die Darstellung der Dogger-Ablagerungen fand ohne Anwendung des Mächtigkeitskriteriums statt. Nach LANU (2004) werden generell Mächtigkeiten zwischen 20 und 70 m angetroffen, wobei die

Dogger beta Sandsteine selten Mächtigkeiten über 20 m aufweisen, die Dogger gamma Sandsteine dagegen Mächtigkeiten bis zu 100 m erreichen können.

In Niedersachsen ist der Dogger gamma in toniger Fazies ausgebildet (HOFFMANN, 1952) und deshalb für eine hydrogeothermische Nutzung nicht geeignet.

2.3.1.8 Mittelrhät-Sandstein (Keuper)

Durch einen hohen Quarzanteil und geringe Feldspatanteile können die grauen bis braungrauen Sandsteine des Mittelrhät als reife Quarzsandsteine angesprochen werden (BEUTLER et al., 1994). Die Temperaturprojektion erfolgte auf die Lias-Basis (minimal zu erreichende Temperatur). Zur Lage und Tiefe der Isobathen fanden Daten von BALDSCHUHN et al. (2001) Verwendung. Angaben zur Mächtigkeit des Aquifers stammen aus BEUTLER et al. (1994). Im Wesentlichen wurde hier der Contorta-Sandstein unter Berücksichtigung der Nettomächtigkeit dargestellt.

2.3.1.9 Unterrhät-Sandstein (Keuper)

Durch einen höheren Chloritgehalt im Gegensatz zum Mittelrhät-Sandstein sind diese reifen Quarzsandsteine teilweise grün gefärbt (BEUTLER et al., 1994). Die Temperaturprojektion wurde auf die Basis des Mittelrhät vorgenommen (minimal zu erreichende Temperatur). Verwendung fanden hierbei die Angaben von BEUTLER et al. (1994) zur Lage und Tiefe der Isobathen. Daten zur Darstellung der Mächtigkeit des Aquifers konnten aus BEUTLER et al. (1994) entnommen werden, wobei hauptsächlich der Postera-Sandstein unter Berücksichtigung der Nettomächtigkeit abgebildet wurde.

2.3.1.10 Dötlingen- und Salzwedel-Sandstein (Mittlerer Buntsandstein)

Der Dötlingen-Sandstein bildet in weiten Teilen seines Verbreitungsgebietes einen kompakten, massigen, tonfreien Sandstein. Der Salzwedel-Sandstein liegt nur im äußersten Osten des Verbreitungsgebietes als geschlossene Sandsteinbank vor. Nach Westen löst sich das Sandsteinpaket in eine Wechsellagerung von Sandsteinbänken mit eingeschalteten Ton- und Schluffsteinhorizonten auf (BEUTLER et al., 1994). Die Temperaturprojektion erfolgte auf die Röt-Basis (minimal prognostizierte Temperatur), wobei Angaben zur Lage und Tiefe der Isobathen von BEUTLER et al. (1994) Verwendung fanden. Informationen über die Mächtigkeit des Aquifers wurden aus BEUTLER et al. (1994) gewonnen; die Bruttomächtigkeit des Dötlingen-Sandsteins entspricht größtenteils seiner Nettomächtigkeit, wogegen sich die Nettomächtigkeit des Salzwedel-Sandsteins aus mehreren Sandsteinbänken unterschiedlicher stratigraphischer Niveaus zusammensetzt.

2.3.1.11 Volpriehausen-Sandstein (Mittlerer Buntsandstein)

Nach MÜLLER & REINHOLD (2011a) ist der Volpriehausen-Sandstein ein kompakter Sandstein, wobei in zentralen Beckenbereichen eine Vertonung zu beobachten ist - in der betreffenden Region kommt der Volpriehausen-Sandstein vereinzelt als Schluffstein, überwiegend jedoch als Feinst- bis Feinsandstein und Mittelsandstein vor. Für die Temperaturprojektion wurde die Basis des Unteren bis Mittleren Buntsandstein verwendet (maximal prognostizierte Temperatur), wobei Angaben von BALDSCHUHN et al. (2001) zur Lage und Tiefe der Isobathen als Grundlage dienten.

In Anlehnung an THOMSEN (2011) fand unter Berücksichtigung des Mächtigkeitskriteriums die Verbreitung von Quickborn- und Volpriehausen-Sandstein in Schleswig-Holstein Eingang in die abschließende Kartendarstellung.

2.3.1.12 Quickborn-Sandstein (Mittlerer Buntsandstein)

Bei dem Quickborn-Sandstein handelt es sich um einen meist fein- bis mittelkörnigen Sandstein, der Zementationen von Kalk, Dolomit oder Anhydrit aufweisen kann (LANU, 2004). Nach BEUTLER et al. (1994) ist er als kompakter Sandstein ausgebildet, der nur relativ wenige, geringmächtige Ton- und Schluffsteineinschaltungen beinhaltet. Die Temperaturprojektion erfolgte auf die Basis des Unteren bis Mittleren Buntsandstein (maximal zu erreichende Temperatur). Aus BALDSCHUHN et al. (2001) wurden hierfür Angaben zur Lage und Tiefe der Isobathen abgeleitet. Unterhalb 5.000 m Tiefe zeigt das für die Temperaturprojektion verwendete 3D-Temperaturmodell keine Werte mehr an. Die 160 °C Isotherme wurde deshalb auf Basis der 4.800 m Tiefenlinie und tiefer liegender Isobathen interpoliert und ergänzt.

Im Bereich des Glückstadtgrabens, der sich im zentralen Teil Schleswig-Holsteins befindet, ist dieser Sandstein bis in Tiefen von 10.000 m abgesenkt worden (LANU, 2004). Schichten unterhalb 7.000 m wurden nicht mehr in die Kartendarstellung einbezogen.

Angaben zur Mächtigkeit und der Verbreitung des Aquifers stammen aus BEUTLER et al. (1994) und RÖHLING (1999). Die Bruttomächtigkeit entspricht bei diesem Aquifer in etwa der Nettomächtigkeit.

2.3.2 Nordostdeutschland

In diesem Abschnitt werden geothermisch relevante Aquifere beschrieben, die sich im östlichen Teil des Norddeutschen Beckens befinden. Die Landesgebiete von Mecklenburg-Vorpommern, Brandenburg, Sachsen-Anhalt und Sachsen werden hiervon berührt.

2.3.2.1 Unterkreide-Sandsteine (Wealden – Unteralb)

Die Wealdensedimente sind in einer sandig-tonigen Wechselfolge entwickelt. Bei den Sandsteinen handelt es sich um graue und braune Feinsandsteine, die als kompakte Sandsteinpakete vorliegen. Braungraue und grauschwarze Tonsteine unterbrechen die Sandsteinabfolge. Typisch für die Wealdengesteine sind die überall verbreiteten kohligen Pflanzenreste und einige dünne kohlige Lagen. Die dem Valangin zugeordneten Sandsteine sind überwiegend aus bräunlichgrauen und dunkelgrauen Feinsandsteinen mit untergeordnet mittelsandigen Partien aufgebaut. Bei den Gesteinen des Hauterive handelt es sich um mergelig-schluffige Gesteine oder Kalksandsteine (z. B. DIENER et al., 1992b). Nach BRÜCKNER et al. (1990) zeichnet sich die nichtmarine Unterkreide durch einen Wechsel von kalkig-sandigen und mergelig-tonigen Gesteinen aus. Die marine Unterkreide beginnt mit Kalksand- bis Kalksteinen. Im Hangenden treten überwiegend Ton- und Schluffsteine bis Tonmergel und Mergelsteine auf. Für die jüngere marine Unterkreide sind nur vereinzelt geringmächtige, meist vertonte kalkhaltige Sandsteine nachzuweisen.

Die Ermittlung und Darstellung der Temperatur bezieht sich auf die jeweilige Basis des Aquifers (maximal zu erreichende Temperatur). Bei der angegebenen Mächtigkeit handelt es sich um eine kumulierte Mächtigkeit (Nettomächtigkeit), bestehend aus mehreren Sandsteinpaketen. Für Temperatur- und Mächtigkeitsangaben diente als Datengrundlage das GeotIS-Projekt (SCHULZ, 2009) und die hierin verwendeten Quellen.

2.3.2.2 Aalen-Sandstein (Mitteljura)

Das Aalen gliedert sich typischerweise in einen tonig schluffigen Bereich, der dem Unteraalen entspricht, einen überwiegend sandigen Bereich, der tonige Einlagerungen aufweist und als Aalen-Sandstein angesprochen werden kann, sowie einer sandig schluffig tonigen Wechsellagerung, die z. T. Sandsteinbänke beinhaltet und dem Oberaalen zugeordnet werden kann (z. B. WORMBS et al., 1988; DIENER et al., 1989). Zur Ermittlung und Darstellung der Temperatur wurde die Basis des Aquifers bzw. des Mitteljura verwendet (maximal prognostizierte Temperatur). Auch hier dienten das GeotIS-Projekt (SCHULZ, 2009) und die hierin verwendeten Quellen als Datengrundlage. Die Daten zur Mächtigkeit der Abfolge wurden aus dem GeotIS-Projekt (SCHULZ, 2009) und den hierin verwendeten Quellen entnommen, wobei es sich um die Nettomächtigkeit handelt, die sich aus mehreren Sandsteinpaketen zusammensetzt.

2.3.2.3 Rhät-Lias-Aquiferkomplex (Rhätkeuper, Hettang – Domer)

Der Rhätkeuper wird aus weißgrauen, braungrauen oder z. T. schwarzgrauen Fein- bis Mittelsandsteinen gebildet, die teilweise kohlige Schlieren aufweisen und kohlige Pflanzenhäcksel beinhalten. Die Sandsteinpakete des Hettang und Sinemur bestehen aus Fein- und Mittelsandsteinen, die gelegentlich grobsandige bis feinkiesige Horizonte aufweisen. Die Sandsteine des Domer sind als graue bis bräunlichgraue Feinsandsteine ausgebildet (z. B. WORMBS et al., 1989).

Für die Ermittlung und Darstellung der Temperatur wurde die Basis des Unterjura (Lias) bzw. die Basis des Rhät herangezogen (maximal zu erreichende Temperatur). Bei der angegebenen Mächtigkeit handelt es sich um eine kumulierte Mächtigkeit bestehend aus mehreren Sandsteinpaketen. Als Datengrundlage dienten das GeotIS-Projekt (SCHULZ, 2009) und die hierin verwendeten Quellen.

2.3.2.4 Schilfsandstein (Mittlerer Keuper)

Die Sandsteine des Schilfsandstein sind vorwiegend feinkörnig ausgebildet; gelegentlich weisen sie einen mittel- bis grobkörnigen Anteil auf. Häufig sind sie auch siltig-tonig entwickelt und mit kohligen Partikeln durchsetzt. Teilweise enthalten sie feinglimmerige, karbonatische oder vereinzelt anhydritische Bestandteile (DIENER et al., 1990a).

Die Ermittlung und Darstellung der Temperatur bezieht sich auf die Basis des Aquifers (maximal prognostizierte Temperatur), wobei Temperaturdaten aus dem GeotIS-Projekt (SCHULZ, 2009) und den hierin verwendeten Quellen Verwendung fanden. Die Angabe zur Mächtigkeit des Schilfsandstein erfolgte nach HAENEL & HURTER (2002).

2.3.2.5 Detfurth- bis Solling-Sandsteine (Mittlerer Buntsandstein)

Die geothermisch relevanten Folgen des Mittleren Buntsandstein sind in Richtung auf den Beckenrand zunehmend sandig ausgebildet. Sie zeigen eine Wechsellagerung im Meter- bis Zentimeterbereich von Sandstein- und Schluffstein- bzw. Tonsteinhorizonten. Die Sandsteinlagen bestehen überwiegend aus rotbraunen, teilweise auch grüngrauen und grauen Fein- bis Mittelsandsteinen, untergeordnet auch Grobsandsteinen. Häufig treten darin tonige und schluffige Schmitzen auf. In die Hardeggen- und Sollingfolge sind Brekzien und konglomeratische Horizonte eingeschaltet (z. B. WORMBS et al., 1989). Der Detfurth-Sandstein ist überwiegend als gut sortierter, lockerer gepackter Fein- bis Mittelsandstein ausgebildet. Vereinzelt treten Gerölle oder

Gerölllagen auf. Bindemittel und kalzitisches Zementmaterial sind in geringen Anteilen enthalten. Die Sandsteine der Hardegsen-Folge sind aus gut sortierten, mittel-sandigen Feinsandsteinen aufgebaut. Im unteren Teil treten Geröllhorizonte auf. Innerhalb der Sandsteinbänke sind in wechselnder Häufigkeit Tonstein- und Kalkschluffsteinflasern ausgebildet. Die basalen sandigen Bereiche der Solling-Folge sind durch Geröllhorizonte geprägt. Der untere sandige Bereich zeichnet sich durch eine unterschiedliche Schüttung von Fein- bis Grobsand mit Geröllhorizonten sowie durch stärker zementierte Lagen von Kalzit, Dolomit oder Anhydrit aus (z. B. DIENER et al., 1992b).

Die Temperaturprojektion erfolgte auf die Basis des Detfurth-Sandsteins mit Ausnahme des Blattes Wittenberge, auf dem die Basis der Solling-Folge für die Projektion herangezogen wurde (maximal zu erreichende Temperatur). Als Datengrundlage diente das GeotIS-Projekt (SCHULZ, 2009) und die hierin verwendeten Quellen wie z. B. BRANDES & OBST (2009). Angaben zur Mächtigkeit des Mittleren Buntsandstein wurden aus HAENEL & HURTER (2002) entnommen.

2.3.3 Hessen und nördlicher Oberrheingraben

Dieser Abschnitt umfasst geothermisch relevante Aquifere innerhalb des Landesgebietes von Hessen sowie des nördlichen Oberrheingrabens, womit Landesteile von Rheinland-Pfalz und Baden-Württemberg ebenfalls Berücksichtigung finden.

2.3.3.1 Hydrobien-Schichten (Miozän)

Bei den Hydrobien-Schichten dominieren bituminöse, mergelige Tonsteine, Tonmergelsteine und vermehrt dolomitische Kalksteinlagen, in die sich Feinsandlinsen und dünne Braunkohlenlagen sowie kiesige Grobsandlagen einschalten (KÖTT, 2008).

Die Darstellung der Temperaturverteilung für die Hydrobien-Schichten erfolgte nach Angaben von HAENEL & HURTER (2002), unter Verwendung der Topfläche des Aquifers (minimal zu erreichende Temperatur). Informationen über die Mächtigkeit der Hydrobien-Schichten wurden aus HAENEL & HURTER (2002) gewonnen.

2.3.3.2 Rotliegend (Perm)

Mächtige Konglomerate verzahnen sich mit Grob-, Mittel- und Feinsandsteinen einer Schutt- und Schwemmfächerfazies, die wiederum in Richtung Zentrum des Sedimentationsgebietes von Silt- bis Tonsteinen einer Playa-Fazies abgelöst werden. Die grobklastischen Sedimente besitzen häufig eine tonige, kiesige oder karbonatische Matrix (MOTZKA & LAEMMLEN, 1967; MOTZKA, 1968; KÖTT & KRACHT, 2011). 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 (KÖTT, 2008).

Für das Rotliegend im nördlichen Oberrheingraben erfolgten die Darstellung der Temperaturverteilung bezogen auf die Topfläche des Aquifers (minimal zu erreichende Temperatur) sowie die Angaben zur Mächtigkeit nach HAENEL & HURTER (2002). Darüber hinaus erfolgte für das gesamte Landesgebiet von Hessen eine Temperaturprojektion auf die Topfläche des Rotliegend (minimal zu erreichende Temperatur). Das Verbreitungsgebiet dieser Einheit sowie Angaben über Lage und Tiefe der Isobathen wurden dabei aus Veröffentlichungen des HLUG (2012) abgeleitet. Die Abschätzung der Mächtigkeit des Rotliegend fand anhand von Veröffentli-

chungen des HLUG (2012) statt und wurde im betreffenden Temperaturintervall als ausreichend im Sinn der Abgrenzungskriterien gewertet.

2.3.4 Thüringer und Fränkisches Becken

Innerhalb dieses Abschnittes werden geothermisch relevante Aquifere innerhalb des Landesgebietes von Thüringen beschrieben. Soweit nicht anders belegt wurden Angaben zur Fazies, Verbreitung, Temperatur und Mächtigkeit der Einheiten innerhalb des Thüringer und Fränkischen Beckens aus TLUG (2012) entnommen.

2.3.4.1 Unterer und Mittlerer Buntsandstein (Untere Trias)

Der Buntsandstein ist durch sandig-tonige, vorwiegend fluviatile Sedimente gekennzeichnet. Im Unteren Buntsandstein dominieren feinkörnige bis mittelkörnige, z. T. siltig-tonige Sandsteine, im Mittleren Buntsandstein dagegen Mittel- und Grobsandsteine. Potenziell geothermisch nutzbare Horizonte sind insbesondere die mehrere Zehnermeter mächtigen Sandsteine der Volpriehausen- und Solling-Folge, jedoch ist davon auszugehen, dass alle Sandsteinhorizonte im Unteren und Mittleren Buntsandstein mehr oder weniger hydraulisch verbunden sind. Die Nutzung wird durch die geringe Temperatur von meist nur 20 bis 30 °C begrenzt.

2.3.4.2 Leine-Karbonat (Zechstein)

Das Leine-Karbonat erreicht nur in einem wenige 10er km breiten Geländestreifen, der vom Werra-Gebiet durch das südöstliche Thüringer Becken über Arnstadt und Weimar nach Bad Sulza reicht, Mächtigkeiten von z. T. über 20 m. Vor allem im Bereich des Mächtigkeitsmaximums treten stark poröse und klüftige, bis 7 m mächtige Dolomite auf. Im Leine-Karbonat liegen die zu erwartenden Temperaturen in den meisten Gebieten jedoch maximal bei 35 °C; lediglich in Südthüringen werden lokal bis 60 °C erreicht.

2.3.4.3 Staßfurt-Karbonat/Hauptdolomit (Zechstein)

Das Staßfurt-Karbonat besteht aus faziell stark differenzierten, z. T. porösen Dolomitsteinen (HUCKRIEDE & ZANDER, 2011). Gebiete, die für eine hydrogeothermale Nutzung ausreichende Porosität und Permeabilität aufweisen, sind hauptsächlich in der Region Gotha-Mühlhausen zu finden. Hier ist das Staßfurt-Karbonat in Randwall-Fazies der vorwiegend dolomitischen Gesteine ausgebildet. Die zu erwartenden Temperaturen erreichen bis zu 45 °C.

2.3.4.4 Werra-Karbonat (Zechstein)

Die geringmächtigen Ablagerungen des Werra-Karbonats sind lokal am ehemaligen Beckenrand aus bis zu etwa 100 m mächtigen Riffen und Riffsedimenten aufgebaut, die erhöhte Porosität und Permeabilität aufweisen können. Im Thüringer Becken werden Temperaturen bis zu 40 °C erreicht; kleinräumig können in Südthüringen die Temperaturen auf bis zu 70 °C steigen.

2.3.4.5 Oberkarbon bis Rotliegend (Permokarbon)

Die Sedimente des Oberkarbon und Rotliegend bestehen überwiegend aus roten bis rotbraunen Konglomeraten, Tuffiten sowie Sand- und Siltsteinen, die meist alluvial oder fluviatil entstanden sind. Vor allem im Oberkarbon kommen auch untergeordnet graue, z. T. limnische Sedimente vor (HUCKRIEDE & ZANDER, 2011).

Gesteine, die für eine geothermische Nutzung in Frage kommen, sind nach Untersuchungen des TLUG (2012) auf das Mühlhäuser Rotliegendbecken und den Saale-Trog beschränkt.

Im Mühlhäuser Rotliegendbecken ist eine bis zu 230 m mächtige Abfolge gut sortierter fein- bis mittelkörniger Sandsteine verbreitet. Auch im Saale-Trog ist eine mehrere hundert Meter mächtige Schichtenfolge des Oberkarbons und Rotliegend erbohrt worden. Diese Sandsteine sind schlechter sortiert und weisen einen höheren Bindemittelanteil auf. Die Porosität und Permeabilität ist heterogen verteilt. Es können Temperaturen bis zu 50 °C erreicht werden.

2.3.5 Oberrheingraben

Hier werden geothermisch relevante Aquifere des Oberrheingrabens mit Landesanteilen von Hessen, Rheinland-Pfalz und Baden-Württemberg behandelt.

Die Temperaturprojektion der in diesem Abschnitt genannten Einheiten erfolgte jeweils auf die Topfläche der Abfolgen, wobei Angaben von HAENEL & STAROSTE (1988) und LGRB (2005) genutzt wurden. Damit wurden bei der Temperatur ausschließlich minimal erreichbare Temperaturen ermittelt.

2.3.5.1 Niederrödern-Schichten (Oligozän)

Die Niederrödern-Schichten setzen mit einer unregelmäßigen Folge bunter Mergelsteine und mäßig harter, kalkiger Feinsandsteine mit Tonmergellagen ein. Es handelt sich um rotbunte Fluss- und Seeablagerungen, in die vereinzelt dunkelgraue Brackwasserbildungen eingeschaltet sind (DOEBL & TEICHMÜLLER, 1979).

Da die Mächtigkeit der Abfolge starken Schwankungen unterliegt, wurde eine Gesamtmächtigkeit nach Angaben des LGRB (2005) ermittelt, die sich aus der Tiefenlage der Topfläche der Niederrödern-Schichten und der Tiefenlage der im Liegenden befindlichen Topfläche der Grauen Schichtfolge ergab.

2.3.5.2 Hauptrogenstein (Bajoc – Bathon)

In den meist sehr gut geklüfteten Kalkoolith des Hauptrogensteins schieben sich lokal feinsandige und ooidische Mergellagen ein. Meist ist eine zyklische Sedimentationsfolge von Mergelkalk, Kalkoolith und Spatkalk ausgebildet. Die Kalkoide sind durch grobkristallinen Kalzit verkittet. Der Mittlere und der Obere Hauptrogenstein können lokal stark dolomitisiert sein (LGRB, 2005).

Angaben zur Mächtigkeit der Einheit wurden aus Veröffentlichungen von HAENEL & STAROSTE (1988) und dem LGRB (2005) entnommen und zusammengestellt.

2.3.5.3 Oberer Muschelkalk (Mittlere Trias)

Der im gesamten Oberrheingraben vorhandene und ziemlich gleichförmig ausgebildete Obere Muschelkalk lässt sich in Trochitenkalk, Plattenkalk und Trigonodus-Dolomit untergliedern. Der Trochitenkalk besteht aus dickbankigen, splittrigen Kalksteinen, oolithischen Kalksteinbänken und Schillsteinbänken mit zwischengelagerten geringmächtigen Mergelhorizonten. Der Plattenkalk wird von plattigen Kalksteinen aufgebaut, in die plattige Schillkalksteine und eine mergelige Kalksteinbank eingelagert sind. Der harte und klüftige, stellenweise auch kavernöse und dolomitische Trigonodus-Dolomit bildet den Abschluss der Abfolge (LGRB, 2005).

Die Mächtigkeit der Einheit wurde nach Angaben von HAENEL & STAROSTE (1988) und dem LGRB (2005) in die Kartendarstellung aufgenommen.

2.3.5.4 Buntsandstein, undifferenziert (Untere Trias)

Im Unteren Buntsandstein wurde der Tigersandstein im Gebiet nördlich von Freiburg abgelagert. Der Mittlere Buntsandstein ist im gesamten Untersuchungsraum verbreitet. Er wird in den Eck'schen Horizont, einen konglomeratischen Sandstein, den Bausandstein, das Hauptkonglomerat und den Kristallsandstein bzw. streifigen Sandstein untergliedert (LGRB, 2005).

Für die undifferenzierten Ablagerungen des Buntsandstein wurden Angaben zur Mächtigkeit aus HAENEL & STAROSTE (1988) und dem LGRB (2005) herangezogen und zusammengestellt.

2.3.6 Süddeutsches Molassebecken

Die in diesem Abschnitt beschriebenen geothermisch relevanten Aquifere befinden sich in den baden-württembergischen und bayerischen Teilen des Süddeutschen Molassebeckens.

Zur Temperaturermittlung aller in diesem Abschnitt erwähnten Einheiten wurden jeweils die Topflächen der Abfolgen für die Projektion verwendet, wobei Angaben von HAENEL & STAROSTE (1988), SCHULZ (2009) bzw. HAENEL et al. (1984) genutzt wurden. Es handelt sich damit ausschließlich um minimal erreichbare Temperaturen. Die angegebenen Mächtigkeiten wurden aus HAENEL & STAROSTE (1988) und HAENEL et al. (1984) entnommen und zusammengestellt; dabei handelt es sich oft um eine kumulierte Mächtigkeit mehrerer Sandablagerungen.

2.3.6.1 Burdigal-Sande, Aquitan-Sande, Nantesbuch-Sandstein (Miozän)

Bei den Burdigal-Sanden handelt es sich um Sande mit zwischengeschalteten Sand- und Tonmergeln. Sie werden zum Hangenden von einer rein tonigen bis sandmergeligen Abfolge begrenzt (BSTWIVT, 2010). Für diese Abfolge wurde eine kumulierte Mächtigkeit > 25 m bestehend aus mehreren Sandablagerungen in die Kartendarstellung aufgenommen.

Die Aquitan-Sand-Mergel-Folge besteht vorwiegend aus Fein- bis Mittelsanden mit eingeschalteten Tonmergeln (BSTWIVT, 2010). Die Nettomächtigkeit > 25 m wurde für diese Einheit ausgewiesen und der Kartendarstellung zugefügt.

Bei dem Nantesbuch-Sandstein handelt es sich um eine vollmarine Ablagerung, die etwa zeitgleich zu den Aquitan-Tonmergeln bzw. zur Aquitan-Sand-Mergel-Folge entstand (BSTWIVT, 2010).

2.3.6.2 Chatt-Sande, Bausteinschichten (Oligozän)

Die Abfolge besteht aus einer Wechsellagerung von gelegentlich feinkiesigen Fein- bis Mittelsanden bzw. -sandsteinen und unterschiedlich mächtigen Ton- bis Sandmergelzwischenlagen (BSTWIVT, 2010). Nur Ablagerungen mit einer Mächtigkeit > 25 m wurden erfasst und dargestellt.

In den Bausteinschichten dominieren schwach bis mittelstark kalzitisch zementierte Sandsteine zum Teil in Wechsellagerung mit Tonsteinen und Tonmergelsteinen. Mancherorts gehen die Korngrößen der Sandsteine im unteren Teil der Baustein-

schichten auch in den Siltbereich über (KRONMÜLLER, 1987). Die angegebene Mächtigkeit wurde als Nettomächtigkeit erfasst.

2.3.6.3 Ampfinger Schichten, Priabon-Basissandstein (Eozän)

Bei den Ampfinger Schichten handelt es sich um mittel- bis grobkörnige, zum Teil feinkiesige und manchmal glaukonitführende Quarzsandsteine (MÜLLER, 1978). Für diese Abfolge ging nur eine kumulierte Mächtigkeit > 25 m in die Kartendarstellung ein.

Der Priabon-Basissandstein konnte nicht berücksichtigt werden, da das Mindestkriterium von 20 m Mächtigkeit an keiner Stelle der Abfolge erfüllt wurde.

2.3.6.4 Gault- und Cenoman-Sandstein (Kreide)

Bei diesen Ablagerungen handelt es sich um glaukonitführende, kalkig gebundene Sandsteine mit grünlicher Farbe (SCHNEIDER, 1999; HAENEL et al., 1984).

Zur Abgrenzung des Potenzialgebietes wurde die aus mehreren Sandsteinabfolgen bestehende Nettomächtigkeit herangezogen.

2.3.6.5 Malm (Oberjura)

Im Südwesten des Molassebeckens ist die Helvetische Fazies verbreitet. Sie ist geprägt von dichten, häufig dunklen und bituminösen Kalken mit gelegentlicher Einschaltung von Oolithlagen. Die Schichtfazies ist aus hellen Kalken und Mergeln aufgebaut. Diese Kalkbildung erfolgte rhythmisch und wurde von Bakterien, Blaugrünalgen und Kalkflagellaten gesteuert. Die Massen- oder Riff-Fazies ist durch Schwammriffe gekennzeichnet, die sich kuppelförmig über dem Meeresboden erhoben. Die Gesteine der Riff-Fazies bestehen vorwiegend aus massigen Kieselschwamm- bzw. Algenriffkalken und -dolomiten sowie aus Korallenriffschuttkalken (MEYER & SCHMIDT-KALER, 1996).

Die Nettomächtigkeit des Malm-Grundwasserleiters hängt im Wesentlichen von der Verkarstungstiefe ab und ist somit in der Regel sehr viel kleiner als die Gesamtmächtigkeit. Angaben zu Nettomächtigkeiten sind in einem Karstgrundwasserleiter nur sehr schwierig zu treffen und als statistische Werte zu interpretieren. Die größten Mächtigkeiten unter dem Molassebecken erreicht der Malm (einschließlich Purbeck) mit über 600 m südlich von München zwischen Lech und Inn. Er setzt sich dort aus bis zu 500 m mächtigen, massigen Schwamm- und Tubiphytenkalken sowie darüber abgelagerten hellen, porösen Korallen-Schuttkalken zusammen (MEYER & SCHMIDT-KALER, 1996).

Die tiefgreifende, während der Kreide und des Tertiär erfolgte Verkarstung erreichte eine Eindringtiefe von etwa 150 bis 250 m unter Top Malm (LEMCKE, 1988).

Für diesen Aquifer wurde daher das gesamte Verbreitungsgebiet in die Darstellung aufgenommen, ohne eine Differenzierung nach der Mächtigkeit zu treffen.

2.3.6.6 Trigonodusdolomit (Oberer Muschelkalk)

Bei dem Trigonodusdolomit handelt es sich um einen geklüfteten, kavernoßen Dolomitstein (FEHN & WIRSING, 2011).

Die Mächtigkeit wurde als Nettomächtigkeit angegeben.

2.4 Vermutetes hydrothermisches Potenzial

Die größten Bereiche mit vermutetem hydrothermischem Potenzial sind die Rotliegend-Sandsteine in Norddeutschland und das Permokarbon des Saar-Nahe-Beckens (siehe auch Abb. 2.6b). Sie wurden hinsichtlich ihrer Verbreitung, Mächtigkeit und Fazies untersucht. Allerdings liegen verlässliche Daten über die hydraulischen Eigenschaften noch nicht vor (JUNG et al., 2002; PASCHEN et al., 2003).

2.4.1 Norddeutsches Becken (sedimentäres Rotliegend)

Das sedimentäre Rotliegend des Norddeutschen Beckens kann in vier Subgruppen unterteilt werden, die vor allem klimatisch-tektonisch abgegrenzt werden. Hinzu kommen mineralogisch-petrographische und biostratigraphische Kriterien. Die Altmark-Subgruppe kann auf mineralogisch-petrographischer Basis in vier Vulkanit-Formationen untergliedert werden. In die Vulkanitkomplexe eingelagerte Sedimenteinheiten bilden weitere Formationen. Die Müritz-Subgruppe ist eine fluvio-lakustrine Sedimentfolge. Die dritte Einheit stellt die Havel-Subgruppe mit den sedimentären Parchim- und Mirow-Formationen dar. Die Elbe-Subgruppe schließlich gliedert sich in die Dethlingen- und die Hannover-Formation, die sich aufgrund zyklischer Sedimentation jeweils in sieben Subformationen (Members) unterteilen lassen (LOTZ, 2004).

Die Informationen zur sedimentologischen und faziellen Entwicklung der Altmark-Subgruppe sind spärlich. Die Sedimentation ist nur in lokalen tektonischen Senken überliefert. Die Abfolgen weisen dabei in der Fazies und der Zusammensetzung kaum Unterschiede zur hangenden Havel-Subgruppe auf. Es dominieren fluvial-lakustrine Silt- und Tonsteine. Sie sind zwischen Verwitterungsbreccien, die den basalen Andesitoiden auflagern, und Konglomeraten ausgebildet. Häufig sind geröllführende Sandsteine eingeschaltet (SCHNEIDER & GEBHARDT, 1993).

Die Sedimentationsräume der Müritz-Subgruppe sind ebenfalls an regionale Bruchstrukturen und durch sie hervorgerufene Senken bzw. Teilsenken gebunden. Die Sedimente unterscheiden sich dabei lithologisch kaum von denen der Altmark-Subgruppe. In der Altmark- und Müritz-Subgruppe sind vereinzelt aber auch Kalksteinlagen nachgewiesen, die eine Sedimentation im Flachwasserbereich größerer, perennierender Seen anzeigen (GAITZSCH, 1995; SCHNEIDER et al., 1995; RIEKE, 2001).

Für die Havel-Subgruppe im Norddeutschen Becken hat sich eine Unterteilung in zwei Formationen (Parchim und Mirow) durchgesetzt (GEBHARDT et al., 1995; DEUTSCHE STRATIGRAPHISCHE KOMMISSION, 2002). Charakteristisch an der Basis dieser Formation sind die z. T. recht mächtigen Konglomerate. Die fluvialen Aktivitäten reduzierten sich im Verlauf der Parchim-Formation erheblich, und es kam zu ausgedehnten Feinsand- bis Grobsandstein-Ablagerungen, äolischen Dünen- und Schichtsandsteinen sowie zu Evaporitbildungen (LINDERT et al., 1990; RIEKE, 2001). Die Sedimentation der Mirow-Formation schloss nach einer Reliefbelebungen, die über den evaporitischen Sedimenten der oberen Parchim-Schichten zu einer erosiven Schüttung fluvial schlecht sortierter Sandsteine führte, an die vorige Entwicklung an. In den zentralen Bereichen des Beckens dominieren feinsandige bis tonsiltige Sedimente und Tonsteine. Isoliert treten dünnbankige fluviale Feinsandsteine als isolierte Schichtflutablagerungen auf. Äolische Sedimente sind nur sehr begrenzt überliefert (GEBHARDT et al., 1995).

In der Elbe-Subgruppe führten weiträumige Hebungen im südlichen Hinterland zur Schüttung des am Südrand des gesamten Norddeutschen Beckens flächenhaft ver-

breiteten fluviatilen Hauptsandsteins, der sich aus umgelagerten äolischen Sanden und aus frisch erodiertem Material zusammensetzt. Aufgrund abnehmender Strömungsenergie werden die Ablagerungen des Hauptsandsteins in Richtung des Beckenzentrums feinkörniger. Im Zentrum des Beckens bildete sich ein perennierender Playa-See aus, dessen zyklische feinklastische Sedimentation von Tonsteinen und Salzlagen durch klimatisch gesteuerte rhythmische Wasserspiegelschwankungen verursacht und zudem durch marine Ingressionen von Westen her beeinflusst wurde (GAST, 1991; GEBHARDT, 1994). Generell muss im lakustrinen Bereich mit der lithologischen Dominanz von Ton- und Siltsteinen sowie mit Anhydrit- und Evaporitbildungen gerechnet werden, während vor allem in den Übergangsbereichen zu den fluviatil geprägten Regionen mit einer stark wechselnden Lithologie (Fein- und Grobklastika, u. U. auch Evaporitbildungen) zu rechnen ist (LOTZ, 2004).

Die Temperaturprojektion erfolgte auf die Basis des Zechsteins, wobei die Angabe über Lage und Tiefe der Isobathen aus BALDSCHUHN et al. (2001) bzw. DOORNENBAL & STEVENSON (2010) entnommen wurde (minimal zu erreichende Temperatur). Unterhalb 5.000 m Tiefe der Basis des Zechsteins liegen in dem für die Temperaturprojektion verwendeten 3D-Temperaturmodell keine Werte mehr vor. Die 160 °C Isotherme wurde deshalb teilweise auf Basis der 4.800 m Tiefenlinie der Zechsteinbasis generiert und ergänzt, wobei der SPBA (DOORNENBAL & STEVENSON, 2010) die Datengrundlage bildete.

Als potenzielle Heißwasseraquifere werden innerhalb des sedimentären Rotliegend äolische und fluviatile Sandsteine in Betracht gezogen. Diese beschränken sich regional auf die südlichen und östlichen Bereiche des Norddeutschen Beckens und sind zum einen an die Grabenstrukturen des frühen Rotliegend-Riftsystems sowie zum anderen an küstenparallele Strandsande des Rotliegend-Salzsees gebunden (JUNG et al., 2002) (Abb. 2.5).

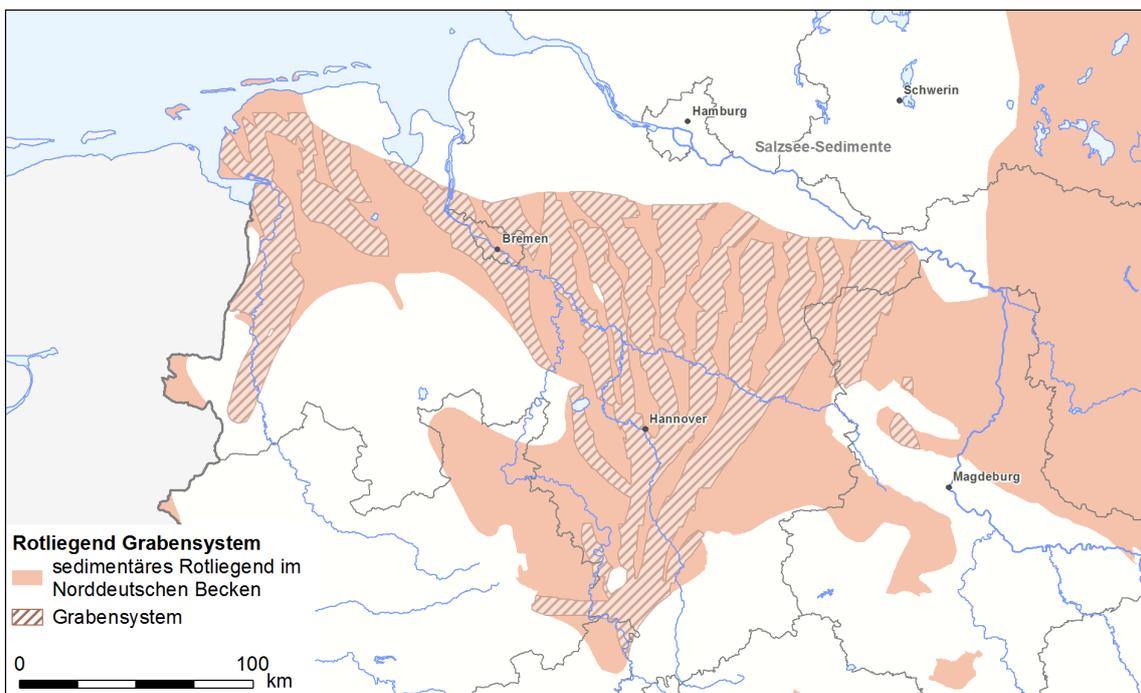


Abb. 2.5: Grabenstrukturen innerhalb der Abfolge des sedimentären Rotliegend des Norddeutschen Beckens (umgezeichnet nach GAST (1988), LOKHORST (1998) und DOORNENBAL & STEVENSON (2010)).

Innerhalb der Rotliegend-Ablagerungen treten sie nach JUNG et al. (2002) in verschiedenen Abschnitten und in unterschiedlichen Mächtigkeiten auf. Gebiete mit Salzsee-Sedimenten werden als potenzielle Aquifere ausgeschlossen. Es wurden folgende Annahmen getroffen: In den Lagerstättenbereichen der Rotliegend-Gase werden für die Sandsteine Nettomächtigkeiten von durchschnittlich 50 m, in den übrigen Verbreitungsgebieten Sandstein-Nettomächtigkeiten von durchschnittlich ca. 20 m angenommen. Die tatsächlichen Nettomächtigkeiten liegen wahrscheinlich noch deutlich höher.

In den Grabenstrukturen im Basisbereich des sedimentären Rotliegend können nach DRONG et. al. (1982), GAST (1988) und PLEIN (1995) Sandsteine mit guten Speichereigenschaften und erheblicher Mächtigkeit (bis ca. 500 m) angetroffen werden. Die Aufnahme der Grabenstrukturen erfolgte nach GAST (1988).

2.4.2 Saar-Nahe-Becken (sedimentäres Rotliegend)

Das Saar-Nahe-Becken ist ein intramontan angelegtes Becken, welches überwiegend mit klastisch-terrigenen Sedimenten in Form von alluvialen Fächern, verflochtenen oder mäandrierenden Flüssen sowie Ablagerungen aus Süßwasserseen verfüllt ist (KORSCH & SCHÄFER, 1995).

Die Ablagerungen des Oberkarbon und des Rotliegend umfassen den größeren Anteil der Sedimentfüllung des Beckens. Obwohl die Sedimentation bereits an der Wende Namur/Westfal eingesetzt hatte, gewann das Saar-Nahe-Becken erst während des Rotliegend wirkliche Bedeutung als Sedimentationsraum. Die Sedimente spiegeln eine kontinuierliche Wasserführung wider (LAUSBERG, 2002).

Die Glan-Gruppe besteht aus mehreren basalen Feinzyklen, die in der Regel aus schlecht sortierten, kantengerundeten Quarzen und Feldspäten aufgebaut sind. Der überwiegende Teil der Nahe-Gruppe besteht aus feinkörnigen, tonig bis siltigen Überschwemmungs- und Süßwassersedimenten. Gröberkörnige Lagen bis hin zu mächtigeren Konglomeraten kommen vor, sind aber häufig dimiktisch mit einem hohen Tonanteil in der Matrix ausgebildet (WENKE et al., 2009).

In den postvulkanischen Sedimenten des Rotliegend, im oberen Abschnitt der Nahe-Gruppe, herrschen Schwemmfächer- und Playa/Sabkha-Sequenzen vor, die in semiaridem Klima abgelagert wurden (STAPF, 1982; STAPF, 1989).

Im Mainzer Becken wird das Rotliegend des Saar-Nahe-Beckens von wenige hundert Meter mächtigem Tertiär (bzw. Paläogen und Neogen) verdeckt (SCHWARZ et al, 2011).

Die Temperaturprojektion erfolgte auf die Basis des Rotliegend (maximal prognostizierte Temperatur) unter Verwendung der Angaben von BOIGK & SCHÖNEICH (1970) und SCHÄFER (1986).

Das gesamte Verbreitungsgebiet dieser Schichten wurde nach Anlegen des Temperaturkriteriums in die Darstellung aufgenommen, ohne eine Untergliederung hinsichtlich der Mächtigkeit zu treffen. Diese kann aber anhand der Darstellung in SCHÄFER (1986) als ausreichend im Sinn der Abgrenzungskriterien gewertet werden.

2.5 Petrothermisches Potenzial

Petrothermische Systeme nutzen zum überwiegenden Teil die im Gestein gespeicherte Energie. Die Energiegewinnung kann nur erfolgen, nachdem durch hydraulische Stimulation ein unterirdischer Wärmetauscher geschaffen oder erweitert worden ist (Enhanced Geothermal System oder Engineered Geothermal System – EGS).

Geeignet sind vor allem magmatische und metamorphe Gesteine, wie die Rotliegend-Vulkanite des Norddeutschen Beckens und das kristalline Grundgebirge Mittel- und Süddeutschlands. Für diese Gebiete ist das Potenzial von JUNG et al. (2002) für den TAB-Bericht (PASCHEN et al., 2003) abgeschätzt worden. In Frage kommen aber auch geringpermeable („dichte“) Sedimentgesteine aus anderen Regionen (siehe auch Abb. 2.6c). So haben die Experimente in einer Bohrung in Hannover gezeigt, dass im Mittleren Buntsandstein ein großflächiges künstliches Rissystem als Wärmeaustauschfläche durch Stimulation geschaffen werden kann (PECHAN et al., 2012).

In die Kartendarstellung wurden nur Abfolgen aufgenommen, für die eine Temperatur von mehr als 100 °C ermittelt werden konnte und die sich in einer Tiefe ab 3.000 m befinden. Unterhalb von 7.000 m Tiefe wurde die Verbreitung der Gesteine aufgrund wirtschaftlicher Überlegungen (extrem hohe Bohrkosten) nicht mehr dargestellt.

2.5.1 Norddeutsches Becken (vulkanisches Rotliegend)

In der Mitteleuropäischen Senke bestehen regionale Unterschiede im Hinblick auf die Vulkanitabfolgen, Vulkanitzusammensetzungen und -assoziationen. Die Eruptivkomplexe lassen sich nicht scharf gegeneinander abgrenzen. Vielmehr gibt es Übergangs- bzw. Verzahnungsbereiche. Insgesamt deutet sich aber eine ausgeprägte Zonierung bzw. Felderung an. Dabei wechselt die Magmencharakteristik von NE nach SW von (verarmt) tholeiitisch über kontinental tholeiitisch zu kalkalkalisch (DEUTSCHE STRATIGRAPHISCHE KOMMISSION, 1995).

Die Temperaturprojektion erfolgte auf die Basis des sedimentären Rotliegend (minimal zu erreichende Temperatur), wobei die Angabe der Lage und Tiefe der Isobathen aus dem SPBA (DOORNENBAL & STEVENSON, 2010) entnommen wurde. Unterhalb 5.000 m Tiefe liegen in dem für die Temperaturprojektion verwendeten 3D-Temperaturmodell keine Werte mehr vor. Die 160 °C Isotherme wurde deshalb auf Basis der 4.800 m Tiefenlinie der sedimentären Rotliegendebasis unter Anwendung des mittleren geothermischen Gradienten generiert und ergänzt. Die 190 °C Isotherme konnte auf Basis der 5.700 m Tiefenlinie ermittelt werden.

Die Angabe der Verbreitung und Mächtigkeit der Abfolge des vulkanischen Rotliegend wurde aus LOKHORST (1998) entnommen. Aufgrund der in der genutzten Quelle vorliegenden Darstellung der Isopachen in Abständen von 100 m konnte die Anwendung des Mächtigkeitskriteriums jedoch nicht erfolgen.

2.5.2 Mittel- und Süddeutsches Kristallengebiet

Nach KEAREY (2001) handelt es sich bei dem Begriff Kristallin um eine Sammelbezeichnung für magmatische (Plutonite) und metamorphe Gesteine; hierzu zählen u. a. Phyllite, Grünschiefer, Glimmerschiefer, Amphibolite, Gneise und Granulite.

Die Verbreitung dieser Abfolgen wurde aus der TAB-Studie (JUNG et al., 2002) abgeleitet, bearbeitet und referenziert in die Kartendarstellung des „Geothermie-Atlas“ aufgenommen.

Der für eine petrothermische Nutzung in Frage kommende kristalline Bereich wird nach Norden durch die Hunsrück-Taunus-Südrandstörung, die Nordbegrenzung der Nördlichen Phyllitzone sowie den Wittenberger Abbruch und die Lausitzer Hauptabbrüche begrenzt, welche in Ostdeutschland den Übergang vom Grundgebirge bzw. Übergangsstockwerk zum Tafeldeckgebirge markieren. Nach Süden bildet die Lage der Kristallinoberfläche in 3.000 m Tiefe die Grenze (JUNG et al., 2002; HAHN et al., 2005; REINHOLD, 2005; FRANKE, 2012).

2.5.3 Nordwestdeutschland (Mittlerer Buntsandstein)

Die Verbreitung des Mittleren Buntsandstein in Nordwestdeutschland wurde entsprechend den Angaben des SPBA (DOORNENBAL & STEVENSON, 2010) dargestellt.

Für die Projektion der Temperatur fand die Basis des Unteren bis Mittleren Buntsandstein Verwendung (maximal prognostizierte Temperatur). Die Angabe der Lage und Tiefe der Isobathen stammt aus BALDSCHUHN et al. (2001). Unterhalb 5.000 m Tiefe zeigt das für die Temperaturprojektion verwendete 3D-Temperaturmodell keine Werte mehr an. Die 160 °C Isotherme wurde deshalb auf Basis der 4.800 m Tiefenlinie und tiefer liegender Isobathen interpoliert und ergänzt.

Die Mächtigkeit der Abfolge kann nach Angaben von DOORNENBAL & STEVENSON (2010) als ausreichend bezeichnet werden.

2.5.4 Nordrhein-Westfalen (Namur A, B)

Im Rahmen der Potenzialstudie „Tiefengeothermie im Ruhrgebiet“ (GEOLOGISCHER DIENST NRW, 2005) erfolgte eine flächendeckende Bearbeitung der geologischen Untergrundverhältnisse des Namur A und B bis in 5.000 m Tiefe. Neben der Ermittlung der für die Region typischen geothermischen Gesteinsparameter fand eine Modellierung der Untergrundtemperaturen bis in 5.000 m Tiefe statt. Aus dieser Potenzialstudie wurde die Verbreitung der Abfolge übernommen.

2.6 Fazit

Die Studie über Potenzialgebiete für die Tiefe Geothermie baut zu großen Teilen auf den Daten und Informationen auf, die aus dem vom Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik entwickelten Geothermischen Informationssystem für Deutschland (GeotIS) abgeleitet werden konnten. Seit Ende Mai 2009 werden Informationen über geologische Strukturen, physikalische Parameter, Temperaturverteilungen etc. unter der Adresse www.geotis.de im Internet bereit gestellt. Das Geothermische Informationssystem ist damit als eine digitale Variante eines Geothermischen Kartenwerkes zu betrachten und wird weiterhin mit Mitteln des BMU gepflegt, aktualisiert und ausgebaut.

Im Rahmen dieser Studie wurden insgesamt über vierzig Aquifere oder Horizonte ermittelt, hinsichtlich ihres geothermischen Potenzials bewertet und für die abschließenden Kartendarstellungen aufbereitet.

Es erfolgte dabei eine Unterscheidung des Potenzials bezüglich seiner Nutzbarkeit zwischen *nachgewiesenem hydrothermischem Potenzial*, *vermutetem hydrothermischem Potenzial* sowie *petrothermischem Potenzial*. Hinsichtlich der zeitlichen Verfügbarkeit der verschiedenen Optionen wurde zwischen „unmittelbar verfügbar“ oder „zukünftig verfügbar“ differenziert.

Das nachgewiesene hydrothermische Potenzial steht unmittelbar zur Verfügung, was durch verschiedene erfolgreich durchgeführte Projekte belegt werden kann. Dagegen sind Projekte in Gebieten mit einem vermuteten Potenzial, wie etwa das Rotliegend des Norddeutschen Beckens, erst in Planung und noch nicht realisiert, so dass man von einer zukünftigen Verfügbarkeit sprechen kann. Projekte, die auf das petrothermische Potenzial abzielen, befinden sich zurzeit noch im Erprobungsstadium, so dass hier ebenfalls nur eine zukünftige Verfügbarkeit besteht.

Entsprechend der aufgestellten Kategorisierung bestand die Herausforderung darin, mögliche Nutzungskonkurrenzen zur CO₂-Einlagerung im unterirdischen dreidimensionalen Raum durch ein zweidimensionales Produkt (Karte) abzubilden. Hierfür wurde eine Methode entwickelt, alle an einem Standort befindlichen, für geothermische Zwecke nutzbaren Potenzialgebiete auf die Oberfläche zu projizieren und darzustellen. Die ausgewiesenen Aquifere bzw. Horizonte wurden zu diesem Zweck einer der oben genannten Nutzungsarten zugeordnet; innerhalb der jeweiligen Kategorie fand anschließend eine Kompilation der Potenzialgebiete statt. Es ergaben sich abschließend drei unterschiedliche Potenzialflächen, die in die vergleichende Darstellung mit den Potenzialgebieten für die CO₂-Einlagerung eingingen (Abb. 2.6, Kap. 5.1).

Um darüber hinaus für geothermische Zwecke besonders geeignete Bereiche herauszustellen und auf diese Weise den Aspekt „Qualität“ des geothermischen Potenzials näher zu charakterisieren, erfolgte innerhalb der drei Nutzungsarten unabhängig vom jeweiligen Aquifer eine Projektion der an einem Standort erreichbaren Temperatur auf die Oberfläche (Abb. 2.6).

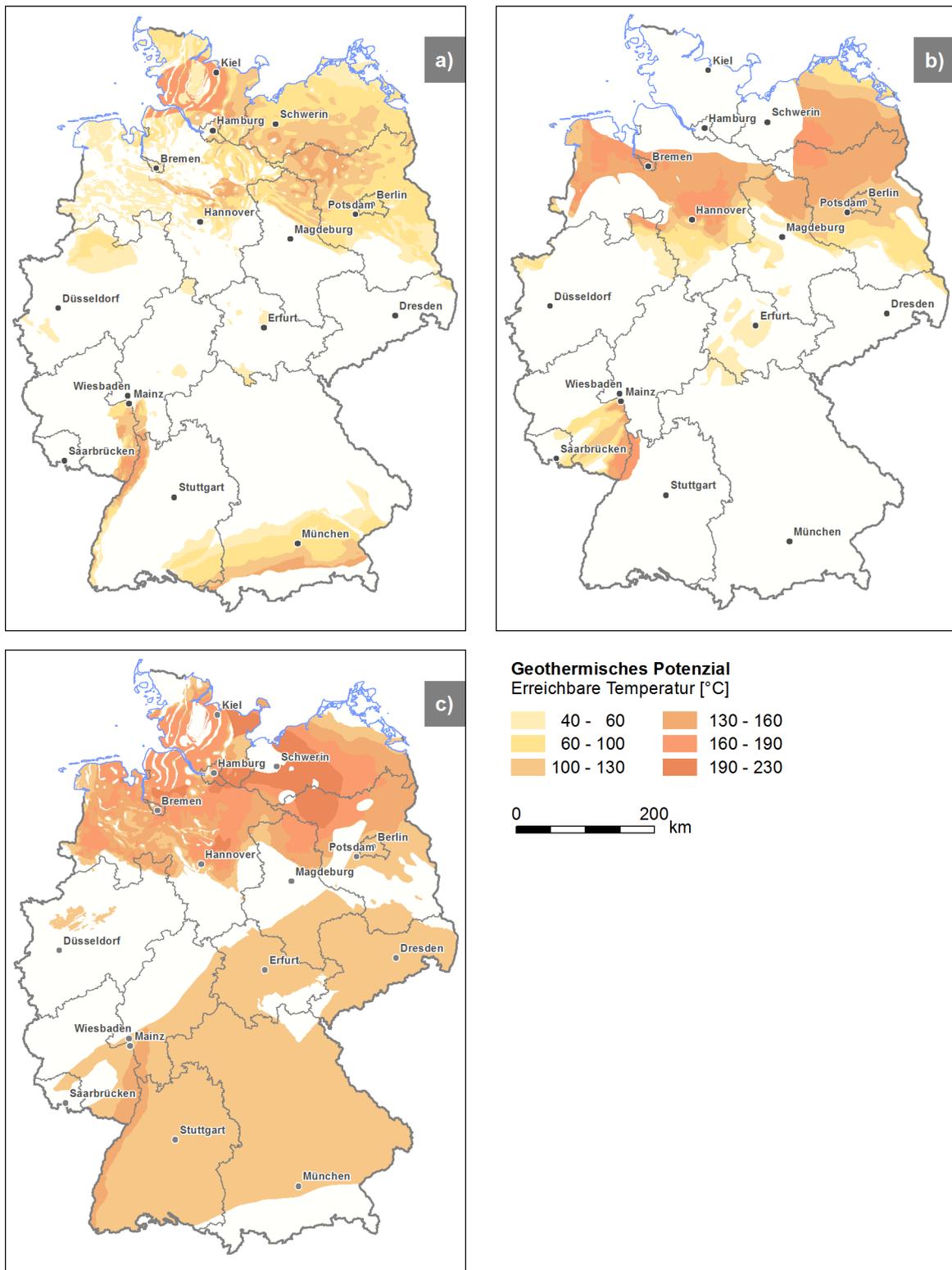


Abb. 2.6: Verbreitung und erreichbare kompilierte Temperatur der geothermisch nutzbaren Aquifere/Horizonte. a) Nachgewiesenes hydrothermisches Potenzial. b) Vermutetes hydrothermisches Potenzial. c) Petrothermisches Potenzial.

Im Rahmen dieser Studie wurde lediglich 20,8 % der Gesamtfläche der BRD nicht untersucht oder als nicht nutzbar eingestuft. Für eine potenziell nachgewiesene hydrothermische Nutzung steht eine Fläche von 34,5 % zur Verfügung. Das vermutete Potenzial umfasst einen Flächenanteil von 25,9 %. Das flächenmäßig größte Potenzial bietet mit 65,9 % die petrothermische Nutzung (Abb. 2.7).

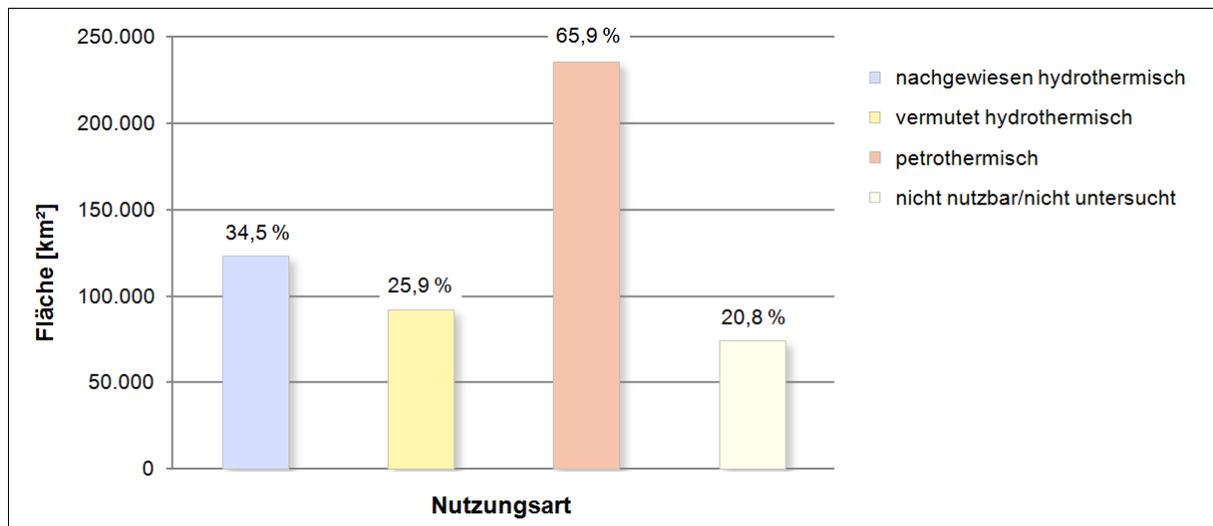


Abb. 2.7: Prozentuale Anteile der drei ermittelten geothermischen Nutzungsmöglichkeiten bezogen auf die Fläche von Deutschland. Überschneidungen mehrerer Nutzungsarten sind möglich.

Es gibt Gebiete, in denen sich mehrere Nutzungsarten oder sogar alle genannten geothermischen Optionen verwirklichen lassen, so dass es zu einer Mehrfachüberdeckung kommen kann. Aus diesen möglichen Überschneidungen der verschiedenen geothermischen Nutzungsoptionen lassen sich insgesamt sieben Kategorien aufstellen, die das unterschiedliche Potenzial bzw. Kombinationen hieraus repräsentieren (Abb. 2.8).

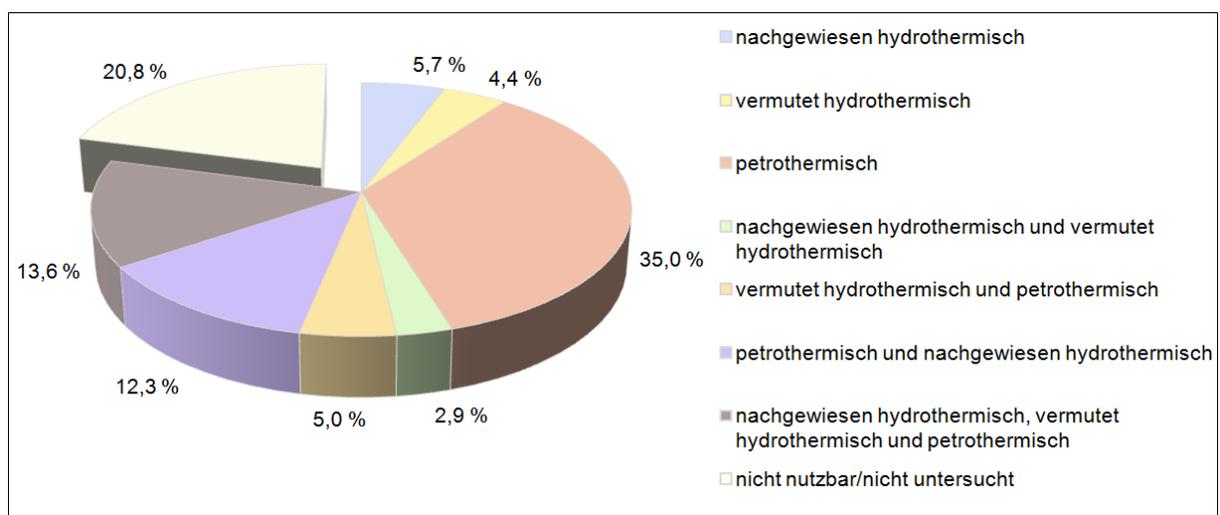


Abb. 2.8: Prozentuale Anteile der drei ermittelten geothermischen Nutzungsmöglichkeiten sowie Kombinationen hieraus bezogen auf die Fläche von Deutschland.

Die geothermisch nutzbare Fläche teilt sich unter den drei Nutzungsmöglichkeiten sowie verschiedenen Kombinationen aus diesen auf, wobei auch bei dieser Art der Darstellung die Fläche, die ausschließlich petrothermisch nutzbar ist, mit 35,0 % den größten Anteil bildet. Den zweitgrößten Flächenanteil mit 13,6 % nimmt die Kategorie ein, in der alle drei geothermischen Nutzungsmöglichkeiten potenziell verwirklicht werden können.

Zur Bewertung und Charakterisierung des vorhandenen geothermischen Potenzials lässt sich neben dem Flächenanteil und der erreichbaren Temperatur auch die Anzahl der nutzbaren Aquifere bzw. Horizonte verwenden, die an einer Lokalität angetroffen wird (Abb. 2.9). Auf diese Weise ist es möglich, Aussagen über den Aspekt „Quantität“ zu treffen.

Die größte Anzahl an geothermisch nutzbaren Aquifere innerhalb des nachgewiesenen hydrothermischen Potenzials befindet sich im Süddeutschen Molassebecken mit einer maximalen Anzahl von sechs möglichen nutzbaren Schichten. Im östlichen Teil des Norddeutschen Beckens können maximal fünf nutzbare Aquifere ermittelt werden. Im zentralen Niedersachsen, Teilen von Schleswig-Holstein sowie im südlichen Thüringen und im nördlichen Oberrheingraben befinden sich maximal drei übereinanderliegende nutzbare Aquifere (Abb. 2.9a).

Werden zu dieser Abbildung die Aquifere hinzugefügt, die ein vermutetes hydrothermisches Potenzial besitzen, erhöht sich die Zahl der nutzbaren Schichten im östlichen Teil des Norddeutschen Beckens auf sechs nutzbare Aquifere. Im zentralen Niedersachsen, Südthüringen und nördlichen Oberrheingraben erhöht sich die Zahl der nutzbaren Schichten innerhalb weniger, regional eng begrenzter Gebiete, auf vier (Abb. 2.9b).

Bei Betrachtung aller vorhandenen geothermisch nutzbaren Aquifere oder Horizonte (nachgewiesen hydrothermisch, vermutet hydrothermisch und petrothermisch) erhält man im östlichen Teil des Norddeutschen Beckens eine maximale Anzahl von sieben potenziell nutzbaren Horizonten (Abb. 2.9c). Die Regionen innerhalb des Norddeutschen Beckens, des Oberrheingrabens und des Süddeutschen Molassebeckens stellen damit sowohl hinsichtlich der zu erwartenden Temperaturen und der räumlichen Ausdehnung als auch bezüglich der Anzahl der möglichen nutzbaren Aquifere/Horizonte die attraktivsten Standorte für eine geothermische Nutzung dar.

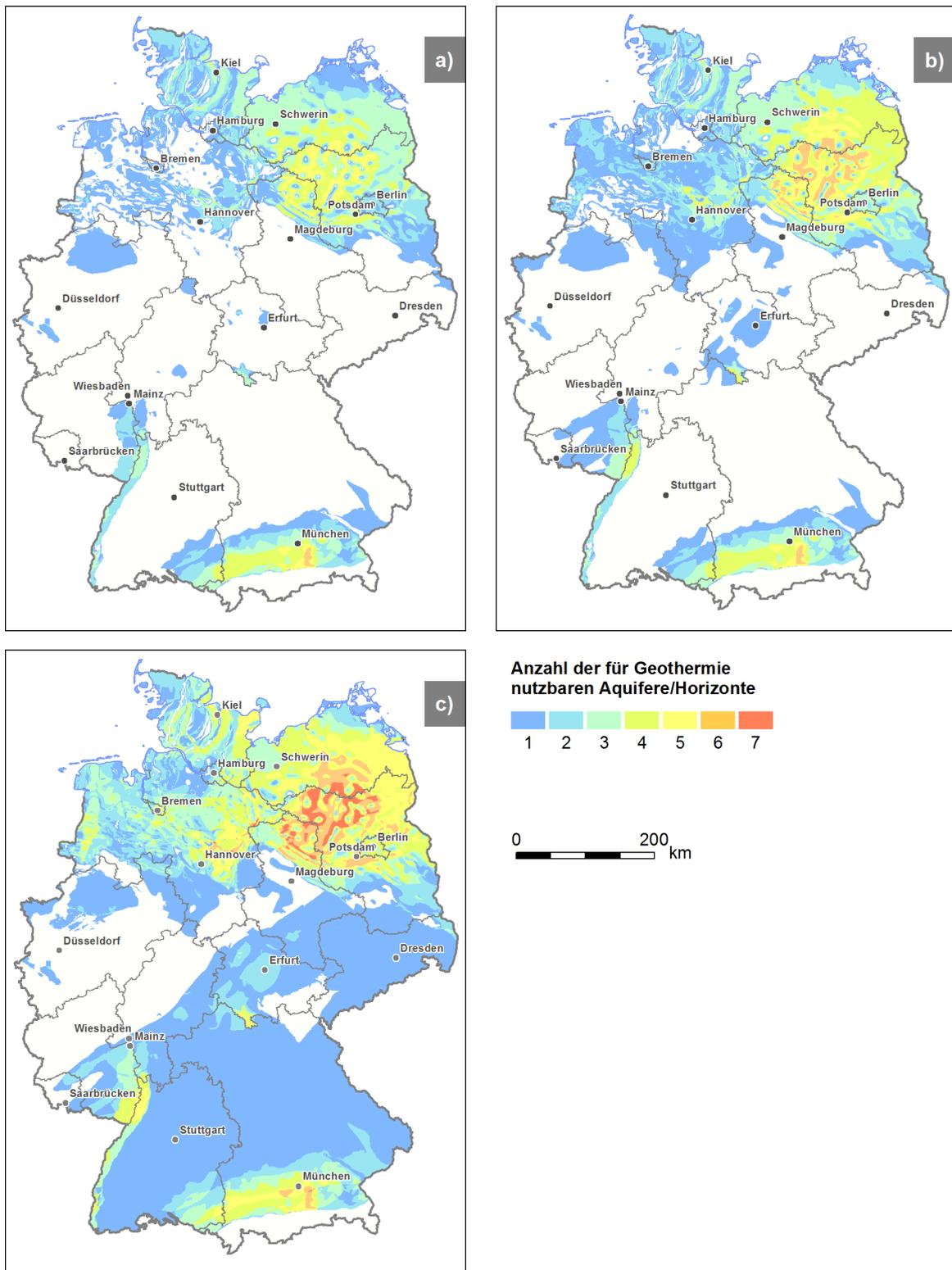


Abb. 2.9: Verbreitung und Anzahl der geothermisch nutzbaren Aquifere/Horizonte. a) Nachgewiesenes hydrothermisches Potenzial. b) Nachgewiesenes und vermutetes hydrothermisches Potenzial in Kombination. c) Gesamtes verfügbares hydrothermisches und petrothermisches Potenzial.

3 Potenzialgebiete für eine CO₂-Einlagerung

3.1 Rahmenbedingungen

In Deutschland sind zwei CO₂-Speicheroptionen relevant, einerseits erschöpfte Erdgasfelder und andererseits tiefe saline Aquifere (KNOPF et al., 2010). Sowohl saline Aquifere als auch Erdgasreservoirie bestehen aus porösen bzw. klüftigen Gesteinen, insbesondere Sandsteine und Karbonate.

Saline Aquifere stellen aufgrund ihrer weiten Verbreitung und der möglichen Speicherkapazität die bedeutendere Speicheroption in Deutschland dar. Die Speicherkapazität in salinaren Aquiferen wird nach Berechnungen von KNOPF et al. (2010) in den von der BGR bearbeiteten Gebieten auf 6,3 Mrd. t bis 12,9 Mrd. t CO₂ geschätzt. Die Speicherkapazität der Erdgasfelder in Deutschland beträgt etwa 2,75 Mrd. t CO₂ (GERLING, 2008).

CO₂ erreicht unter den durchschnittlichen Druck- und Temperaturbedingungen des Untergrundes in Tiefen von mehr als 800 m eine relativ hohe Dichte, die sich mit zunehmender Tiefe nur noch geringfügig ändert. Für die Einlagerung von CO₂ in Aquiferen kommen somit Speichertiefen von > 800 m in Frage.

Um ein Entweichen des CO₂ zu verhindern, kommen nur solche Speicherhorizonte in Betracht, die im Hangenden von Barrieregesteinen wirksam bedeckt werden. Insbesondere Salz- und Tongesteine besitzen aufgrund ihrer sehr geringen Durchlässigkeit und ihres Bruch- und Deformationsverhaltens günstige Barriereigenschaften (z. B. WARREN, 2006; HOTH et al., 2007; REINHOLD et al., 2011).

Für die Speicherung von CO₂ eignen sich insbesondere Antiklinalstrukturen (Abb. 3.1). Aufgrund des natürlichen Auftriebes kann sich das CO₂ am Top einer Antiklinale unter der Barriere ansammeln und nicht vertikal oder lateral entweichen. Wie der Untergrundspeicher für eine CO₂-Einlagerung in einem Schnitt aussehen könnte, zeigt schematisch die Abbildung 3.1.

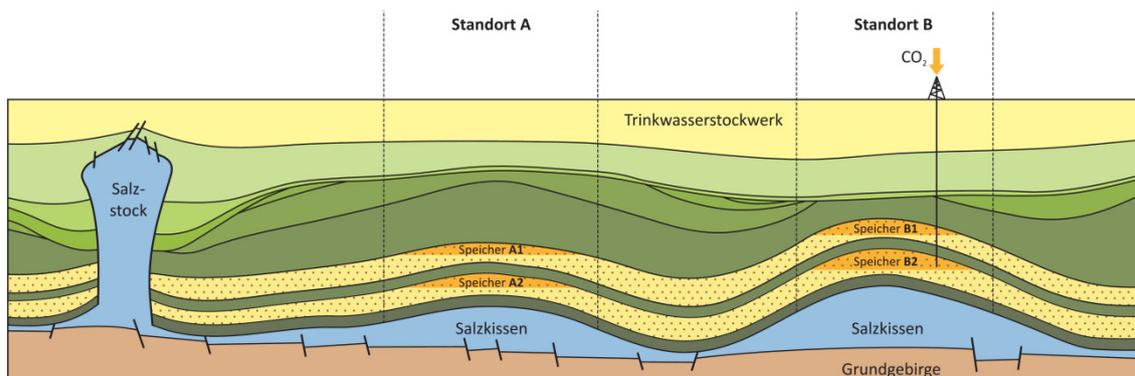


Abb. 3.1: Schematische Darstellung eines Untergrundspeichers für die CO₂-Einlagerung (aus KNOPF et al., 2010). Oberhalb eines Speicherhorizontes befindet sich jeweils ein Barrierehorizont.

3.2 Datengrundlage

Karten und Berichte des Projektes Speicher-Kataster Deutschland (MÜLLER & REINHOLD, 2011b) bilden die Grundlage für die in diesem Projekt getroffene Ausweisung von Potenzialgebieten für eine CO₂-Einlagerung. Im genannten Projekt wurden von der BGR und den Staatlichen Geologischen Diensten (SGD) der Bundesländer gemeinsam untersuchungswürdige Speicher- und Barrieregesteinshorizonte, insbesondere für die dauerhafte CO₂-Einlagerung, erfasst und bearbeitet. Diese beschränken sich auf den deutschen Festlandsbereich (Abb. 3.2). Als Informationssystem bietet das Speicher-Kataster Deutschland eine Planungsgrundlage zur Untersuchung von potenziellen Speichergesteinen im tieferen Untergrund von Deutschland.

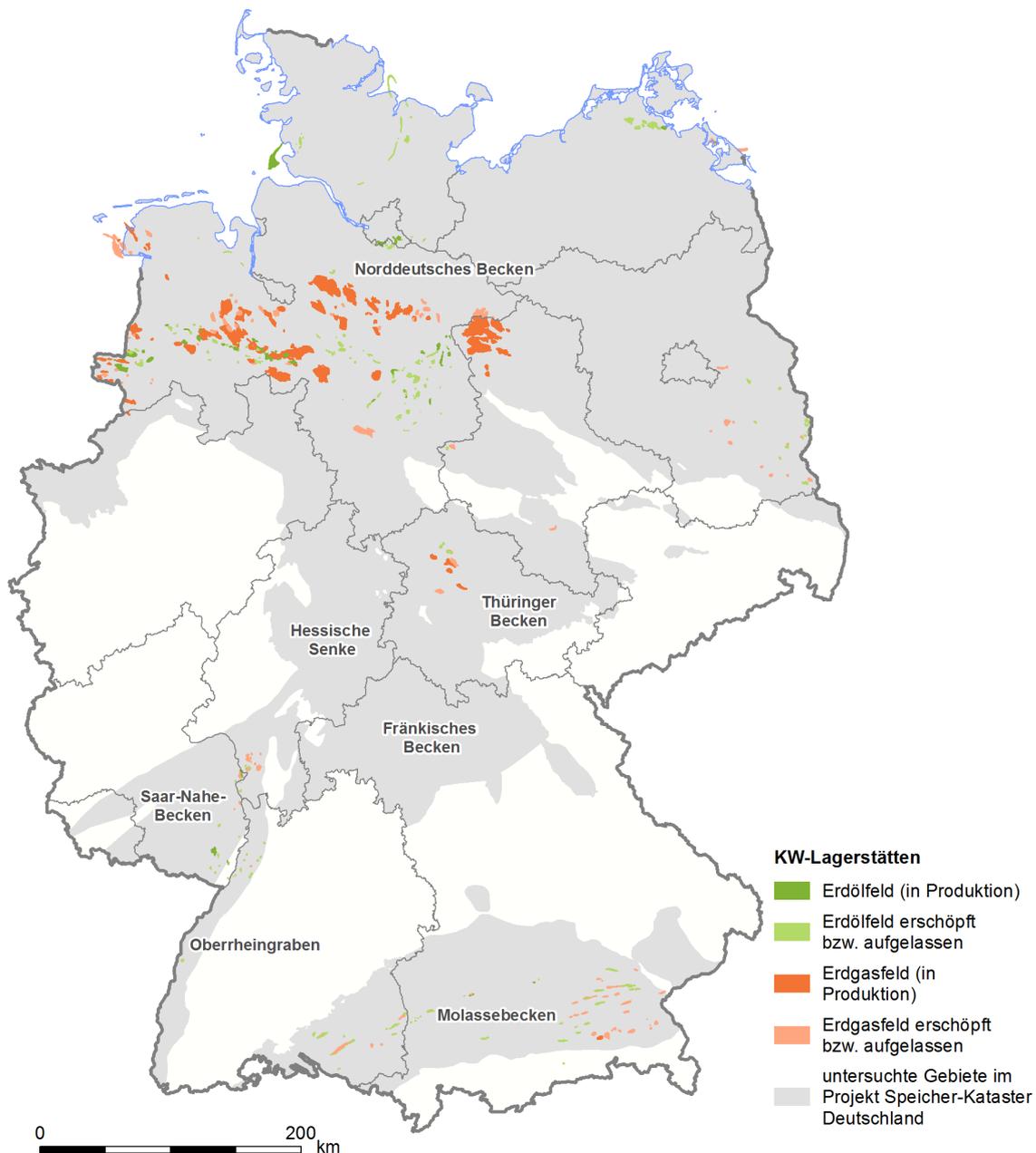


Abb. 3.2: Darstellung der im Projekt Speicher-Kataster Deutschland untersuchten Gebiete (REINHOLD et al., 2011) und Lage der Kohlenwasserstoff(KW)-Lagerstätten (Datenquelle: LBEG).

Für das Speicher-Kataster Deutschland wurden Potenzialkarten untersuchungswürdiger Gebiete erstellt, die Mindestkriterien (siehe Kapitel 3.4) für Speicher- und Barrierekomplexe erfüllen. Diese Karten und Erläuterungen basieren auf der Aufbereitung und Neubewertung bereits bestehender Daten aus Bohrdatenbanken, insbesondere aus der bundesweiten Kohlenwasserstoff-Bohrungsdatenbank (KW-DB) beim niedersächsischen Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG) sowie geotektonischer und geothermischer Kartenwerke.

Aus dem Speicher-Kataster Deutschland liegen folgende Daten bzw. Informationen vor:

- ein Synthesebericht, mit insgesamt 18 Potenzialkarten zu permischen und mesozoischen Speicher- und Barrierekomplexen im Maßstab 1 : 1 000 000,
- Teilberichte der SGD der Bundesländer,
- ein Nachweisdatensatz des LBEG
- sowie die GIS-Shape-Dateien:
 - eine digitale topographische Karte im Maßstab 1 : 1 000 000 (BUNDESAMT FÜR KARTOGRAPHIE UND GEODÄSIE (BKG), 2004),
 - eine Kategorisierung der Speicher- und Barrierekomplexe im Maßstab 1 : 1 000 000.

3.3 Begriffserläuterungen

Speicherkomplex (SK) bzw. Barrierekomplex (BK)

Im Speicher-Kataster Deutschland sind stratigraphisch verschiedene Gesteinshorizonte zu Speicher- bzw. Barrierekomplexen zusammengefasst worden. Ein Komplex umfasst Formationen oder Gesteinseinheiten, die eine vertikal und lateral abgrenzbare Einheit innerhalb eines ehemaligen Sedimentationsraumes bilden. Basis und Top der Speicher- und Barrierekomplexe sind durch stratigraphische Grenzen definiert (REINHOLD et al., 2011). Die Komplexe enthalten weit verbreitete Gesteinseinheiten, die zur Speicherung (Speicherkomplex) oder zur Abdichtung (Barrierekomplex) geeignet sein könnten.

Speicher-Barriere-Komplex (SBK)

Für dieses Projekt wird ein zusätzlicher Begriff eingeführt: Ein Speicher-Barriere-Komplex (SBK) ist die Kombination von untersuchungswürdigen Gebieten eines Speicherkomplexes mit überlagernden untersuchungswürdigen Gebieten des Barrierekomplexes. Die Verbreitung eines Speicher-Barriere-Komplexes ist durch die Schnittfläche der beiden untersuchungswürdigen Komplexe definiert (siehe Kapitel 3.6.2). Die Abbildung 3.3 zeigt schematisch den Speicher-Barriere-Komplex „Buntsandstein“ als Kombination des Speicherkomplexes „Mittlerer Buntsandstein“ mit dem Barrierekomplex „Oberer Buntsandstein“. Im Speicherkomplex treten neben Speicherhorizonten auch zwischengeschaltete Tonsteinhorizonte auf.

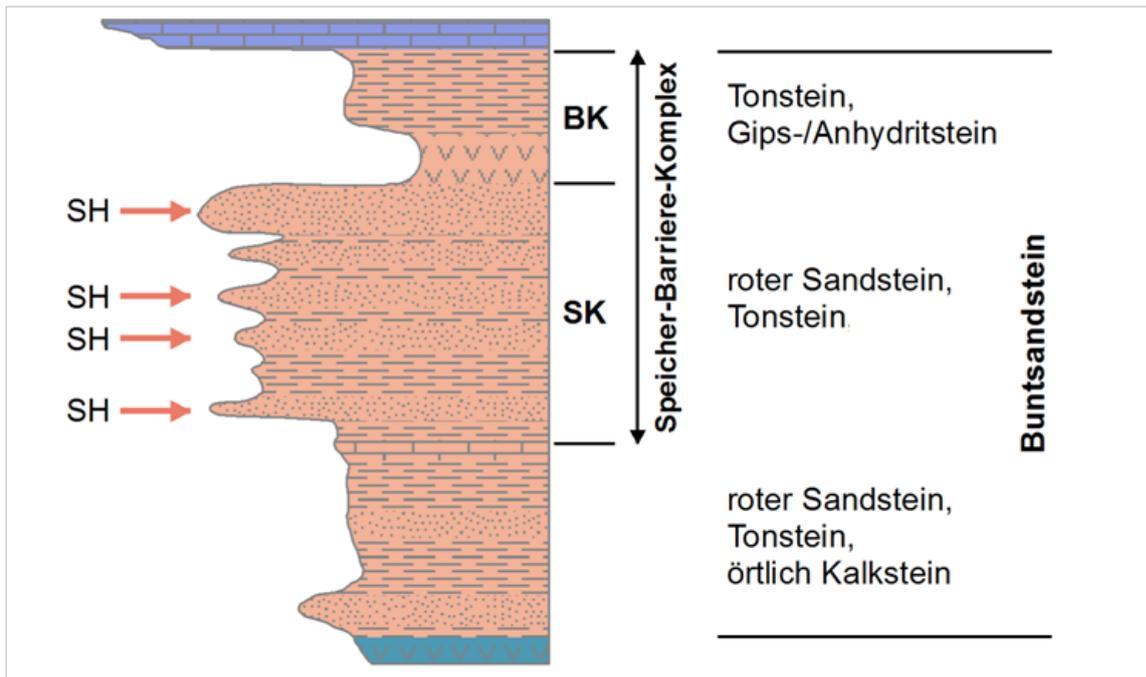


Abb. 3.3: Schematisches lithologisches Profil des Speicher-Barriere-Komplexes „Buntsandstein“ (Profil verändert nach HEUNISCH et al., 2007). BK = Barrierekomplex, SK = Speicherkomplex, SH = Speicherhorizont.

3.4 Kriterien für die Bewertung von Speicher- und Barrierekomplexen

Für das Projekt Speicher-Kataster Deutschland wurden die potenziellen Speicher- und Barrierehorizonte auf Basis einheitlicher Kriterien bewertet. Dabei erfolgte die Bearbeitung der Speicher- und Barrierekomplexe unabhängig und getrennt voneinander. Auf die Speicher- und Barrierekomplexe sind folgende Mindestkriterien nach CHADWICK et al. (2008) angewendet worden:

Speicherkomplex:

- Mächtigkeit > 10 m (Nettomächtigkeit der Speichergesteine),
- Tiefenlage > 800 m (Top des Speicherkomplexes unter Geländeoberkante).

Barrierekomplex:

- Mächtigkeit > 20 m (Mächtigkeit des Barrieregesteins),
- Tiefenlage > 800 m (Basis des Barrierekomplexes unter Geländeoberkante).

Die Speicher- und Barrierekomplexe sind anhand der Mindestkriterien kategorisiert worden: Werden die Mindestkriterien für den Speicher- bzw. Barrierekomplex erfüllt, so sind diese Gebiete als untersuchungswürdig kategorisiert worden.

Weitere speicherrelevante Parameter sind Porosität und Permeabilität der Gesteine. Sofern Daten verfügbar waren, erfolgte zusätzlich eine Charakterisierung der Komplexe durch diese Parameter. Eine Regionalisierung der untersuchungswürdigen Gebiete der Speicher- oder Barrierekomplexe anhand dieser Parameter erfolgte mangels ausreichender Datengrundlage jedoch nicht.

3.5 Methodik

Die Verwaltung und Bearbeitung der Geometrie- und Sachdaten, zusammen als Shape-Dateien bezeichnet, erfolgt über eine Geodatenbank mittels der Software ArcGIS. Die Koordinaten der Shape-Dateien liegen einheitlich im Gauß-Krüger-Koordinaten-System mit dem Zentralmeridian 9° östlicher Länge (GK3) vor.

Die Shape-Dateien der Verbreitung der untersuchungswürdigen Gebiete der Speicher- und Barrierekomplexe wurden aus dem Projekt Speicher-Kataster Deutschland übernommen.

Folgende untersuchungswürdige Speicher- und Barrierekomplexe (SK = Speicherkomplex, BK = Barrierekomplex) wurden für diese Studie herangezogen:

- BK Kreide,
- SK Unterkreide und untere Oberkreide,
- SK Oberjura (nur Molassebecken),
- BK Oberer Mitteljura und Oberjura (nur Molassebecken),
- SK Mitteljura,
- BK Unterjura und unterer Mitteljura,
- SK Oberer Keuper und Unterjura,
- BK Mittlerer Keuper (nur Molassebecken),
- SK Mittlerer Keuper (nur Molassebecken),
- BK Muschelkalk (nur Molassebecken und Oberrheingraben),
- SK Muschelkalk (Unterer u. Mittlerer Muschelkalk; nur Molassebecken und Oberrheingraben),
- BK Buntsandstein,
- SK Buntsandstein,
- BK Zechstein,
- SK Zechstein (nur Thüringer Becken und Hessische Senke),
- BK Rotliegend (nur Saar-Nahe-Becken),
- SK Rotliegend/Oberkarbon.

Für die Verschneidung der Speicher- und Barrierekomplexe wurden nur die Gebiete der Gesteinskomplexe berücksichtigt, die die Mindestkriterien (Tiefe und Mächtigkeit) erfüllen. In Abbildung 3.4a ist die Verschneidung anhand des Beispiels des untersuchungswürdigen Speicherkomplexes „Oberer Keuper und Unterjura“ und des untersuchungswürdigen Barrierekomplexes „Unterjura und unterer Mitteljura“ im Gebiet des östlichen Norddeutschen Beckens dargestellt. Die Schnittfläche zwischen dem untersuchungswürdigen Speicher- und dem untersuchungswürdigen Barrierekomplex zeigt die Verbreitung des Speicher-Barriere-Komplexes „Oberer Keuper – Unterjura“. Dieses Vorgehen ermöglicht die Eingrenzung der für die CO₂-Einlagerung untersuchungswürdigen Gebiete (Abb. 3.4b).

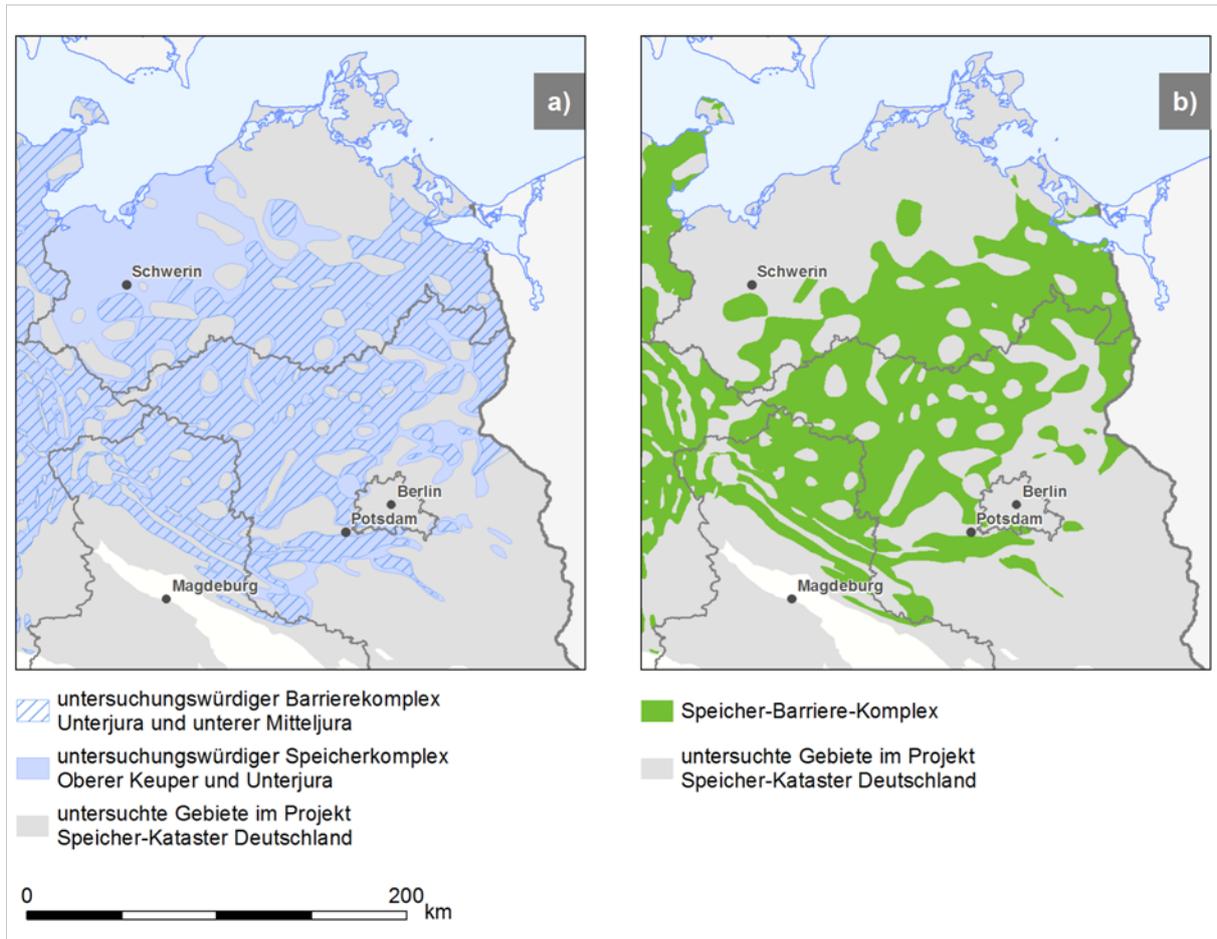


Abb. 3.4: Untersuchungswürdiger Speicher- und Barrierekomplex „Oberer Keuper – Unterjura“. a) Verbreitung des untersuchungswürdigen Speicherkomplexes und des untersuchungswürdigen Barrierekomplexes im östlichen Norddeutschen Becken. b) Aus der Verschneidung der beiden untersuchungswürdigen Komplexe resultiert die Ausweisung des Speicher-Barriere-Komplexes.

In erster Linie wurde für einen Speicherkomplex nur derjenige Barrierekomplex mit einbezogen, der sich unmittelbar im Hangenden eines Speicherkomplexes befindet. Für die Speicher-Barriere-Komplexe 5 und 9 (siehe Tab. 3.1) wurden hingegen jeweils zwei stratigraphisch übereinander liegende untersuchungswürdige Speicherkomplexe zusammengefasst und mit dem darauf folgenden untersuchungswürdigen Barrierekomplex im Hangenden verschnitten, da in der stratigraphischen Abfolge dem tieferen Speicherkomplex kein Barrierekomplex unmittelbar im Hangenden folgt.

3.6 Potenzialgebiete

Die Speicher- und Barrieregesteine der Komplexe sind meist nicht flächendeckend verbreitet. Lateral verändert sich häufig die fazielle und somit auch lithologische Ausprägung der Gesteine. Daher werden in den verschiedenen Regionen unterschiedliche Speicher-Barriere-Komplexe ausgewiesen.

3.6.1 Stratigraphie der Speicher-Barriere-Komplexe

Die stratigraphische Abfolge der im Projekt Speicher-Kataster Deutschland untersuchten Speicher- und Barrierehorizonte reicht vom Rotliegend bis zur Kreide. Als potenzielle Speichergesteine wurden vorrangig poröse bis klüftig-poröse Sandsteine erfasst (REINHOLD et al., 2011). Als potenzielle Barrieregesteine eignen sich aufgrund geringer Durchlässigkeiten insbesondere Salz- und Tongesteine.

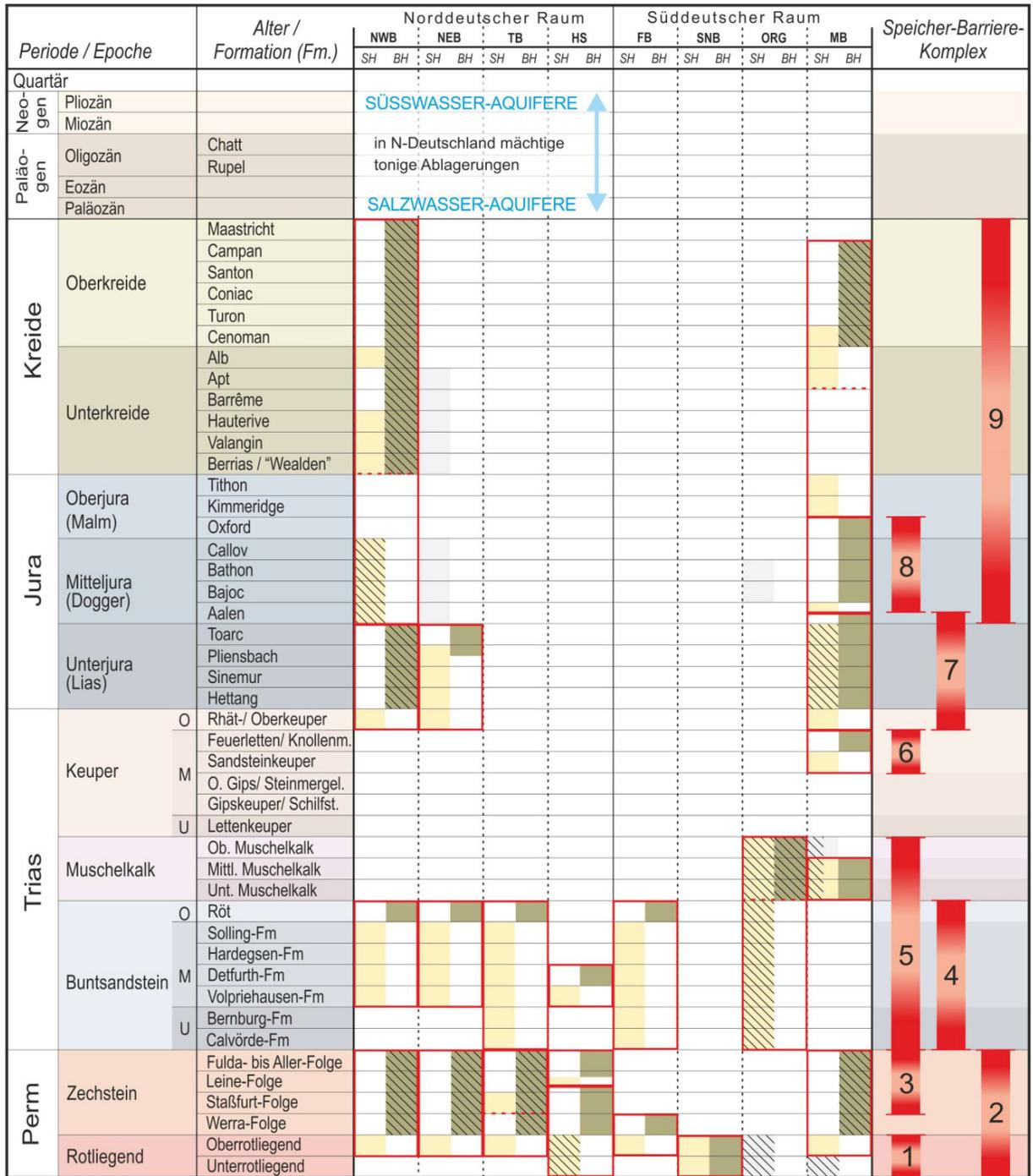
Alle im Projekt Speicher-Kataster Deutschland als untersuchungswürdig definierte Speicher- und Barrierekomplexe sind in Tabelle 3.1 in Speicher- und Barrierehorizonte (SH, BH) sowie nach wichtigen norddeutschen und süddeutschen Becken- und Senkungsgebieten untergliedert worden. Für die verschiedenen Regionen sind jeweils Kombinationen von untersuchungswürdigen Speicher- und Barrierekomplexen zu regionalen Speicher-Barriere-Komplexen zusammengefasst worden (rote Rahmung).

In fast allen Regionen sind mehrere stratigraphisch verschiedene Speicher-Barriere-Komplexe vorhanden. Beispielsweise werden im westlichen Teil des Norddeutschen Beckens vier Speicher-Barriere-Komplexe unterschieden, im östlichen Teil des Norddeutschen Beckens hingegen drei Speicher-Barriere-Komplexe. Im Süddeutschen Molassebecken werden sechs stratigraphisch verschiedene Speicher-Barriere-Komplexe und im Saar-Nahe-Becken nur ein Speicher-Barriere-Komplex ausgehalten.

In Einzelfällen besteht ein Speicher-Barriere-Komplex sogar aus zwei untersuchungswürdigen Speicherkomplexen und nur einem untersuchungswürdigen Barrierekomplex im Hangenden. Dieser Fall tritt im Jura und in der Kreide im westlichen Teil des Norddeutschen Beckens auf. Dort bilden der Mitteljura und die Unterkreide zwei separate Speicherkomplexe, die jeweils regional vom Barrierekomplex der Kreide überlagert werden. Ebenso besteht der Speicher-Barriere-Komplex im Oberrheingraben aus den untersuchungswürdigen Speicherkomplexen des Buntsandstein und Muschelkalk sowie dem Barrierekomplex des Muschelkalk. Im Molassebecken werden die untersuchungswürdigen Speicherkomplexe des Malm und der Unterkreide bis zur älteren Oberkreide vom untersuchungswürdigen Barrierekomplex der Oberkreide bedeckt und bilden zusammen einen Speicher-Barriere-Komplex. Einen Überblick über die Anzahl der stratigraphisch unterschiedlichen Speicher-Barriere-Komplexe pro Region gibt Tabelle 3.2.

Für die Kartendarstellung wurden verschiedene regionale Speicher-Barriere-Komplexe, die der gleichen Periode bzw. Epoche zugehörig sind, bundesweit zu einem Speicher-Barriere-Komplex (SBK) zusammengefasst. Für Deutschland ergeben sich somit stratigraphisch neun verschiedene Speicher-Barriere-Komplexe (rechte Spalte in Tabelle 3.1, sowie Tabelle 3.3).

Tab. 3.1: Stratigraphische und regionale Differenzierung der Speicher-Barriere-Komplexe (verändert nach MÜLLER & REINHOLD, 2011b).



- untersuchungswürdiger Speicherhorizont
 - untersuchungswürdiger Barrierehorizont
 - Speicher-Barriere-Komplex einer Region
 - untersuchungswürdiger Speicherhorizont ohne untersuchungswürdigen Barrierehorizont im Hangenden
 - Speicher-Barriere-Komplex (SBK)
 - Vorkommen mit undifferenzierter stratigraphischer Zuordnung
- NWB Nordwestdeutsches Becken
 NEB Nordostdeutsches Becken
 TB Thüringer Becken
 HS Hessische Senke
 FB Fränkisches Becken
 SNB Saar-Nahe-Becken
 ORG Oberrheingraben
 MB Molassebecken
- SH = Speicherhorizont
 BH = Barrierehorizont

Tab. 3.2: Anzahl der stratigraphisch unterschiedlichen Speicher-Barriere-Komplexe in den bearbeiteten Regionen.

Gebiete/Regionen	Anzahl der Speicher-Barriere-Komplexe
Molasse	6
Westlicher Teil des Norddeutschen Beckens	4
Östlicher Teil des Norddeutschen Beckens, Thüringer Becken, Hessische Senke	3
Fränkisches Becken	2
Saar-Nahe Becken, Oberrheingraben	1

Tab. 3.3: Speicher-Barriere-Komplexe (SBK).

Stratigraphie der Speicher-Barriere-Komplexe	Kurzform	Gebiete/Regionen
Mitteljura/Oberjura/Unterkreide – Kreide	SBK 9	Westlicher Teil des Norddeutschen Beckens, Molassebecken
Mitteljura – Mitteljura/Oberjura	SBK 8	Molassebecken
Oberer Keuper – Unterjura	SBK 7	Norddeutsches Becken, Molassebecken
Mittlerer Keuper – Mittlerer Keuper	SBK 6	Molassebecken
Buntsandstein/Muschelkalk – Muschelkalk	SBK 5	Molassebecken, Oberrheingraben
Buntsandstein – Buntsandstein	SBK 4	Norddeutscher Raum, Fränkisches Becken
Zechstein – Zechstein	SBK 3	Thüringer Becken, Hessische Senke
Rotliegend – Zechstein	SBK 2	Norddeutscher Raum, Fränkisches Becken, Molassebecken
Rotliegend – Rotliegend	SBK 1	Saar-Nahe-Becken

3.6.2 Verbreitung der Speicher-Barriere-Komplexe

Die potenziellen Speicher- und Barrieregesteine treten vorwiegend in großen Sedimentbecken auf. Das größte Sedimentbecken bildet das Norddeutsche Becken mit einer maximalen Sedimentmächtigkeit der spätpaläozoischen bis känozoischen Gesteinsabfolge von mehr als 10 km und einer Verbreitung im gesamten Norddeutschen Raum. Des Weiteren sind Gebiete im Thüringer Becken, in der Hessischen Senke, im Fränkischen Becken, im Saar-Nahe-Becken, im Oberrheingraben und im Süddeutschen Molassebecken (Alpenvorlandbecken) für die CO₂-Einlagerung untersuchungswürdig.

Die neun Speicher-Barriere-Komplexe (SBK) treten in verschiedenen Regionen Deutschlands auf (Abb. 3.5 bis 3.7). Der Speicher-Barriere-Komplex Rotliegend – Rotliegend (SBK 1) ist nur in wenigen zusammenhängenden Gebieten im Saar-Nahe-Becken verbreitet (Abb. 3.5a). Dagegen ist der Speicher-Barriere-Komplex Rotliegend – Zechstein (SBK 2) weiträumig im norddeutschen Raum einschließlich der Beckenrandgebiete sowie im Fränkischen Becken verbreitet (Abb. 3.5b). Der untersuchungswürdige Speicherkomplex Rotliegend ist nach BRANDES & OBST (2010) in Mecklenburg-Vorpommern sowie nach HABLE et al. (2011) in Schleswig-Holstein und Hamburg aufgrund der Lithologie und der Diagenese der Ablagerungen nicht als Porenspeicher geeignet. In dieser Studie ist daher das Verbreitungsgebiet des Rotliegend-Salinars in Schleswig-Holstein und Hamburg sowie im Norden von Niedersachsen und im Westen von Mecklenburg-Vorpommern nicht für den Speicher-Barriere-Komplex berücksichtigt worden. Die Verbreitung der jüngsten Rotliegend-Horizonte in salinärer Fazies reicht vom britisch-niederländischen Permbecken bis zur Müritz und zur Altmark (GAST, 1991; BALDSCHUHN & KOCKEL, 1998; GAST et al., 1998; REINHOLD et al., 2011).

Sowohl in Thüringen als auch in Hessen treten im Zechstein untersuchungswürdige Speicherkomplexe auf, die von dem Barrierekomplex Zechstein überlagert werden und den Speicher-Barriere-Komplex Zechstein – Zechstein (SBK 3) bilden (Abb. 3.5c).

Der Speicher-Barriere-Komplex Buntsandstein – Buntsandstein (SBK 4) ist im Norddeutschen Becken als großes zusammenhängendes Gebiet verbreitet (Abb. 3.5d). Jedoch beeinflussten salztektonische Bewegungen den Ablagerungsraum der Speicher- und Barrieregesteine im Norddeutschen Becken so, dass diese Gesteine gebietsweise erodiert oder nicht abgelagert wurden. Die Salzdiapire zeichnen sich als Verbreitungslücken des Speicher-Barriere-Komplexes ab und spiegeln diese Entwicklung im westlichen Teil des Norddeutschen Beckens und teilweise auch im Süden des östlichen Teils des Norddeutschen Beckens wider.

Die Potenzialgebiete des Speicher-Barriere-Komplexes Buntsandstein/Muschelkalk – Muschelkalk (SBK 5) beschränken sich auf den Oberrheingraben und das westliche Molassebecken (Abb. 3.6a). Dieser Speicher-Barriere-Komplex setzt sich aus zwei stratigraphisch unterschiedlichen Speicherkomplexen zusammen, die von dem Barrierekomplex Muschelkalk bedeckt werden (siehe Tab. 3.1). Die Verbreitung des Speicher-Barriere-Komplexes im Mittleren Keuper (SBK 6) beschränkt sich auf das westliche Molassebecken (Abb. 3.6b).

Der Speicher-Barriere-Komplex Oberer Keuper – Unterjura (SBK 7) ist im Norddeutschen Becken und im westlichen Molassebecken verbreitet (Abb. 3.6c). Dessen Verbreitung im Norddeutschen Becken ist sehr wechselhaft. Dagegen ist im Molassebecken ein zusammenhängendes Gebiet verbreitet. Der Speicher-Barriere-Komplex Mitteljura – Mitteljura/Oberjura (SBK 8) kommt im westlichen und östlichen Molassebecken flächenhaft vor (Abb. 3.6d).

Der Speicher-Barriere-Komplex Mitteljura/Oberjura/Unterkreide – Kreide (SBK 9) kommt wie der SBK 2, SBK 4 und SBK 7 sowohl im Norden als auch im Süden Deutschlands vor (Abb. 3.7). Im westlichen Norddeutschen Becken ist dieser Speicher-Barriere-Komplex sehr wechselhaft ausgebildet und besteht aus den Speicherkomplexen Mitteljura und Unterkreide sowie dem Barrierekomplex Kreide. Im östlichen Molassebecken tritt er in zwei zusammenhängenden Gebieten auf und wird von den Speicherkomplexen Oberjura und Unterkreide sowie dem Barrierekomplex Kreide gebildet.

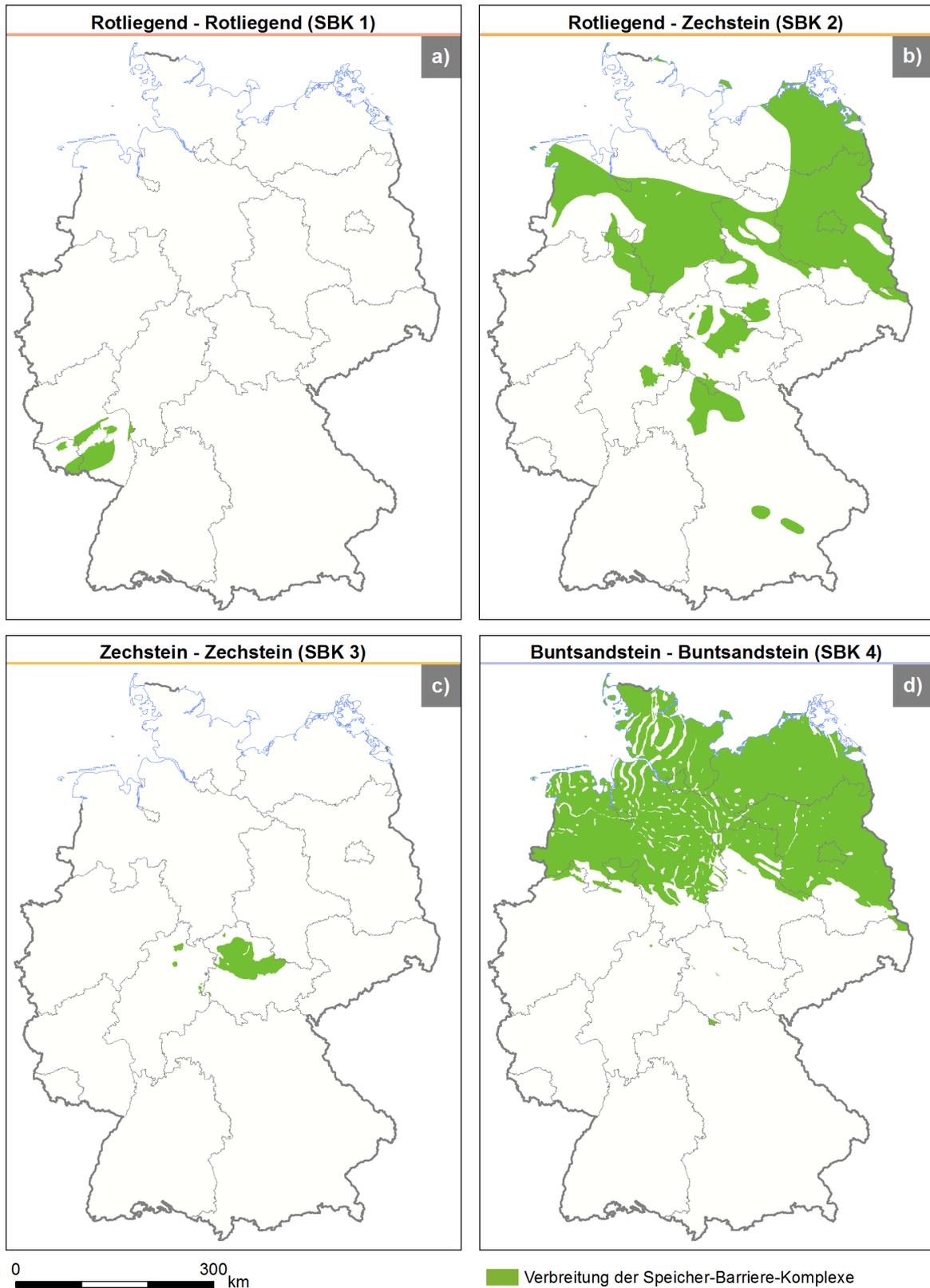


Abb. 3.5: Verbreitung der Speicher-Barriere-Komplexe SBK 1 bis SBK 4. a) Speicher-Barriere-Komplex Rotliegend – Rotliegend (SBK 1). b) Speicher-Barriere-Komplex Rotliegend – Zechstein (SBK 2). c) Speicher-Barriere-Komplex Zechstein – Zechstein (SBK 3). d) Speicher-Barriere-Komplex Buntsandstein – Buntsandstein (SBK 4).

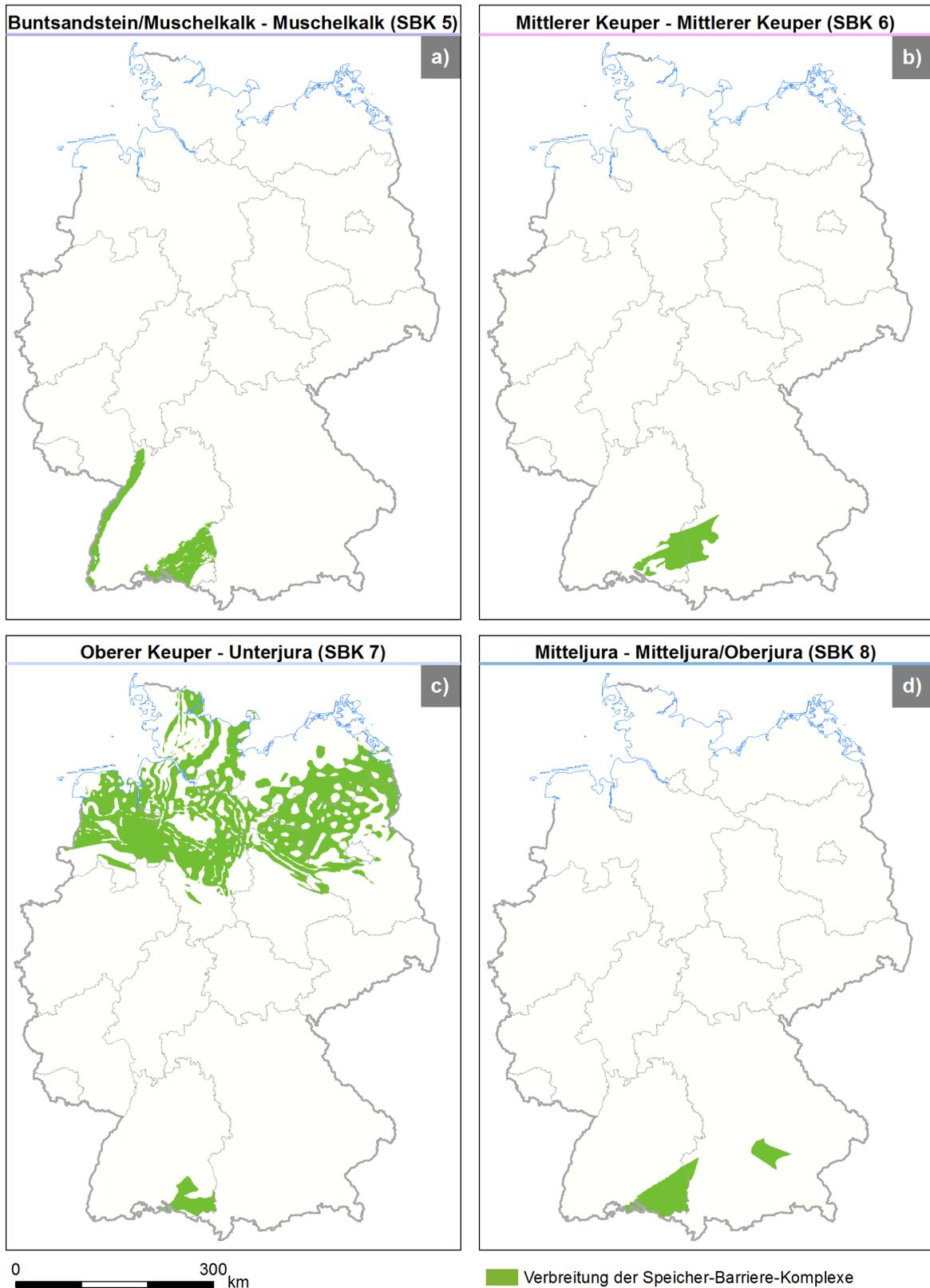


Abb. 3.6: Verbreitung der Speicher-Barriere-Komplexe SBK 5 bis SBK 8. a) Speicher-Barriere-Komplex Buntsandstein/Muschelkalk – Muschelkalk. b) Speicher-Barriere-Komplex Mittlerer Keuper (SBK 6). c) Speicher-Barriere-Komplex Oberer Keuper – Unterjura (SBK 7). d) Speicher-Barriere-Komplex Mitteljura – Mitteljura/Oberjura (SBK 8).

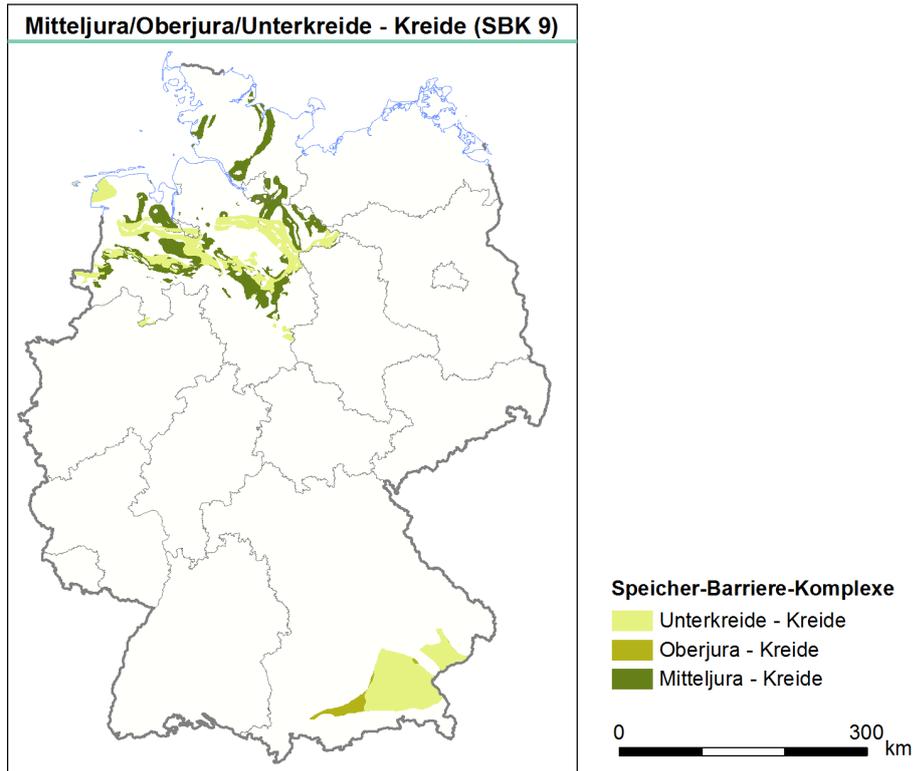


Abb. 3.7: Verbreitung des Speicher-Barriere-Komplexes (SBK 9).

Den prozentualen Anteil der einzelnen Speicher-Barriere-Komplexe an der Gesamtfläche Deutschlands zeigt Abbildung 3.8. Die flächenmäßig bedeutendsten Speicher-Barriere-Komplexe sind SBK 4 mit einem Anteil von 30 %, SBK 2 mit 23 % sowie der SBK 7 mit 15 %.

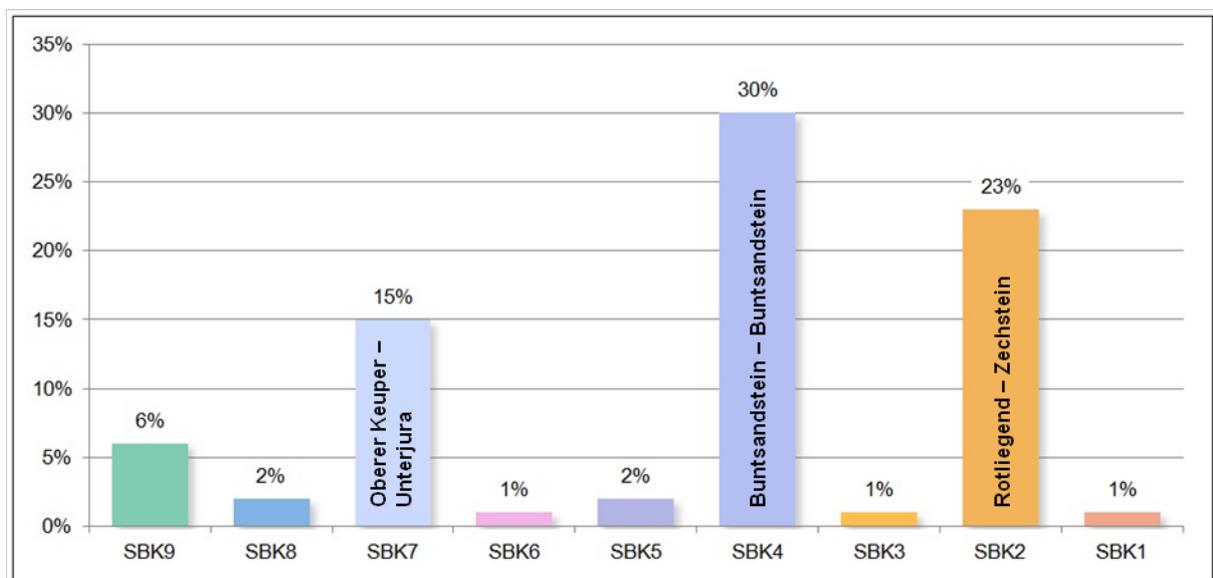


Abb. 3.8: Prozentualer Flächenanteil der Speicher-Barriere-Komplexe (SBK 1–9) an der Gesamtfläche Deutschlands.

3.6.3 Untersuchungswürdige Gebiete

Aus der Zusammenführung der Verbreitungsgebiete aller Speicher-Barriere-Komplexe (Abb. 3.9) ergibt sich die Gesamtverbreitung der untersuchungswürdigen Gebiete für eine CO₂-Einlagerung in Deutschland. Dieses Gesamtgebiet nimmt knapp 43 % der Gesamtfläche Deutschlands ein (Abb. 3.10).

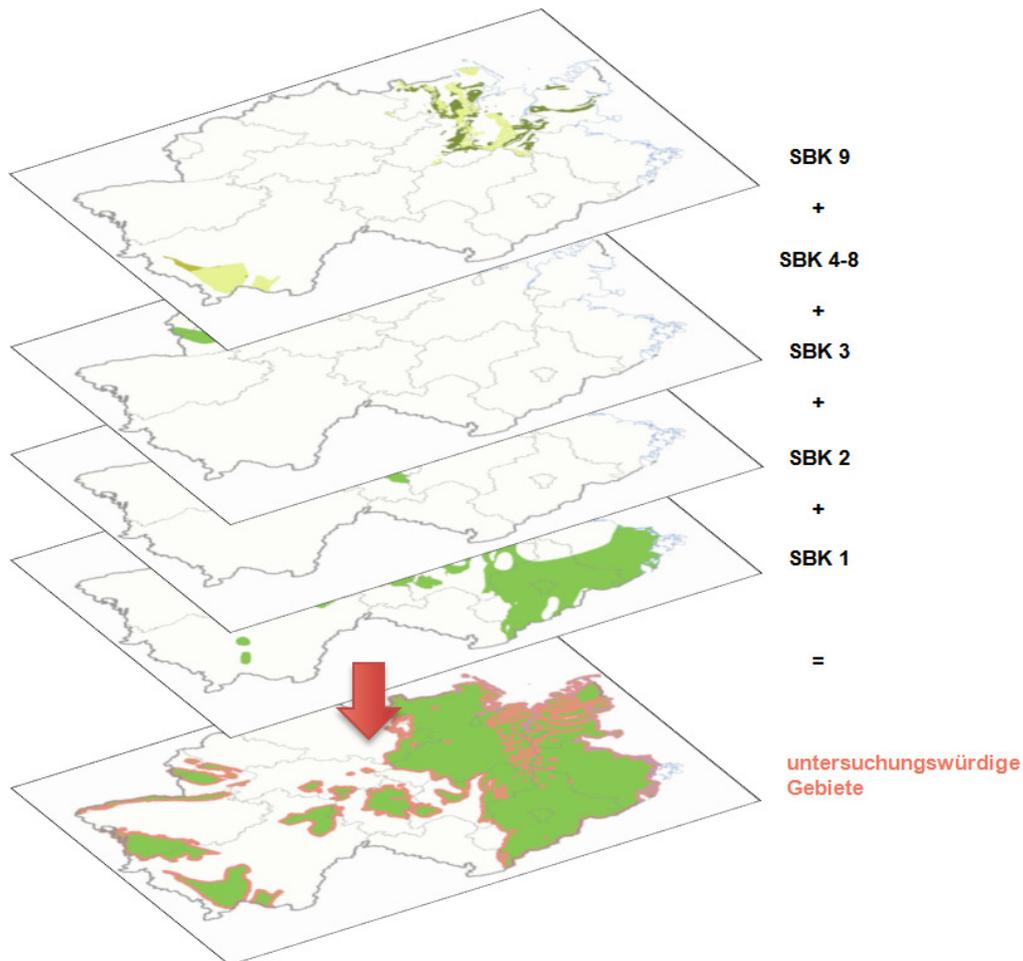


Abb. 3.9: Die Zusammenführung der Speicher-Barriere-Komplexe führt zu der integrierten Darstellung der untersuchungswürdigen Gebiete (rot umrandete grüne Flächen) für eine CO₂-Einlagerung in Deutschland.



Abb. 3.10: Verbreitung der für eine CO₂-Einlagerung untersuchungswürdigen Gebiete.

Die Gebiete mit an einer Lokalität übereinanderliegenden („gestapelten“) Speicher-Barriere-Komplexen können aus der Abbildung 3.11 entnommen werden.

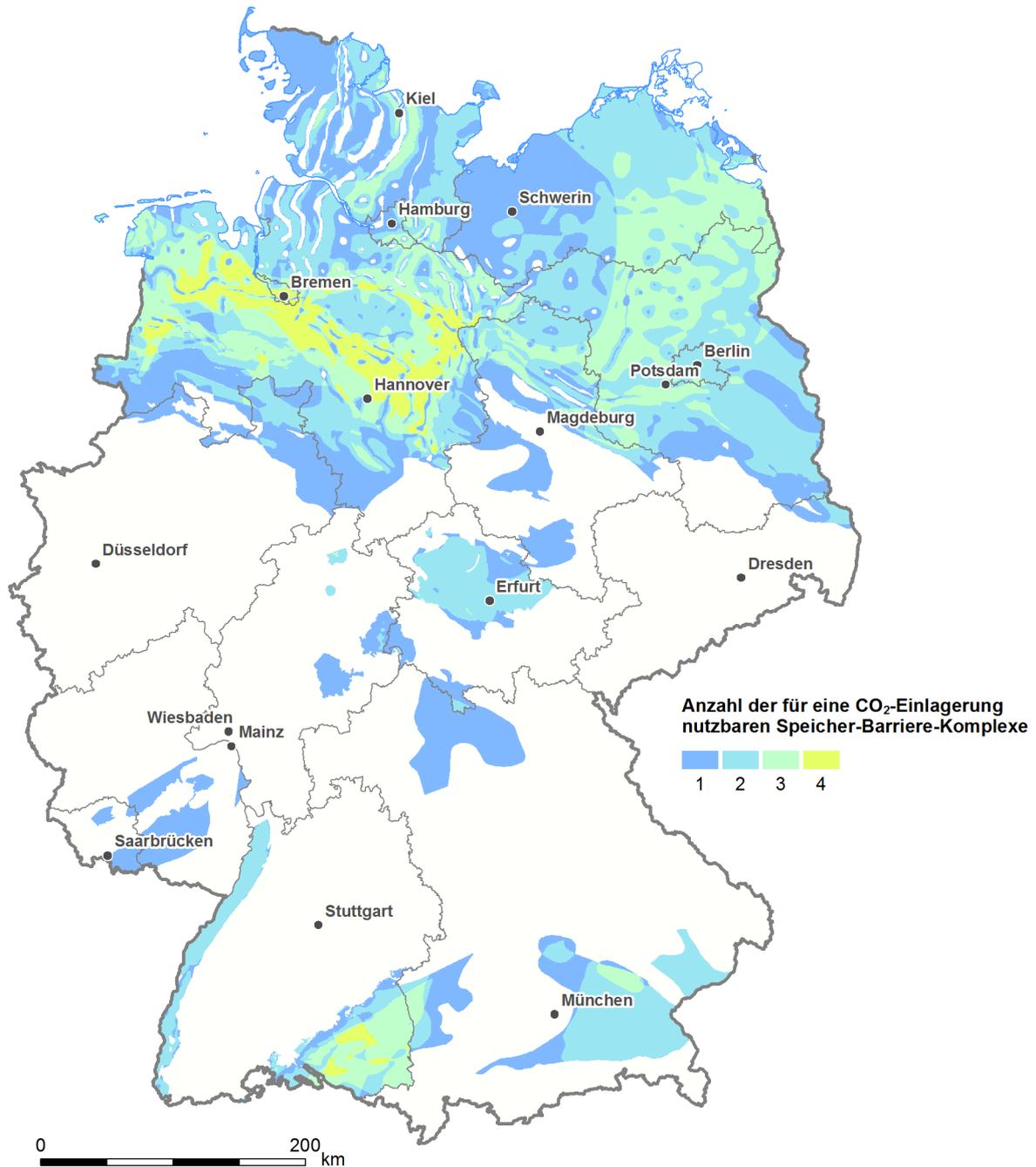


Abb. 3.11: Verbreitung und Anzahl der für eine CO₂-Einlagerung nutzbaren untersuchungswürdigen Speicher-Barriere-Komplexe.

3.7 Diskussion und Fazit

Diskussion

Da die vorliegende Studie auf den Ergebnissen des Projektes Speicher-Kataster Deutschland aufbaut, gelten deren Grenzen bezüglich Darstellung und Aussagekraft auch für diese Studie. Sie enthält keine qualitative und quantitative Bewertung des Speicherpotenzials, keine kleinräumigen Analysen der Lithologie, Porosität, Permeabilität, der Faziesverteilung, der geologischen Entwicklung und der geologischen Strukturen (REINHOLD et al., 2011).

Im Folgenden werden die Grenzen der Studie näher erläutert:

Im Projekt Speicher-Kataster Deutschland wurden nur die bedeutenden Speichergesteinshorizonte erfasst. Insofern umfassen die als untersuchungswürdig eingestuft Speicher- und Barrierekomplexe nur eine Teilmenge aller im tieferen Untergrund vorkommenden Gesteinshorizonte.

Die Auswahl der zu bearbeitenden Gesteinskomplexe erfolgte im Projekt Speicher-Kataster Deutschland jeweils von den Projekt-Bearbeitern der SGD der Bundesländer. Aufgrund von regionalen Unterschieden in der faziellen Ausprägung von stratigraphischen Horizonten sind in den Ländern unterschiedliche Prioritäten festgesetzt worden. So kann ein Komplex in einem Land bis zur Landesgrenze untersucht worden sein, jedoch jenseits der Grenze vom SGD des Nachbarlandes nicht, da der Komplex dort als nicht relevant eingestuft wurde. Aus diesem Grund kann eine Landesgrenze auch die Grenze eines Komplexes bilden.

Die Speicher- und Barrierekomplexe wurden im Projekt Speicher-Kataster Deutschland unabhängig voneinander betrachtet. Dabei wurden z. T. Speicherkomplexe betrachtet, die nicht unmittelbar im Hangenden von einem Barrierekomplex überlagert werden. Für die in dieser Studie erstellten Speicher-Barriere-Komplexe wurden hingegen Speicherkomplexe mit dem jeweils stratigraphisch nächstjüngeren Barrierekomplex in Beziehung gesetzt. Dabei decken die Barrierekomplexe die Speicherkomplexe nicht in jedem Fall unmittelbar ab. Die zwischen dem Speicherkomplex im Liegenden und dem dazugehörigen Barrierekomplex im Hangenden liegenden Gesteinshorizonte wurden nicht betrachtet. Ebenso wurden die möglicherweise innerhalb eines Speicherkomplexes auftretenden Barrierehorizonte nicht erfasst (vgl. Abb. 3.3).

In einigen Regionen konnte die Ausweisung von untersuchungswürdigen Gebieten der Gesteinskomplexe aufgrund eines unzureichenden Kenntnisstandes nur aus regionalgeologischen und paläogeographischen Trends abgeleitet werden. Solche vermuteten untersuchungswürdigen Gebiete sind undifferenziert bei der Ausweisung der insgesamt untersuchungswürdigen Gebiete für eine CO₂-Einlagerung in dieser Studie übernommen worden.

Im Projekt Speicher-Kataster Deutschland wurde keine Regionalisierung der petrophysikalischen Eigenschaften (Porosität, Permeabilität) der untersuchungswürdigen Speicherkomplexe vorgenommen, da die verfügbare Datengrundlage (Poro-Perm-Daten aus Bohrkernproben) nicht ausreichend war. Eine Aussage zu den petrophysikalischen Eigenschaften wäre je nach Fazies nur in einem begrenzten Umfeld einer Bohrung möglich. Am Beispiel der für das Speicher-Kataster verfügbaren Poro-Perm-Daten aus dem Mittleren Buntsandstein in Niedersachsen zeigte sich, dass die Aussagekraft aufgrund der insgesamt geringen Bohrungsdichte nur begrenzt ist. Allenfalls lokal in Gebieten mit hoher Bohrungsdichte wäre eine auf punk-

tuellen Messwerten beruhende Prognose der Gesteinseigenschaften möglich. Eine Einbeziehung der für die Bewertung der Speicher- und Transporteigenschaften wichtigen Parameter Porosität und Permeabilität als zusätzliches Bewertungskriterium könnte die Darstellung von untersuchungswürdigen Gebieten für eine CO₂-Einlagerung verändern.

Fazit

Die in dieser Studie auf Basis der Ergebnisse des Projektes Speicher-Kataster Deutschland erfolgte Kartierung von untersuchungswürdigen Gebieten für eine CO₂-Einlagerung ergab im Wesentlichen folgende Erkenntnisse:

Die untersuchungswürdigen Gebiete der Speicherkomplexe werden überwiegend im Hangenden von untersuchungswürdigen Barrierekomplexen überdeckt. Die Verschneidung von Speicher- und Barrierekomplexen führt also zu keiner wesentlichen Verringerung der Flächen der untersuchungswürdigen Gebiete der Speicherkomplexe.

In den meisten Regionen treten in mehreren geologischen Stockwerken Speicher-Barriere-Komplexe auf. Die höchste Anzahl an Speicher-Barriere-Komplexen, die für eine mögliche CO₂-Einlagerung an einer Lokalität zur Verfügung stehen, liegt bei vier. Solche Bereiche befinden sich im westlichen Norddeutschen Becken sowie im Westteil des Süddeutschen Molassebeckens.

Es gilt konsequent zu beachten, dass die verwendete Bezeichnung „untersuchungswürdig“ nicht gleichzusetzen ist mit „geeignet“. Die hier präsentierten Ergebnisse ersetzen in keiner Weise notwendige detaillierte Erkundungen des geologischen Untergrundes an potenziellen Speicherstandorten. Sie stellen lediglich untersuchungswürdige Gebiete für eine CO₂-Einlagerung dar.

4 Störungen, Störungszonen und Störungssysteme

Regionale und überregionale Störungssysteme sind sowohl für die Tiefe Geothermie als auch für die CO₂-Einlagerung von großer Bedeutung. Die hydraulischen Eigenschaften von Störungen in einer Region sind dabei ein entscheidendes Kriterium bei der Standortauswahl.

Störungen können im Vergleich zum Nebengestein erhöhte Durchlässigkeiten und Porositäten aufweisen, wodurch die Zirkulation von Grundwässern im Bereich der Störungzone möglich ist. Solche zirkulierenden Grundwässer können geothermisch genutzt werden. Dagegen wird man bei der CO₂-Einlagerung solche Störungen meiden, um das Risiko einer Leckage zu minimieren. Andere Störungen wirken wiederum hydraulisch abdichtend, so dass diese für den Fluidfluss eine Barriere darstellen.

Die Durchlässigkeit einer Störung kann entlang ihres Verlaufes durch Änderungen der Geometrie, der lithologischen Ausprägung sowie aufgrund von Änderungen in den Versatzbeträgen stark variieren. Auch innerhalb von Störungszonen haben kleinskalige Veränderungen der Lithologie und Deformation einen großen Einfluss auf die Durchlässigkeit.

4.1 Definitionen und Eigenschaften

Störungen, Störungszonen und Störungssysteme entstehen durch Brechen der Festgesteine in der spröden oberen Erdkruste.

Eine **Störung** ist in erster Näherung als eine Bruchfläche zu beschreiben, entlang derer sich die Gesteinskörper gegeneinander bewegt haben. Im Unterschied zu Klüften weisen Störungen einen merklichen Versatz im Gesteinsgefüge auf, der von Zentimetern bis zu Zehnerkilometern reichen kann (MATTAUER, 1993). In Abbildung 4.1a ist eine skizzenhafte Generalisierung einer Störung dargestellt. Auf den Bruchflächen in Aufschlüssen sind oft gerichtete Spuren (Striemungen bzw. Harnische) zu beobachten, die aus der Reibung der bewegten Gesteinskörper zueinander resultieren oder Mineralisierungen in Richtung der Bewegung anzeigen. Daraus lässt sich die Bewegung der Gesteinskörper zueinander ableiten (Abb. 4.1a). Störungen lassen sich nach ihren Bewegungsrichtungen in Abschiebungen, Auf- bzw. Überschiebungen sowie in Blattverschiebungen klassifizieren. Bei einer Einengung der Kruste entstehen vorrangig Aufschiebungen, während bei einer Dehnung der Kruste vorrangig Abschiebungen dominieren. Blattverschiebungen sind Störungen mit einer überwiegend horizontalen Verschiebungskomponente und können sowohl in extensiven als auch kompressiven Regimen vorkommen.

In geologischen und strukturgeologischen Karten sind die Bereiche an denen die Bruchflächen die Erdoberfläche schneiden maßstabsbedingt als Linien dargestellt. Bei näherer Betrachtung zeigt sich jedoch, dass Störungen vielmehr als 3D-Körper beschrieben werden müssen.

Störungszonen sind komplexe geologische Körper, mit einer häufig heterogenen Internstruktur, die sich entlang des Störungsverlaufs teils deutlich ändern kann. In Abbildung 4.1b ist der Internbau einer Störungzone (Bruchzone und Störungskern) schematisch dargestellt. Die Breite von Störungszonen kann zwischen wenigen Zentimetern bis einigen Hundertmetern variieren.

Störungszonen beinhalten oft Scharen von Bruchflächen und kleineren Klüften mit unterschiedlichen Versatzbeträgen der Schichten, sowie Bereiche plastischer Deformation. Sie können auch aus unterschiedlich groß zerbrochenem, unsortiertem Ma-

terial bestehen, das infolge der Bewegung vom Störungsrand mitgerissen wurde und je nach Korngröße als Störungsbrekzie, Kataklasit oder Mikrobrekzie bezeichnet wird.

Störungssysteme bilden Scharen einzelner genetisch zusammenhängender Störungen, welche häufig abgrenzbare Gebirgseinheiten voneinander trennen und erdgeschichtlich über lange Zeiten aktiv gewesen sein können. Hierzu zählen beispielsweise komplexe, invertierte Strukturen, wie in Abbildung 4.2 anhand eines interpretierten seismischen Profils im Oberen Allertal dargestellt (BEST & ZIRNGAST, 2002).

Sockelstörungen sind in diesem Zusammenhang alle im „Sockel“ ausgebildeten Störungszonen. Hierbei stellt z. B. im Norddeutschen Becken der „Sockel“ den Teil des Untergrundes dar, der sich unterhalb des Steinsalzes des zweiten Zechstein-Zyklus (Stäufurt-Folge) befindet (KOCKEL & KRULL, 2000; BRÜCKNER-RÖHLING et al., 2002). Störungen im Subsalinar bezeichnet Störungen, die sich unter den Salzen des Rotliegend und des Zechstein befinden.

Als eine **Hauptstörung** wird gewöhnlich die Störung einer Störungszone bzw. Störungssystems bezeichnet, die die Kinematik und Dynamik des Systems vorgibt und in der Regel den größten Versatz aufweist. Die in Norddeutschland verbreiteten längsgestreckten Salzmauern zeigen häufig einen Bezug zu größeren Störungszonen im Grundgebirge (Abb. 4.2). Salzstrukturen werden im Rahmen dieser Studie jedoch nicht betrachtet.

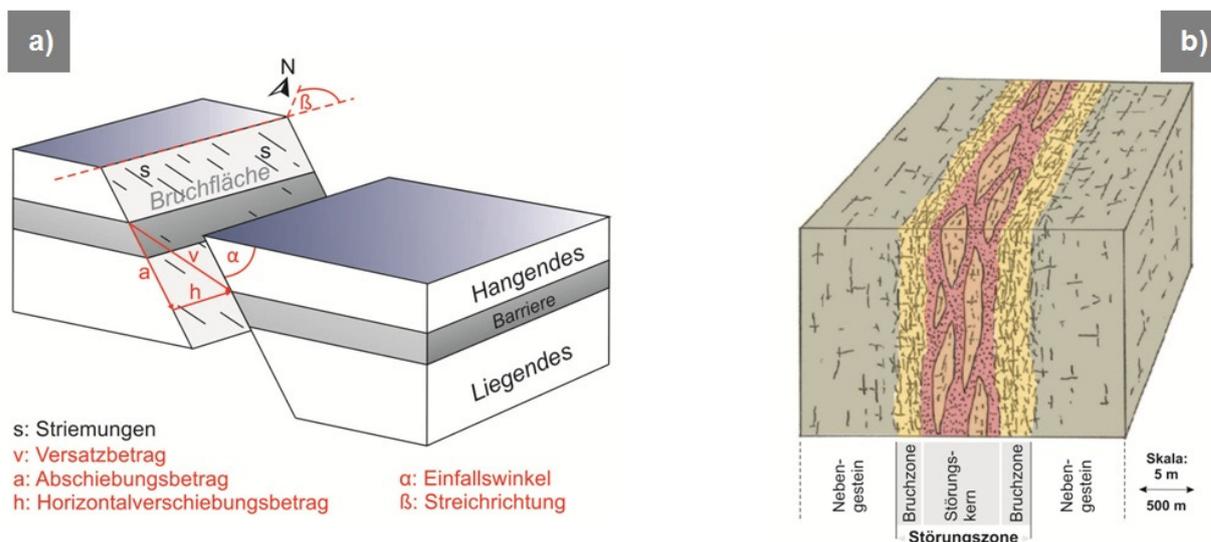


Abb. 4.1: Schematische Darstellung einer Störung und Störungszone. a) Wesentliche Begriffe zur geometrischen Charakterisierung einer Störung (in diesem Fall eine Abschiebung mit Blattverschiebungskomponente). b) Schema des Internbaus einer Störungszone: Nebengestein, Bruchzone und Störungskern (nach FASCHING & VANEK, 2011).

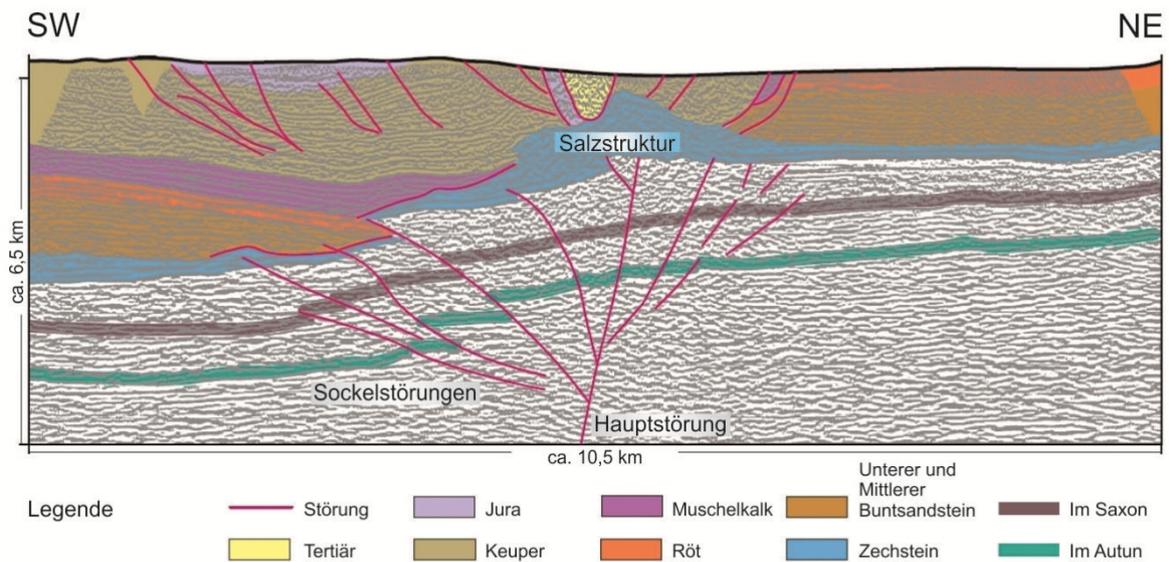


Abb. 4.2: Darstellung eines komplexen Störungssystems im Bereich des Oberen Allertal (BEST & ZIRNGAST, 2002).

Die Durchlässigkeit einer Störung kann entlang ihres Verlaufes an verschiedenen Punkten sehr unterschiedlich ausgebildet sein. Zudem unterscheidet sich die Durchlässigkeit parallel zur Störungsfläche von der Durchlässigkeit durch die Störungszone hindurch.

Der Kenntnisstand zur Verteilung von Porositäten und Permeabilitäten entlang von Störungszonen ist für viele Störungen und Störungszonen in Deutschland nicht gegeben. Ausnahmen bilden jedoch Störungen im Bereich von Erdöl- und Erdgasreservoiren, bei denen aufgrund der Fördergeschichte hydraulische Eigenschaften der Störungen abgeleitet werden konnten. So zeigt die Erfahrung bei der Produktion und Exploration verschiedener Kohlenwasserstoffreservoirs oftmals eine Kompartimentalisierung einzelner Bereiche der Lagerstätte, in denen Störungen nachweislich abdichtend wirken (STOLL, 1981; SCHUMACHER & MAY, 1990; ANTRETT et al., 2012).

Der Störungskern (Abb. 4.1b) inaktiver Störungen weist aufgrund des meist brekziierten, hydraulisch dichten Materials eine geringere Permeabilität als das Nebengestein auf. Die Bruchzone dagegen zeigt infolge einer erhöhten Zahl an Brüchen und Klüften eine erhöhte Permeabilität im Nebengestein. Die Ausbildung von Störungskern und Bruchzone beeinflusst die Durchlässigkeit einer Störungszone. Die Abbildung 4.3 veranschaulicht ein schematisches Konzept der Permeabilitätsstruktur in Störungszonen. Je größer die Bruchzone und je geringmächtiger der Störungskern, umso größer ist die Durchlässigkeit einer Störung im untersuchten Bereich. Je größer der Störungskern und je geringmächtiger die Bruchzone, umso größer ist die Barrierewirkung. Eine sogenannte lokale Barriere wirkt abdichtend, so dass in diesem Fall keine Durchlässigkeit eines Fluides gegeben ist. Kleinere Störungen können als lokale Leiter für Fluide durchlässig sein. Bei verteilten Leitern ist eine erhöhte Durchlässigkeit für Fluide zu erwarten. Sie bieten gute Möglichkeiten für eine geothermische Nutzung, könnten aber u. U. für eine CO₂-Einlagerung von Nachteil sein (Tab. 4.1). Barriere-Leiter-Systeme können beispielsweise für den lateralen Fluidfluss innerhalb einer Formation Barrieren darstellen, während sie vertikale

Durchlässigkeiten für den Fluidfluss zwischen Formationen in unterschiedlichen Tiefen bieten können.

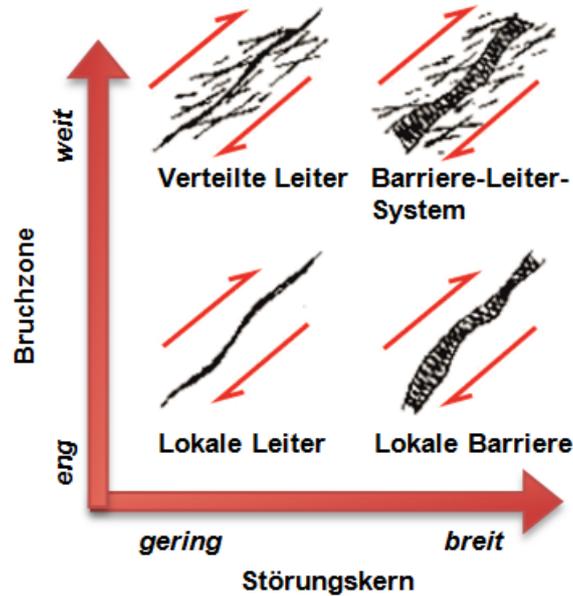


Abb. 4.3: Schematisches Konzept der Permeabilitätsstruktur an Störungszonen mit Endgliedern: Verteilter Leiter, lokaler Leiter, lokale Barriere sowie Barriere-Leiter-System (verändert nach CAINE et al., 1996).

Tab. 4.1: Übersicht über die verschiedenen Leiter-Barriere-Typen und deren möglicher Anwendungsbereich.

Schema	Typ	Bruchzone	Störungskern	möglicher Nutzen
	Lokaler Leiter	eng	gering	
	Lokale Barriere	eng	breit	Barriere von Speicherstrukturen
	Verteilter Leiter	weit	gering	Geothermische Energiegewinnung
	Barriere-Leiter-System	weit	breit	

REYER et al. (2010) konnte an aufgeschlossenen Störungen in Norddeutschland deutliche Unterschiede in der Architektur der Störungszonen in verschiedenen Sedimentgesteinen feststellen. Von den untersuchten Störungszonen weisen solche in reinen Kalksteinen höhere Permeabilitätswerte auf als solche in Sandsteinen, deren Bruchzonen meistens geringmächtig sind. Ebenso können Versatzbeträge nach Untersuchungen aufgeschlossener Störungen in den Gesteinen des Muschelkalk für die interne Struktur an Störungen wichtig sein. Ist der Versatz kleiner, so ist auch der Störungskern geringmächtiger, der beispielsweise an inaktiven Störungszonen durch Toneinschmierungen Versiegelungsflächen hervorrufen kann (MEIER et al., 2012).

Weiterhin gibt es Publikationen zur Mineralisation entlang von Störungen (z. B. GROBE & MACHEL, 1997) und zu rezenten Fluidaustritten entlang von Störungszonen. Diese Informationen erlauben ebenfalls Rückschlüsse auf die mögliche Dichtigkeit oder Durchlässigkeit von Störungen. Beim Aufstieg mineralisierter Thermalwässer in Klüften und Störungen können Minerale ausgefällt werden. Quarzgänge sind häufig Zeugnis solcher Hydrothermalsysteme wie zum Beispiel der Bayerische Pfahl (FREUDENBERGER & SCHWERD, 1996). Sie zeigen, dass die Fluidbewegung in aktiven Störungszonen episodisch verläuft. Die Mineralausfällung kann zur Selbstversiegelung der Störungen führen. Bei andauernder Verschiebung der Gesteine entlang der Störungzone kommt es aber auch wiederholt zu Brüchen und erneutem Durchströmen der Störung. Trotz starker Mineralisationen an alten inaktiven Störungen können deren mögliche Bruchzonen noch den Durchfluss von Fluiden ermöglichen (Barriere-Leiter-System).

4.2 Datengrundlage

Welche Eigenschaften von Störungen und Störungszonen beschrieben werden können, ist von der gegebenen Datengrundlage abhängig. Nur ein geringer Teil der Störungen und Störungszonen ist an der Oberfläche bzw. in Bergwerken aufgeschlossen, wo deren Eigenschaften untersucht werden könnten. Informationen zu erfassten Störungen und Störungszonen stammen aus folgenden Datenquellen:

- geologische Karten und Kartenwerke,
- geologische Publikationen und Berichte der Staatlichen Geologischen Dienste.

Weiterhin können für Aussagen über Störungen folgende Daten verwendet werden:

- Bohrlochdaten und geophysikalische Messdaten,
- Aufschlussdaten und Vergleichsstudien,
- Fördergeschichte von Lagerstätten.

Geologische Karten beinhalten meist grundlegende strukturgeologische Informationen wie z. B. das Streichen von Störungen. Häufig sind den geologischen Karten geologische Profilschnitte beigefügt, um die Lagerungsverhältnisse der Gesteinsschichten zu verdeutlichen. Neben den meisten geologischen Karten, die die Verteilung der Lithologie und Stratigraphie an der Oberfläche abbilden, zeigen beispielsweise Tiefenhorizontkarten die Verbreitung eines Gesteinshorizonts mit der Tiefe. Niveauschnittkarten verdeutlichen dagegen die geologischen Verhältnisse auf einer einheitlichen Tiefe (z. B. 1.000 m Tiefe u. NN). Spezielle tektonische Kartenwerke stellen neben der Länge und dem Streichen der Störungen auch weitere gemessene oder abgeleitete Eigenschaften (z. B. Einfallen, Alter, Genese, Bewegungssinn) dar. Abbildung 4.4 zeigt eine Übersicht geologischer Kartenwerke mit strukturgeologischen Inhalten, geordnet nach Veröffentlichungsjahr und den jeweils dargestellten

Gebieten. Dabei ist zu bemerken, dass viele der Kartenwerke in Teilen aufeinander aufbauen und häufig auch Weiterentwicklungen oder Generalisierungen darstellen. Hierbei wurden überregionale Karten (grün) und regionale Karten (rot) unterschieden. Ein Teil der überregionalen Karten in dieser Abbildung wurden bisher nicht publiziert (blassgrün). In der Abbildung haben die Literaturzitate eine laufende Nummer (rote Ziffern). Die schwarzen Ziffern verweisen auf die Karten, die dabei als Grundlage zur Erstellung der neuen Karten dienten.

	Ost	Nord	West	Süd
bis 1980		1 Geologisches Landesamt Hannover (1946): Geotektonische Karte von NW-Deutschland (1 : 100 000)		
				2 CARLE (1950): Geotektonische Übersichtskarte der südwestdeutschen Großscholle (1 : 1 000 000)
		3 KÖLBEL (1962): Geologische Karte der DDR (1 : 500 000)		
		4 SCHUHMACHER (1964): Geologische Karte der DDR (1 : 500 000)		
		5 GAERTNER et al. (1968): Karte der Orogenetischen Entwicklung / Fazieskarte der Lithotektonik (1 : 2 500 000)		
		6 AHRENS (1972): Neotektonik DDR (1 : 1 000 000)		
		7 WALTHER & ZITZMANN (1973): Geologische Karte der Bundesrepublik Deutschland (1 : 1 000 000)		
		8 KÖLBEL (1977): Tektonisches Kartenschema von Mitteleuropa (1 : 2 500 000)		
		9 BGR & SGD (1973 bis 2003): Geologische Übersichtskarten (GÜK 200) (1 : 200 000)		
		10 ZITZMANN (1981): Tektonische Karte der Bundesrepublik Deutschland (1 : 1 000 000)		
1980 – 1990		11 REINHARDT & EEGommern (1982): Komplexgeophysikalische Strukturkarte DDR (1 : 500 000)		
		12 KATZUNG et al. (1984): Geothermie-Atlas der DDR (1 : 1 500 000)		
		13 HAENEL & STAROSTE (1988): Atlas of Geothermal Resources in the European Community, Austria and Switzerland		
1990 – 2000		14 RÖLLIG et al. (1990): Geologische Karte der DDR ohne Känozoische Sedimente (1 : 500 000)		
		15 SÖLLIG & RÖLLIG (1990): Tektonische Karte der DDR (1 : 500 000) 11, 14 → 15		
		16 BGR (1993): Geologische Karte der Bundesrepublik Deutschland (1 : 1 000 000) 9 → 16		
ab 2000		17 BALDSCHUHN et al. (1996): Geotektonischer Atlas NW-Deutschland (1 : 300 000)		
		18 BALDSCHUHN et al. (2001): Geotektonischer Atlas NW-Deutschland und deutscher Nordsee-Sektor (1 : 300 000) 17 → 18		
		19 DOORNEBAL & STEVENSON (eds.) (2010): Petroleum Geological Atlas of the Southern Permian Basin (SPBA) (1 : 1 000 000) 11, 18 → 19		

Abb. 4.4: Übersicht regionaler und überregionaler geologischer Karten und Kartenwerke mit strukturgeologischen Inhalten in Deutschland.

4.3 Übersichtskarte der Störungszonen

Für diese Studie wurden regionale bzw. überregionale Störungen, Störungszonen und Störungssysteme aus bestehenden Kartenwerken ausgewählt und in einer bundesweiten GIS-Karte im Maßstab 1 : 1 000 000 generalisiert dargestellt. Zudem wurden Publikationen, die spezifisch diese Störungen oder deren strukturelles Umfeld beschreiben, recherchiert und den Störungen zugeordnet. Dabei erfolgte eine Erfassung der Publikationen als Zitat in einer Literatur-Datenbank. Die Literatur-Zitate umfassen wichtige geologische Karten und Kartenwerke mit strukturellen Inhalten sowie Veröffentlichungen, Artikel und Berichte. Im Fokus der Recherche standen Gebiete, die bevorzugt für die Tiefe Geothermie und für die geologische CO₂-Einlagerung in Betracht kommen (Kapitel 2 und 3). Es wurden aber auch wichtige Störungszonen aus angrenzenden Gebieten erfasst.

4.3.1 Methodik und Generalisierungsschritte

Für die Erstellung der GIS-Karte im Maßstab 1 : 1 000 000 standen geologische Karten unterschiedlicher Maßstäbe, GIS-Shape-Dateien sowie WMS-Dienste (Web Map Service) zur Verfügung. Folgende Karten wurden verwendet:

- Geologische Übersichtskarte von Mecklenburg-Vorpommern - Nutzhorizonte im Mittleren Buntsandstein, 1 : 500 000 (OBST & BRANDES, 2011),
- Geologische Übersichtskarte von Sachsen-Anhalt, Tektonische Übersichtskarte von Sachsen-Anhalt, 1 : 500 000 (MARTIKLOS et al., 2001),
- Geologische Karte von Bayern, 1 : 500 000 (FREUDENBERGER & SCHWERD, 1996),
- Geologische Karte der Deutschen Demokratischen Republik, geologische Karte ohne känozoische Sedimente, 1 : 500 000 (RÖLLIG et al., 1990),
- Tektonische Karte der Bundesrepublik Deutschland, 1 : 1 000 000 (ZITZMANN, 1981),
- Tiefenlinienkarten der Horizonte Zechsteinbasis bis Unterkreidebasis, Southern Permian Basin Atlas (SPBA) (DOORNENBAL & STEVENSON, 2010),
- Generalisierte Darstellung der Störungen und Störungszonen, Erstellung von Potenzialkarten und Charakterisierung von Speicherstrukturen in Thüringen für den Aufbau eines Informationssystems (ZANDER & HUCKRIEDE, 2010),
- Tiefenlinienkarten der Horizonte Zechsteinbasis und Tertiärbasis des Regionalen geophysikalischen Kartenwerkes (REINHARDT, 1986-1989),
- Karte der Sockelstörungen, Projekt Gorleben, Standsicherheitsnachweise Nachbetriebsphase: Seismische Gefährdung (BRÜCKNER-RÖHLING et al., 2002).

WMS-Daten von Störungen und Störungszonen folgender Staatlicher Geologischer Dienste der Bundesländer wurden verwendet:

- Tektonik im Maßstab 1 : 300 000 (GÜK 300) (Regierungspräsidium Freiburg, Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (LGRB), 2006),
- Geologische Übersichtskarte im Maßstab 1 : 500 000 (GÜK 500) (GEOLOGISCHER DIENST NORDRHEIN-WESTFALEN (GD NRW), 2004),

- Störungen im Maßstab 1 : 300 000 (GÜK 300) (LANDESAMT FÜR GEOLOGIE UND BERGBAU RHEINLAND-PFALZ (LGB), 2003).

Die Datensätze der Störungen wurden soweit erforderlich georeferenziert, vektorisiert und in einer Shape-Datei (ArcGIS) zusammengeführt. Die Projektion der Linien erfolgte im Gauß-Krüger-Koordinaten-System, einheitlich bezogen auf den dritten Meridianstreifen (9° östl. Länge).

Des Weiteren erfolgte je nach Bedarf eine geometrische Bearbeitung der Störungslinien. Anschließend erfolgte die Generalisierung der Störungen für eine übersichtliche Darstellung im Maßstab 1 : 1 000 000 beruhend auf folgenden Arbeitsschritten:

- Vergleich von verschiedenen geologischen Kartenwerken derselben Region;
- Störungen und Störungszonen wurden auf ihre Plausibilität überprüft (insbesondere, wenn sie nur in einem Kartenwerk verzeichnet sind);
- Verwendung von Störungen und Störungszonen, die bevorzugt in stratigraphisch älteren Gesteinshorizonten ausgebildet sind (z. B. Zechsteinbasis und Basis Unterer Buntsandstein);
- es wurden nur Störungen in die Karte übernommen, deren Störungsverlauf mindestens 5 km lang ist;
- regionale Störungen, die bis zu 5 km nebeneinander liegen, wurden zu einer Störungszone zusammengefasst (Abb. 4.5a, b);

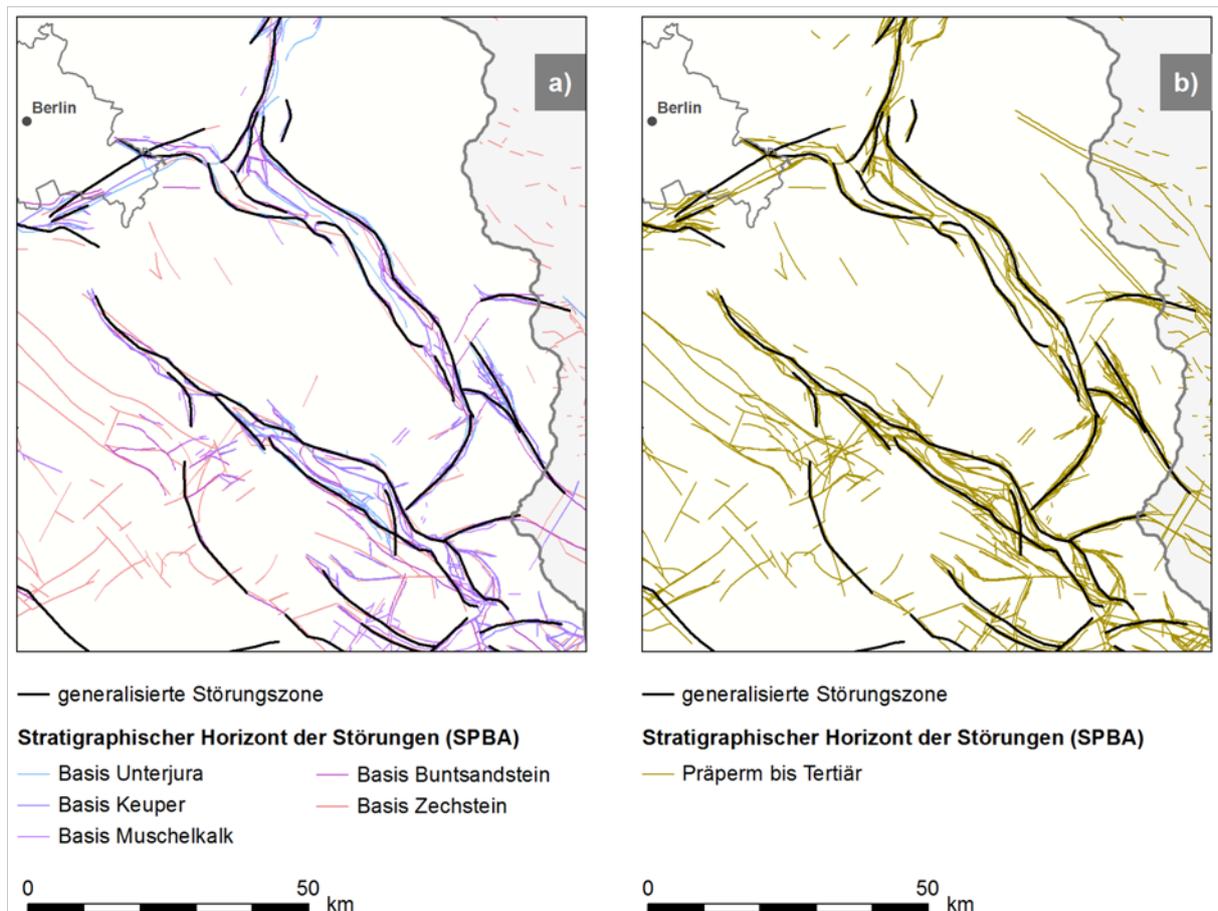


Abb. 4.5: Zusammenfassung von Störungen zu generalisierten Störungszonen und Störungssystemen am Beispiel eines Kartenausschnittes. Die dargestellten Störungen wurden aus dem SPBA entnommen (DOORNENBAL & STEVENSON, 2010). a) Zechstein bis Unterjura. b) Präperm bis Tertiär.

- regionale Störungen, deren Störungsspuren in einzelnen Horizonten eines Tiefenkartenwerkes nebeneinander liegen (häufig durch das Einfallen der Störungen), wurden zu einer Störungszone zusammengefasst (Abb. 4.5a, b);
- sind die Linien von Störungszone auf der Karte um weniger als 1 km horizontal versetzt, so werden diese generalisiert ohne Versatz dargestellt (Abb. 4.6).

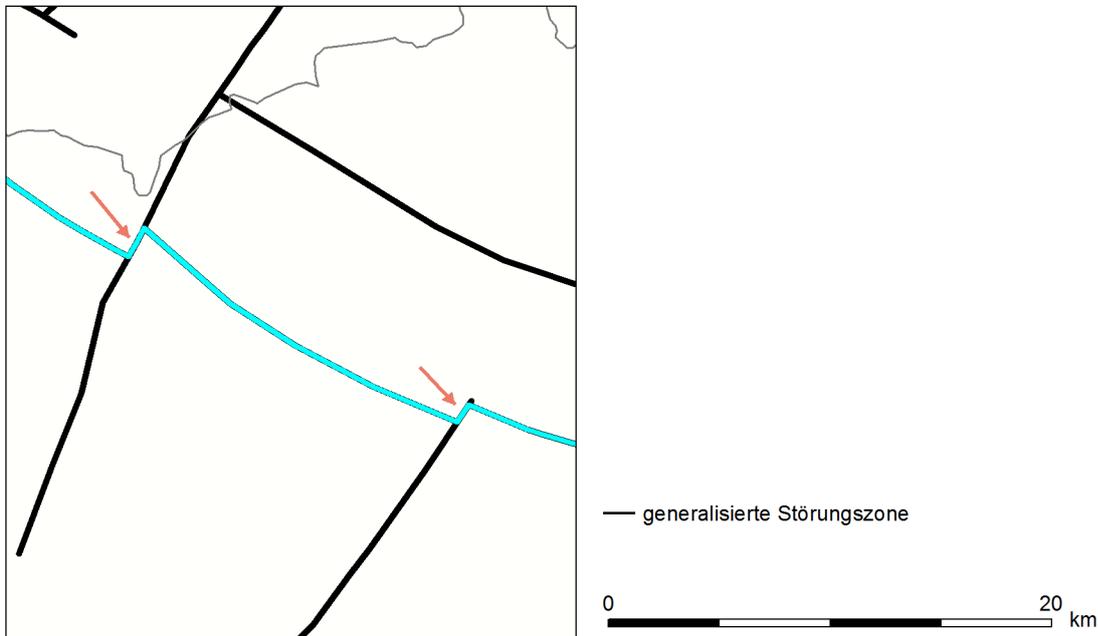


Abb. 4.6: Sind die Linien von Störungszone auf der Karte um mehr als 1 km horizontal versetzt (rote Pfeile an der blauen Linie), so bleibt diese Abweichung erhalten.

4.3.2 Attributierung der Störungszone

Verschiedene Eigenschaften, die in den vorliegenden geologischen Karten die Störungen näher beschreiben, wurden in die GIS-Shape-Datei übernommen und können über ein Identifizierungswerkzeug bei Auswahl der betreffenden Struktur abgefragt werden (Abb. 4.7). Im Feld „Kategorie“ sind z. B. der Störungstyp (wie Auf-, Über-, Abschiebung und Blattverschiebung) oder beschreibende Begriffe (siehe Kapitel 4.1) wie „Sockelstörung“, „Störung im Subsalinar“, „Hauptstörung“, „Störung“ bzw. „Störung allgemein“ übernommen. Das Feld „Horizont“ benennt gegebenenfalls den geologischen Horizont (Perm, Basis Zechstein, Basis Buntsandstein, Basis Oberer Buntsandstein, Basis Tertiär und oberflächennah), für den die Lage der Störungszone (aus Tiefenhorizontkarten) dargestellt ist.

Zusätzlich wurden die Linien um die genannten Quellen und Störungszone-Namen sowie um weitere Eigenschaften ergänzt, die sich im GIS aufgrund geometrischer Beziehungen herleiten lassen. Zu diesen Eigenschaften gehören die Länge, die GÜK 200-Blattnummer in der die Störung liegt, und deren Anzahl pro Störungszone sowie die Streichrichtung der Störungszone. Die Angabe der Streichrichtung einer Störungszone erfolgte neben der Gradzahl (0 bis 180°) in den entsprechenden Himmelsrichtungen (z. B. NW – SE). Hierbei bildet die Streichrichtung die kürzeste Verbindung zwischen dem Anfang und Ende einer Störungslinie. Stark gekrümmte Störungslinien wurden in mindestens zwei verschiedene Störungssegmente unterteilt. In

der Liste der Attribute ist ebenso vermerkt, wenn die Störungszone den Grundriss einer Salzstruktur (Salzdiapir oder Salzkissen) schneidet.

Field	Value
Anzahl_GUE	3
Bemerkung	
Code_Nr	S21111
FID	789
GUEK200__1	CC3118
GUEK200__2	CC3918
GUEK200__3	CC3926
GUEK200__4	
GUEK200__5	
GUEK200_Bl	CC3118 (Hamburg-West); CC3918 (Hannover); CC3926 (Braunschweig)
Horizont	
ID_Nr	819
Kategorie	Sockelstörung
Laenge_km	121
Name	Bassen-Celle-Störungszone
Quelle	Brückner-Röhling et al. (2002)
Salzstrukt	Salzdiapir
Shape	Polyline
Streich_°	123
Streichen	WNW - ESE

Abb. 4.7: Beispiel der Attribut-Tabelle für eine in der GIS-Shape-Datei erfassten generalisierten Störungszone.

Abbildung 4.8 zeigt die nach einheitlichen Kriterien aufgenommene und generalisierte Übersichtskarte bedeutender Störungszone in Deutschland. Die Streichrichtung der Störungszone ist dabei den Himmelsrichtungen entsprechend in acht Klassen unterteilt. Ein bevorzugtes Streichen in den folgenden drei Hauptrichtungen ist zu erkennen:

- NW – SE,
- WNW – ESE und
- NNE – SSW.

Die Salzdiapire und Salzkissen in Norddeutschland sind verändert nach REINHOLD et al. (2008) als blaugraue Flächen eingezeichnet. Zu erkennen ist, dass ein Teil der Salzstrukturen, insbesondere die längs gestreckten Salzmauern in Nordwestdeutschland, sich entlang größerer Störungszone anordnen. Demzufolge ist für einen Teil der Salzstrukturen im norddeutschen Becken ein enger genetischer Zusammenhang zu den dort vorliegenden Störungszone zu vermuten.

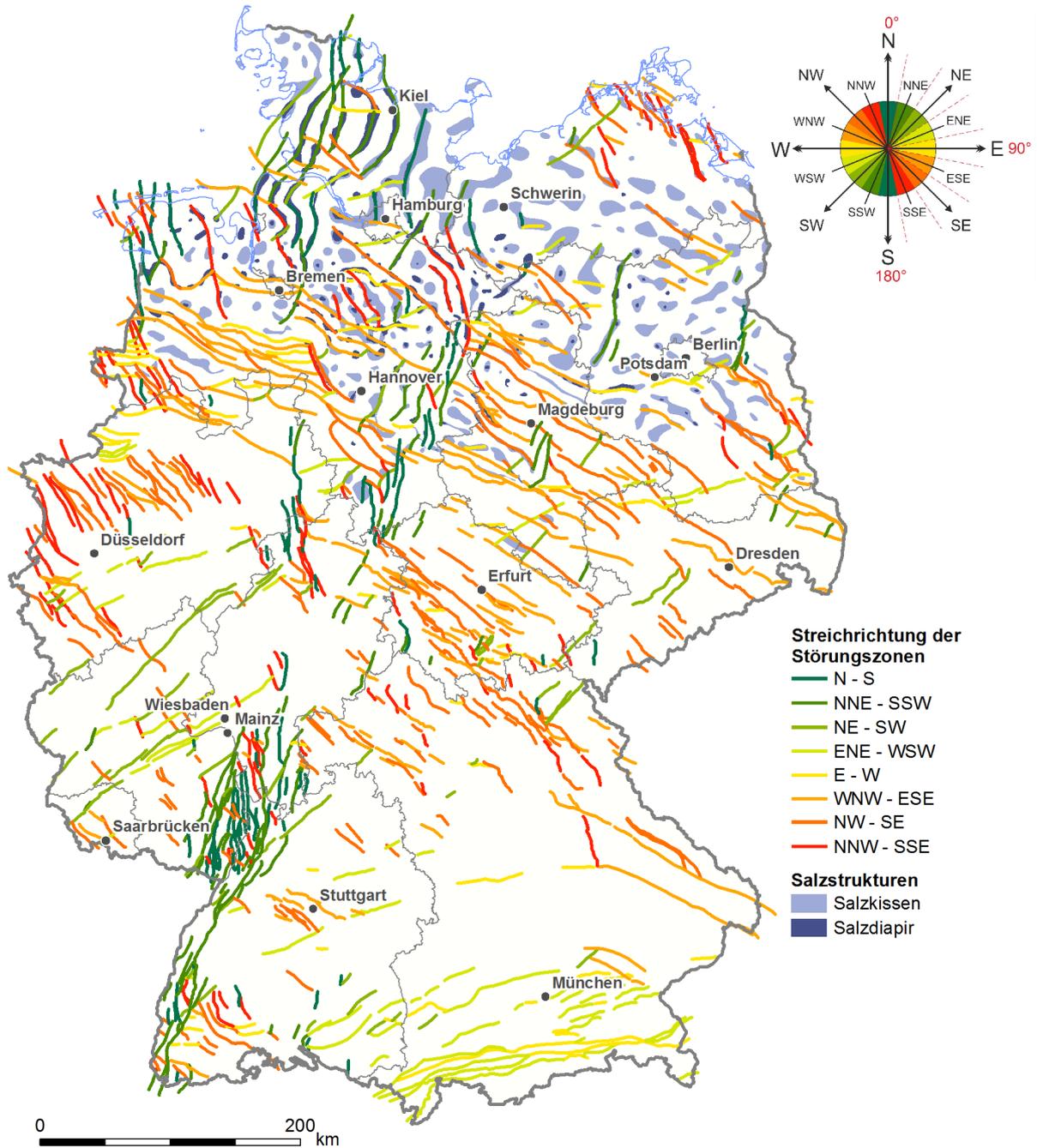


Abb. 4.8: Übersichtskarte der generalisierten bedeutenden Störungszonen in Deutschland (verändert u. a. nach ZITZMANN et al. (1981), HAENEL & STAROSTE (1988), SÖLLIG & RÖLLIG (1990), BRÜCKNER-RÖHLING et al. (2002) und REINHOLD et al. (2008)).

4.3.3 Literatur-Datenbank

Die Literatur-Datenbank beinhaltet die für diese Studie recherchierten Zitate zu den generalisierten Störungen. Diese Datenbank wurde mittels der Software EndNote erstellt. Die Datenbank ist um weitere Zitate erweiterbar (Abb. 4.9). Die Verknüpfung der Störungslinien im ArcGIS mit den Zitaten in der Literatur-Datenbank erfolgt über die Blattnummern der Geologischen Übersichtskarten im Maßstab 1 : 200 000 (GÜK 200). Jedem GÜK 200-Blatt wurden die Literatur-Zitate zugeordnet, die sich auf Stö-

rungen in diesem Raster beziehen. Die Ausgabe der Recherche kann beispielsweise als PDF-Dokument erfolgen (Abb. 4.10).

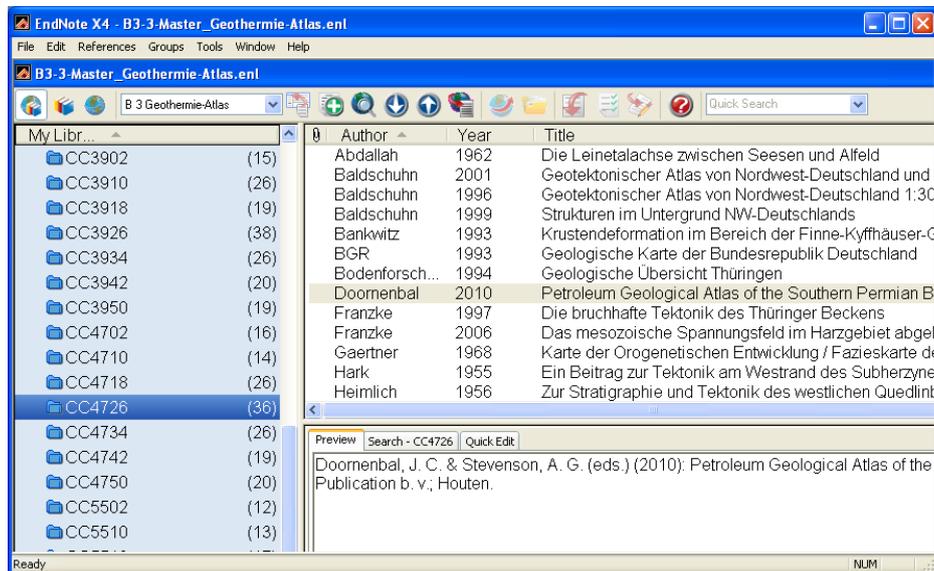


Abb. 4.9: Verknüpfung der Störungszonen über Blattnummern mit Literaturzitaten.

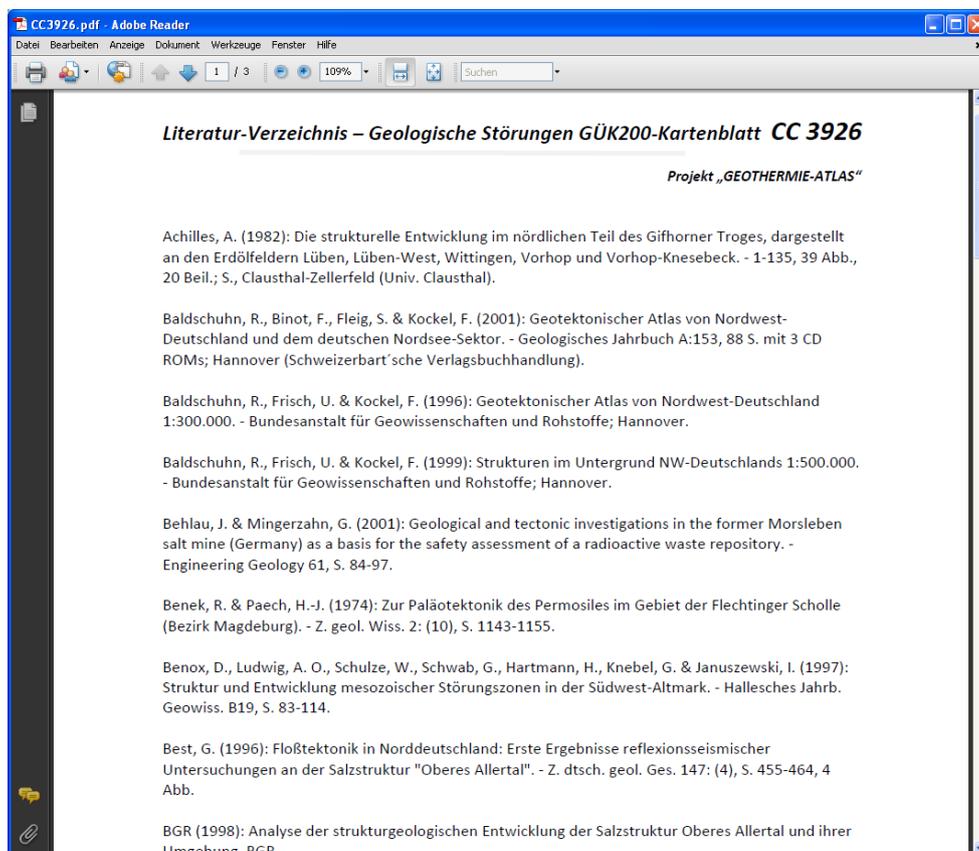


Abb. 4.10: Beispiel für die Ausgabe der Literaturzitate eines selektierten Kartenblattes mit den dort beschriebenen Störungssystemen als PDF-Dokument.

4.4 **Strukturgebiete**

In Deutschland lassen sich je nach geologischer Entwicklung verschiedene Gebiete unterscheiden. Die an der Erdoberfläche anstehenden Gesteine zeigen strukturgeologische Merkmale, die einerseits die lithologischen Eigenschaften der Gesteine widerspiegeln, andererseits von der tektonischen Entwicklung der Gebiete geprägt wurden.

In Abbildung 4.11 sind die in der GÜK 1000 (BGR, 1993) enthaltenen Störungen dargestellt. Es handelt sich dabei um Störungen, die überwiegend an der Oberfläche ausstreichen. Die dargestellten Störungen sind fast ausschließlich in den mesozoischen und paläozoischen Sedimenten, im Kristallin (paläozoische Magmatite und Metamorphite) und in den Mittelgebirgen sowie in der nach CARLÉ (1955) definierten Südwestdeutschen Großscholle zu finden.

Die Abbildung 4.12 zeigt in der Gegenüberstellung die Übersichtskarte der in dieser Studie erfassten und generalisierten Störungszonen. Insbesondere in Norddeutschland, im Molassebecken und im Rheingraben sind regional bedeutende Störungszonen von känozoischen Sedimenten und Vulkaniten bedeckt. Diese Störungszonen können daher nicht an der Erdoberfläche kartiert werden. Ihr Verlauf ist allerdings auf Basis geophysikalischer Messungen und Bohrdaten erfasst und interpretiert. Diese Gebiete stellen vornehmlich die Beckengebiete dar, die für die Tiefe Geothermie und für die CO₂-Einlagerung relevant sind. Die hier dargestellten Störungszonen spiegeln das spätpaläozoische, mesozoische und känozoische Strukturmuster Mitteleuropas wider. Sie beinhalten auch ältere Störungen, die im Perm reaktiviert wurden oder erst dann entstanden. Ein Großteil der dargestellten Störungszonen wurde erst im Mesozoikum angelegt und ist meist extensiver Natur. Eine kompressive Überprägung vieler Störungen und jurassischer bis kretazisch angelegter Grabenstrukturen erfolgte in der Oberkreide. Die dadurch entstandenen Strukturen werden als Inversionsstrukturen bezeichnet und treten insbesondere in Mitteldeutschland und im Niedersächsischen Becken auf.

Bezüglich des Bruchmusters und der vorherrschenden Richtung bedeutender Störungszonen lassen sich verschiedene Strukturgebiete in Deutschland unterscheiden, deren Ausdehnung oft auch der Verbreitung unterschiedlicher Gesteine an der Erdoberfläche entspricht.

Die Grenzen zwischen diesen Gebieten sind oft nicht scharf zu ziehen. Jedoch gibt es auch Störungszonen, wie z. B. das Osning-Lineament, die Harz-Nordrandstörung, die Fränkische Linie und die Hunsrück-Südrandstörung, die verschiedene Strukturgebiete voneinander trennen. Im Folgenden werden die charakteristischen tektonischen Elemente und die erdgeschichtliche Entwicklung dieser Gebiete kurz beschrieben.

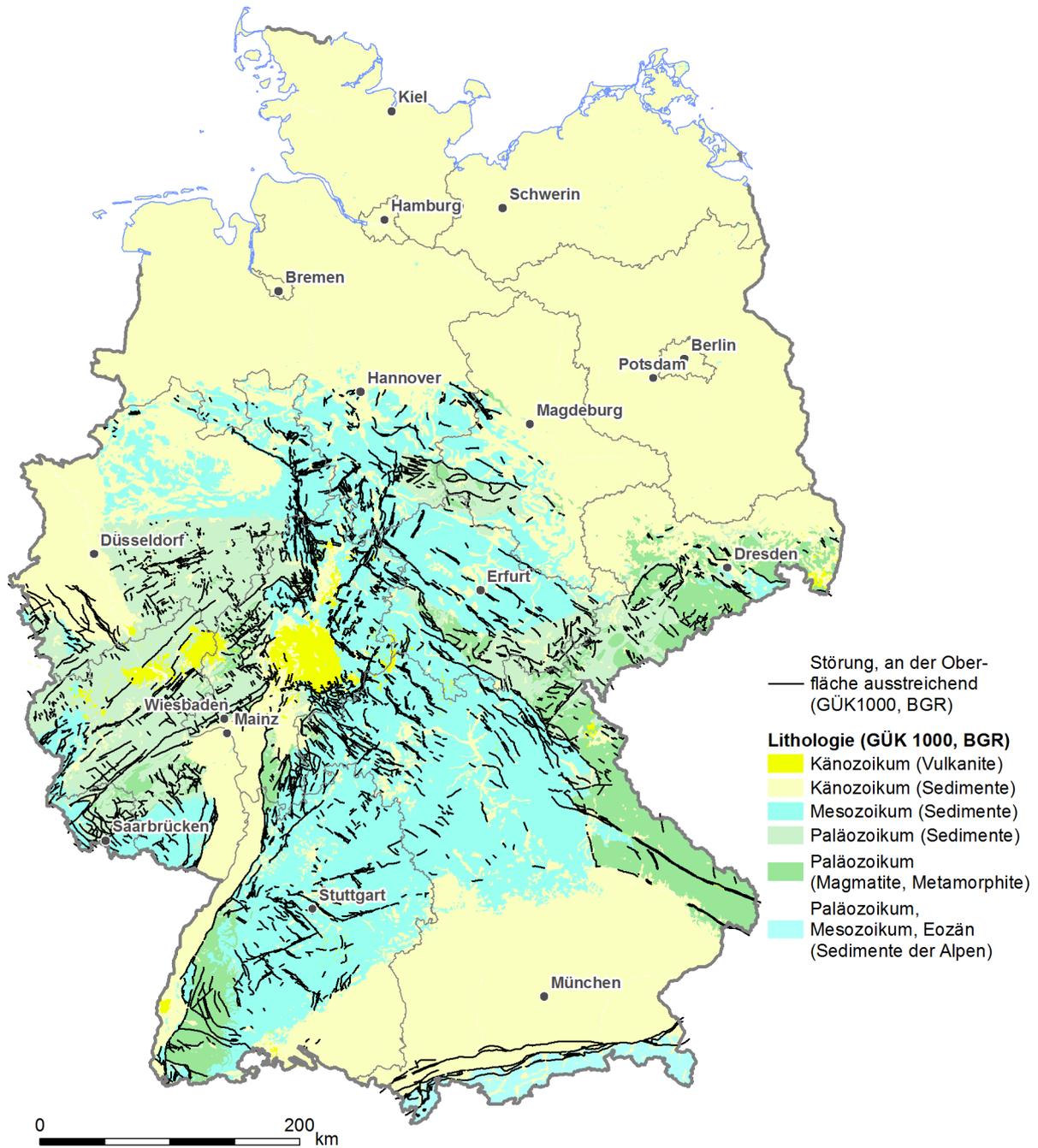


Abb. 4.11: Störungsinventar der GÜK 1000 (BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE, 1993).

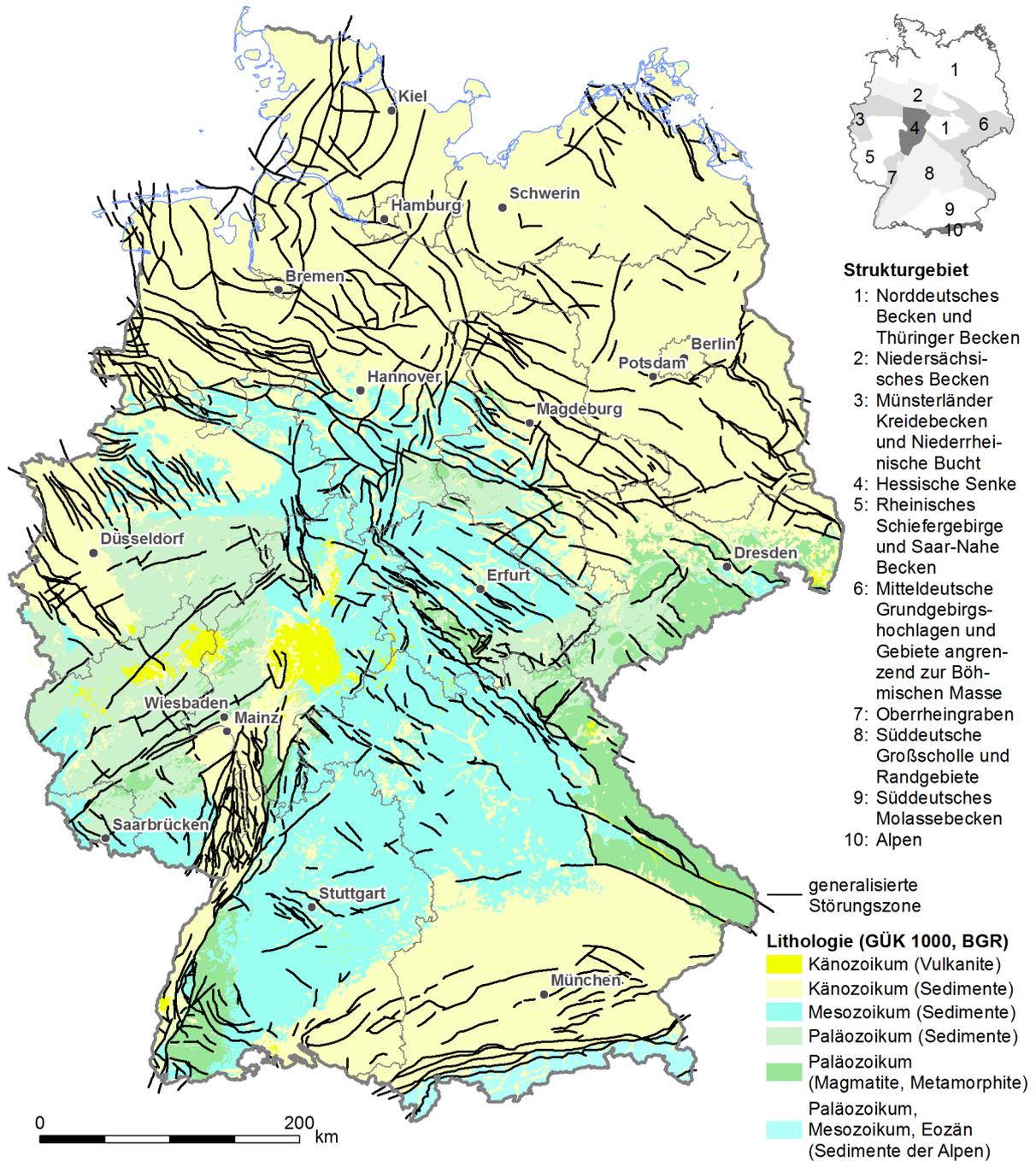


Abb. 4.12: Generalisierte Störungszone (schwarz) und Strukturgebiete (rechts oben), verändert nach verschiedenen Autoren (vgl. Abb. 4.11).

(1) Norddeutsches Becken und Thüringer Becken

Das Norddeutsche Becken ist Teil des zentraleuropäischen Beckensystems (ZIEGLER, 1990). Im ausgehenden Stefan und Rotliegend entstanden Gräben in NNW – SSE-, N – S- und NNE – SSW-Richtung (GAST, 1988; KLARNER, 1993; BRÜCKNER-RÖHLING et al., 2002). Seit Beginn der Beckenabsenkung (Subsidenz) im Rotliegend lagerten sich verschiedenste Sedimente (Salzgestein, Sandstein und Tonsteine) ab. Im älteren Mesozoikum führte ein ca. E – W-gerichtetes, extensionales Spannungsfeld zur Bildung von NNE – SSW-streichenden Gräben (MAYSTRENKO et al., 2005; LOHR, 2007). Zudem wurden in dieser Zeit häufig auch NW – SE-streichende Abschiebungen angelegt. In der Oberkreide wurden infolge des Wechsels zu einem kompressionalen Stressfeld Beckenteile invertiert, d. h. der Bewegungssinn an Störungen wurde umgekehrt (BRÜCKNER-RÖHLING et al., 2002). Die Entwicklung im Tertiär wurde wiederum von extensionalen Bewegungen mit der Bildung oder Reaktivierung regionaler Strukturen dominiert. Die mesozoischen und känozoischen Sedimentgesteine wurden zudem durch die Mobilisation von Salzformationen (Rotliegend, Zechstein), die zur Bildung von Salzdiapiren und Salzkissen führte, in ihrer Lagerung und Mächtigkeit beeinflusst (SCHECK et al., 2003).

Die spätpaläozoischen bis mesozoischen Ablagerungen im Bereich des Thüringer Beckens spiegeln die Sedimentation im südlichen Randbereich des Norddeutschen Beckens wider. Dieser Bereich zeigt zudem eine ähnliche Entwicklung wie nördlich angrenzende Bereiche des Norddeutschen Beckens. Große Störungszonen wurden vermutlich bereits im Permokarbon angelegt und seitdem mehrfach reaktiviert (ZANDER & HUCKRIEDE, 2010). Sie streichen meist WNW – ESE, lokal teils auch in E – W- oder NW – SE-Richtung. Im Zuge der Beckeninversion während der Oberkreide wurden Teile am Rand des Norddeutschen Beckens massiv gehoben, wodurch auch das Thüringer Becken im regionalen Niveau sehr viel tiefer erodiert wurde als der Rest des Norddeutschen Beckens.

(2) Niedersächsisches Becken

Das Niedersächsische Becken ist ein Teil des Norddeutschen Beckens und grenzt im Süden entlang des Osning-Lineaments an das Münsterländer Kreidebecken. Im Norden wird es unter anderem durch das Aller-Lineament begrenzt (LOHR, 2007). Insbesondere im Mitteljura bis in die Kreide bildete sich in dem Gebiet ein eigener Sedimentationsraum aus (WALTER, 1992). Krustendehnung und Blattverschiebungen führten im Jura und in der Unterkreide zu einer verstärkten Absenkung und Sedimentation. In der Oberkreide bewirkte der Wechsel zu einem kompressiven Spannungsfeld eine verstärkte Inversion dieses Beckenbereiches, in der bestehende Störungszonen reaktiviert und zu Aufschiebungen umgewandelt wurden (BETZ et al, 1987).

(3) Münsterländer Kreidebecken und Niederrheinische Bucht

Die Lagerungsverhältnisse im Kreide-Deckgebirge des zentralen Münsterlandes gelten als relativ ungestört (DÖLLING & JUCH, 2009). Die Gesteine unterhalb der Oberkreide (lokal auch Unterkreide) bilden die flözführenden Schichten des Oberkarbons und sind als Folge der variszischen Orogenese intensiv verfaltet (DROZDZEWSKI & WREDE, 1994). Die SW – NE-streichenden variszischen Falten werden von NW – SE-streichenden Querstörungen versetzt. Die heute noch anhaltende Absenkung der Niederrheinischen Bucht begann im Eozän. An NW – SE-streichenden, untergeordnet auch WNW – ESE-streichenden, Störungszonen kam es zur Bildung großer Blattverschiebungen. Sie bestimmen das Strukturbild und auch die Morphologie in diesem Gebiet.

(4) Hessische Senke

Der tiefere Untergrund der Hessischen Senke ist ein Teil der mitteleuropäischen Varisziden. Ab dem Rotliegend entwickelte sich im nördlichen Teil ein mit dem Norddeutschen Becken zusammenhängendes Sedimentationsgebiet. Hingegen bildete sich im Süden ein Sedimentbecken in Fortsetzung des Saar-Nahe-Beckens heraus (WALTER, 1992). Im Jura wurden Störungszonen bzw. Gräben neu angelegt. Sie streichen vorwiegend N – S, NNW – SSE (z. B. Egge-Störungssystem), NNE – SSW (z. B. östlicher Teil des Leinetalgrabens), NW – SE und WSW – ESE. Die oberkretazische Inversion ist auch hier gebietsweise zu beobachten. Im jüngeren Tertiär (Miozän) begünstigte das extensive Spannungsfeld einen intensiven Vulkanismus. So liegt beispielsweise der Vogelsberg in der Fortsetzung des Oberrheingrabens. Zudem sind kleinere Vulkanstrukturen NNE des Vogelsberges ebenfalls im Streichen des Oberrheingrabens angeordnet.

(5) Rheinisches Schiefergebirge und Saar-Nahe-Becken

Die paläozoischen Gesteine des Rheinischen Schiefergebirges wurden während der variszischen Orogenese gefaltet. Größere Überschiebungen bestimmen das Strukturbild. Es dominieren NE – SW-streichende Überschiebungen und WNW – ESE-streichende Blattverschiebungen. Die tektonische Entwicklung des Saar-Nahe-Beckens als ein großes spätvariszisches Becken begann zeitgleich mit der Sedimentation im ältesten Oberkarbon (Grenze Namur/Westfal) und war zum Ende des Rotliegend abgeschlossen. Im Zuge der postvariszischen tektonischen Entwicklung wurden ältere NE – SW-streichende Störungen reaktiviert (REIN et al., 2011).

(6) Mitteldeutsche Grundgebirgshochlagen und Gebiete angrenzend zur Böhmischem Masse

Zu diesen Gebieten zählen Harz, Flechtinger Höhenzug, Thüringer Wald, Mitteldeutsches Granulitgebirge, Erzgebirge, Thüringisch-Fränkisch-Vogtländisches Schiefergebirge, Fichtelgebirge, Oberpfälzer Wald sowie der Bayerische Wald. Sie sind Teil der mitteleuropäischen Varisziden und bestehen aus variszisch gefalteten paläozoischen Sedimentserien sowie Plutoniten, Magmatiten und Metamorphiten. Die spätvariszische und jüngere tektonische Entwicklung von der Oberkreide bis ins Känozoikum führte entlang des westlichen Randes des Böhmischem Massiv zu einer Zerblockung und Heraushebung des Grundgebirges entlang von meist NW – SE- und NNW – SSE-streichender Bruchsysteme (WALTER, 1992). Große Störungen wie die Harz-Nordrandstörung oder die Fränkische Linie trennen nach FRANZKE et al. (2004) und FRANZKE & RAUCHE (1991) diese Gebiete von den benachbarten Strukturgebieten ab.

(7) Oberrheingraben

Der Oberrheingraben ist Teil eines westeuropäischen känozoischen Grabensystems (ZIEGLER, 1992), welches bis in den Mittelmeerraum zu verfolgen ist. Hierbei streicht eine Schar morphologisch sichtbarer Störungen, im Süden des Grabens in NNE – SSW-, im Norden in N – S-Richtung, entlang der Grabenflanken. Die markanten Randstörungen bestehen aus Abschiebungen, die grabenwärtig mit 55° bis 85° einfallen und teils erhebliche Versatzbeträge erreichen (WALTER, 1992). Der nördliche Teil des Grabens senkte sich tiefer ab als der südliche Teil. Der Grabenrand wie auch der Graben ist durch eine große Anzahl an Abschiebungen (Staffelbrüche), teils aber auch durch Blattverschiebungen gekennzeichnet.

(8) Südwestdeutsche Großscholle und Randgebiete

Die Südwestdeutsche Großscholle wird als eine Struktureinheit im Sinne von KOSSMAT (1927) und CARLÉ (1955) verstanden. Hierzu gehören neben der Fränkischen und Schwäbischen Alb die Randgebiete von Rhön, Frankenhöhe, Spessart, Odenwald, Steigerwald, Kraichgau und des Schwarzwaldes. Das auf dem paläozoischen und präkambrischen Grundgebirge aufliegende mesozoische Deckgebirge fällt insgesamt flach vom Spessart und Odenwald in Richtung E und SE ein. Der Randbereich der Südwestdeutschen Großscholle zeigt im Gegensatz zum inneren Teil ein engmaschiges Störungsmuster mit dominierenden WNW – ESE- bis NW – SE-streichenden Störungszonen bzw. Gräben, deren mehrphasige Anlage im höchsten Oberkarbon (Stefan) begann (FREUDENBERGER, 1996). Diese Störungszonen unterlagen später einer Kompression, in der Auf- und Überschiebungen besonders im Randbereich entstanden. Die im östlichen Bruchsystem auftretenden Störungszonen (z. B. Bayerischer Pfahl, Donaurandbruch, Fränkische Linie) zeigen öfter hohe Versatzbeträge von teils mehreren Kilometern und wurden während der Oberkreide reaktiviert.

(9) Süddeutsches Molassebecken

Infolge der Extension in postvariszischer Zeit bildeten sich im östlichen Süddeutschen Molassebecken mehrere SW – NE-streichende Senken, deren neu angelegte Störungszonen mehrfach reaktiviert wurden (UNGER, 1996). Unter den angelegten Abschiebungen bilden meist die antithetischen (entgegengesetzt gerichteten) Abschiebungen die Fallen für die Erdöl- und Erdgaslagerstätten (BACHMANN et al., 1987). Die ab der Oberkreide einsetzende Alpen-Orogenese führte zu einer intensiven Strukturierung dieses Raumes und zur Anlage und Reaktivierung von Störungen mit teils hohen Versatzbeträgen.

(10) Alpen

Die deutschen Alpen bestehen aus den Großbaueinheiten Faltenmolasse, Helvetikum, Flysch und den Nördlichen Kalkalpen. Letztere bestehen überwiegend aus Kalksteinen des Mesozoikum. Mit Beginn der alpidischen Decken- und Schuppentektonik in der Oberkreide kommt es zur Bildung von Auf- und Überschiebungen, Seitenverschiebung und auch Abschiebungen (SCHWERD, 1996). Diese überwiegend W – E- bis WSW – ENE-streichenden Störungszonen trennen die einzelnen Deckenkörper ab und werden öfter von NW – SE- und NE – SW-streichenden Blattverschiebungen durchsetzt.

4.5 Diskussion und Fazit

Diskussion

Die Kenntnis über das Vorhandensein und die Eigenschaften von Störungen sind wesentliche Informationen für die Standortauswahl sowohl bei der geothermischen Nutzung des Untergrunds als auch für die CO₂-Einlagerung. Informationen zur Beschaffenheit und Geometrie von Störungen lassen sich nur bedingt aus geologischen Kartenwerken entnehmen. Somit sind die meisten Störungen in Deutschland unterbestimmt. Auch wenn durch Oberflächenaufschlüsse und geophysikalische Messmethoden eine Vielzahl an Informationen zu Störungen vorliegt, so liegt die große Herausforderung darin, Aussagen über Störungen und über deren gesamten Einflussbereich zu treffen. Allerdings ermöglichen Informationen über eine Orientierung (Strei-

chen, Fallen), Versatz und Lithologie der Nebengesteine unter Berücksichtigung der regionalgeologischen Situation eine erste Abschätzung der zu erwartenden Eigenschaften.

Auch die Spannungsverhältnisse im tiefen Untergrund beeinflussen die Eigenschaften von Störungen. Dabei werden Strukturen mit einer bestimmten Ausrichtung zum gegebenen Spannungsfeld bevorzugt aktiviert oder reaktiviert. JUNG et al. (2002) vermuten, dass NW – SE- und NNE – SSW-streichende Störungen infolge der Orientierung zum heutigen Spannungsfeld ausreichende Transmissibilitäten für eine geothermische Nutzung bieten könnten. Trotz regionaler Tendenzen des Spannungsfeldes sind jedoch lokal Variationen zu beobachten. Ebenso kann sich das Spannungsfeld auch in vertikaler Richtung mit der Tiefe ändern, wie dies in zahlreichen Bohrungen im Norddeutschen Becken beobachtet wurde.

Diese Studie soll durch eine generalisierte Darstellung und kleinmaßstäbliche Betrachtung der Thematik einen Einstieg in eine im Detail sehr komplexe Materie bieten. Die umfassende Sammlung von Zitaten und deren Zuordnung zu den Lineamenten bietet eine Grundlage für weiterführende Studien. Nur durch Untersuchungen des Fluidflusses in einem gestörten Gesteinskomplex in unterschiedlichen Skalen und durch neue Messwerte entlang von Störungen wird es in Zukunft möglich sein, konkrete Aussaugen über die Hydraulik von Störungen zu treffen. Derzeit sind fundierte, gesicherte Aussagen zum hydraulischen Verhalten einer Störung nur in kleinen gut explorierten Bereichen möglich. Im regionalen Maßstab beruhen viele Aussagen auf tektonischen Konzepten und Annahmen zum Einfluss verschiedener Parameter auf die Dichtheit einer Störung. Diese Konzepte und Annahmen gilt es in Folgestudien zu überprüfen.

Auf der Grundlage der GIS-Karte der regional bedeutenden Störungen könnten zukünftig weitere relevante Störungseigenschaften erfasst und übersichtsmäßig dargestellt werden.

Fazit

Störungen und Störungszonen treten in Deutschland überall auf. Einige dieser Störungen sind neotektonisch aktiv und als potenzielle Risiken sowohl für die CO₂-Speicherung als auch für Geothermieprojekte besonders sorgfältig zu erkunden.

Der Charakter von Störungen ist oft ambivalent. Sie können teilweise Barrieren für den Fluidfluss darstellen und anderenorts die Fluidzirkulation begünstigen. Sie können somit je nach Eigenschaften die betrachteten Untergrundnutzungen ermöglichen oder verhindern.

Die erforderlichen Daten zur Charakterisierung und Bewertung von Störungen sind nicht flächendeckend und meist nur unvollständig vorhanden. Für belastbare Standortbewertungen sind zusätzliche Daten mittels gezielter Erkundungsprogramme zu erheben.

5 Kompilation der Karten und Bewertung

5.1 Aufbau und Beschreibung der Karten

5.1.1 Allgemeiner Aufbau der Karten

Die Zusammenfassung der Ergebnisse über die Potenzialgebiete für die Geothermie (Kap. 2) und für die CO₂-Einlagerung (Kap. 3) führte zu drei thematischen Karten A, B und C, die im Maßstab 1 : 1 000 000 erstellt wurden (s. Anlage). Sie beinhalten neben den untersuchungswürdigen Gebieten für eine CO₂-Einlagerung Angaben über die Art des geothermischen Potenzials, ermöglichen eine Einschätzung der erreichbaren Temperaturen und geben einen ergänzenden Hinweis auf die zukünftige zeitliche Verfügbarkeit. In einer vierten Kartendarstellung (Karte D) erfolgte die Kompilation der wesentlichen Inhalte aus den drei Karten A – C.

Die Wahl des Maßstabes ermöglicht es, das vollständige Gebiet von Deutschland im Format DIN A0 abzubilden, ohne dass eine zu hohe Lagegenauigkeit der dargestellten Objekte suggeriert wird. Das gewählte Format bietet neben dem Kartenbild und der Legende Platz für weitere Elemente und zusätzliche Erläuterungen (Abb. 5.1).

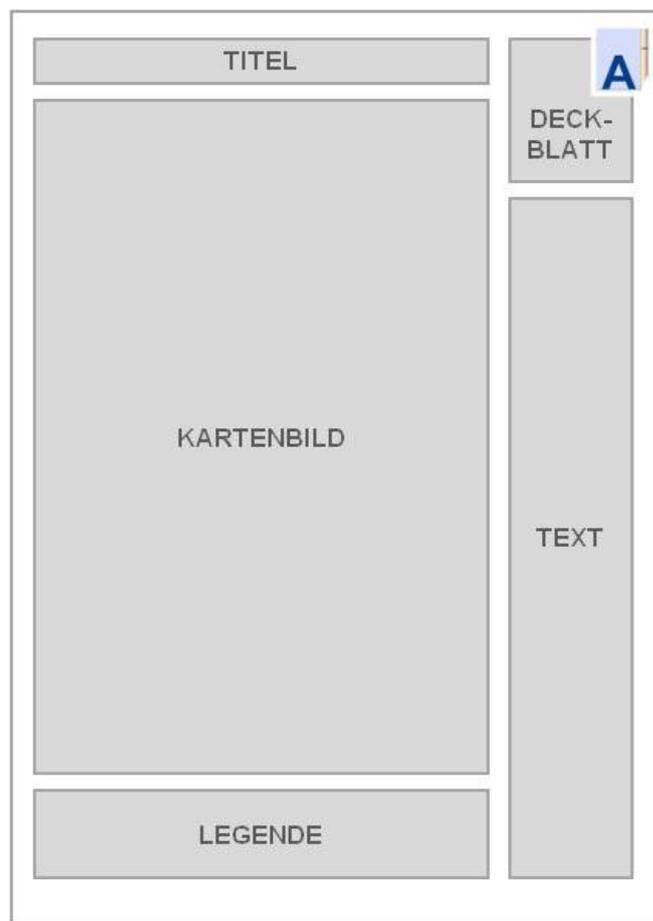


Abb. 5.1: Generelle Aufteilung der vier erstellten Karten.

Auf der rechten Seite befindet sich das Deckblatt, das alle relevanten Angaben zur Karte zusammenfassend wiedergibt. Unter dem Kartendeckblatt sind zunächst die Kriterien, die zur Abgrenzung der einzelnen Einheiten verwendet wurden, in tabellarischer Form aufgeführt. In einer weiteren Tabelle werden die jeweils betroffenen stratigraphischen Einheiten genannt. Daneben sind Erläuterungen zu den untersuchungswürdigen Gebieten für eine CO₂-Einlagerung und den Potenzialgebieten für Geothermie aufgeführt. Die kartenbeschreibenden Elemente sind auf den Inhalt der jeweiligen Karte abgestimmt.

Auf dem Deckblatt der entsprechenden Karte wird am rechten oberen Rand zudem mittels Buchstabenkennzeichnung veranschaulicht, um welche der vier Karten es sich handelt. Durchgängig verwendete Farbsymbole, die die einzelnen Potenziale repräsentieren, sollen die Orientierung unterstützen (Abb. 5.2).

Zum Verständnis der Karten ist die Definition des Terminus „mögliche Nutzungskonkurrenz“ im Sinn dieser Studie zu berücksichtigen: Eine mögliche Nutzungskonkurrenz existiert, wenn an einem Standort im Untergrund untersuchungswürdige Horizonte für die CO₂-Einlagerung vorkommen und ein Potenzial für eine geothermische Nutzung vorliegt. Eine konkurrierende Nutzung kann nicht nur bezüglich eines konkreten Zielhorizontes festgestellt werden, sondern auch an Standorten mit unterschiedlichen Nutzungsoptionen für verschiedene Zielhorizonte bestehen.

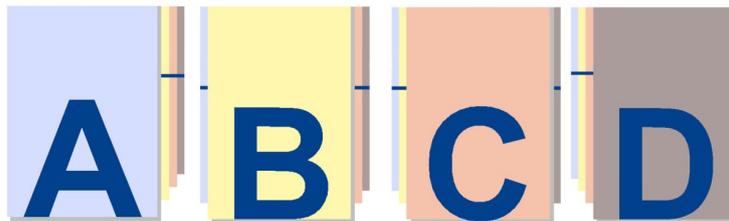


Abb. 5.2: Auf dem jeweiligen Deckblatt befindliche Buchstabenkennzeichnung der vier Einzelkartenblätter mit durchgängig verwendeter Farbsymbolik zur Kartenbezeichnung.

Die Verbreitung der für eine geothermische Nutzung in Frage kommenden Horizonte wurde mit deren Mächtigkeits- und Temperaturwerten verschnitten. Das Ergebnis zeigt eine Kompilation der jeweils erreichbaren Temperaturen aller Gebiete projiziert auf die Oberfläche. Die Kategorisierung der Temperaturintervalle richtete sich dabei nach geothermischen Aspekten. Für die Erstellung der untersuchungswürdigen Gebiete für eine CO₂-Einlagerung wurden die Speicher- und Barrierehorizonte miteinander in Beziehung gesetzt und ebenso kompiliert. Die Bearbeitung erfolgte mittels diverser Werkzeuge im Geoinformationssystem ArcGIS von ESRI in Form von Vektordaten. Hierbei diente das DHDN 3°/Gauß-Krüger-Zone 3 (GK3) als Bezugssystem.

In Kapitel 2 und 3 wurde die thematische Gliederung der aufgenommenen Daten mit den jeweils berücksichtigten Einheiten bereits ausführlich beschrieben, wobei u. a. auch die zeitliche Verfügbarkeit berücksichtigt wurde. In der Kartendarstellung D wurden ausgewählte Inhalte der Karten A, B und C zusammengefasst. Folgende Einteilung wurde vorgenommen (Abb. 5.3):

- Karte A: Untersuchungswürdige Gebiete für eine CO₂-Einlagerung und *nachgewiesene hydrothermische Potenziale* (unmittelbar verfügbar) für Tiefe und

Mitteltiefe Geothermie mit kompilierter Darstellung der erreichbaren Temperatur;

- Karte B: Untersuchungswürdige Gebiete für eine CO₂-Einlagerung und *vermutete hydrothermische Potenziale* (zukünftig verfügbar) für Tiefe und Mitteltiefe Geothermie mit kompilierter Darstellung der erreichbaren Temperatur;
- Karte C: Untersuchungswürdige Gebiete für eine CO₂-Einlagerung und *petrothermische Potenziale* (zukünftig verfügbar) für Geothermie mit kompilierter Darstellung der erreichbaren Temperatur;
- Karte D: Untersuchungswürdige Gebiete für eine CO₂-Einlagerung und Gesamtheit *hydro- und petrothermischer Potenziale* (Kompilation der Karten A, B und C) für Geothermie ohne Temperaturdarstellung.

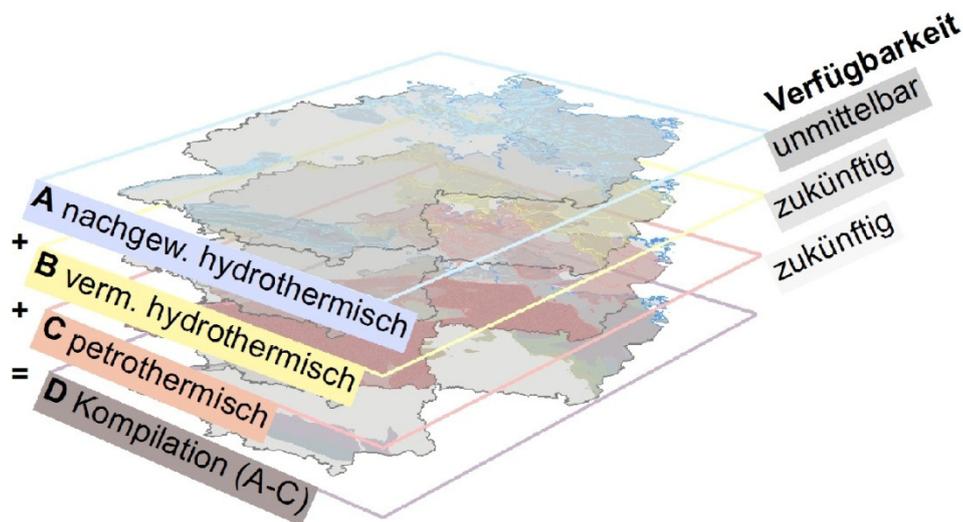


Abb. 5.3: Aufbau des vierteiligen Kartenwerkes.

Den drei Potenzialkarten A – C wurde entsprechend ihres thematischen Inhaltes je eine charakteristische Farbe zugeordnet, die durchgängig bei allen Karten beibehalten wird (Abb. 5.2): Blau symbolisiert das nachgewiesene hydrothermische Potenzial; Gelb steht für das vermutete hydrothermische Potenzial und Rot repräsentiert das petrothermische Potenzial. Durch die Überlagerung dieser drei Grundfarben ergeben sich die Mischfarben Grün, Violett und Orange, die damit auch eine Mischung der Potenzialarten versinnbildlichen. Grün entsteht durch die Überblendung des nachgewiesenen hydrothermischen Potenzials mit dem vermuteten hydrothermischen Potenzial, Violett durch einen Verschnitt des nachgewiesenen hydrothermischen Potenzials mit dem petrothermischen Potenzial und Orange durch die Mischung des vermuteten hydrothermischen Potenzials mit dem petrothermischen Potenzial. Bei der Überlagerung aller drei Farben und damit auch der drei Potenzialarten entsteht ein Grauton. Somit ergeben sich insgesamt sieben Farben, die verdeutlichen, in welchen Gebieten welches mögliche Potenzial mit der entsprechend assoziierten zeitlichen Verfügbarkeit erwartet werden kann (Abb. 5.4).

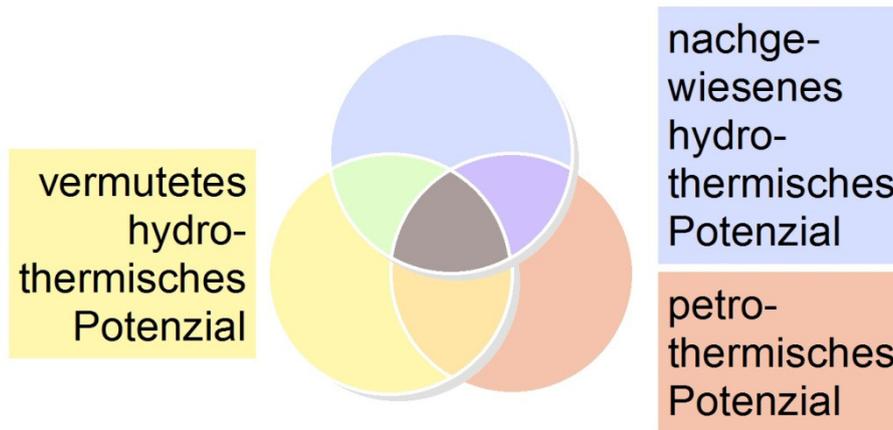


Abb. 5.4: Farbgebung der Kartenwerke mit durchgängig verwendeten Farbsymbolen für die verschiedenen geothermischen Potenzialarten.

Alle vier Karten bilden zusätzlich mittels dunkelgrüner Schraffur die Gebiete für eine CO₂-Einlagerung in Form einer kompilierten Darstellung der Speicher-Barrier-Komplexe ab. Durch die Überlagerung des geothermischen Potenzials mit den untersuchungswürdigen Gebieten für eine CO₂-Einlagerung werden die Gebiete kenntlich, in denen eine Nutzungskonkurrenz zwischen den Optionen auftreten könnte (Abb. 5.5).

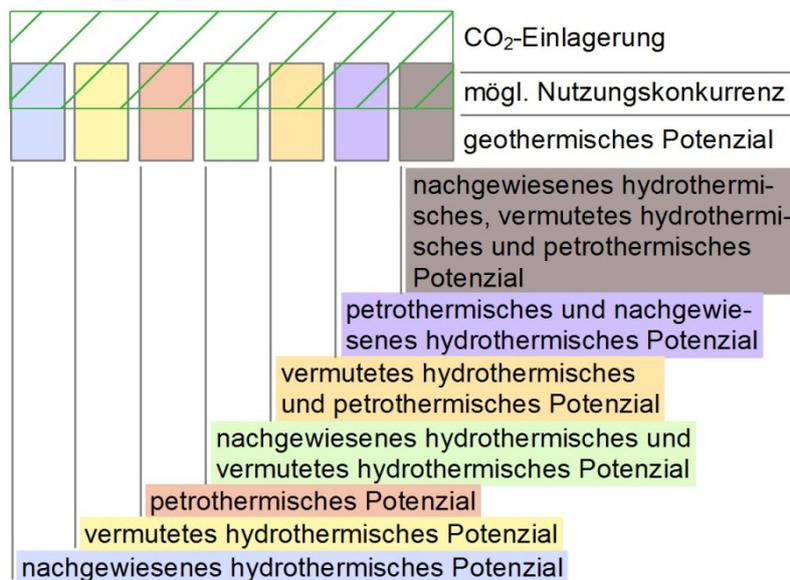


Abb. 5.5: Legendengestaltung bzw. Aufschlüsselung der Farbsymbolik der vier thematischen Kartenwerke.

5.1.2 Inhalte der Karte A

Karte A (Anlage A) stellt untersuchungswürdige Gebiete für eine CO₂-Einlagerung und nachgewiesene hydrothermische Potenziale für Tiefe und Mitteltiefe Geothermie in Deutschland dar. Es handelt sich hierbei um ein geothermisches Potenzial, das bereits heute genutzt wird oder genutzt werden kann und damit als unmittelbar verfügbar bezeichnet werden kann.

Die erreichbaren Temperaturen innerhalb des geothermischen Potenzialgebietes, das Formationen vom Rotliegend bis in das Tertiär umfasst, werden unter Anwendung der in Abschnitt 2.2 definierten Kriterien (Tab. 2.1) abgebildet. Die Darstellung der Temperatur erfolgt mittels einer Farbreihe von Gelb bis Rot. Das abgebildete Temperaturintervall umfasst Bereiche von 40 bis maximal 190 °C.

Dunkelgrün schraffierte Bereiche weisen untersuchungswürdige Gebiete für eine CO₂-Einlagerung der Formationen Rotliegend bis Kreide aus. Beide Nutzungsoptionen können somit getrennt voneinander betrachtet werden. Sie können jedoch ebenso in Bezug gebracht werden. Dort, wo sich beide Nutzungsoptionen überlagern, ist eine Nutzungskonkurrenz möglich.

5.1.3 Inhalte der Karte B

Karte B (Anlage B) zeigt untersuchungswürdige Gebiete für eine CO₂-Einlagerung und vermutete hydrothermische Potenziale für Tiefe und Mitteltiefe Geothermie in Deutschland. Dieses geothermische Potenzial ist noch nicht nachgewiesen, sondern wird nur vermutet und noch nicht genutzt, kann aber in Zukunft zur Energieversorgung beitragen, so dass es in der Kartendarstellung als zukünftig verfügbares Potenzial Berücksichtigung findet. Neben dem Permokarbon des Saar-Nahe-Beckens fallen in diese Kategorie insbesondere die Rotliegend-Sandsteine in Norddeutschland.

Die erreichbaren Temperaturen innerhalb des Gebietes mit vermutetem hydrothermischem Potenzial werden unter Anwendung der Kriterien (Tab. 2.1) abgebildet. Die Darstellung der Temperatur erfolgt mittels einer Farbreihe von Gelb bis Rot. Das abgebildete Temperaturintervall umfasst Bereiche von 40 bis maximal 190 °C.

Dunkelgrün schraffierte Bereiche weisen untersuchungswürdige Gebiete für eine CO₂-Einlagerung aus. Diese Darstellung ermöglicht es, die verschiedenen Nutzungsoptionen getrennt voneinander zu betrachten oder sie miteinander in Bezug zu setzen. Eine Nutzungskonkurrenz ist in Zukunft innerhalb der Gebiete denkbar, in denen sich beide Nutzungsoptionen überlagern.

5.1.4 Inhalte der Karte C

Karte C (Anlage C) beinhaltet die Darstellung untersuchungswürdiger Gebiete für eine CO₂-Einlagerung und petrothermischer Potenziale für Geothermie in Deutschland. Petrothermische Potenziale können erst durch hydraulische Stimulation der entsprechenden Zielformation nutzbar gemacht werden. Hierzu zählen das vulkanische Rotliegend des Norddeutschen Beckens, die Magmatite und Metamorphite des Mittel- und Süddeutschen Kristallingebietes sowie die Sedimentgesteine des Ruhrkarbons und des Mittleren Buntsandsteins von Nordwestdeutschland. Da sich die Technologie noch im Erprobungsstadium befindet, beinhalten diese Abfolgen ein Potenzial, das gegebenenfalls mittelfristig zur Verfügung steht.

Die erreichbaren Temperaturen innerhalb des Gebietes mit petrothermischem Potenzial werden unter Anwendung der Kriterien (Tab. 2.1) abgebildet. Die Darstellung

der Temperatur erfolgt mittels einer Farbreihe von Gelb bis Rot. Das abgebildete Temperaturintervall umfasst Bereiche von 100 bis maximal 230 °C.

Dunkelgrün schraffierte Bereiche weisen untersuchungswürdige Gebiete für eine CO₂-Einlagerung aus, so dass beide Nutzungsoptionen getrennt voneinander betrachtet oder miteinander in Bezug gebracht werden können. Dort, wo sich beide Nutzungsoptionen überlagern, kann zukünftig eine Nutzungskonkurrenz auftreten.

5.1.5 Inhalte der Karte D

Die Karte D (Anlage D) bildet die untersuchungswürdigen Gebiete für eine CO₂-Einlagerung und die Gesamtheit der hydro- und petrothermischen Potenziale für Geothermie in Deutschland ab. Es handelt sich um eine Kompilation der Karten A bis C. Eine Untergliederung der geothermischen Potenzialgebiete hinsichtlich der erreichbaren Temperaturen erfolgt in dieser Kartendarstellung nicht. Auch hier werden die geothermischen Potenzialgebiete von den untersuchungswürdigen Gebieten für eine CO₂-Einlagerung, symbolisiert mittels dunkelgrüner Schraffur, überlagert. Durch eine Überblendung aller untersuchten Optionen zeigt sich, wo mögliche Nutzungskonkurrenzen auftreten können, welche Gebiete nicht untersucht wurden bzw. durch keine der Optionen nutzbar sind, oder welche Bereiche nur für eine der möglichen Nutzungen in Frage kommen.

5.2 Ergebnisse und Bewertung

Die in diese Studie aufgenommenen geothermischen Potenzialgebiete sowie die als untersuchungswürdige Gebiete für eine CO₂-Einlagerung ausgewiesenen Flächen sind entsprechend der betreffenden stratigraphischen Abfolgen in der unten stehenden Tabelle zusammengestellt (Tab. 5.1). Zur besseren Übersicht findet eine Aufschlüsselung nach überregionalen Vorkommen (Norddeutscher Raum/Süddeutscher Raum) und verschiedenen Regionaleinheiten sowie in bestimmte Becken statt.

Anhand der Farbsymbolik kann in dieser Darstellung weiterhin eine Unterscheidung des geothermischen Potenzials zwischen *nachgewiesenem hydrothermischem Potenzial* (Hellblau), *vermutetem hydrothermischem Potenzial* (Dunkelblau) und *petrothermischem Potenzial* (Grün) getroffen werden. Die zunächst getrennt voneinander auskartierten Speicher- und Barriere-Gesteine (Hellgelb bzw. Olivgrün) sind in der Tabelle zusätzlich als regionale Speicher-Barriere-Komplexe zusammengefasst und ausgewiesen worden (rote Rahmung).

Bereits in der tabellarischen Ansicht zeichnet sich eine große Übereinstimmung der für beide Optionen als mögliche nutzbare Einheiten eingestuft Abfolgen. Sowohl die Tiefe Geothermie als auch die geologische CO₂-Einlagerung zielen weitgehend auf dieselben Formationen in den jeweiligen Regionen ab.

Zur Verdeutlichung, welche geographischen Regionen von einer möglichen konkurrierenden Nutzung betroffen sein könnten, dient die Kartendarstellung in Abbildung 5.6. Diese Abbildung bezieht sich dabei nur auf die reine Anzahl der an einer Lokalität vorhandenen Schichten, ohne zwischen den einzelnen geothermischen Nutzungsoptionen zu differenzieren. Die unterschiedliche Qualität des geothermisch nutzbaren Potenzials wird bei dieser Betrachtung somit nicht einbezogen. Eine mögliche Nutzungskonkurrenz zeigt sich hauptsächlich in den Regionen, in denen die größte Anzahl an geothermisch nutzbaren Aquiferen bzw. Horizonten zu verzeichnen ist, wie dem östlichen Teil des Norddeutschen Beckens, im zentralen Niedersachsen, dem östlichen Teil des Süddeutschen Molassebeckens oder dem Oberrheingraben.

In einer Zusammenstellung gibt die Abbildung 5.7 (vgl. auch Anlage D) einen Überblick hinsichtlich aller geothermischen Nutzungsmöglichkeiten sowie der Nutzungsoption der CO₂-Einlagerung. Die Farbwahl der abgebildeten Einheiten entspricht dabei der in Abbildung 5.5.

Bei Überlagerung der untersuchungswürdigen Gebiete für eine CO₂-Einlagerung (Schraffur) mit den geothermisch nutzbaren Horizonten (Vollfarben) zeichnen sich mögliche Nutzungskonkurrenzen vor allem im westlichen und östlichen Bereich des Süddeutschen Molassebeckens, im gesamten Norddeutschen Becken und im Oberrheingraben sowie in weiteren kleinräumigen Beckenstrukturen ab.

Gebiete in Mittel- und Süddeutschland, die sich im Wesentlichen durch ein petrothermisches Potenzial auszeichnen, weisen dagegen nur in geringem Maße eine mögliche Nutzungskonkurrenz auf.

Für die Rotliegend-Vulkanite und den Mittleren Buntsandstein im Norddeutschen Becken, den weiteren petrothermischen Potenzialgebieten, trifft dies nicht zu.

Tab. 5.1: Gegenüberstellung der ermittelten stratigraphischen Einheiten, die für eine geothermischen Nutzung zur Verfügung stehen bzw. als untersuchungswürdig für eine CO₂-Einlagerung ermittelt wurden (vgl. Tab. 3.1).

Periode / Epoche	Alter / Formation (Fm.)	Norddeutscher Raum				Süddeutscher Raum				Alter / Formation (Fm.)
		NWB	NEB	TB	HS	FB	SNB	ORG	MB	
		SH BH A	SH BH A	SH BH A	SH BH A	SH BH A	SH BH A	SH BH A	SH BH A	
Quartär										
Neogen	Pliozän									
	Miozän									
Paläogen	Oligozän									Chatt
	Rupel									Rupel
	Paläozän									
Kreide	Oberkreide	Maastricht								Maastricht
		Campan								Campan
		Santon								Santon
		Coniac								Coniac
		Turon								Turon
		Cenoman								Cenoman
	Unterkreide	Alb								Alb
		Apt								Apt
		Barrême								Barrême
		Hauterive								Hauterive
		Valangin								Valangin
		Berrias / "Wealden"								Berrias / Wealden
Jura	Oberjura (Malm)	Tithon							Tithon	
		Kimmeridge							Kimmeridge	
		Oxford							Oxford	
	Mitteljura (Dogger)	Callov							Callov	
		Bathon							Bathon	
		Bajoc							Bajoc	
		Aalen							Aalen	
	Unteljura (Lias)	Toarc							Toarc	
		Pliensbach							Pliensbach	
		Sinemur							Sinemur	
Trias	Keuper	O Rhätkeuper							Oberkeuper	
		Steinmergelkeuper							Feuerletten / Knollenmergel	
		Oberer Gipskeuper							Sandsteinkeuper	
		Schilfsandstein							Gipskeuper	
		Unterer Gipskeuper							Unterkuper	
	Muschelkalk	Ob. Muschelkalk							Ob. Muschelkalk	
		Mittl. Muschelkalk							Mittl. Muschelkalk	
		Unt. Muschelkalk							Unt. Muschelkalk	
	Buntsandstein	O Röt							Röt	
		Solling-Fm							Solling-Fm	
Hardegsen-Fm								Hardegsen-Fm		
M Defurth-Fm								Defurth-Fm		
Volpriehausen-Fm								Volpriehausen-Fm		
U Bernburg-Fm								Bernburg-Fm		
Calvörde-Fm							Calvörde-Fm			
Permo-karbon	Zechstein	Fulda- bis Aller-Folge							Fulda- bis Aller-Folge	
		Leine-Folge							Leine-Folge	
		Staßfurt-Folge							Staßfurt-Folge	
		Werra-Folge							Werra-Folge	
	Rotliegend	Oberrotliegend							Rotliegend	
		Unterrotliegend							Karbon	

Erläuterung

CO₂-Einlagerung:

- Vorkommen der untersuchungswürdigen Speicherhorizonte
- Vorkommen der untersuchungswürdigen Barrierehorizonte
- Vorkommen mit undifferenzierter stratigraphischer Zuordnung
- Regionaler Speicher-Barriere-Komplex
- Speicherhorizont ohne Barrierehorizont im Hangenden
- Barrierehorizont ohne Speicherhorizont im Liegenden

- NWB Nordwestdeutsches Becken
- NEB Nordostdeutsches Becken
- TB Thüringer Becken
- HS Hessische Senke
- FB Fränkisches Becken
- SNB Saar-Nahe-Becken
- ORG Oberrheingraben
- MB Molassebecken

- SH = Speicherhorizont
- BH = Barrierehorizont
- A = Aquifer bzw. Horizont für EGS

Tiefe Geothermie:

- Vorkommen von Aquiferen mit nachgewiesenem hydrothermischem Potenzial
- Vorkommen von Aquiferen mit vermutetem hydrothermischem Potenzial
- Vorkommen von petrothermischem Potenzial aus EGS

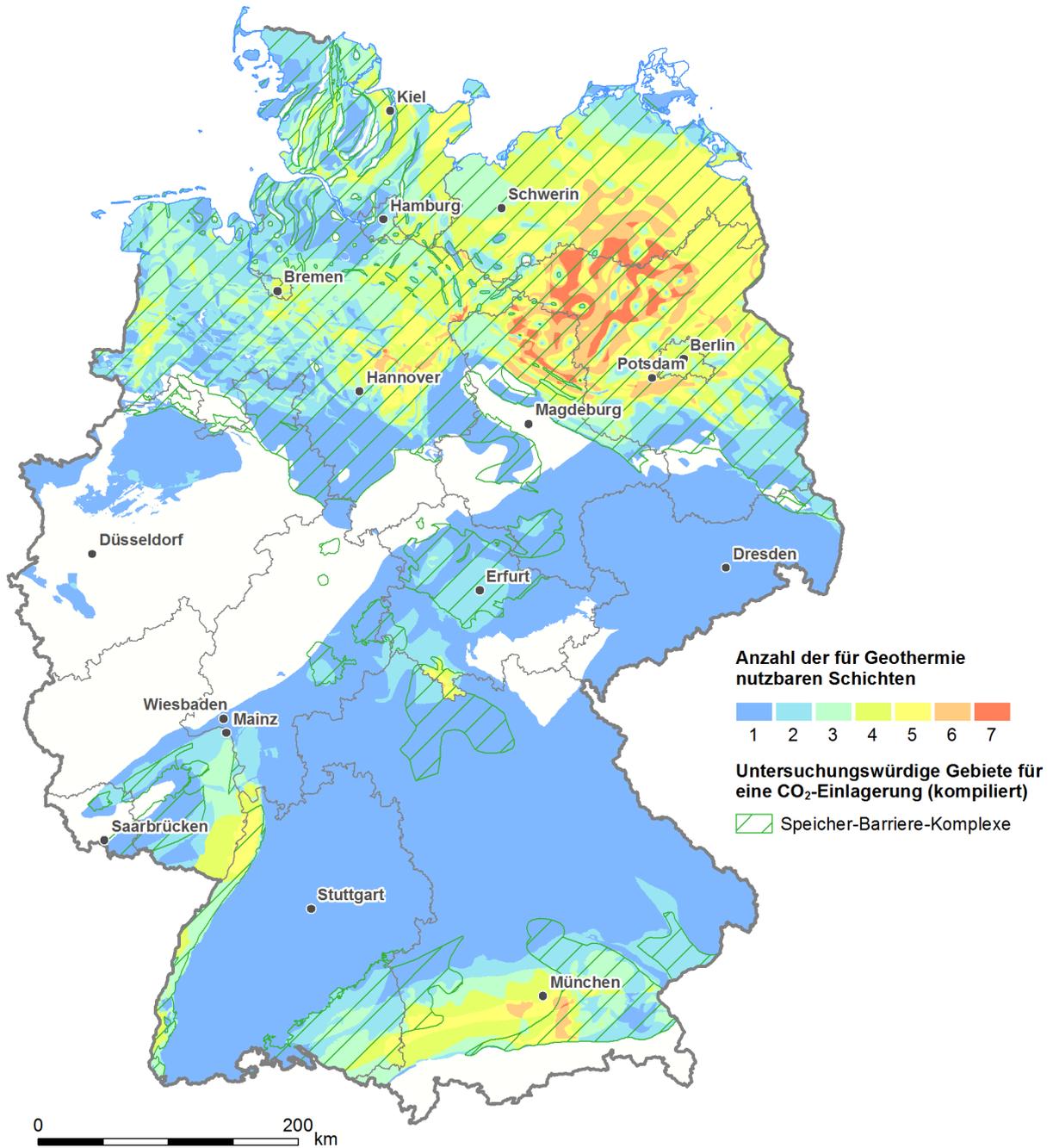


Abb. 5.6: Mögliche Nutzungskonkurrenz zwischen geothermischen Potenzialgebieten (Vollfarben) und untersuchungswürdigen Gebieten für eine CO₂-Einlagerung (Schraffur). Die Farben symbolisieren die Anzahl der geothermisch nutzbaren Schichten.

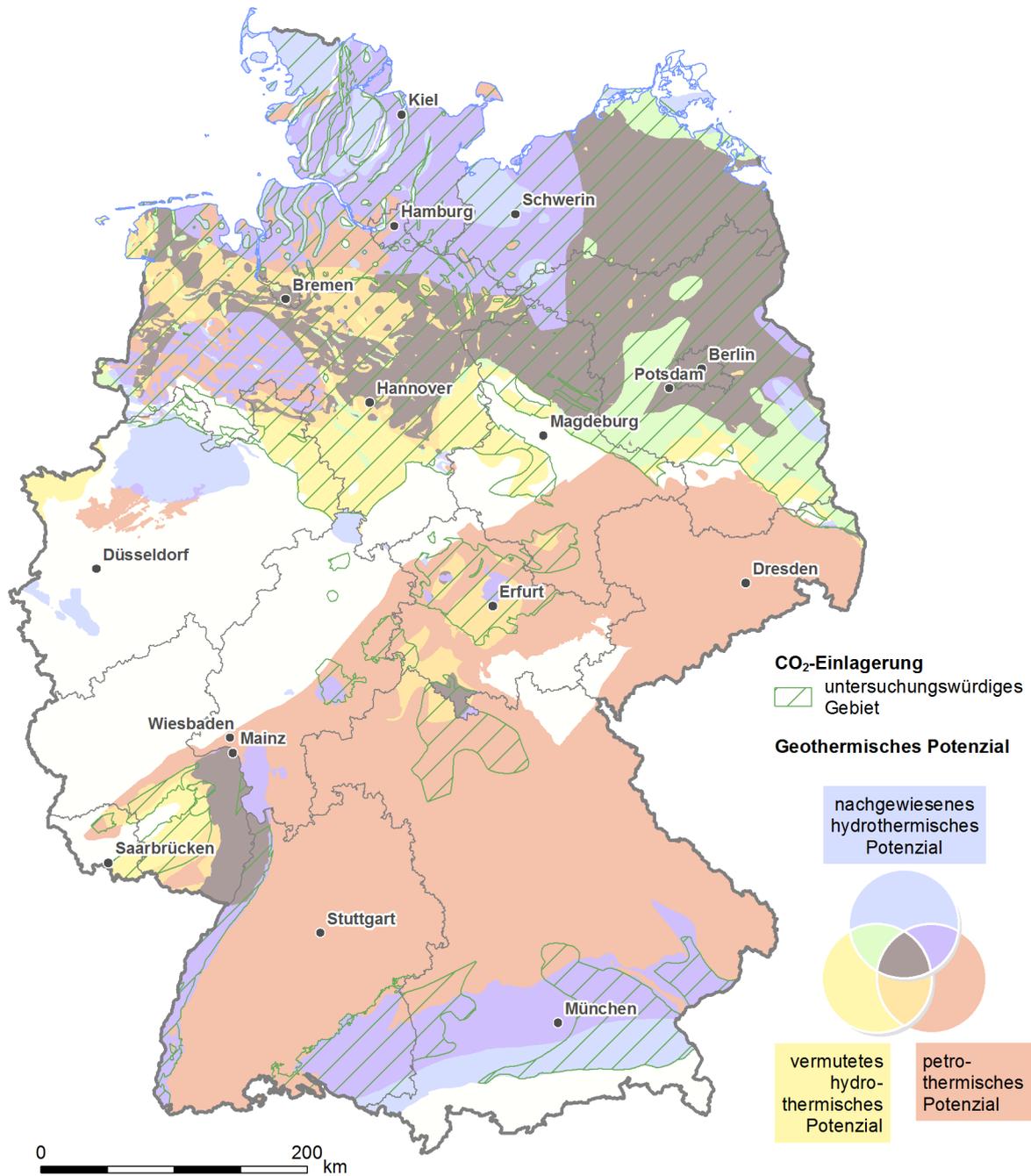


Abb. 5.7: Kompilierte Darstellung der Nutzungsoptionen von Geothermie und CO₂-Einlagerung mit möglichen resultierenden Nutzungskonkurrenzen auf den sich überlagernden Flächen. Die Vollfarben beziehen sich auf das geothermische Potenzial (ausführliche Legende siehe Abb. 5.5).

Aus dem Diagramm in Abbildung 5.8 lässt sich ersehen, dass nur rund 1,2 % der gesamten Fläche von Deutschland für eine CO₂-Einlagerung untersuchungswürdig ist, ohne dass Konkurrenz zu einer geothermischen Option auftreten würde. Eine mögliche konkurrierende Nutzung konnte für 41,7 % der Fläche von Deutschland festgestellt werden. Geothermisch nutzbar, ohne Konkurrenz zur CO₂-Einlagerung, sind 37,3 % der Gesamtfläche. Lediglich 19,9 % der Fläche von Deutschland sind nicht untersucht oder als nicht nutzbar für mindestens eine der untersuchten Optionen eingestuft worden.

Für eine vergleichende Bewertung der Nutzungsarten und eine mögliche Ausweisung von Vorzugsgebieten ist es jedoch nötig, weitere Aspekte und Kriterien zu berücksichtigen; dies war nicht Inhalt dieses Projektes. Zusätzliche Kriterien könnten zum Beispiel Bevölkerungsdichte oder geeignete Energieabnehmer sein. In jedem Fall kann die Eignung des Untergrundes für eine geotechnische Nutzung erst nach einer intensiven standortspezifischen Erkundung festgelegt werden.

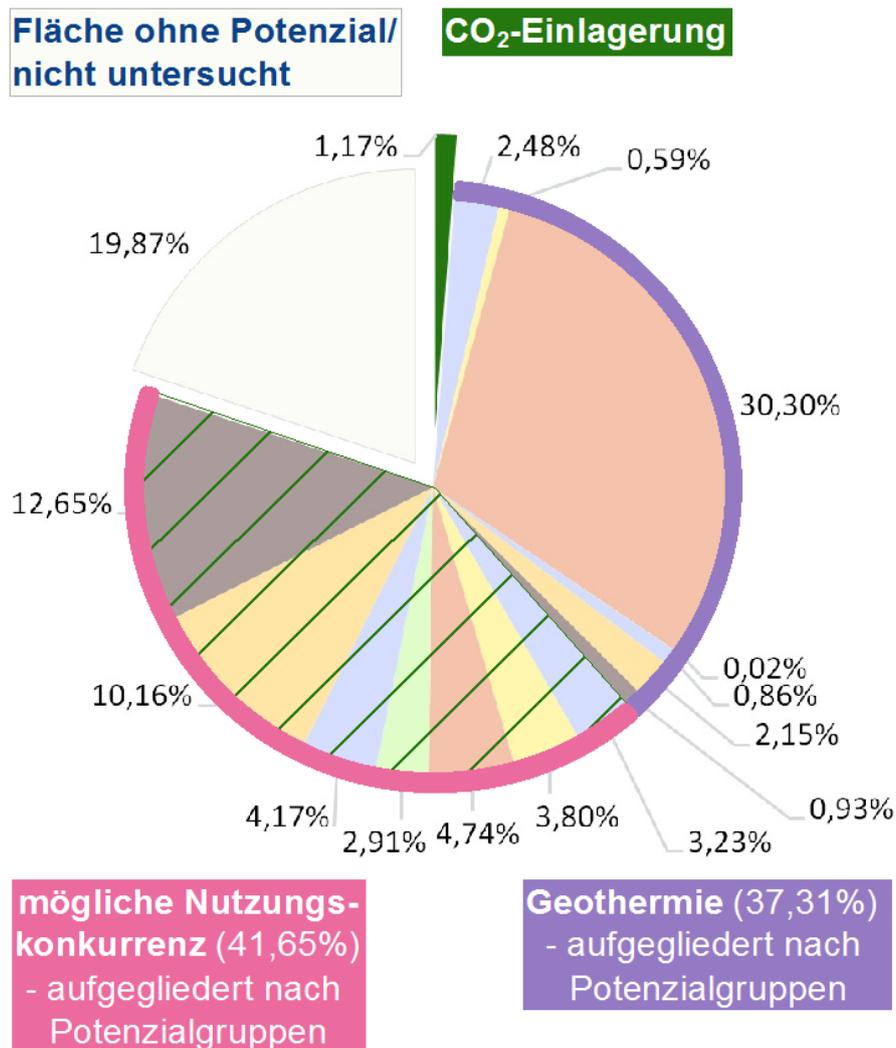


Abb. 5.8: Kompilierte Darstellung aller Nutzungsoptionen und möglichen Nutzungskonkurrenzen mit Angabe der prozentualen Anteile an der Gesamtfläche von Deutschland.

6 Literaturverzeichnis

6.1 Verwendete Literatur

- AGEMAR, T., SCHELLSCHMIDT, R. & SCHULZ, R. (2012): Subsurface Temperature Distribution of Germany. – *Geothermics*, **44**: 65-77.
- AHRENS, H. (1972): Neotektonische Karte der DDR 1 : 1 000 000. – Zentrales Geologisches Institut (ZGI); Berlin.
- ANTRETT, P., VACKINER, A.A., KUKLA, P.A., BACK, S. & STOLLHOFEN, H. (2012): Controls on reservoir compartmentalization of an Upper Permian tight gas field in Germany and links to a modern analogue in the Western US. – *Petroleum Geoscience*, **18**: 289 -304.
- BACHMANN, G.H., MÜLLER, M. & WEGGEN, K. (1987): Evolution of the Molasse Basin (Germany, Switzerland). – *Tectonophysics*, **137**: 77-92.
- BALDSCHUHN, R., BINOT, F., FLEIG, S. & KOCKEL, F. (2001): Geotektonischer Atlas von NW-Deutschland und dem deutschen Nordsee-Sektor. – *Geol. Jb.*, **A153**: 3-95, 1 Abb., 3 CD's; Hannover.
- BALDSCHUHN, R., FRISCH, U. & KOCKEL, F. (1996): Geotektonischer Atlas von Nordwest-Deutschland 1 : 300 000. – Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe; Hannover.
- BALDSCHUHN, R. & KOCKEL, F. (1998): Der Untergrund von Hannover und seiner Umgebung. – *Ber. Nat. hist. Ges.*, **140**: 5-98.
- BEST, G. & ZIRNGAST, M. (2002): Die strukturelle Entwicklung der exhumierten Salzstruktur „Oberes Allertal“. – 110 S., Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe; Hannover.
- BETZ, D., FUEHRER, F. & GREINER, G. (1987): Evolution of the Lower Saxony Basin. – *Tectonophysics*, **137**: 127-170.
- BEUTLER, G., RÖHLING, H.-G., SCHULZ, R. & WERNER, K.-H. (1994): Regionale Untersuchungen von geothermischen Reserven und Ressourcen in Nordwestdeutschland. – Bericht, NLfB-Archiv 111 758; 161 S., 37 Abb., 13 Tab., 33 Anl.; Hannover.
- BOIGK, H. & SCHÖNEICH, H. (1970): Die Tiefenlage der Permbasis im nördlichen Teil des Oberrheingrabens. – In: ILLIES, J. H. & MÜLLER, S. (Hrsg.): Graben Problems: 45-55, 8 Abb.; Stuttgart (Schweizerbart).
- BRANDES, J. & OBST, K. (2009): Isobathenkarte für den Aquiferkomplex Mittlerer Buntsandstein in NE-Deutschland. – *Brandenb. Geowiss. Beitr.*, **16**: 19-28; Cottbus.
- BRANDES, J. & OBST, K. (2010): Speicher- und Barrieregesteinskomplexe in Mecklenburg-Vorpommern. – In: MÜLLER, C. & REINHOLD, K. (Hrsg.) (2011): Informationssystem Speichergesteine für den Standort Deutschland - eine Grundlage zur klimafreundlichen geotechnischen und energetischen Nutzung des tieferen Untergrundes (Speicher-Kataster Deutschland). – Abschlussbericht, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe; Berlin.

- BRÜCKNER, W., MEINKE, O.-D., ALTHEN, G.-W., FISCHER, U., SEEGER, J., TOLEIKIS, R. & KNEBEL, G. (1990): Geothermische Ressourcen im N-Teil der DDR (II): Abschlussbericht Blatt Wittenberge (1 : 200 000). – GFE GmbH; Berlin.
- BRÜCKNER-RÖHLING, S., ESPIG, M., FISCHER, M., FLEIG, S., FORSBACH, H., KOCKEL, F., KRULL, P., STIEWE, H. & WIRTH, H. (2002): Projekt Gorleben, Standsicherheitsnachweise Nachbetriebsphase: Seismische Gefährdung. - Teil 1: Strukturgeologie. – Archiv-Nr. 0128111, 183 S., 39 Abb., 9 Tab., 70 Anl.; Hannover.
- BStWIVT – BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT, INFRASTRUKTUR, VERKEHR UND TECHNOLOGIE (Hrsg.) (2010): Bayerischer Geothermieatlas – Hydrothermale Energiegewinnung. – 93 S.; München.
- BUNDESAMT FÜR KARTOGRAPHIE UND GEODÄSIE (Hrsg.) (2004): Digitale Topographische Karte 1 : 1 000 000. – DTK 1000; Leipzig.
- BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE (Hrsg.) (1993): Geologische Karte der Bundesrepublik Deutschland 1 : 1 000 000. – GÜK 1000; Hannover.
- CAINE, J.S., EVANS, B.J. & FORSTER, C.B. (1996): Fault zone architecture and permeability structure. – *Geology*, **24** (11): 1025-1028.
- CARLÉ, W. (1950): Erläuterungen zur geotektonischen Übersichtskarte der südwestdeutschen Großscholle 1 : 1 000 000. – Württ. Statist. Landesamt; Stuttgart.
- CARLÉ, W. (1955): Bau und Entwicklung der Süddeutschen Großscholle. – *Beih. Geol. Jb.*, **16**: 272 S.
- CHADWICK, A., ARTS, R., BERNSTONE, C., MAY, F., THIBEAU, S. & ZWEIGEL, P. (Eds.) (2008): Best practice for the storage of CO₂ in saline aquifers, Observations and guidelines from the SACS and CO2STORE projects. – 267 pp.; Nottingham (British Geological Survey).
- DEUTSCHE STRATIGRAPHISCHE KOMMISSION (Hrsg.; Koordination und Redaktion: PLEIN, E. für die Subkommission Perm-Trias, 1995): Stratigraphie von Deutschland I – Norddeutsches Rotliegendebcken. – *Cour. Forsch.-Inst. Senckenberg*, **183**: 1-193, 81 Abb., 10 Tab., 8 Taf.; Frankfurt a. M.
- DEUTSCHE STRATIGRAPHISCHE KOMMISSION (Hrsg.; Koordination und Gestaltung: MENNING, M. & HENDRICH, A., 2002): Stratigraphische Tabelle von Deutschland 2002. – Potsdam (GeoForschungsZentrum), Frankfurt a. M. (Forsch.-Inst. Senckenberg).
- DIENER, I., PASTERNAK, G., RUSITZKA, I., STOLLBERG, K., TESSIN, R., WORMBS, J. & KATZUNG, G. (1988): Geothermische Ressourcen im Nordteil der DDR (I) – Blatt Neuruppin (1 : 200 000). – Zentrales Geologisches Institut; Berlin.
- DIENER, I., PASTERNAK, G. & STOLLBERG, K. (1991): Geologische Grundlagen für die Geothermienutzung in Nordost-Deutschland – Blatt Magdeburg/Brandenburg (1 : 200 000). – UWG GmbH; Berlin.
- DIENER, I., PASTERNAK, G., STOLLBERG, K., TESCH, M., TESSIN, R., TOLEIKIS, R. & WORMBS, J. (1990b): Geothermische Perspektivitätsbewertung für die Geothermienutzung in NE-Deutschland – Blatt Berlin/Frankfurt Oder (1 : 200 000). – UWG GmbH; Berlin.

- DIENER, I., TESCH, M. & PASTERNAK, G. (1992a): Geologische Grundlagen für die Geothermienutzung in Nordost-Deutschland – Blatt Finsterwalde/Cottbus (1 : 200 000). – UWG GmbH; Berlin.
- DIENER, I., WORMBS, J., PASTERNAK, G., STOLLBERG, K., TESCH, M. & TESSIN, R. (1992b): Geologische Grundlagen zur Geothermienutzung in Nordost-Deutschland – Blatt Rostock/Stralsund (1 : 200 000). – UWG GmbH; Berlin.
- DIENER, I., WORMBS, J., PASTERNAK, G., STOLLBERG, K., TESCH, M., TESSIN, R. & TOLEIKIS, R. (1992c): Geologische Grundlagen für die Geothermienutzung in Nordost-Deutschland – Blatt Salzwedel (1 : 100 000). – UWG GmbH; Berlin.
- DIENER, I., WORMBS, J., RUSITZKA, I., PASTERNAK, G., TOLEIKIS, R., TESSIN, R. & TROTTNER, D. (1990a): Geothermische Ressourcen im Nordteil der DDR (II) – Blatt Eberswalde/Bad Freienwalde (1 : 200 000). Teilbericht Stufe A3. – Zentrales Geologisches Institut; Berlin.
- DIENER, I., WORMBS, J., RUSITZKA, I., PASTERNAK, G., TOLEIKIS, R., TESSIN, R., TROTTNER, D. & WUNDERLICH, H. (1989): Geothermische Ressourcen im Nordteil der DDR (I) – Blatt Schwerin/Bad Doberan (1 : 200 000). – Zentrales Geologisches Institut; Berlin.
- DOEBL, F. & TEICHMÜLLER, R. (1979): Zur Geologie und heutigen Geothermik im mittleren Oberrheingraben. – *Fortschr. Geol. Rheinl. u. Westf.*, **27**: 1-17; Krefeld.
- DÖLLING, M. & JUCH, D. (2009): Strukturgeologische Modellvorstellungen zum Kreide-Deckgebirge im zentralen Münsterland. – In: GEOLOGISCHER DIENST NORDRHEIN-WESTFALEN (Hrsg.): Zwei Beiträge zur Geologie des zentralen und des südlichen Münsterlandes: 5-27; Krefeld (Geologischer Dienst Nordrhein-Westfalen).
- DOORNENBAL, J.C. & STEVENSON, A.G. (Eds.) (2010): Petroleum Geological Atlas of the Southern Permian Basin Area. – 342 S.; Houten (EAGE).
- DRONG, H.-J., PLEIN, E., SANNEMANN, D., SCHUEPBACH, M.A. & ZIMDARS, J. (1982): Der Schneverdingen-Sandstein des Rotliegenden - eine äolische Sedimentfüllung alter Grabenstrukturen. – *Z. dt. geol. Ges.*, **133**: 699-725, 9 Abb., 1 Tab., 5 Taf.; Hannover.
- DROZDZEWSKI, G. (1995): Geologie im Münsterland. – 195 S.; Krefeld (Geolog. Landesamt NRW).
- DROZDZEWSKI, G. & WREDE, V. (1994): Faltung und Bruchtektonik – Analyse der Tektonik im Subvariscikum. – In: GEOLOGISCHES LANDESAMT NORDRHEIN-WESTFALEN (Hrsg.): Fortschritte in der Geologie von Rheinland und Westfalen, **38**: 7-187; Krefeld.
- FASCHING, F. & VANEK, R. (2011): Engineering geological characterization of fault rocks and fault zones. – *Geomechanics and Tunnelling*, **4**: 181-194.
- FEHN, C. & WIRSING, G. (2011): Speicherpotentiale im tieferen Untergrund Baden-Württembergs. – In: MÜLLER, C. & REINHOLD, K. (Hrsg.): Geologische Charakterisierung tiefliegender Speicher- und Barrierehorizonte in Deutschland – Speicher-Kataster Deutschland. – *Schriftenr. dt. Ges. Geowiss.*, Heft **74**: 214-225; Hannover.
- FRANKE, D. (2012): Regionale Geologie von Ostdeutschland – Ein Wörterbuch. – <http://www.regionalgeologie-ost.de> [Stand 26.01.2013].

- FRANZKE, H.J. & RAUCHE, H. (1991): Ablauf der rupturrellen Deformationen an der Fränkischen Linie im Bereich des nordwestlichen Thüringer Waldes und Südthüringens. – *KTB-Report*, **91** (1): 21-40; Hannover.
- FRANZKE, H.J., VOIGT, T., EYNATTEN, H. V., BRIX, M.R. & BURMEISTER, G. (2004): Geometrie und Kinematik der Harznordrandstörung, erläutert an Profilen aus dem Gebiet von Blankenburg. – *Geowiss. Mitt. Thüringen*, **11**: 39-62; Jena.
- FREUDENBERGER, W. (1996): Tektonik – Deckgebirge nördlich der Donau. – In: BAYERISCHES GEOLOGISCHES LANDESAMT (Hrsg.): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1 : 500 000 (4. Aufl.): 259-265; München.
- FREUDENBERGER, W. & SCHWERD, K. (1996): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1 : 500 000. – 4. neubearbeitete Auflage, BAYERISCHES GEOLOGISCHES LANDESAMT (Hrsg.); München.
- GAERTNER, H.R. V., WALTHER, H.W. & ZITZMANN, A. (1968): Karte der Orogenetischen Entwicklung/Fazieskarte der Lithotektonik 1 : 2 500 000. – Vorentwurf, Bundesanstalt für Bodenforschung; Hannover.
- GAITZSCH, B. (1995): Grüneberg-Formation. – In: PLEIN, E. (Hrsg.): Stratigraphie von Deutschland I Norddeutsches Rotliegendebcken Rotliegend Monographien Teil II. – *Cour. Forsch.-Inst. Senckenb.*, **183**: 102-106; Frankfurt a. M.
- GAST, R. (1988): Rifting im Rotliegenden Niedersachsens. – *Die Geowissenschaften*, **6** (4): 115-122, 14 Abb.; Weinheim.
- GAST, R. (1991): The perennial Rotliegend Saline Lake in NW-Germany. – *Geol. Jb.*, **A119**: 25-59; Hannover.
- GAST, R., PASTERNAK, G., PISKE, J. & RASCH, H.-J. (1998): Das Rotliegend im Nordostdeutschen Raum: Regionale Übersicht, Stratigraphie, Fazies und Diagenese. – *Geol. Jb.*, **A149**: 59-79; Hannover.
- GEBHARDT, U. (1994): Zur Genese der Rotliegend-Salinare in der Norddeutschen Senke (Oberrotliegend II, Perm). – *Freib. Forsch.-H.*, **452**: 3-22; Berlin.
- GEBHARDT, U., HELMUTH, H., KLEDITZSCH, O. & SÜSSMUTH, S. (1995): Havel-Subgruppe. – *Cour. Forsch.-Inst. Senckenb.*, **183**: 110-117; Frankfurt a. M.
- GEOLOGISCHER DIENST NRW (2004): Geologische Übersichtskarte im Maßstab 1 : 500 000. – GÜK 500; Krefeld.
- GEOLOGISCHER DIENST NRW (2005): Potenzialstudie „Tiefengeothermie im Ruhrgebiet“. – <http://www.gd.nrw.de> [Stand 30.01.2013].
- GEOLOGISCHES LANDESAMT HANNOVER (1946): Geotektonische Karte von Nordwestdeutschland im Maßstab 1 : 100 000, Großblatt 61; Hannover.
- GEO THERMIE NEUBRANDENBURG GMBH (GTN) (2004): Geothermie in Bremen - Bewertung der geologischen und verfahrenstechnischen Möglichkeiten einer praktischen Nutzung geothermischer Energie im Bundesland Bremen. – Studie mit digitalen Karten (CD-Rom); Bremen (Bremer Energie-Konsens GmbH).
- GERLING, J.P. (2008): Geologische CO₂-Speicherung als Beitrag zur nachhaltigen Energieversorgung. – *Bergbau*, **59** (10): 472-475.
- GROBE, M. & MACHEL, H.G. (1997): Petrographic and geochemical evidence for fault-controlled hydrothermal mineralization of the Brilon reef complex, Germany. – *AAPG Bull.*, **81** (10): 1775.

- HABLE, R., KAUFHOLD, H., LIEBSCH-DÖRSCHNER, T. & THOMSEN, C. (2011): Endbericht Speicher-Kataster Deutschland für die Bundesländer Hamburg und Schleswig-Holstein. – In: MÜLLER, C. & REINHOLD, K. (Hrsg.): Informationssystem Speichergesteine für den Standort Deutschland – eine Grundlage zur klimafreundlichen geotechnischen und energetischen Nutzung des tieferen Untergrundes (Speicher-Kataster Deutschland). – Abschlussbericht, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe; Berlin.
- HAENEL, R. & HURTER, S. (Eds.) (2002): Atlas of Geothermal Resources in Europe. – Commission of the European Communities, 74 pp.; Luxembourg.
- HAENEL, R., KLEEFELDT, M. & KOPPE, I. (1984): Geothermisches Energiepotenzial. Pilotstudie: Abschätzung der geothermischen Energievorräte an ausgewählten Beispielen in der Bundesrepublik Deutschland (Abschlussbericht). – Bericht NLFb (im Auftrag der Europäischen Gemeinschaft und des Bundesministeriums für Forschung und Technologie), Archiv-Nr. 96 276, Band I–IV; Hannover.
- HAENEL, R. & STAROSTE, E. (Eds.) (1988): Atlas of Geothermal Resources in the European Community, Austria and Switzerland. – Publ. No. EUR 17811 of the European Commission, Office of Official Publications of the European Communities, 92 pp.; Luxembourg.
- HAGER, H. & PRÜFERT, J. (1988): Tertiär. – In: HILDEN, H.D. (Hrsg.): Geologie am Niederrhein, S. 32-40; Krefeld (Geolog. Landesamt NRW).
- HAHN, T., WUCHER, K., HEUSE, T. & MELZER, P. (2005): Neudefinition lithostratigrafischer Einheiten im Unterkarbon (Kulm) des Thüringisch-Fränkisch-Vogtländischen Schiefergebirges. – *Geowiss. Mitt. Thüringen*, **12**: 19-49; Weimar.
- HESSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE (HLUG) (2012): Geothermisches Potenzial: Projekt Hessen 3D. – <http://www.hlug.de> [Stand 29.01.2013].
- HEUNISCH, C., CASPERS, G., ELBRACHT, J., LANGER, A., RÖHLING, H.G., SCHWARZ, A. & STREIF, H. (2007): Erdgeschichte von Niedersachsen: Geologie und Landschaftsentwicklung. – *GeoBerichte* **6**: 85 S., 57 Abb., 18 Tab., 5 Kt.; Hannover.
- HINSCH, W. (1974): Das Tertiär im Untergrund von Schleswig-Holstein. – *Geol. Jb.*, **A24**: 22-38; Hannover.
- HINSCH, W. (1986): Lithologie, Stratigrafie und Paläogeographie des Paläogens in Schleswig-Holstein. – *Beitr. Reg. Geol. Erde*, **18**: 10-21; Berlin.
- HOFFMANN, J. (1952): Fazieskarten des Dogger (Dogger Alpha-Zeta). – 1 Kt.; Hannover.
- HOTH, P., WIRTH, H., REINHOLD, K., BRÄUER, V., KRULL, P. & FELDRAPPE, H. (2007): Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands - Untersuchung und Bewertung von Tongesteinsformationen.– 118 S. , Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe; Berlin.
- HUCKRIEDE, H. & ZANDER, I. (2011): Geologische Charakterisierung der Speicher- und Barrieregesteine im tieferen Untergrund des Freistaats Thüringen (Deutschland). – In: MÜLLER, C. & REINHOLD, K. (Hrsg.): Geologische Charakterisierung tiefliegender Speicher- und Barrierehorizonte in Deutschland – Speicher-Kataster Deutschland. – *Schriftenr. dt. Ges. Geowiss.*, Heft **74**: 188-204; Hannover.

- HUENGES, E., HOTH, P. & SCHEYTT, T. (1999): Technisch nutzbare Erdwärmeverkommen. – In: KALTSCHMITT, M., HUENGES, E. & WOLF, H. (Hrsg.): Energie aus Erdwärme: 40–59; Stuttgart (Dt. Verl. für Grundstoffindustrie).
- JUNG, R., RÖHLING, S., OCHMANN, N., ROGGE, S., SCHELLSCHMIDT, R., SCHULZ, R. & THIELEMANN, T. (2002): Abschätzung des technischen Potenzials der geothermischen Stromerzeugung und der geothermischen Kraft-Wärmekopplung (KWK) in Deutschland. – Bericht für das Büro für Technikfolgenabschätzung beim Deutschen Bundestag, BGR/GGA, Archiv-Nr. 122 458; Hannover.
- KATZUNG, (1984): Geothermie-Atlas der Deutschen Demokratischen Republik (1 : 500 000). – Zentrales Geologisches Institut; Berlin.
- KEAREY, P. (2001): The New Penguin Dictionary of Geology. – 336 pp.; London (Penguin).
- KEMPER, E. (1976): Geologischer Führer durch die Grafschaft Bentheim und die angrenzenden Gebiete. – Das Bentheimer Land Nr. 64: 206 S.; Nordhorn-Bentheim (Heimatverein der Grafschaft Bentheim e.V.).
- KLARNER, S. (1993): Analyse des strukturellen Aufbaus (Grabenproblematik) des Rotliegend im Raum Zehdenick-Gransee. – *Geol. Jb.*, **A131**: 239-251.
- KLÜNKER, J. (1997): Lokale Grundwasserfließsysteme im Grenzbereich zwischen paläozoischen Festgesteinen und känozoischen Lockergesteinen: eine geologisch-hydrogeologisch-wasserwirtschaftliche Studie im Übergangsbereich Niederbergisches Land/Niederrheinische Bucht. – Diss. RWTH Aachen: 241 S.; Aachen.
- KNOFF, S., MAY, F., MÜLLER, C., & GERLING, J.P. (2010): Neuberechnung möglicher Kapazitäten zur CO₂-Speicherung in tiefen Aquifer-Strukturen. – *Energiewirtschaftliche Tagesfragen*, **60** (4): 76-80.
- KOCKEL, F. & KRULL, P. (2000): Aufbau, Strukturierung und Kinematik des Sockels unter dem Norddeutschen Zechsteinbecken. – Zwischenbericht, Archiv-Nr. 117 801, 60 S., 13 Abb., 12 Tab., 1 Anl.; Hannover.
- KÖLBEL, H. (1962): Geologische Karte der DDR 1 : 500 000, Karte ohne känozoische Bildungen 1 : 500 000. – Zentrales Geologisches Institut der Staatlichen Geologischen Kommission der DDR; Berlin.
- KÖLBEL, H. (1977): Tektonisches Kartenschema von Mitteleuropa 1 : 2 500 000. – Zentrales Geologisches Institut; Berlin.
- KOENIGSWALD, W. v. (Hrsg.) (1994): Erdgeschichte im Rheinland - Fossilien und Gesteine aus 400 Millionen Jahren. – 239 S.; München (Pfeil).
- KORSCH, R.J. & SCHÄFER, A. (1995): The Permo-Carboniferous Saar-Nahe Basin, south-west Germany and north-east France: basin formation and deformation in a strike-slip regime. – *Geol. Rundsch.*, **84**: 293-318; Berlin.
- KOSSMAT, F. (1927): Gliederung des variszischen Gebirgsbaues. – *Abh. Sächs. Geol. L.-Amt*, **1**: 1-39; Leipzig.
- KÖTT, A. (2008): Abschlussbericht zur Vorstudie zum Informationssystem Speichergesteine zur CO₂-Speicherung für den Standort Hessen – eine Grundlage zur klimafreundlichen geo- und energietechnischen Nutzung des tiefen Untergrundes (Speicherkataster) – INKLIM 2012 II plus. – Hessisches Ministerium für Umwelt, ländlichen Raum und Verbraucherschutz; Wiesbaden.

- KÖTT, A. & KRACHT, M. (2011): Möglichkeiten der CO₂-Speicherung in tiefen Aquiferen Hessens. – In: MÜLLER, C. & REINHOLD, K. (Hrsg.): Geologische Charakterisierung tiefliegender Speicher- und Barrierehorizonte in Deutschland – Speicher-Kataster Deutschland. – *Schriftenr. dt. Ges. Geowiss.*, **74**: 165-187; Hannover.
- KRONMÜLLER, K. (1987): Sedimentologie der Bausteinschichten und der Unteren Cyrenenschichten im westlichen Molassebecken Süddeutschlands (Oberoligozän). – *Clausth. Geowiss. Diss.*, 25, 177 S.; Clausthal-Zellerfeld.
- KÜHNE, K., MAUL, A.-A. & GORLING, L. (2003): Aufbau eines Fachinformationssystems Geophysik. – *Z. Angew. Geol.*, **49** (2): 48-53; Hannover.
- KÜHNE, K. & GORLING, L. (2009): Neues im und um das Fachinformationssystem Geophysik. – In: BOOGAART, R. v. D. & SCHAEBEN, H. (Hrsg.): GIS – Geowissenschaftliche Anwendungen und Entwicklungen, 8. GIS-Kolloquium, 18.06.2009, *Wiss. Mitt. Inst. Geol. TU BAF*, **40**: 19-26, ISSN 1433-1284; Freiberg.
- LANDESAMT FÜR GEOLOGIE, ROHSTOFFE UND BERGBAU (LGBR) IM REGIERUNGSPRÄSIDIUM FREIBURG (2005): Geothermische Synthese/Bestandsaufnahme des Oberrheingrabens (1979/1981). – Digitale Karten (CD-Rom); Freiburg.
- LANDESAMT FÜR GEOLOGIE UND BERGBAU (LGB) RHEINLAND-PFALZ (2003): Störungen im Maßstab 1 : 300 000. – GÜK 300; Mainz.
- LANDESAMT FÜR NATUR UND UMWELT DES LANDES (LANU) SCHLESWIG-HOLSTEIN (2004): Geothermie in Schleswig Holstein – Ein Baustein für den Klimaschutz. – Broschüre, 110 S.; Flintbek.
- LAUSBERG, S. (2002): Neue Kenntnisse zur saarpfälzischen Rotliegendflora unter besonderer Berücksichtigung der Coniferentaxonomie und des Hinterlandes. – *Diss. Univ. Münster*: 266 S.; Münster.
- LEMCKE, K. (1988): Geologie von Bayern, Bd. I: Das bayerische Alpenvorland vor der Eiszeit – Erdgeschichte, Bau, Bodenschätze. – 175 S., 71 Abb., 1 Tab., 2 Taf.; Stuttgart (Schweizerbart).
- LINDERT, W., WARNCKE, D. & STUMM, M. (1990): Probleme der lithostratigraphischen Korrelation des Oberrotliegenden (Saxon) im Norden der DDR. – *Z. Angew. Geol.*, **36**: 368-375.
- LOHR, T. (2007): Seismic and sub-seismic deformation on different scales in the NW German Basin. – *Diss. FU Berlin, Deutsches GeoForschungsZentrum*: 89 S.; Potsdam.
- LOKHORST, A. (Ed.) (1998): Northwest European Gasatlas – Composition and Isotope Ratios of Natural Gases. – 1 CD; Haarlem (NITG-TNO).
- LOTZ, B. (2004): Neubewertung des rezenten Wärmestroms im Nordostdeutschen Becken. – *Diss. FU Berlin, Deutsches GeoForschungsZentrum*: 199 S.; Potsdam.
- MALLET, J.L. (1992): GOCAD – a computer aided design program for geological applications: Three-Dimensional Modelling with Geoscientific Information Systems. – *Nato ASI Series*, **C354**: 123-142.

- MARTIKLOS, G., BEUTLER, G. & EHLING, B.C. (2001): Geologische Übersichtskarte von Sachsen-Anhalt, Karte ohne quartäre Bildungen 1 : 400 000 und Tektonische Übersichtskarte von Sachsen-Anhalt 1 : 500 000. – Landesamt für Geologie und Bergwesen Sachsen Anhalt (Hrsg.); Halle.
- MATTAUER, M. (1993): Strukturgeologie. – 353 S.; Stuttgart (Enke).
- MAYSTRENKO, Y., BAYER, U. & SCHECK-WENDEROTH, M. (2005): The Glueckstadt Graben, a sedimentary record between the North and Baltic Sea in north Central Europe. – *Tectonophysics*, **397**: 113-126.
- MEIER, S., BAUER, J.F. & PHILIPP, S.L. (2012): Charakterisierung von Störungszonen im Muschelkalk des Oberrheingrabens – Aufschlussanalogstudien. – Der Geothermie Kongress 2012, 13.-16.11.2012, Tagungsband-DVD; Karlsruhe.
- MEYER, R.K.F. & SCHMIDT-KALER, H. (1996): Jura. – In: BAYERISCHES GEOLOGISCHES LANDESAMT (Hrsg.): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1 : 500 000 (4. Aufl.): 90-111; München.
- MICHEL, G. & STRUCKMEIER, W. (1985): The Cretaceous Basin of Muenster – A General System in Response to Multiple Impacts (Water Supply, Spas, Deep mining). – In: Hydrology in the Service of Man, Memoires of the 18th Congress of the IAH: 150-159; Cambridge.
- 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.
- MÜLLER, C. & REINHOLD, K. (Hrsg.) (2011a): Geologische Charakterisierung tiefliegender Speicher- und Barrierehorizonte in Deutschland – Speicher-Kataster Deutschland. – *Schriftenr. dt. Ges. Geowiss.*, Heft **74**; Hannover.
- MÜLLER, C. & REINHOLD, K. (Hrsg.) (2011b): Informationssystem Speichergesteine für den Standort Deutschland – eine Grundlage zur klimafreundlichen geotechnischen und energetischen Nutzung des tieferen Untergrundes (Speicher-Kataster Deutschland). – Abschlussbericht, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe; Berlin.
- MÜLLER, M. (1978): Das tiefere Tertiär, Obereozän – Miozän. – In: UNGER, H.J.: Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1 : 50 000, Blatt Nr. L 7740 Mühldorf am Inn: 45-73; München (Bayer. Geol. Landesamt).
- NICKEL, E. (2003): Oligozäne Beckendynamik und Sequenzstratigraphie am Südrand des Nordwesteuropäischen Tertiärbeckens. – Diss. Univ. Bonn: 151 S.; Bonn.
- OBST, K. & BRANDES, J. (2011): Geologische Übersichtskarte von Mecklenburg-Vorpommern – Nutzhorizonte im Mittleren Buntsandstein 1 : 500 000. – Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern; Güstrow.
- PASCHEN, H., OERTEL, D. & GRÜNWARD, R. (2003): Möglichkeiten der geothermischen Stromerzeugung in Deutschland. – Sachstandsbericht, Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag, Arbeitsbericht 84: 129 S.; Berlin (TAB).

- PECHAN, E., TISCHNER, T., KRUG, S. & JATHO, R. (2012): Fracoperation und hydraulische Tests in der Bohrung Groß Buchholz Gt 1 (GeneSys-Projekt Hannover). – *Schriftenr. dt. Ges. Geowiss.*, Heft **80**: 203; Hannover.
- PK TIEFE GEOTHERMIE (2007): Nutzungen der geothermischen Energie aus dem tieferen Untergrund (Tiefe Geothermie) – Arbeitshilfe für Geologische Dienste. – <http://www.infogeo.de> [Stand 27.01.2013].
- PLEIN, E. (1995): Rotliegendablagerungen im norddeutschen Becken. – *Z. dt. geol. Ges.*, **129**: 71-97, 6 Abb., 1 Tab.; Hannover.
- REGIERUNGSPRÄSIDIUM FREIBURG, LANDESAMT FÜR GEOLOGIE, ROHSTOFFE UND BERGBAU (Hrsg.) (2006): Tektonik im Maßstab 1 : 300 000. – GÜK 300; Freiburg.
- REIN, B., HANEKE, J. & WEIDENFELLER, M. (2011): Speicher-Kataster für Deutschland – Endbericht für das Gebiet der Bundesländer Rheinland-Pfalz und Saarland. – In: MÜLLER, C. & REINHOLD, K. (Hrsg.): Informationssystem Speichergesteine für den Standort Deutschland – eine Grundlage zur klimafreundlichen geotechnischen und energetischen Nutzung des tieferen Untergrundes (Speicher-Kataster Deutschland) – Abschlussbericht, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe; Berlin.
- REINHARDT, H.-G. (1982): Komplexgeophysikalische Strukturkarte der Deutschen Demokratischen Republik 1 : 500 000. – VEB Geophysik; Leipzig.
- REINHARDT, H.-G. & AUTORENKOLLEKTIV (1986-1989): Regionales geophysikalisches Kartenwerk der DDR, Tiefenlinienkarten der Rx-Horizonte. – Unveröff. Karten, VEB Geophysik; Leipzig.
- REINHOLD, K. (2005): Tiefenlage der Kristallin-Oberfläche in Deutschland – Abschlussbericht. F + E Endlagerung. – 91 S., 1 Anl.; Berlin (BGR).
- REINHOLD, K., KRULL, P. & KOCKEL, F. (2008): Salzstrukturen Norddeutschlands 1 : 500 000. – Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe; Hannover.
- REINHOLD, K., MÜLLER, C. & RIESENBERG, C. (2011): Informationssystem Speichergesteine für den Standort Deutschland – Synthese. – Bericht: 134 S., Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe; Berlin.
- REYER, D., BAUER, J.F. & PHILIPP, S.P. (2010): Architektur und Permeabilität von Störungszonen in Sedimentgesteinen des Norddeutschen Beckens. – Tagungsband, der Geothermiekongress 2010, 17.-19.11.2010; Karlsruhe.
- RIEKE, H. (2001): Sedimentologie, Faziesarchitektur und Faziesentwicklung des kontinentalen Rotliegenden im Norddeutschen Becken (NEDB). – Diss. Univ. Potsdam, Deutsches GeoForschungsZentrum: 138 S.; Potsdam.
- ROCKEL, W. & SCHNEIDER, H. (1992): Die Möglichkeiten der Nutzung geothermischer Energie in Nordostdeutschland und der Bearbeitungsstand geplanter Vorhaben. – In: SCHULZ, R., WERNER, R., RUHLAND, J. & BUßMANN, W. (Hrsg.): Geothermische Energie – Forschung und Anwendung in Deutschland: 87-98; Karlsruhe (C.F. Müller).
- ROCKEL, W., HOTH, P. & SEIBT, P. (1997): Charakteristik und Aufschluss hydrogeothermaler Speicher. – *Geowissenschaften*, **15** (8): 244-252.

- RÖHLING, H.-G. (1999): The Quickborn Sandstone – a new lithostratigraphic unit in the lowermost Middle Buntsandstein (Scythian). – *Zbl. Geol. Paläont.*, Teil I, Heft 7-8: 797-812; Stuttgart.
- RÖHLING, H.-G. & FRITZ, J. (2000): Potenzielle Aquifere für die Thermalwassergewinnung im mitteltiefen Untergrund von Bremerhaven-Speckenbüttel. – NLFb, Archiv Nr. 120299: 26 S., 6 Abb., 3 Tab.; Hannover.
- RÖLLIG, G., VIEHWEG, M. & MUSSTOW, R. (1990): Geologische Karte der Deutschen Demokratischen Republik, geologische Karte ohne känozoische Sedimente 1 : 500 000. – Zentrales Geologisches Institut (ZGI); Berlin.
- SCHÄFER, A. (1986): Die Sedimente des Oberkarbons und Unterrotliegenden im Saar-Nahe-Becken. – *Mainzer geowiss. Mitt.*, **15**: 239-365.
- SCHECK, M., BAYER, U. & LEWERENZ, B. (2003): Salt redistribution during extension and inversion inferred from 3D backstripping. – *Tectonophysics*, **373**: 55-73.
- SCHENK, N. (1998): Teil 1: Geologische Kartierung im Raum Bottrop-Kirchhellen – Schermbeck (Südwest Münsterland), Teil 2: Lithologie und Fazies der tertiären Schichten im Raum Bottrop-Kirchhellen – Schermbeck (Südwest Münsterland). – 126 S., unveröff. Diplomarbeit, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität; Bonn.
- SCHNEIDER, J. & GEBHARDT, U. (1993): Litho- und Biofaziesmuster in intra- und extramontanen Senken des Rotliegend (Perm, Nord- und Ostdeutschland). – In: MÜLLER, E.P. & PORTH, H. (Hrsg.): Perm im Ostteil der Norddeutschen Senke. *Geol. Jb.*, **A131**: 57-98.
- SCHNEIDER, J., GEBHARDT, U., GAITZSCH, B. & DÖRING, H. (1995): Fossilführung und Biostratigraphie. – In: PLEIN, E. (Hrsg.): Stratigraphie von Deutschland I Norddeutsches Rotliegendbecken Rotliegend Monographien Teil II: 25-35, Cour. Forsch.-Inst. Senckenberg; Frankfurt a. M.
- SCHNEIDER, U. (1999): Geotechnische Untersuchungen, satellitengestützte (GPS) Bewegungsanalysen und Standsicherheitsüberlegungen an einem Kriechhang in Ebnit, Vorarlberg. – Diss. Univ. Karlsruhe: 83 S.; Karlsruhe.
- SCHULZ, R. (2008): Nutzung petrothermaler Technik – Vorschlag für eine Definition für die Anwendung des EEG. – GGA-Bericht, Archiv-Nr. 128 088; Hannover.
- SCHULZ, R. (Hrsg.) (2009): Aufbau eines geothermischen Informationssystems für Deutschland. – Endbericht, LIAG, Archiv-Nr. 128 452: 114 S., 1 CD; Hannover.
- SCHULZ, R., AGEMAR, T., ALTEN, J.-A., KÜHNE, K., MAUL, A.-A., PESTER, S. & WIRTH, W. (2007): Aufbau eines geothermischen Informationssystems für Deutschland. – *Erdöl Erdgas Kohle*, **123** (2): 76-81; Hamburg.
- SCHULZ, R. & RÖHLING, H.-G. (2000): Geothermische Ressourcen in Nordwestdeutschland. – *Z. Angew. Geol.*, **46** (3): 122-129; Hannover.
- SCHUMACHER, K.H. (1964): Geologische Karte der DDR 1 : 500 000, Karte vom Gebiet nördlich der Mitteldeutschen Hauptlinie ohne Mittelvalendis und jüngerer Bildungen. – Forschungsinstitut für die Erkundung und Förderung von Erdöl u. Erdgas; Gommern.
- SCHUMACHER, K.H. & MAY, F. (1990): Trends der Verteilung fallen- und lagerstättengenetischer Parameter im Erdgaslagerstättengebiet der Westaltmark. – *Erdöl, Erdgas, Kohle*, **106** (6): 243-246.

- SCHÜTTE, H. (2005): Geologische Formationen zur Speicherung von Druckluft im küstennahen Raum der Nord- und Ostsee. – 5. dena Energieforum 2005, 08.09.2005, 12 S.; Berlin.
- SCHWARZ, M., BECKER, A. & SCHÄFER, A. (2011): Seismische Leithorizonte im nordöstlichen Saar-Nahe-Becken. – *Erdöl, Erdgas, Kohle*, **127** (1): 28-34; Hamburg.
- SCHWERD, K. (1996): Tektonik – Alpen. – In: BAYERISCHES GEOLOGISCHES LANDESAMT (Hrsg.): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1 : 500 000 (4. Aufl.), S. 266-279; München.
- SÖLLIG, A. & RÖLLIG, G. (1990): Geologische Karte der Deutschen Demokratischen Republik, Tektonische Karte 1 : 500 000. – Zentrales Geologisches Institut; Berlin (unveröff.).
- STAPF, K.R.G. (1982): Schwemmfächer- und Playa-Sedimente im Ober-Rotliegend des Saar-Nahe-Beckens (Permokarbon, SW-Deutschland). Ein Überblick über Faziesanalyse und Faziesmodell. – *Mitt. Pollichia*, **70**: 7-64; Bad Dürkheim.
- STAPF, K.R.G. (1989): Biogene fluvio-lakustrine Sedimentation im Rotliegend des permokarbonen Saar-Nahe-Beckens (SW-Deutschland). – *Facies*, **20**: 169-198; Erlangen.
- STOBER, I., FRITZER, T., OBST, K. & SCHULZ, R. (2011): Tiefe Geothermie – Nutzungsmöglichkeiten in Deutschland. – 3. akt. Aufl., 81 S.; Berlin (BMU).
- STOLL, A. (1981): Forschungsaufgabe „Strukturentwicklung Mitteldeutsche Hauptabbrüche und Südrand Norddeutsch-Polnische Senke“, Themen-Nr. 5.07.2019, Zur Feinstruktur des Saxons der westlichen Altmark unter besonderer Berücksichtigung einer N-S-Traverse (Gebiet Salzwedel – Gebiet Mellin). – 38 S.; Berlin.
- THOMSEN, C. (2011): Geothermische Potenziale in Norddeutschland am Beispiel Schleswig-Holstein. – Vortrag, Hotspot 2011, 26.-27.10.2011; Hannover.
- THÜRINGER LANDESANSTALT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE (TLUG) (2003): Geologie und Hydrogeologie im Überblick. Digitale Karten (CD-Rom); Jena.
- THÜRINGER LANDESANSTALT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE (TLUG) (Hrsg.) (2012): Geothermische Verhältnisse in tieferen Untergrund Thüringens. Interaktive Karte. – <http://www.tlug-jena.de> [Stand 25.01.2013].
- UNGER, H.J. (1996): Tektonik – Molassebecken. – In: BAYERISCHES GEOLOGISCHES LANDESAMT (Hrsg.): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1 : 500 000 (4. Aufl.): 265-266; München.
- VDI-RICHTLINIE 4640: Blatt 1 – Thermische Nutzung des Untergrundes – Grundlagen, Genehmigungen, Umweltaspekte. – Dezember 2000, 32 S.; Berlin.
- WALTHER, H.W. & ZITZMANN, A. (1973): Geologische Karte Bundesrepublik 1 : 1 000 000. – Bundesanstalt für Bodenforschung; Hannover.
- WALTER, R. (1992): Geologie von Mitteleuropa. – 561 S.; Stuttgart (Schweizerbart).
- WARREN, J.K. (2006): Evaporites: Sediments, Resources and Hydrocarbons. – 1035 S., Berlin (Springer).

- WENKE, A., GALL, W., GUTEKUNST, S., KREUTER, H., ROHRER, L. & ZÜHLKE, R. (2009): Tiefe Geothermie im Raum Groß-Gerau – Erkenntnisse einer ersten Reconnaissance Studie. – Der Geothermie Kongress 2009, 17.-19.11.2009; 10 S.; Bochum.
- WORMBS, J., DIENER, I. & PASTERNAK, G. (1988): Geothermische Ressourcen im Nordteil der DDR (I) – Blatt Güstrow (1 : 200 000). – Zentrales Geologisches Institut; Berlin.
- WORMBS, J., DIENER, I., RUSITZKA, I., PASTERNAK, G., TESCH, M. & TOLEIKIS, R. (1989): Abschlussbericht Geothermische Ressourcen im Nordteil der DDR (II) – Blatt Neubrandenburg/Torgelow (1 : 200 000). – Zentrales Geologisches Institut; Berlin.
- ZANDER, I. & HUCKRIEDE, H. (2010): Erstellung von Potenzialkarten und Charakterisierung von Speicherstrukturen in Thüringen für den Aufbau eines Informationssystems Speicher-Kataster für Deutschland. – In: MÜLLER, C. & REINHOLD, K. (Hrsg.): Informationssystem Speichergesteine für den Standort Deutschland – eine Grundlage zur klimafreundlichen geotechnischen und energetischen Nutzung des tieferen Untergrundes (Speicher-Kataster Deutschland) – Abschlussbericht, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe; Berlin.
- ZIEGLER, P.A. (1990): Tectonic and palaeogeographic development of the North Sea rift system. – In: BLUNDELL, D.J. & GIBBS, A.D.: Tectonic evolution of the North Sea rifts: 1-36; Oxford.
- ZIEGLER, P.A. (1992): European Cenozoic rift system. – *Tectonophysics*, **208**: 91-111.
- ZITZMANN, A. (1981): Tektonische Karte der Bundesrepublik Deutschland 1 : 1 000 000. – Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe; Hannover (unveröff.).
- ZITZMANN, A. (2003): Die Geologische Übersichtskarte 1 : 200 000 – von der Karte bis zur Sachdatenbank. – *Z. Dtsch. Ges. Geowiss.*, **154** (1): 121-139.

6.2 Publikationen und Vorträge

Im Folgenden werden alle im Rahmen des Projektes erstellten Publikationen, Poster und Vorträge aufgelistet.

6.2.1. Vortragsveröffentlichungen (Proceedings)

SUCHI, E., DITTMANN, J., KNOPF, S., MÜLLER, C. & SCHULZ, R. (2011): Geothermie-Atlas zur Darstellung möglicher Nutzungskonkurrenzen zwischen CCS und Tiefer Geothermie. – Der Geothermie Kongress 2011, 15.-17.11.2011, Tagungsband-DVD: 10 S.; Bochum.

SUCHI, E., DITTMANN, J., KNOPF, S., MÜLLER, C. & SCHULZ, R. (2012): Atlas to visualise potential conflicts of interest between CO₂ storage (CCS) and deep geothermal energy. – SDGG (Schriftenreihe der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften), 80: 460.

SUCHI, E., DITTMANN, J., KNOPF, S., MÜLLER, C. & SCHULZ, R. (2012): Geothermie-Atlas zur Darstellung möglicher Nutzungskonkurrenzen zwischen CCS und Tiefer Geothermie – Methodik und Ergebnisse. – Der Geothermie Kongress 2012, 13.-16.11.2012, Tagungsband-DVD: 12 S.; Karlsruhe.

6.2.2. Poster

SUCHI, E., DITTMANN, J., KNOPF, S., MÜLLER, C. & SCHULZ, R. (2012): Atlas to visualise potential conflicts of interest between CO₂ storage (CCS) and deep geothermal energy. – Poster, DGG-Jahrestagung, 01.-03.10.2012; Hannover.

SUCHI, E., DITTMANN, J., KNOPF, S., MÜLLER, C. & SCHULZ, R. (2012): Atlas to visualise potential conflicts of interest between CO₂ storage (CCS) and deep geothermal energy. – Poster, LIAG-Austauschsitzung, 07.-08.11.2011; Hannover.

6.2.3. Vorträge

SUCHI, E., DITTMANN, J., KNOPF, S., MÜLLER, C. & SCHULZ, R. (2011): Geothermie-Atlas zur Darstellung möglicher Nutzungskonkurrenzen zwischen CCS und Tiefer Geothermie. – LIAG-Austauschsitzung, 02.-03.11.2011; Hannover.

SUCHI, E., DITTMANN, J., KNOPF, S., MÜLLER, C. & SCHULZ, R. (2012): Geothermie-Atlas zur Darstellung möglicher Nutzungskonkurrenzen zwischen CCS und Tiefer Geothermie. – Informationsveranstaltung für SGD, 08.02.2012; Hannover.

SUCHI, E., DITTMANN, J., KNOPF, S., MÜLLER, C. & SCHULZ, R. (2012): Der Geothermie-Atlas zur Darstellung möglicher Nutzungskonkurrenzen zwischen CCS und Tiefer Geothermie. – Informationsveranstaltung für den Kreisverband der Mittelstandsvereinigung (MIT) der CDU im Geozentrum, 10.05.2012; Hannover.

SUCHI, E., DITTMANN, J., KNOPF, S., MÜLLER, C. & SCHULZ, R. (2012): Geothermie-Atlas zur Darstellung möglicher Nutzungskonkurrenzen zwischen CCS und Tiefer Geothermie. – 5. Norddeutsche Geothermietagung, 17.-18.10.2012; Hannover.

SUCHI, E., DITTMANN, J., KNOPF, S., MÜLLER, C. & SCHULZ, R. (2012): Geothermie-Atlas zur Darstellung möglicher Nutzungskonkurrenzen zwischen CCS und Tiefer Geothermie – Methodik und Ergebnisse. – Informationsveranstaltung für SGD, 06.11.2012; Hannover.

6.2.4. Berichte

- KNOPF, S. (2011): Geothermie-Atlas zur Darstellung möglicher Nutzungskonkurrenzen zwischen CCS und Tiefer Geothermie. – 1. Zwischenbericht, BGR-Bericht, Geschäftszeichen B050330-09/2011-0002; Hannover.
- KNOPF, S. (2012): Geothermie-Atlas zur Darstellung möglicher Nutzungskonkurrenzen zwischen CCS und Tiefer Geothermie. – 2. Zwischenbericht, BGR-Bericht, Geschäftszeichen B50330-09/2012-0001; Hannover.
- KNOPF, S. (2013): Geothermie-Atlas zur Darstellung möglicher Nutzungskonkurrenzen zwischen CCS und Tiefer Geothermie. – 3. Zwischenbericht, BGR-Bericht, Geschäftszeichen B50330-09/2013-0001; Hannover.
- SCHULZ, R. (2011): Geothermie-Atlas zur Darstellung möglicher Nutzungskonkurrenzen zwischen CCS und Tiefer Geothermie. – 1. Zwischenbericht, LIAG-Bericht, Archiv-Nr. 129 712; Hannover.
- SCHULZ, R., MÜLLER, C., SUCHI, E., DITTMANN, J. & KNOPF, S. (2012): Verbundvorhaben: Geothermie-Atlas zur Darstellung möglicher Nutzungskonkurrenzen zwischen CCS und Tiefer Geothermie. – Bericht, Forschungsjahrbuch des Projektträgers Jülich, Erneuerbare Energien 2011; Jülich.
- SCHULZ, R. & SUCHI, E. (2012): Geothermie-Atlas zur Darstellung möglicher Nutzungskonkurrenzen zwischen CCS und Tiefer Geothermie. – 2. Zwischenbericht, LIAG-Bericht, Archiv-Nr. 130 262; Hannover.
- SUCHI, E. & SCHULZ, R. (2013): Geothermie-Atlas zur Darstellung möglicher Nutzungskonkurrenzen zwischen CCS und Tiefer Geothermie. – 3. Zwischenbericht, LIAG-Bericht, Archiv-Nr. 131 074; Hannover.

6.2.5. Workshops

- SCHULZ, R. & SUCHI, E. (2012): Informationsveranstaltung für SGD zum Projekt Geothermie-Atlas zur Darstellung möglicher Nutzungskonkurrenzen zwischen CCS und Tiefer Geothermie. – 30 Personen, 08.02.2012; Hannover.
- SCHULZ, R. & SUCHI, E. (2012): 2. Informationsveranstaltung für SGD zum Projekt Geothermie-Atlas. - 30 Personen, 06.11.2012; Hannover.

7 Glossar

Aquifer: Grundwasserleiter, d. h. ein Gesteinskörper unter der Erdoberfläche der Wegsamkeiten (Poren, Klüfte usw.) für Fluide bietet.

Aquiferkomplex: Der stratigraphieübergreifende Zusammenschluss mehrerer Grundwasserleiter.

Barrieregestein: Gestein mit einer geringen Permeabilität und meist auch mit geringer Porosität. Es soll quasi undurchlässig für Flüssigkeiten und Gase aller Art sein. Beispiele sind Ton- und Salzgestein.

Barrierekomplex (BK): Eine oder mehrere Formationen oder Gesteinseinheiten mit Barrieregesteinen, die eine vertikal und lateral abgrenzbare Einheit innerhalb eines Sedimentbeckens bilden.

Basement: Auch als **Grundgebirge** bezeichnet. Ist die Gesteinsbasis einer geologischen Formation oder der Untergrund eines Sedimentbeckens. Als Grundgebirge werden die ältesten, tragenden Gesteinskomplexe der oberen Erdkruste auf den Kontinenten bezeichnet. Meistens besteht das Grundgebirge aus metamorphen Gesteinen, die mit Plutoniten durchsetzt sind. Jedoch können auch im Grundgebirge eines Sedimentbeckens Sedimentgesteine vorkommen und eine Tiefenwasserführung gegeben sein.

BGR: Die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe in Hannover ist als Fachbehörde des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie die zentrale geowissenschaftliche Beratungseinrichtung der Bundesregierung.

CCS: Abtrennung und Speicherung von Kohlendioxid (CO₂); englisch: **C**arbon (Dioxide) **C**apture and **S**torage.

Diagenese: Prozess der chemischen und physikalischen Umbildung lockerer Sedimente zu festen Gesteinen durch mehr oder weniger langzeitige Wirkung von Druck, Temperatur, chemischer Lösung und Abscheidung etc.

Durchlässigkeitsbeiwert: Beschreibt die Durchlässigkeit eines Mediums gegenüber einer viskosen Flüssigkeit mit einer bestimmten Dichte (hydraulische Leitfähigkeit).

EEG: Erneuerbare-Energien-Gesetz. Mit dem EEG wird die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien gefördert. Die Stromerzeuger erhalten dabei einen bestimmten Vergütungssatz für jede Kilowattstunde, die sie ins Stromnetz einspeisen.

EGS: Enhanced Geothermal Systems oder Engineered Geothermal System sind künstlich erzeugte Wärmetauschersysteme ab ungefähr drei Kilometer Tiefe. In diesen Tiefen hat das umgebende Gestein im Durchschnitt Temperaturen oberhalb 100 °C. Es befinden sich auch kleine Mengen an Wasser in den Gesteinen. Allerdings ist die Durchlässigkeit der Gesteine zu gering, um genug heißes Wasser zur Stromproduktion daraus fördern zu können. Die natürliche Permeabilität wird mit Stimulationstechniken wie der hydraulischen oder der Säurestimulation erhöht. An der Erdoberfläche wird das Wasser über eine tiefe Bohrung in den Untergrund verpresst, dort erwärmt es sich auf dem künstlich geschaffenen Rissystem und wird über eine zweite Bohrung wieder an die Erdoberfläche befördert. Das Ziel ist ein quasi geschlossener Wasserkreislauf.

Fazies: Bezeichnung für den ablagerungsbedingten Habitus eines Sediments bezüglich seines petrographischen Aufbaus, der dadurch Rückschlüsse auf die damaligen Umweltbedingungen, die Paläoökologie und -geographie des Ablagerungsraums zulässt (z. B. marine oder fluviatile Fazies).

Formation: Lithostratigraphische Gesteinseinheit. Als Formation werden Gesteinskörper bezeichnet, die einen genetisch zusammenhängenden Verband bilden. Gesteine einer Formation sind in einem zusammenhängenden Zeitraum, in nahezu gleichem Milieu und in einem klar begrenzten Gebiet entstanden. Der Gesteinstyp innerhalb einer Gesteinsformation muss nicht identisch sein.

Geothermische Energie: Ist die in Form von Wärme gespeicherte Energie unterhalb der Oberfläche der festen Erde (Synonym: Erdwärme, häufig auch Geothermie).

Geothermisches Potenzial: Hydrothermisches und/oder petrothermisches Potenzial, das nach Anwendung der definierten Kriterien von Temperatur und Mächtigkeit für eine mögliche geothermische Nutzung zur Verfügung steht.

GeotIS: Vom LIAG entwickeltes digitales Geothermisches Informationssystem, das Potenziale und Standorte der Tiefen Geothermie in Deutschland zeigt (<http://www.geotis.de>).

GIS: Geoinformationssystem, das computergestützte Werkzeuge und Methoden umfasst, die in der Lage sind, flächenbezogene geographische Daten zu erheben, zu verwalten, abzuändern und auszuwerten.

Graben: Durch Dehnung entstandene Struktur, bei der ein Krustenblock zwischen zwei mehr oder weniger parallelen Störungen eingesunken ist.

GTA: Der Geotektonische Atlas von Nordwest-Deutschland und der deutschen Nordsee ist ein Standardwerk für die präquartäre Geologie dieser Region. Auf 3 CD's finden sich Struktur- und Tiefenpläne, paläogeographische Karten und Profilschnitte sowie zahlreiche beschreibende Texte und Tabellen. Über 500 Karten- und Bildobjekte, ca. 1.000 beschreibende Texte und eine Literaturdatenbank mit 4.000 Zitaten wurden auf den CD's regional und thematisch geordnet abgelegt.

Hangendes: Das Hangende bezeichnet die Gesteinsschichten oberhalb eines bestimmten Referenzhorizonts oder einer Störung.

HDR: Hot-Dry-Rock-Technik zur Stromerzeugung, bei der im kristallinen Gestein durch Verpressen von Wasser Spalten erzeugt werden, über die im Untergrund erhitztes Wasser zirkuliert werden kann. Siehe auch EGS.

Horizont: Ein geologischer Horizont ist ein oft weit verbreiteter, als Schicht verlaufender Gesteinskörper, der von besonderem geologischem oder wirtschaftlichem Interesse ist.

Hydraulische Stimulation: Während einer hydraulischen Stimulation wird eine große Menge Wasser mit großen Fließraten in das Bohrloch gepresst. Durch den hydraulischen Druck werden im Bohrlochtiefsten und der näheren Umgebung kleine seismische Ereignisse erzeugt. Diese kleinen Ereignisse können bereits existierende Brüche und Risse wieder öffnen oder neue Brüche hervorrufen, und verbessern so die Fließwege des Wassers. Hydraulische Stimulationen werden meist bei der Erstellung eines HDR- oder EGS-Projektes eingesetzt.

Inversion: Ein tektonischer Prozess, bei dem die Bewegungsrichtung von Strukturen (z. B. Störungen) umgekehrt wird.

Isobathe: Linie gleicher Tiefenlage.

Isopache: Linie gleicher Mächtigkeit.

Karst: Landformen, die vorwiegend durch Lösungs- und Kohlensäureverwitterung entstanden sind. Karst bildet sich in Gesteinen, die leicht chemisch angreifbar sind.

LIAG: Das Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik in Hannover ist eine außeruniversitäre Forschungseinrichtung für angewandte Geowissenschaften. Der Schwerpunkt der Arbeiten liegt in der Erkundung des nutzbaren Untergrundes sowie in der Entwicklung von Mess- und Auswerteverfahren, die dabei zum Einsatz kommen. Das LIAG ist Mitglied der Leibniz-Gemeinschaft (WGL) und bildet zusammen mit der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) und dem Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG) das Geozentrum Hannover.

Liegendes: Das Liegende bezeichnet die Gesteinsschichten unterhalb eines bestimmten Referenzhorizonts oder einer Störung.

Mächtigkeit: Vertikale Ausdehnung eines Gesteinskörpers.

Mitteltiefe Geothermie: Die Mitteltiefe Geothermie umfasst den Tiefenabschnitt von ca. 400 bis ca. 1.000 Meter und bewegt sich im Temperaturintervall von rund 40 bis 60 °C.

Mögliche Nutzungskonkurrenz: Eine mögliche Nutzungskonkurrenz existiert, wenn an einem Standort im Untergrund untersuchungswürdige Horizonte für verschiedene Nutzungsmöglichkeiten existieren, z. B. für die CO₂-Einlagerung und für eine geothermische Nutzung. Eine konkurrierende Nutzung kann nicht nur bezüglich eines konkreten Zielhorizontes festgestellt werden, sondern kann auch an Standorten mit unterschiedlichen Nutzungsoptionen für verschiedene Zielhorizonte bestehen.

Nettomächtigkeit: Summe der Mächtigkeiten einzelner Schichten innerhalb einer betrachteten Gesteinsabfolge (z. B. potenzielle Speicherhorizonte innerhalb eines Speicherkomplexes).

Permeabilität: Die Permeabilität beschreibt die Durchlässigkeit eines porösen Mediums gegenüber einem Fluid (z. B. Wasser), wobei sich die Permeabilität auf die Beschreibung der Gesteinseigenschaften beschränkt. Der Grad der Permeabilität des Gesteins hängt von der Anzahl, der Größe und der Form der Poren und/oder der Risse und ihrer Verbindungen zueinander ab. Die Permeabilität wird gemessen, indem man die Zeit misst, die ein Fluid mit standardmäßiger Viskosität benötigt, um eine bestimmte Distanz zu durchfließen. Die Einheit der Permeabilität ist ein Darcy (D), gängige Einheit ist ein Millidarcy (mD).

PK Tiefe Geothermie: Bei der Sitzung der SGD-Vertreter am 9.12.2004 in Saarbrücken wurde die Einrichtung des Personenkreises (PK) Tiefe Geothermie beschlossen. Der PK Tiefe Geothermie beschäftigt sich mit der Nutzung des geothermischen Potenzials der tiefliegenden Aquifere und des Festgesteins.

Playa: Salztonebene bzw. Gebiet mit trockenfallenden Binnenseen in aridem und semiaridem Klima. Im Gegensatz zu **Sabkhas** besteht keine direkte oder indirekte Verbindung des Grundwassers mit dem Meer.

Porperm: Zusammengesetztes Akronym aus Porosität und Permeabilität, d. h. Gesteinseigenschaften für die Durchlässigkeit von Flüssigkeiten.

Porosität: Das Verhältnis zwischen dem Porenvolumen eines Gesteins oder Bodens zu seinem Gesamtvolumen. Die Porosität wird in Prozent angegeben.

Reservoir: Ein natürlicher unterirdischer Speicher, der Flüssigkeiten oder Gase (z. B. Wasser, Erdöl oder Erdgas) in den Gesteinshohlräumen speichern kann.

Säuerung oder Säurestimulation: Säuren wie Salzsäure oder Flußsäure werden in das Bohrloch gepumpt und lösen Kalzit oder Quarzit in der Umgebung des Bohrlochs. Nach der Auflösung dieser Minerale können ältere Störungen wieder offen sein und das Wasser kann leichter zum Bohrloch fließen.

Salinität: Die Salinität gibt die Menge der Konzentration an gelösten Salzen im Wasser an.

Salzstruktur: Salzkörper im geologischen Untergrund, bei dem die saline Schichtenfolge von der primären horizontalen Lagerung abweicht z. B. Salzstock (Salzdiapir), Salzkissen oder Salzmauer.

Sedimentbecken: Geologische Senkenstruktur, in der Sedimente abgelagert werden (z. B. Norddeutsches Becken).

SGD: Staatliche Geologische Dienste Deutschlands, d. h. die geologischen Landesämter oder Dienste der einzelnen Bundesländer sowie die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe als nachgeordnete Behörde des Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit.

Sockel: Begriff für geologisch vergleichsweise altes Gestein, das den Untergrund für relativ jüngere, auflagernde Sedimentabfolgen bildet. Wird in dieser Studie für den Bereich unterhalb des Zechstein-Salzes der Staßfurt-Folge verwendet.

SPBA: Der Southern Permian Basin Atlas entstand aufgrund einer gemeinsamen Initiative der Erdgas- und Erdöl-Industrie und der Geologischen Dienste von Belgien, Großbritannien, Polen, der Niederlande, Dänemark und Deutschland. Der Atlas umfaßt das ganze Südliche Permbecken, d. h. er erstreckt sich vom Osten Englands bis zur russisch-polnischen Grenze und überdeckt einen Breitenbereich von 50 °N bis 56 °N. Der Atlas spiegelt die geologische Entwicklung und das KW-Potenzial für jedes stratigraphische Intervall wider. Der Atlas ist im Maßstab 1 : 1 000 000 sowohl in Papier- als auch in elektronischer Form publiziert.

Speichergestein: Gestein, das einen hohen Anteil an Poren oder Klüften besitzt und damit grundsätzlich Gase und Flüssigkeiten aufnehmen und weiterleiten kann.

Speicher-Barriere-Komplex (SBK): Besteht aus einem untersuchungswürdigen Speicherkomplex und einem assoziierten untersuchungswürdigen Barrierekomplex im Hangenden. Es werden regionale Speicher-Barriere-Komplexe (auf eine Region bezogen, z. B. Norddeutsches Becken) und überregionale Speicher-Barriere-Komplexe (gleiche stratigraphische Verbreitung z. B. Buntsandstein) unterschieden.

Speicherkomplex (SK): Eine oder mehrere Formationen oder Gesteinseinheiten mit Speichergesteinen, die eine vertikal und lateral abgrenzbare Einheit innerhalb eines Sedimentbeckens bilden (Anmerkung: diese Definition unterscheidet sich von der Verwendung des Begriffs in der europäischen CCS-Richtlinie 2009/31/EG, Art. 3: „die Speicherstätte und die umliegenden geologischen Gegebenheiten, die die allgemeine Speicherintegrität beeinflussen können“ (d. h. sekundäre Rückhalteformationen)).

Störung: Eine Trennfläche im Gesteinsverband, an der das ursprüngliche Gefüge eines Gesteins gestört wurde. Im Gegensatz zur Kluft werden in der Regel größere Gesteinspakete gegeneinander verschoben.

Stratigraphie: Ordnung geologischer Einheiten (Gesteine und Formationen) nach ihrer Bildungsfolge und Aufstellung einer Zeitskala zur Datierung der geologischen Vorgänge und Ereignisse.

Streichen: Schnittlinie einer geologischen Fläche mit der Horizontalebene.

TAB-Studie: Studie des Büro für Technikfolgenabschätzung des deutschen Bundestages (TAB) zu den "Möglichkeiten geothermischer Stromerzeugung in Deutschland" (PASCHEN et al. 2003). Der geowissenschaftliche Teil der Abschätzung des Potenzials der geothermischen Stromerzeugung in Deutschland wurde von der BGR gemeinsam mit dem LIAG erstellt (JUNG et al. 2002).

Tektonik: Lehre vom Aufbau der Erdkruste in ihrer Struktur und großräumigen Bewegung.

Temperaturgradient: Maß für die Veränderung der Temperatur in Abhängigkeit von der Tiefe.

Tiefe Geothermie: Umfasst Systeme, bei denen die geothermische Energie über Tiefbohrungen erschlossen wird und deren Energie direkt (d. h. ohne Niveauanhebung) genutzt werden kann. Die Tiefe Geothermie beginnt ab einer Tiefe von ca. 1.000 Meter und ab Temperaturen von rund 60 °C.

Untersuchungsgebiet: Region, die im Rahmen des Projektes untersucht wurde. Als untersuchungswürdig wird der Teil des Untersuchungsgebietes bezeichnet, der nach Anwendung der Kriterien weiterhin auf seine Eignung zu prüfen ist.

Zement: Mineralisches Bindemittel zwischen den Sandsteinkörnern eines Porenspeichers, das den Porenraum teilweise bis vollständig ausfüllt.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1: Generelle Vorgehensweise und Ablaufschema der einzelnen Arbeitsschritte innerhalb des Projektes „Geothermie-Atlas“.	7
Abb. 2.1: McKelvey-Diagramm: Schaubild für geothermische Ressourcen und Reserven (verändert nach HAENEL & STAROSTE, 1988).	9
Abb. 2.2: Methodische Vorgehensweise bei der Aufnahme der Potenzialgebiete am Beispiel des Rhät-Lias-Aquiferkomplexes. a) Auskartierung der Mächtigkeit der Abfolge. b) Bereiche < 20 m Mächtigkeit werden nicht einbezogen. c) Auskartierung der Temperatur an der Basis der Abfolge. d) Bereiche mit einer Temperatur < 40 °C werden nicht einbezogen.	13
Abb. 2.3: Flächenminderung nach Anwendung der Kriterien am Beispiel des Rhät-Lias-Aquiferkomplexes. a) Untersuchte Fläche. b) Resultierendes geothermisches Potenzialgebiet mit Einteilung in Temperaturkategorien.	14
Abb. 2.4: Projektion der erreichbaren Temperatur auf die Oberfläche (Modellbeispiel). a) Separate Ausweisung der Temperatur aller relevanten Horizonte einer Lokalität. b) Kompilation und Projektion der maximal ermittelten Temperaturwerte auf die Erdoberfläche in der abschließenden Kartendarstellung.	15
Abb. 2.5: Grabenstrukturen innerhalb der Abfolge des sedimentären Rotliegend des Norddeutschen Beckens (umgezeichnet nach GAST (1988), LOKHORST (1998) und DOORNENBAL & STEVENSON (2010)).	29
Abb. 2.6: Verbreitung und erreichbare kompilierte Temperatur der geothermisch nutzbaren Aquifere/Horizonte. a) Nachgewiesenes hydrothermisches Potenzial. b) Vermutetes hydrothermisches Potenzial. c) Petrothermisches Potenzial.	34
Abb. 2.7: Prozentuale Anteile der drei ermittelten geothermischen Nutzungsmöglichkeiten bezogen auf die Fläche von Deutschland. Überschneidungen mehrerer Nutzungsarten sind möglich.	35
Abb. 2.8: Prozentuale Anteile der drei ermittelten geothermischen Nutzungsmöglichkeiten sowie Kombinationen hieraus bezogen auf die Fläche von Deutschland.	35
Abb. 2.9: Verbreitung und Anzahl der geothermisch nutzbaren Aquifere/Horizonte. a) Nachgewiesenes hydrothermisches Potenzial. b) Nachgewiesenes und vermutetes hydrothermisches Potenzial in Kombination. c) Gesamtes verfügbares hydrothermisches und petrothermisches Potenzial.	37
Abb. 3.1: Schematische Darstellung eines Untergrundspeichers für die CO ₂ -Einlagerung (aus KNOFF et al., 2010). Oberhalb eines Speicherhorizontes befindet sich jeweils ein Barrierehorizont.	38
Abb. 3.2: Darstellung der im Projekt Speicher-Kataster Deutschland untersuchten Gebiete (REINHOLD et al., 2011) und Lage der Kohlenwasserstoff(KW)-Lagerstätten (Datenquelle: LBEG).	39

Abb. 3.3:	Schematisches lithologisches Profil des Speicher-Barriere-Komplexes „Buntsandstein“ (Profil verändert nach HEUNISCH et al., 2007). BK = Barrierekomplex, SK = Speicherkomplex, SH = Speicherhorizont.....	41
Abb. 3.4:	Untersuchungswürdiger Speicher- und Barrierekomplex „Oberer Keuper – Unterjura“. a) Verbreitung des untersuchungswürdigen Speicherkomplexes und des untersuchungswürdigen Barrierekomplexes im östlichen Norddeutschen Becken. b) Aus der Verschneidung der beiden untersuchungswürdigen Komplexe resultiert die Ausweisung des Speicher-Barriere-Komplexes.	43
Abb. 3.5:	Verbreitung der Speicher-Barriere-Komplexe SBK 1 bis SBK 4. a) Speicher-Barriere-Komplex Rotliegend – Rotliegend (SBK 1). b) Speicher-Barriere-Komplex Rotliegend – Zechstein (SBK 2). c) Speicher-Barriere-Komplex Zechstein – Zechstein (SBK 3). d) Speicher-Barriere-Komplex Buntsandstein – Buntsandstein (SBK 4).....	48
Abb. 3.6:	Verbreitung der Speicher-Barriere-Komplexe SBK 5 bis SBK 8. a) Speicher-Barriere-Komplex Buntsandstein/Muschelkalk – Muschelkalk. b) Speicher-Barriere-Komplex Mittlerer Keuper (SBK 6). c) Speicher-Barriere-Komplex Oberer Keuper – Unterjura (SBK 7). d) Speicher-Barriere-Komplex Mitteljura – Mitteljura/Oberjura (SBK 8).	49
Abb. 3.7:	Verbreitung des Speicher-Barriere-Komplexes (SBK 9).....	50
Abb. 3.8:	Prozentualer Flächenanteil der Speicher-Barriere-Komplexe (SBK 1–9) an der Gesamtfläche Deutschlands.....	50
Abb. 3.9:	Die Zusammenführung der Speicher-Barriere-Komplexe führt zu der integrierten Darstellung der untersuchungswürdigen Gebiete (rot umrandete grüne Flächen) für eine CO ₂ -Einlagerung in Deutschland.....	51
Abb. 3.10:	Verbreitung der für eine CO ₂ -Einlagerung untersuchungswürdigen Gebiete.	52
Abb. 3.11:	Verbreitung und Anzahl der für eine CO ₂ -Einlagerung nutzbaren untersuchungswürdigen Speicher-Barriere-Komplexe.....	53
Abb. 4.1:	Schematische Darstellung einer Störung und Störungszone. a) Wesentliche Begriffe zur geometrischen Charakterisierung einer Störung (in diesem Fall eine Abschiebung mit Blattverschiebungskomponente). b) Schema des Internbaus einer Störungszone: Nebengestein, Bruchzone und Störungskern (nach FASCHING & VANEK, 2011).....	57
Abb. 4.2:	Darstellung eines komplexen Störungssystems im Bereich des Oberen Allertal (BEST & ZIRNGAST, 2002).....	58
Abb. 4.3:	Schematisches Konzept der Permeabilitätsstruktur an Störungszone mit Endgliedern: Verteilter Leiter, lokaler Leiter, lokale Barriere sowie Barriere-Leiter-System (verändert nach CAINE et al., 1996).....	59
Abb. 4.4:	Übersicht regionaler und überregionaler geologischer Karten und Kartenwerke mit strukturgeologischen Inhalten in Deutschland.	61

Abb. 4.5: Zusammenfassung von Störungen zu generalisierten Störungszonen und Störungssystemen am Beispiel eines Kartenausschnittes. Die dargestellten Störungen wurden aus dem SPBA entnommen (DOORNENBAL & STEVENSON, 2010). a) Zechstein bis Unterjura. b) Präperm bis Tertiär.	63
Abb. 4.6: Sind die Linien von Störungszonen auf der Karte um mehr als 1 km horizontal versetzt (rote Pfeile an der blauen Linie), so bleibt diese Abweichung erhalten.	64
Abb. 4.7: Beispiel der Attribut-Tabelle für eine in der GIS-Shape-Datei erfassten generalisierten Störungszone.	65
Abb. 4.8: Übersichtskarte der generalisierten bedeutenden Störungszonen in Deutschland (verändert u. a. nach ZITZMANN et al. (1981), HAENEL & STAROSTE (1988), SÖLLIG & RÖLLIG (1990), BRÜCKNER-RÖHLING et al. (2002) und REINHOLD et al. (2008)).	66
Abb. 4.9: Verknüpfung der Störungszonen über Blattnummern mit Literaturzitate.	67
Abb. 4.10: Beispiel für die Ausgabe der Literaturzitate eines selektierten Kartenblattes mit den dort beschriebenen Störungssystemen als PDF-Dokument.	67
Abb. 4.11: Störungsinventar der GÜK 1000 (BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE, 1993).	69
Abb. 4.12: Generalisierte Störungszonen (schwarz) und Strukturgebiete (rechts oben), verändert nach verschiedenen Autoren (vgl. Abb. 4.11).	70
Abb. 5.1: Generelle Aufteilung der vier erstellten Karten.	75
Abb. 5.2: Auf dem jeweiligen Deckblatt befindliche Buchstabenkennzeichnung der vier Einzelkartenblätter mit durchgängig verwendeter Farbsymbolik zur Kartenbezeichnung.	76
Abb. 5.3: Aufbau des vierteiligen Kartenwerkes.	77
Abb. 5.4: Farbgebung der Kartenwerke mit durchgängig verwendeten Farbsymbolen für die verschiedenen geothermischen Potenzialarten.	78
Abb. 5.5: Legendengestaltung bzw. Aufschlüsselung der Farbsymbolik der vier thematischen Kartenwerke.	78
Abb. 5.6: Mögliche Nutzungskonkurrenz zwischen geothermischen Potenzialgebieten (Vollfarben) und untersuchungswürdigen Gebiete für eine CO ₂ -Einlagerung (Schraffur). Die Farben symbolisieren die Anzahl der geothermisch nutzbaren Schichten.	83
Abb. 5.7: Kompilierte Darstellung der Nutzungsoptionen von Geothermie und CO ₂ -Einlagerung mit möglichen resultierenden Nutzungskonkurrenzen auf den sich überlagernden Flächen. Die Vollfarben beziehen sich auf das geothermische Potenzial (ausführliche Legende siehe Abb. 5.5).	84
Abb. 5.8: Kompilierte Darstellung aller Nutzungsoptionen und möglichen Nutzungskonkurrenzen mit Angabe der prozentualen Anteile an der Gesamtfläche von Deutschland.	85

Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1: Verwendete Kriterien zur Abgrenzung der für eine geothermische Nutzung geeigneten Gebiete (zusammengestellt nach Angaben von ROCKEL & SCHNEIDER (1992); ROCKEL et al. (1997); HUENGES et al. (1999); JUNG et al. (2002); PASCHEN et al. (2003)).....	11
Tab. 3.1: Stratigraphische und regionale Differenzierung der Speicher-Barriere-Komplexe (verändert nach MÜLLER & REINHOLD, 2011b).....	45
Tab. 3.2: Anzahl der stratigraphisch unterschiedlichen Speicher-Barriere-Komplexe in den bearbeiteten Regionen.....	46
Tab. 3.3: Speicher-Barriere-Komplexe (SBK).....	46
Tab. 4.1: Übersicht über die verschiedenen Leiter-Barriere-Typen und deren möglicher Anwendungsbereich.....	59
Tab. 5.1: Gegenüberstellung der ermittelten stratigraphischen Einheiten, die für eine geothermischen Nutzung zur Verfügung stehen bzw. als untersuchungswürdig für eine CO ₂ -Einlagerung ermittelt wurden (vgl. Tab. 3.1).	82

Anlagen

- Karte A: Untersuchungswürdige Gebiete für eine CO₂-Einlagerung und nachgewiesene hydrothermische Potenziale (unmittelbar verfügbar) für Tiefe und Mitteltiefe Geothermie (1 : 1 000 000).
- Karte B: Untersuchungswürdige Gebiete für eine CO₂-Einlagerung und vermutete hydrothermische Potenziale (zukünftig verfügbar) für Tiefe und Mitteltiefe Geothermie (1 : 1 000 000).
- Karte C: Untersuchungswürdige Gebiete für eine CO₂-Einlagerung und petrothermische Potenziale (zukünftig verfügbar) für Geothermie (1 : 1 000 000).
- Karte D: Untersuchungswürdige Gebiete für eine CO₂-Einlagerung und Gesamtheit hydro- und petrothermischer Potenziale (Kompilation der Karten A – C) für Geothermie (1 : 1 000 000).