

CLIMATE CHANGE

50/2026

Kurzpapier

Anforderungen an Verfahren zur Identifikation umweltverträglicher CO₂- Speicher

**Begleitforschung zur Umweltwirkung der
Kohlenstoffwirtschaft, AP 1.1**

von

Dr. Florian Krob, Angelika Spieth-Achtnich, Stephan Kurth
Öko-Institut, Darmstadt

Herausgeber:

Umweltbundesamt

CLIMATE CHANGE 50/2026

REFOPLAN des Bundesministeriums für Umwelt,
Klimaschutz, Naturschutz und nukleare Sicherheit

Forschungskennzahl 3724 41 704 0

Kurzpapier

Anforderungen an Verfahren zur Identifikation umweltverträglicher CO₂- Speicher

Begleitforschung zur Umweltwirkung der
Kohlenstoffwirtschaft, AP 1.1

von

Dr. Florian Krob, Angelika Spieth-Achtnich, Stephan Kurth
Öko-Institut, Darmstadt

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber

Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
buergerservice@uba.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

Durchführung der Studie:

Öko-Institut Consult GmbH
Rheinstraße 95
64295 Darmstadt

Abschlussdatum:

Juli 2026

Redaktion:

Fachgebiet V I.2 Szenarien und Strategien zu Klimaschutz und Energie
Joris Spindler, (Kirsten op de Hipt - Layout)

DOI:

<https://doi.org/10.60810/openumwelt-8469>

ISSN 1862-4359

Dessau-Roßlau, September 2026

© Alle Rechte vorbehalten

Zur Verbesserung der Verständlichkeit, Lesbarkeit sowie zur Überprüfung der Rechtschreibung wurde bei der Erstellung dieses wissenschaftlichen Dokuments Künstliche Intelligenz ([ChatGPT](#), [KI-Modell GPT-5.2o](#), [OpenAI](#), 2025) eingesetzt. Es handelt sich ausschließlich um redaktionelle und stilistische Optimierungen selbst verfasster Inhalte. Die Nutzung erfolgt rein unterstützend und wird aus Gründen der Transparenz hiermit offengelegt.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Kurzbeschreibung: Anforderungen an ein Verfahren zur Identifikation umweltverträglicher CO₂-Speicher

Die CO₂-Speicherung in geologischen Formationen wird auch in Deutschland zunehmend als notwendige ergänzende Maßnahme zur Erreichung der Klimaziele betrachtet, bleibt jedoch aufgrund technischer, ökologischer und gesellschaftlicher Unsicherheiten umstritten. Zwar gelten geologische Formationen in der deutschen Nordsee grundsätzlich als geeignet, doch dürften die realistisch nutzbaren Speicherkapazitäten unter Berücksichtigung rechtlicher, ökologischer und sozioökonomischer Einschränkungen deutlich geringer ausfallen als theoretisch angenommen.

Zentrale Herausforderung ist die Ausgestaltung einer möglichst vollständigen Speicherung über große Zeiträume hinweg. Voraussetzung dafür sind ein umfassendes Sicherheits- und Risikomanagement, eine fundierte Überwachung sowie die frühzeitige und transparente Beteiligung der Öffentlichkeit. Neben direkten Risiken wie Leckagen müssen auch indirekte Umweltauswirkungen – etwa durch Infrastrukturaufbau oder Betrieb – minimiert werden.

Für eine umweltverträgliche Standortauswahl ist es daher zielführend klare Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen bereits in der frühen Identifikationsphase potenzieller CO₂-Speicher festzulegen. Ergänzende Umweltkriterien ermöglichen eine vergleichende Bewertung, bei der neben geologischer und technischer Eignung auch ökologische und sozioökonomische Aspekte berücksichtigt werden. Ein solcher integrativer und iterativer Ansatz beabsichtigt, dass eine möglichst hohe Umweltverträglichkeit als durchgängiges Prinzip verankert wird.

Abstract: Requirements in site selection to identify environmentally compatible storage sites

Geological CO₂ storage is increasingly regarded in Germany as a likely necessary complementary measure for achieving climate targets, but it remains controversial due to technical, environmental, and societal uncertainties. While geological formations in the German North Sea are generally considered suitable, the realistically usable storage capacities are likely to be significantly lower than theoretical estimates once legal, environmental, and socio-economic constraints are considered.

A central challenge is ensuring storage is as complete as possible over long time periods. This requires comprehensive safety and risk management, robust monitoring, and the early and transparent involvement of the public. In addition to direct risks such as leakages, indirect environmental impacts, for example those associated with infrastructure development or operation—must also be minimized.

For an environmentally compatible site selection, it is therefore expedient to define clear exclusion criteria and minimum requirements already in the early identification phase of potential CO₂ storage sites. Additional environmental criteria enable a comparative assessment that considers ecological and socio-economic aspects alongside geological and technical suitability. Such an integrative and iterative approach aims to embed a high level of environmental compatibility as a guiding principle throughout the process.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	7
Tabellenverzeichnis	8
Abkürzungsverzeichnis	9
Zusammenfassung.....	10
Summary	12
1 Problem- und Zielstellung	14
2 Potenzielle Standortmerkmale umweltverträglicher CO ₂ - Speicher.....	18
3 Übergreifende Ansätze zur Identifikation geeigneter CO ₂ -Speicher im geologischen Untergrund.....	22
3.1 Ansätze zur Ermittlung von Standortauswahlkriterien und Verfahren zur Identifikation geeigneter CO ₂ -Speicher	22
3.2 Beispiele bereits bestehender Verfahren zur Identifikation unterirdischer Lagerstätten und Speichern	26
3.2.1 Verbringung von Sonderabfällen in Untertagedeponien (DepV)	27
3.2.2 Entsorgung von hochradioaktiven Abfällen (gemäß StandAG)	28
3.2.3 Temporäre Speicherung von Erdgas und Wasserstoff im geologischen Untergrund.....	29
4 Bewertung potenzieller Ansätze hinsichtlich ihrer Eignung zur Identifikation umweltverträglicher CO ₂ -Speicher und Eckpunkte für eine erste Potentialanalyse	31
4.1 Bewertung potenzieller Ansätze hinsichtlich ihrer Eignung zur Identifikation umweltverträglicher CO ₂ -Speicher	31
4.2 Eckpunkte für eine erste Potenzialanalyse	33
4.2.1 Mindestanforderungen.....	33
4.2.2 Ausschlusskriterien	37
4.3 Abschließende Betrachtung.....	40
5 Aspekte und mögliche Verfahrensstufen für eine vertiefte Prüfung von umweltverträglichen Standorten.....	43
6 Schlussfolgerungen.....	51
7 Quellenverzeichnis	54
A Anhang	64
A.1 Beispiele für Ansätze zu Standortauswahlkriterien zur Identifikation für CO ₂ -Speicher aus der Literatur	64
A.2 Beispiele für Ansätze zu Standortauswahlverfahren zur Identifikation für CO ₂ -Speicher aus der Literatur.....	72
A.3 Wesentliche Standortmerkmale und Standortauswahlkriterien zur Identifikation von geeigneten Standorten zur Nutzung unterirdischer Lagerstätten und Speicher.....	76

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Darstellung möglicher Nutzungskonkurrenzen in der AWZ der deutschen Nordsee	16
Abbildung 2:	Schematische Darstellung des räumlichen Systems der CO ₂ -Speicherung in geologischen Formationen unter der AWZ der deutschen Nordsee	19
Abbildung 3:	Mögliche Verfahrensstufen bei der Identifikation umweltverträglicher CO ₂ -Speicher und deren vertieften Prüfung.....	47
Abbildung 4:	Kriterien für die Bewertung von Sedimentbecken für die geologische CO ₂ -Speicherung nach (Bachu, 2003)	64
Abbildung 5:	Geologische Schlüsselindikatoren für die Eignung von CO ₂ -Speichern nach (Chadwick, 2008)	65
Abbildung 6:	CO ₂ -Speicher Charakteristika und deren Attribute, Eigenschaften und Proxies nach (Oldenburg, 2008)	66
Abbildung 7:	Bei der Standortauswahl für CO ₂ -Speicher zu berücksichtigende Kriterien nach (Grataloup et al., 2009)	67
Abbildung 8:	Klassifikation von Standortauswahlkriterien für CO ₂ -Speicher nach (Bachu et al., 2009).....	68
Abbildung 9:	Klassifikation von technischen Standortauswahlkriterien und ihren untersetzenden Indikatoren für CO ₂ -Speicher nach (Llamas & Cienfuegos, 2012).....	69
Abbildung 10:	Klassifikation von sozio-ökonomischen Standortauswahlkriterien und ihren untersetzenden Indikatoren für CO ₂ -Speicher nach (Llamas & Cienfuegos, 2012)	70
Abbildung 11:	Wichtige Bewertungskriterien für die Beurteilung der Standorteignung von CO ₂ -Speicher nach (Wei et al., 2013).....	70
Abbildung 12:	Standortauswahlkriterien zur Identifikation potenzieller CO ₂ -Speicher nach (Raza et al., 2016)	71
Abbildung 13:	Übergreifende Standortkriterien für CO ₂ -Speicher nach (Alcalde et al., 2021)	71
Abbildung 14:	Verfahrensstufen zur Identifikation, Charakterisierung, Auswahl und dem Betrieb bis zur Nachsorgephase von CO ₂ -Speichern nach (Aarnes et al., 2009)	72
Abbildung 15:	Verfahrensschritte bei der Standortsuche von CO ₂ -Speichern und deren Bewertungskriterien nach (von Goerne et al., 2010)	73
Abbildung 16:	Verfahrensstufen zu Charakterisierung, Auswahl, Entwicklung, Errichtung, Betrieb und Verschluss von CO ₂ -Speichern nach (Carpenter et al., 2011).....	74
Abbildung 17:	Vorgehen zur Untersuchung und Auswahl von CO ₂ -Speichern nach (Carpenter et al., 2011)	75
Abbildung 18:	Verfahrensschritte bei der Standortauswahl von CO ₂ -Speichern nach (Alcalde et al., 2021)	76

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Ausschlusskriterien für die Identifikation potenziell geeigneter geologischer Formationen unter der AWZ der deutschen Nordsee nach (Fuhrmann et al., 2024)	25
Tabelle 2:	Standortauswahlkriterien zur Abwägung zwischen potenziellen CO ₂ -Speicherstandorten nach (ISO, 2017).....	25
Tabelle 3:	Mögliche Mindestanforderungen zur Identifikation umweltgerechter CO ₂ -Speicher	36
Tabelle 4:	Mögliche Ausschlusskriterien zur Identifikation möglichst umweltgerechter CO ₂ -Speicher	38

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Erläuterung
AkEnd	Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte
BASE	Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung
BGE	Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
BMWE	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
BMWK	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
CO₂	Kohlenstoffdioxid
DAM	Deutsche Allianz Meeresforschung
DepV	Deponieverordnung
ERA	Environmental Risk Assessment
ESK	Entsorgungskommission
ewG	Einschlusswirksamer Gebirgsbereich
GEOSTOR	Forschungsverbund zur Untersuchung der unterirdischen Speicherung von Kohlendioxid in geologischen Formationen der deutschen Nordsee
H₂	Wasserstoff
HSE	Health, Safety, and Environment
IPCC	International Panel on Climate Change
LN_e	Langfriststrategie Negativemissionen
MCDM	Multi Criteria Decision Making
MMV	Monitoring, Measurement, and Verification
MSK	Medwedjew-Sponheuer-Karnik (-Skala)
NSTA	North Sea Transition Authority
UBA	Umweltbundesamt
UVP	Umweltverträglichkeitsprüfung
UVPG	Umweltverträglichkeitsprüfungsgesetz
TUNB	Tiefer Untergrund Norddeutsches Becken
SöPa	Sozio-ökonomische Potenzialanalyse
SUP	Strategische Umweltprüfung
SRF	Screening and Ranking Framework
StandAG	Standortauswahlgesetz
StandAV	Standortauswahlverfahren für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle
WaBG	Wasserstoffbeschleunigungsgesetz

Zusammenfassung

Die Speicherung von Kohlendioxid in geologischen Formationen wird auch in Deutschland zunehmend als notwendige ergänzende Maßnahme zur Erreichung der Klimaziele betrachtet. Gleichzeitig bleibt die CO₂-Speicherung in geologischen Formationen eine umstrittene, energie- und kostenintensive Technologie, die mit erheblichen Herausforderungen und zahlreichen bestehender Ungewissheiten und Risiken, erwartbarer Umweltauswirkungen sowie imminenter Nutzungskonflikte des zur Verfügung stehenden Raums verbunden ist. Der tatsächliche Einsatz der CO₂-Speicherung und dessen Umfang ist im Hinblick der Machbarkeit eines industriellen Hochlaufs unter Berücksichtigung dieser Aspekte weiterhin zu diskutieren und kritisch zu hinterfragen.

Die grundsätzliche Eignung geologischer Formationen unter der ausschließlichen Wirtschaftszone der deutschen Nordsee zur Speicherung von CO₂ wird derzeit als möglich eingeschätzt. Dennoch ist davon auszugehen, dass die realistisch nutzbaren Speicherkapazitäten unter Einhaltung technischer, ökologischer, rechtlicher und sozioökonomischer Einschränkungen erheblich geringer ausfallen dürften als theoretisch angenommen. Darüber hinaus bleibt die CO₂-Speicherung in geologischen Formationen eine umstrittene Technologie mit erheblichen Herausforderungen und Ungewissheiten, insbesondere hinsichtlich Langzeitstabilität und Umweltverträglichkeit sowie ihrer gesellschaftlichen Akzeptanz.

Nach gesetzlichen Bestimmungen soll die CO₂-Speicherung im Untergrund vollständig, dauerhaft und auf unbegrenzte Zeit erfolgen. Dies gewährleisten zu wollen stellt eine große Herausforderung dar, nicht zuletzt aufgrund der langen Einlagerungszeiträume von mehreren tausend Jahren. Ein möglichst sicherer und dauerhafter Einschluss des CO₂ legt jedoch den wesentlichen Grundstein, um Langzeitsicherheit und Umweltverträglichkeit zu erreichen. Dazu müssen in erster Linie direkte Umweltauswirkungen der CO₂-Speicherung durch technische Risiken beim Transport und der Injektion sowie geologische Gefahren wie CO₂-Leckagen vermieden werden. Voraussetzung für eine möglichst umweltschonende CO₂-Speicherung ist dabei nicht nur ein umfassendes Sicherheits- und Risikomanagement, sondern auch ein fundiertes Überwachungskonzept und die Berücksichtigung indirekter Umweltauswirkungen sowie eine frühzeitige, transparente Beteiligung der Öffentlichkeit.

Letztendlich müssen Projekte mit dem Ziel der CO₂-Speicherung daher so gestaltet sein, dass auch indirekte Umweltauswirkungen jenseits von potenziellen CO₂-Leckagen (bspw. durch den Aufbau von Infrastruktur oder während des Betriebs) und unzumutbare Belastungen für Mensch und Umwelt entlang der gesamten Prozesskette über lange Zeiträume möglichst effektiv vermieden oder minimiert werden. Dies erfordert eine stärkere Berücksichtigung ökologischer und sozioökonomischer Faktoren bei der Identifikation potenzieller CO₂-Speicher und der vertieften Prüfung umweltverträglicher Standorte. Die Verfahrensstufen müssen daher im Sinne des Vorsorgeprinzips bereits frühzeitig das gesamte System für die CO₂-Speicherung in geologischen Formationen berücksichtigen. So muss bereits bei der vertieften Prüfung von CO₂-Speichern die Langzeitsicherheit auf verschiedene Zeitskalen – über viele Jahrzehnte und Jahrhunderte bis mehrere zehntausend Jahre – hinweg prognostiziert werden, um dem Vorsorgeprinzip gerecht zu werden.

Zahlreiche Studien liefern bereits fundierte Ansätze für die Identifikation geeigneter CO₂-Speicher und schlagen erste Kriterien zur Eingrenzung und Auswahl großräumiger geologischer Suchräume vor. Diese ermöglichen eine erste Potenzialanalyse, bleiben jedoch häufig noch auf einem generischen Niveau. Besonders im Hinblick auf die Umweltverträglichkeit zeigen sich noch Lücken: Zwar werden zunehmend Umweltfaktoren berücksichtigt, doch insbesondere indirekte Auswirkungen entlang der gesamten Prozesskette – von Erkundung, Errichtung,

Transport und Betrieb sowie Überwachungsmethoden – finden bislang nur begrenzt Eingang in bestehende Bewertungsrahmen.

Auch das Kohlendioxid-Speicherung- und Transport-Gesetz (KSpTG/25.11.2025) formuliert, dass „potenzielle Kohlendioxidspeicher und potenzielle Speicherkomplexe“ zur Feststellung der Eignung „nach Maßgabe einschlägiger Kriterien der Anlage 1 und weiterer geeigneter Methoden zu überprüfen und auf ihre Eignung für eine langzeitsichere Speicherung hin zu charakterisieren und zu bewerten sind (Vgl. siehe KSpTG/25.11.2025, § 7 (3)). Die Kriterien der Anlage 1 beziehen sich jedoch nur auf die Feststellung der Eignung potenzieller CO₂-Speicher und sind „auf Grundlage der durch die Untersuchung gewonnenen Erkenntnisse“ zu charakterisieren und zu bewerten.

Ein Verfahren zur Identifikation umweltverträglicher CO₂-Speicher setzt jedoch deutlich früher – vor den Untersuchungen im Gelände durch die Betreiber – an. Es besteht durch dieses Verfahren die Möglichkeit harte Mindestanforderungen und Ausschlusskriterien zu formulieren, welche potenzielle CO₂-Speicher erfüllen müssen, schon bevor Betreiber gemäß § 7 KSpTG/25.11.2025 für diese eine Untersuchungsgenehmigung beantragen.

Für eine umweltgerechte Standortauswahl wäre es jedoch notwendig, klare Ausschlusskriterien und belastbare Mindestanforderungen zu definieren, die bereits in der frühen Phase der Identifikation möglichst umweltverträglicher CO₂-Speicher Anwendung finden. Ergänzend ermöglichen differenzierte Umweltkriterien eine weiterführende vergleichende Abwägung potenzieller Speicher im Rahmen vertiefter Prüfungen. So kann nicht nur die technische und geologische Eignung, sondern auch Umweltverträglichkeit im Sinne eines präventiven und integren Speicherbetriebs schon bei der Standortauswahl berücksichtigt werden. Ein Standortauswahlprozess für umweltverträgliche Speicherstandorte muss wissenschaftlich fundiert, transparent und konsequent an den Maßstäben der Umweltverträglichkeit ausgerichtet sein. Grundlage ist ein integrativer Bewertungsansatz, der geowissenschaftliche, technische, ökologische und sozioökonomische Kriterien systematisch einbezieht. Die Umweltverträglichkeit ist dabei als durchgängiges Prinzip zu verstehen.

Bisher sieht das KSpTG nur eine Umweltverträglichkeitsprüfung im Rahmen des Planfeststellungsverfahrens gemäß § 13 KSpTG/25.11.2025 vor. Diese könnte jedoch frühzeitig, etwa durch strategische Umweltprüfungen und sozio-ökonomische Potenzialanalysen, wie sie aus dem Standortauswahlverfahren für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle bekannt sind, ergänzt werden. Dadurch könnten bereits bei der Vorauswahl, aus Sicht der Umweltverträglichkeit, weniger geeignete CO₂-Speicher vorzeitig ausgeschlossen oder potenziell besonders geeignete Gebiete frühzeitig eingegrenzt werden.

Abschließend gilt für den Einsatz der CO₂-Speicherung hinsichtlich der drohenden Übernutzung räumlicher Kapazitäten und zu erwartender Umweltauswirkungen das Vorsorgeprinzip „je weniger, desto besser“. Umweltverträglichkeit wird am ehesten mit einem möglichst moderaten Einsatz der CO₂-Speicherung erreicht.

Summary

The geological storage of carbon dioxide is increasingly regarded in Germany as a necessary complementary measure for achieving climate targets. At the same time, CO₂ storage remains a highly controversial, energy- and cost-intensive technology associated with significant challenges, numerous uncertainties and risks, expected environmental impacts, and potential conflicts over the use of limited spatial resources. The actual deployment of CO₂ storage and its potential scale therefore remain subject to debate and require critical assessment regarding the feasibility of an industrial ramp-up under these conditions.

Geological formations beneath the exclusive economic zone of the German North Sea are currently considered potentially suitable for CO₂ storage. However, it is likely that the realistically usable storage capacities will be considerably lower than theoretical estimates once technical, ecological, legal, and socio-economic constraints are considered. In addition, CO₂ storage remains a controversial technology with substantial challenges and uncertainties, particularly regarding long-term stability, environmental compatibility, and societal acceptance.

According to legal requirements, CO₂ stored in the subsurface must remain completely and permanently contained for an unlimited period. Ensuring such permanent containment represents a major challenge, particularly because storage periods extend over several thousand years. Reliable and durable containment of CO₂ is therefore a fundamental prerequisite for achieving long-term safety and environmental protection. This requires avoiding direct environmental impacts resulting from technical risks during transport and injection, as well as geological hazards such as CO₂ leakage. Environmentally compatible CO₂ storage therefore requires not only comprehensive safety and risk management but also robust monitoring concepts, the consideration of indirect environmental impacts, and early and transparent public participation.

CO₂ storage projects must therefore be designed in a way that minimizes or avoids indirect environmental impacts beyond potential CO₂ leakage, for example those resulting from infrastructure development or operational activities. In addition, unacceptable burdens on humans and the environment along the entire process chain must be prevented over long time periods. This requires greater consideration of ecological and socio-economic factors when identifying potential CO₂ storage sites and during the detailed assessment of environmentally compatible locations. In line with the precautionary principle, the different procedural stages must therefore take the entire system of CO₂ storage in geological formations into account from an early stage. Long-term safety must be assessed during the detailed evaluation of potential storage sites across different time scales, ranging from decades and centuries to several tens of thousands of years.

Numerous studies already provide well-established approaches for identifying suitable CO₂ storage sites and propose initial criteria for narrowing down and selecting large geological search areas. These approaches enable a first assessment of storage potential but often remain relatively generic. Important gaps remain, particularly regarding environmental compatibility. While environmental factors are increasingly considered, indirect impacts along the entire process chain – from exploration and construction to transport, operation, and monitoring – are still only partially integrated into existing assessment frameworks.

The German Carbon Dioxide Storage Act (see § (3) KSpTG/25.11.2025) stipulates that “potential carbon dioxide storage sites and potential storage complexes” must be examined to determine their suitability “in accordance with the relevant criteria of Annex 1 and other appropriate methods and must be characterized and evaluated with regard to their suitability for long-term

secure storage” However, the criteria listed in Annex 1 focus primarily on assessing the suitability of potential storage sites and are to be characterized and evaluated “on the basis of the knowledge gained through the investigation.”

A procedure for identifying environmentally compatible CO₂ storage sites should therefore begin much earlier, before operators conduct site investigations in the field. Such a procedure would allow the definition of strict minimum requirements and exclusion criteria that potential CO₂ storage sites must meet even before operators apply for an exploration permit in accordance with § 7 (KSpTG/25.11.2025).

For an environmentally sound site selection process, it is therefore necessary to define clear exclusion criteria and robust minimum requirements that already apply during the early phase of identifying potentially suitable CO₂ storage sites. In addition, differentiated environmental criteria allow for a more detailed comparative assessment of potential storage locations during subsequent evaluation steps. In this way, not only technical and geological suitability but also environmental compatibility in the sense of preventive and responsible storage operations can already be considered during site selection. A site selection process for environmentally compatible storage locations must be scientifically robust, transparent, and consistently guided by environmental protection objectives. This requires an integrated assessment framework that systematically considers geoscientific, technical, ecological, and socio-economic criteria. Environmental compatibility should therefore be understood as a guiding principle throughout the entire process.

At present, the KSpTG/25.11.2025 requires an environmental impact assessment only within the framework of the planning approval procedure pursuant to § 13 (KSpTG/25.11.2025). However, this process could be complemented at an earlier stage by strategic environmental assessments and socio-economic potential analyses like those applied in the site selection procedure for a repository for high-level radioactive waste. Such approaches would allow storage sites that are less suitable from an environmental perspective to be excluded early in the process and would help identify particularly suitable areas at an early stage.

Finally, regarding the risk of overusing spatial capacities and the environmental impacts that may arise, the precautionary principle applies to the deployment of CO₂ storage: the less, the better. Environmental compatibility is most likely achieved if CO₂ storage is used in a moderate and limited way.

1 Problem- und Zielstellung

In globalen Szenarien ökonomischer Klimamodelle (s. g. Integrated Assessment Models, IAMs) wird die Speicherung von Kohlendioxid in geologischen Formationen (engl.: Carbon Capture and Storage, CCS) vor dem Hintergrund spezifischer Annahmen u.a. zur Nachfrage- und Entwicklung der Erneuerbaren Energien zunehmend als Maßnahme zur Erreichung der internationalen Klimaziele integriert (Slade et al., 2022). Gleichzeitig bleibt CCS eine umstrittene, energie- und kostenintensive Technologie, die mit erheblichen Herausforderungen und Ungewissheiten verbunden ist, insbesondere in Bezug auf ihre Langzeitstabilität, Umweltverträglichkeit, gesellschaftlichen Akzeptanz sowie der Erfüllung sehr ambitionierter, modellbasierter Annahmen hinsichtlich der zu speichernden CO₂-Mengen in den Klimamodellen (Zhang et al., 2024).

Nichtsdestotrotz sehen auch in Deutschland viele Treibhausgasneutralitätsszenarien den Einsatz von CCS zur Vermeidung der Freisetzung von CO₂-Emissionen und zum Entzug von CO₂ aus der Atmosphäre in unterschiedlichem Umfang vor (z. B. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz [BMWK], 2024a, 2024b; CDU, CSU & SPD, 2025; Gores et al., 2025; Lübbers et al., 2026; Stiftung Wissenschaft und Politik [SWP], 2022). Während einige Szenarien einen umfangreicheren Einsatz mit ambitioniertem industriellen Hochlauf der CO₂-Abscheidung und -Einlagerung für notwendig erachten (bspw. Burchardt et al., 2021; Nesselhauf et al., 2024), zeigen andere Szenarien die Möglichkeit eines moderaten Hochlaufs der CCS-Technologie. Hier wird die Treibhausgasneutralität 2045 mit einer ambitionierten CO₂-Minderungsstrategie erreicht und einem ergänzenden moderaten Einsatz von BECCS (Harthan et al., 2025). Insofern bleibt der tatsächlich notwendige Einsatz und der damit verbundene Umfang des Hochlaufs von CCS im Kontext einer umweltverträglichen und gesellschaftlich akzeptierten Klimapolitik weiterhin zu diskutieren und kritisch zu hinterfragen (Cames et al., 2024; Cames et al., 2023; Krupp, 2025; Umweltbundesamt [UBA], 2008; Yao et al., 2025).

Mit der Verabschiedung des Kohlendioxid-Speicherung- und Transport-Gesetz (KSpTG/25.11.2025) wurde die CO₂-Speicherung im industriellen Maßstab ermöglicht und ein einheitliches Zulassungsregime für Transportleitungen geschaffen (BMWK, 2024a, 2024b; BMWK, 2022). Die CO₂-Speicherung könnte demnach sowohl in unterirdischen Gesteinsschichten unter der ausschließlichen Wirtschaftszone (AWZ) der deutschen Nordsee, nach Beschluss einzelner Bundesländer, unter dem Gebiet des jeweiligen Landesbereichs oder unter Teilen davon, zum Einsatz kommen. Es findet keine Priorisierung für den Einsatz von CCS statt außer dem Ausschluss der sehr emissionsintensiven Energieerzeugung aus Kohle, auch die Anbindung von Gaskraftwerken ist möglich. Zudem wurde für Bau von CCS-Anlagen das überragende öffentliche Interesse festgestellt.

Gemäß § 5 (KSpG, 2012/10.08.2021) wurde die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) bereits im Jahr 2008 beauftragt, das Potenzial der CO₂-Speicherung in geologischen Formationen zu analysieren. Das Speicher-Kataster Deutschland¹ lieferte hierzu eine erste Abschätzung von statischen Speicherpotenzialen² unter Land und Meer. Das

¹ <https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Nutzung-tieferer-Untergrund/Projekte/CO2-Speicherung/Nutzungspotenziale/Abgeschlossen/speicherkataster.html>

² Statische Speicherpotenziale liefern eine „erste grobe Einschätzung des theoretisch nutzbaren Speichervolumens in einem geologischen Reservoir“ und schaffen eine Basis für eine weiterführende, detaillierte Erkundung (Wallmann, K. und das GEOSTOR-Konsortium, 2025). Statische Speicherpotenziale berücksichtigen dabei weder geotechnische noch ökologische, ökonomische, rechtliche und raumplanerische Einschränkungen (Cames et al. 2024; Lübbers et al. 2026).

Forschungsprojekt GEOSTOR³ setzt derzeit die Untersuchungen zur CO₂-Speicherung unter dem Meer der AWZ der deutschen Nordsee fort, um deren Risiken und Potenziale einschätzen zu können (Wallmann, K. und das GEOSTOR-Konsortium, 2025).

Wallmann, K. und das GEOSTOR-Konsortium (2025) kommen zu der Einschätzung, dass die CO₂-Speicherung in geologischen Formationen unter der AWZ der deutschen Nordsee prinzipiell möglich ist. Demnach könnte ein Teil, der in Zukunft in Deutschland abgeschiedenen CO₂-Mengen in salinaren Aquiferen der Buntsandsteinformationen vor der Küste gespeichert werden. Derzeit wird das statische Speicherpotenzial der Buntsandsteinformationen auf ca. 0,9 – 5,5 Gt CO₂ geschätzt⁴ (Fuhrmann et al., 2024; Wallmann, K. und das GEOSTOR-Konsortium, 2025). Auch wenn diese Schätzungen tendenziell als konservativ und zuverlässig zu verstehen sind, basieren auch diese ausschließlich auf theoretischen geologischen Betrachtungen⁵ (Fuhrmann et al., 2024; Rütters & Löschke, 2024).

Es ist jedoch bereits absehbar, dass die im Rahmen einer vertieften geologischen Prüfung ermittelten dynamischen Speicherkapazitäten nicht zuletzt aufgrund geotechnischer Einschränkungen deutlich unter den initialen statischen Abschätzungen liegen werden (Krupp, 2025; Wallmann, K. und das GEOSTOR-Konsortium, 2025). Darüber hinaus wird der Einbezug weiterer Standortfaktoren, wie ökologische, ökonomische, rechtliche und raumplanerische Festlegungen die tatsächlich kommerziell nutzbaren Speicherkapazitäten weiter erheblich beeinflussen (Fuhrmann et al., 2024; Lübbers et al., 2026). Realistische Speicherkapazitäten dürften so, unter Berücksichtigung geotechnischer, umweltrechtlicher und sozioökonomischer Auflagen, nur einen Bruchteil der theoretischen geologischen Abschätzungen ausmachen (Cames et al., 2024; Lübbers et al., 2026; Krupp, 2025; Rütters & Löschke, 2024; Wallmann, K. und das GEOSTOR-Konsortium, 2025).

Potenzielle CO₂-Speicher⁶ müssen unter Berücksichtigung dieser regulatorischen und geotechnischen Auflagen sorgfältig identifiziert, ausgewählt und untersucht werden, um eine möglichst sichere und dauerhafte Speicherung zu gewährleisten (Richtlinie 2009/31/EG; International Organization for Standardization [ISO], 2017, 2026). Neben der Langzeitsicherheit gilt es, indirekte Umweltauswirkungen jenseits von potenziellen CO₂-Leckagen und unzumutbare Belastungen für Mensch und Umwelt möglichst zu vermeiden (Bartel & Janssen, 2016; Cames et al., 2024; Center for International Environment Law [CIEL], 2023; Janssen, 2024). Dies erfordert eine stärkere Berücksichtigung ökologischer und sozioökonomischer Faktoren bei der Identifikation umweltverträglicher CO₂-Speicher.

Bereits heute ist abzusehen, dass zahlreiche potenzielle CO₂-Speicher aufgrund von Nutzungskonkurrenzen mit Vorrangflächen anderer Nutzungen und dem Naturschutz nicht zu Verfügung stehen werden (Abbildung 1) (Rütters & Löschke, 2024; Wallmann, K. und das

³Das Forschungsprojekt "Unterirdische Speicherung von Kohlendioxid in geologischen Formationen der deutschen Nordsee" (GEOSTOR) ist Teil der Forschungsmission der der Deutschen Allianz Meeresforschung (DAM) „Marine Kohlenstoffspeicher als Weg zur Dekarbonisierung“, <https://geostor.cdrmare.de/>

⁴ Darüber hinaus könnten möglicherweise 11 – 65 Mt CO₂ in weiteren geologischen Formationen (z. B. Jura) gespeichert werden (Wallmann, K. und das GEOSTOR-Konsortium, 2025).

⁵ Wesentlich größere Ungewissheiten bestehen im Vergleich derzeit für die theoretischen Abschätzungen der statischen Onshore-Speicherpotenziale auf dem deutschen Festland. So werden für Deutschland (Onshore und Offshore) insgesamt potenzielle CO₂-Speicherkapazitäten zwischen 6,3 Gt CO₂ (mit 90 %iger Wahrscheinlichkeit) und 12,8 Gt CO₂ (mit 10 %iger Wahrscheinlichkeit) angenommen. Mediane Abschätzungen mit 50 %iger Wahrscheinlichkeit liegen bei etwa 9,3 Gt CO₂ (Knopf et al., 2010; Knopf und May, 2017).

⁶ Gemäß § 3 Kohlendioxid-Speicherung-und-Transport-Gesetz umfasst der Begriff CO₂-Speicher „den zum Zweck der dauerhaften Speicherung räumlich abgegrenzten Bereich, der aus einer oder mehreren Gesteinsschichten besteht, sowie die hierfür erforderlichen unter- und oberirdischen Einrichtungen ab Anlieferung des Kohlendioxidstroms an der Injektionsanlage“. International wird meist der Begriff „storage site“ (deutsch: Speicherstätte) genutzt und ist nach der Artikel 3 der CCS-Richtlinie gleichbedeutend mit dem deutschen Begriff CO₂-Speicher (Richtlinie 2009/31/EG).

GEOSTOR-Konsortium, 2025). Der Raumnutzungsplan für die AWZ in der deutschen Nordsee sieht bislang keine Flächen für CO₂-Speicher vor⁷ (Cames et al., 2024; Janssen, 2024).

Abbildung 1: Darstellung möglicher Nutzungskonkurrenzen in der AWZ der deutschen Nordsee



Darstellung der Überlagerung bereits bestehender Nutzungsfläche im und über dem Meeresraum mit der Lage der potenziell geeigneten Speicherstrukturen nach (Fuhrmann et al., 2024) im geologischen Untergrund in Tiefen von 800 – 4500 m. Die potenziell geeigneten Speicherstrukturen haben schon erste geologische Ausschlusskriterien durchlaufen (Vgl. siehe Kapitel 3.1).

Quelle: verändert nach (CDRMare, 2023; Fuhrmann et al., 2024)

Nach § 13 (KSpTG/25.11.2025) sollen Gebiete für potenzielle CO₂-Speicher ausgeschlossen werden, wenn sie erneuerbare Energieprojekte (z. B. Windenergieanlagen) beeinträchtigen oder in Meeresschutzgebieten bzw. weniger als acht Kilometer davon entfernt liegen⁸. Wallmann, K. und das GEOSTOR-Konsortium (2025) weisen darauf hin, dass ohne Konzepte für Mehrfachnutzungen und Wege zum Umgang mit Nutzungskonflikten nur ein kleiner Teil der potenziellen CO₂-Speicher genutzt werden könnten⁹. Daraus ergeben sich Anforderungen, um eine möglichst umweltverträgliche Gestaltung der CO₂-Speicherung gewährleisten zu können.

⁷ <https://gdi.bsh.de/mapapps/resources/apps/meeresnutzung/index.html?lang=de>,

siehe auch Raumordnungsgesetz (2008); Raumordnungsplan für die deutsche ausschließliche Wirtschaftszone in der Nordsee und in der Ostsee (Anlage zur Verordnung über die Raumordnung in der deutschen ausschließlichen Wirtschaftszone in der Nordsee und in der Ostsee, 2021)

⁸ Dies umfasst sämtliche für die CO₂-Speicherung erforderlichen Tätigkeiten in den Bereichen über oder auf der Wasseroberfläche, der Wassersäule, des Meeresbodens sowie des geologischen Untergrunds Kohlendioxid-Speicherung-und-Transport-Gesetz.

⁹ Wallmann, K. und das GEOSTOR-Konsortium (2025) schließen in ihrer Potenzialbewertung eine CO₂-Speicherung unter Meeresschutzgebieten entsprechend dem Gesetzentwurf zur Änderung des Kohlendioxid-Speicherungsgesetzes (KSpG) vom 29. Mai 2024 ebenfalls aus.

Ziel des Kurzpapieres ist es daher, Anforderungen an ein Verfahren zur Identifikation umweltverträglicher CO₂-Speicher zu beschreiben. Dazu werden in Kapitel 2 generische Standortmerkmale umweltverträglicher CO₂-Speicher formuliert. In Kapitel 3 werden übergreifende Ansätze zur Identifikation geeigneter CO₂-Speicher erläutert und Beispiele aus bereits bestehenden Standortauswahlprozessen zur Identifikation unterirdischer Lager- bzw. Speicher herangezogen. Kapitel 4 bewertet diese Ansätze hinsichtlich ihrer Eignung zur Identifikation umweltverträglicher CO₂-Speicher und schlägt mögliche Eckpunkte für eine erste Potentialanalyse vor. Kapitel 5 benennt Aspekte und mögliche Verfahrensstufen für eine vertiefte Prüfung von umweltverträglichen CO₂-Speichern und Speicherstandorten, und Kapitel 6 fasst die Schlussfolgerungen zusammen. Die Betrachtungen konzentrieren sich auf die geologische CO₂-Speicherung in salinaren Aquiferen für Offshore-Speicher und deren Infrastruktur¹⁰, wobei Onshore-Speicher und die Speicherung ggf. in ausgedienten Erdgasfelder in Delta-Betrachtungen zur Herausarbeitung von wesentlichen Unterschieden (Deltas) berücksichtigt werden.

¹⁰ Darunter zählen die (Bohr-)Anlagen zur Injektion von CO₂ sowie der Offshore-Transport von CO₂ mittels Schiff und Pipeline am Meeresboden.

2 Potenzielle Standortmerkmale umweltverträglicher CO₂- Speicher

Das zentrale Ziel der CO₂-Speicherung in geologischen Formationen muss ein möglichst dauerhafter und sicherer Einschluss des Kohlendioxids sein (Metz et al., 2005; Purr & Spindler, 2023). Dieser gilt als gewährleistet¹¹, wenn technische Risiken (etwa beim Transport und der Injektion) sowie geologische Gefahren (wie CO₂-Leckagen) vermieden werden können (Richtlinie 2009/31/EG; ISO, 2017, 2026; Wallmann, K. und das GEOSTOR-Konsortium, 2025). Nur wenn das CO₂ möglichst dauerhaft und sicher im geologischen Untergrund zurückgehalten wird, kann die Speicherung einen substanziellen Beitrag zum Schutz der menschlichen Gesundheit, zur Umweltverträglichkeit und zur Klimawirksamkeit leisten (Slade et al., 2022; Metz et al., 2005).

Umweltverträgliche CO₂-Speicher zeichnen sich darüber hinaus durch Standortmerkmale aus, die das Risiko unzumutbarer Belastungen und negativer Auswirkungen für Mensch und Umwelt deutlich verringern (Cames et al., 2024; Metz et al., 2005; Purr & Spindler, 2023; Schütte et al., 2018). Umweltverträglichkeit bedeutet dabei nicht nur Schutz natürlicher Ökosysteme, sondern kann auch auf die Vermeidung politischer und sozioökonomischer Risiken ausgeweitet werden (Schütte et al., 2018).

Die Langzeitsicherheit und Umweltverträglichkeit müssen einerseits während des Betriebs der CO₂-Speicherung über Jahrzehnte hinweg gewährleistet bleiben (Cames et al., 2024). Andererseits sind CO₂-Speicherprojekte nur für eine operative Projektdauer von 50 bis 70 Jahren ausgelegt. Die Langzeitsicherheit und Umweltverträglichkeit müssen auch über diesen Zeitraum hinaus bestehen (Richtlinie 2009/31/EG; UBA, 2008; Purr & Spindler, 2023). Es schließen sich mindestens weitere 40 Jahre an den operativen Betrieb bis zur Übertragung der Verantwortung der Speicherstätten an die Behörden an (KSpTG/25.11.2025). Darüber hinaus erfordert eine dauerhafte Speicherung Isolationszeiträume von mindestens tausend bis mehreren zehntausend Jahren (Alcalde et al., 2018; von Goerne et al., 2010; Metz et al., 2005), bzw. bis zu 100.000 Jahre (May, 2024). Blohm et al. (2006) hat sich schon früh dafür ausgesprochen, dass Leckageraten von 0,01 %/Jahr nicht überschritten werden sollten, um sicherzustellen, dass auch nach 1.000 Jahren noch mindestens 90 % des injizierten CO₂ gespeichert bleiben.

Wallmann (2023) erwartet im Eintrittsfall von CO₂-Leckagen bei gut ausgewählten Speichern maximale Austrittsraten in der Größenordnung der Leckageraten von natürlichen Erdgasaustritten¹² in der Nordsee. Bei CO₂-Leckageraten von ca. 0,0001 % würde dies einer dauerhaften Speicherung von mehr als 99 % des CO₂ über einen Zeitraum von 1.000 Jahren entsprechen. In dieser Größenordnung würden sich Schäden durch CO₂-Leckagen nur sehr lokal und geringfügig auf die Umwelt am Meeresboden auswirken besonders an Stellen mit einem hohen Strömungsaustausch am Meeresgrund, da dort das austretende CO₂ durch die Strömung rasch verdünnt und verteilt wird (Vielstädte et al., 2019; Wallmann, 2023; Wallmann, K. und das GEOSTOR-Konsortium, 2025). Diese Leckageraten beruhen jedoch in aller Regel auf Modellierungen, deren Gültigkeit und absolute Verlässlichkeit sich in der Realität erst noch beweisen müssen. Festzuhalten ist, dass selbst beim bestimmungsgemäßen Betrieb aufgrund der großen Unsicherheiten beim Langzeitverhalten des CO₂ im Untergrund mit gewissen

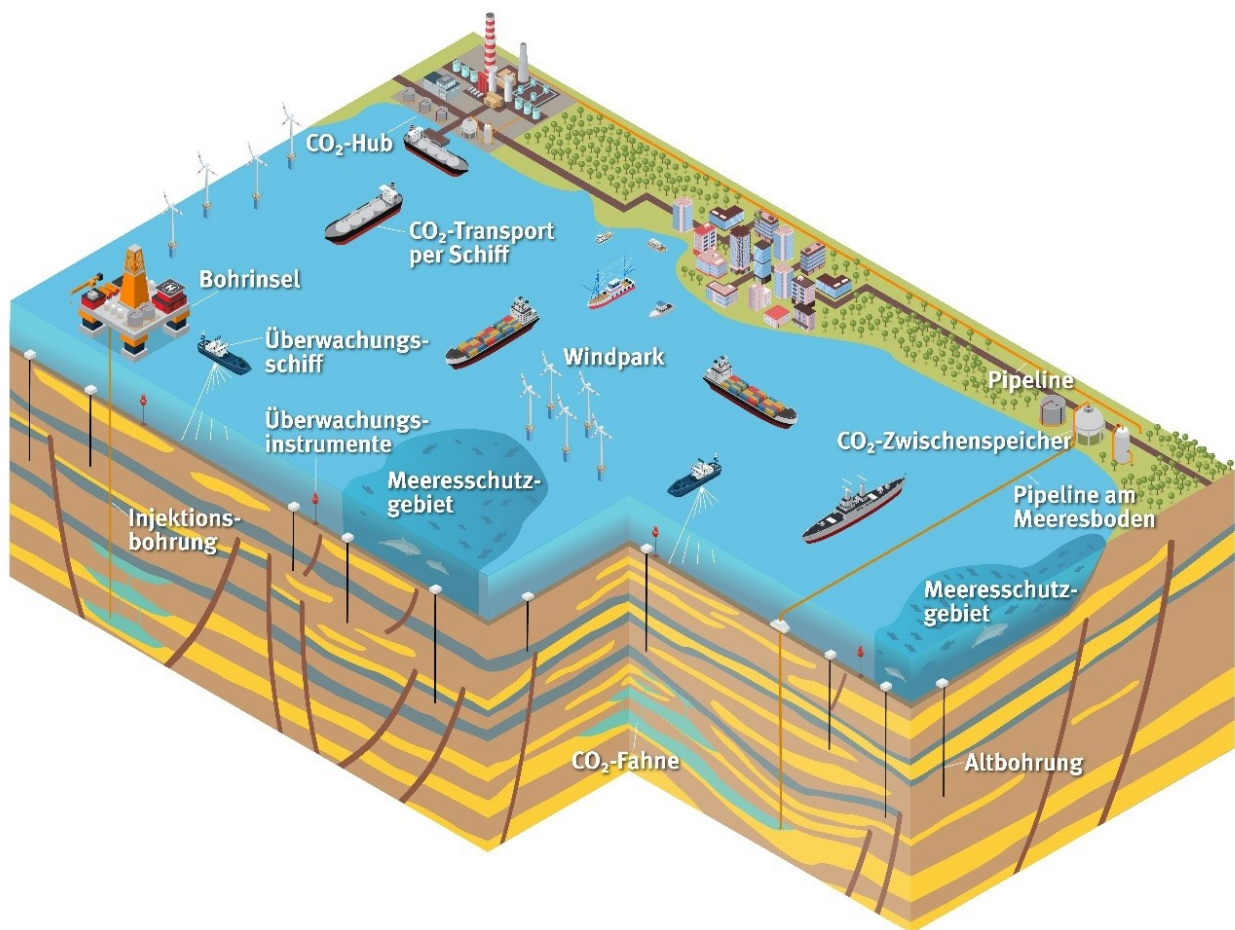
¹¹ Dennoch bestehen erhebliche Ungewissheiten, ob mögliche CO₂-Emissionen entsprechend der in der EU- Monitoringverordnung festgelegten Genauigkeit ermittelt werden können (Durchführungsverordnung (EU) 2018/2066; May, 2024).

¹² An Austrittsstellen, wie alten Bohrlöchern und natürlichen Störungszonen werden mit Leckageraten von Erdgas auf 1 – 30 Tonnen pro Jahr gerechnet (Vielstädte et al., 2017; Vielstädte et al., 2019; Wallmann, 2023; Wallmann, K. & das ECO₂-Consortium, 2015).

Leckagen gerechnet werden muss (Alcalde et al., 2018). Diese werden in der Regel nicht oder nur sehr schwer bzw. teilweise quantifizierbar sein (May, 2024).

Langzeitsicherheit und Umweltverträglichkeit müssen darüber hinaus auch für verschiedene Räume gelten. CO₂-Speicherprojekte sind komplexe, mehrdimensionale Systeme (Janssen, 2024). An der Erdoberfläche muss die gesamte Prozesskette betrachtet werden – vom Transport von industriellen Punktquellen über Umladung und Zwischenspeicherung bis hin zu den Injektionsanlagen sowie zu deren Überwachung und Instandhaltung (Abbildung 2). Im geologischen Untergrund breitet sich das CO₂ dreidimensional aus und kann sich mehrere Kilometer von der Injektionsstelle entfernen, wo es dort theoretisch über Leckagen an die Erdoberfläche oder zum Meeresboden gelangen kann. Besonders bei der Offshore-Speicherung im mehrdimensionalen Meeresraum kommen zusätzliche Schutzerfordernisse für Meeresboden, Wassersäule und Oberflächenbereiche hinzu (Bartel & Janssen, 2016; Janssen et al., 2017; UBA, 2008).

Abbildung 2: Schematische Darstellung des räumlichen Systems der CO₂-Speicherung in geologischen Formationen unter der AWZ der deutschen Nordsee



Die Abbildung verfolgt das Ziel einer schematischen Darstellung der räumlichen und mehrdimensionalen Komplexität des CCS-Systems. Abstände sind nicht maßstabsgetreu.

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut Consult GmbH.

Daher muss eine umweltverträgliche CO₂-Speicherung das gesamte System berücksichtigen und erfordert ein umfassendes Sicherheits- und Überwachungskonzept (von Goerne et al., 2010). Auch unter der Annahme, dass der sichere und dauerhafte Einschluss von CO₂ gewährleistet werden könnte, können direkte (z. B. Unregelmäßigkeiten bei der Injektion) und indirekte Umweltauswirkungen (z. B. durch Infrastrukturaufbau und Überwachungsmaßnahmen) auftreten, die im Rahmen des Vorsorgeprinzips mit Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen berücksichtigt werden müssen (Bartel & Janssen, 2016; Cames et al., 2024; Wallmann, K. und das GEOSTOR-Konsortium, 2025). Letztendlich legt die Kombination geologischer, technischer, ökologischer und sozio-ökonomischer Standortmerkmale den Grundstein für den langfristigen und mehrdimensionalen Schutz von Mensch und Umwelt.

Umweltverträgliche CO₂-Speicher zeichnen sich in erster Linie durch geologische Standortmerkmale aus, die für eine dauerhafte und sichere CO₂-Speicherung geeignet sind (von Goerne et al., 2010; Kaldi et al., 2009; Kühn, 2011; Metz et al., 2005). Der Speicherkomplex muss eine geeignete Speicherformation umfassen, die große Mengen CO₂ aufnehmen und dauerhaft binden kann. Idealerweise verfügen diese Komplexe über mehrere stratigraphische und tektonische Barrieren im Deckgebirge, die die unkontrollierte Ausbreitung von CO₂ verhindern. Diese Barrieren müssen ungestört von tektonischen Prozessen (z. B. seismische Aktivität und Wegsamkeiten) und menschlichen Eingriffen (z. B. Altbohrungen) sein (von Goerne et al., 2010). Langfristige geologische Stabilität und Integrität sind entscheidend, um CO₂-Leckagen zu vermeiden. Wenn CO₂ sicher eingeschlossen bleibt, können Umweltauswirkungen durch das Entweichen von CO₂ oder CO₂-angereichertem Formationswasser und damit potenzielle Schäden an angrenzenden Ökosystemen vermieden werden (Dean et al., 2020; Wallmann, 2023; Wallmann, K. & das ECO₂-Consortium, 2015).

Geotechnische Standortmerkmale umweltverträglicher CO₂-Speicher lassen sich ebenfalls aus den geologischen Eigenschaften der Speicherstrukturen ableiten und betreffen sämtliche technischen Prozesse. Beim Transport und der Injektion können direkte Umweltauswirkungen durch Unregelmäßigkeiten im Betrieb (z. B. Leckagen oder durch Druckanstiege) auftreten (Cames et al., 2024; Gholami et al., 2021; Hauber, 2023; International Energy Agency Greenhouse Gas R&D Programme [IEAGHG], 2023a; Oldenburg et al., 2011; White & Foxall, 2016). Günstige Druckverhältnisse und ausreichend Porenraum sichern stabile Speicherkapazitäten und Injektionsraten, die für den sicheren Betrieb notwendig sind. Indirekte Umweltauswirkungen sind hingegen bei der Untersuchung von Speichern, dem Bau der Infrastruktur und dem Betrieb zu erwarten (z. B. Emissionen) (Abrahamsen, 2012; CIEL, 2023; European Environment Agency [EEA], 2011; McLean et al., 2020; Sivle et al., 2021; Solé et al., 2023; Vereide & Kühn, 2023; Popper & Hawkins, 2023). Alle diese Faktoren müssen bei der Auswahl der Speicherstandorte berücksichtigt werden, um Umweltverträglichkeit zu gewährleisten.

Darüber hinaus ist ein umfassendes Risikomanagement und Programme zur Überwachung¹³ (Monitoring, Measurement, and Verification, MMV) entscheidend, um frühzeitig auf Unregelmäßigkeiten im Betrieb, unkontrollierte Migration oder Leckagen von CO₂ sowie auf indirekte Umweltauswirkungen reagieren und Gegenmaßnahmen ergreifen zu können¹⁴ (Connelly et al., 2022; Dean et al., 2020; Furre et al., 2024; International Association of Oil&Gas Producers [IOGP], 2023; IEAGHG, 2023b; Meneguolo et al., 2024; Ringrose & Sæther, 2020). Daraus ergibt sich das Standortmerkmal, dass MMV-Programme sicher und zuverlässig im Sinne

¹³ z. B. seismische Überwachungen

¹⁴ Hierbei ist zu beachten, dass die festgelegten Messgenauigkeiten möglicher CO₂-Emissionen von CO₂-Speichern im Bereich von 7,5 Massenprozent entsprechend der EU Monitoringverordnung (Durchführungsverordnung (EU) 2018/2066) mit den zum jetzigen Zeitpunkt vorhandenen Messmethoden wahrscheinlich nicht erreichbar sind (May, 2024).

einer technisch durchführbaren, möglichst lückenlosen und aussagekräftigen Überwachung durchgeführt werden können müssen. Gleichzeitig müssen die Auswirkungen der Überwachungstätigkeiten auf die Umwelt so gering wie möglich gehalten werden (McCauley et al., 2017; Sivle et al., 2021; Vereide et al., 2024; Vereide & Kühn, 2023).

Umweltverträglichkeit schließt auch sozioökonomische Aspekte mit ein (Braun, 2017; Dütschke et al., 2022; Upham & Roberts, 2011). CO₂-Speicherprojekte beanspruchen Raum an der Oberfläche und im tiefen Untergrund und müssen so gestaltet sein, dass sie mit anderen Nutzungen im maritimen Raum vereinbar sind (Fugro, 2022; de Jonge-Anderson & Underhill, 2022; Wallmann, K. und das GEOSTOR-Konsortium, 2025). Ziel ist es, funktionale Beeinträchtigungen und negative Umwelteffekte durch konkurrierende Raumnutzungen zu vermeiden. Eine genaue Analyse der räumlichen Anforderungen ist erforderlich, insbesondere mit Blick auf bestehende und geplante Nutzungen wie Schifffahrt, Windenergie, Militär, Fischerei, Forschung oder Naturschutz. Da die CO₂-Speicherung in der Regel in tiefen Gesteinsschichten ab etwa 800 m erfolgt, bestehen grundsätzlich Potenziale für Mehrfachnutzungen. Während Schutzgebiete aus Gründen des Natur- und Umweltschutzes grundsätzlich von CO₂-Speicherprojekten auszunehmen sind – sowohl an der Oberfläche, im Meeresraum als auch im geologischen Untergrund –, könnte für andere Nutzungen geprüft werden, ob diese unter Wahrung der Umweltverträglichkeit miteinander koexistieren können (Janssen, 2024; Janssen et al., 2017; Kahnt et al., 2015; Rütters & Löschke, 2024; Schulze et al., 2015; Wallmann, K. und das GEOSTOR-Konsortium, 2025).

Darüber hinaus sollte ein geeigneter Standort für die umweltverträgliche CO₂-Speicherung so gewählt werden, dass durch transparente Kommunikation und Beteiligung eine breite gesellschaftliche Akzeptanz erreicht wird (Dütschke et al., 2022; Fink & Ratter, 2024; Voelsen, 2024; Witte et al., 2023). Diese lässt sich leichter erzielen, wenn die Anwendung der CO₂-Speicherung möglichst sorgfältig, effizient und moderat gestaltet wird. Eine moderate CO₂-Speicherung ermöglicht die Nutzung begrenzter CO₂-Speicherpotentiale für mehrere Generationen. Darüber hinaus besteht bei der Einlagerung von biogenem CO₂ besteht eine deutlich geringere Gefahr der Übernutzung natürlicher Ressourcen. Dazu gehört auch, dass Aspekte wie technischer Aufwand und Erreichbarkeit der Speicher im Einklang mit Nutzungskonflikten und der Umweltverträglichkeit stehen (Anders et al., 2024).

3 Übergreifende Ansätze zur Identifikation geeigneter CO₂-Speicher im geologischen Untergrund

Im Folgenden werden übergreifende Ansätze zur Identifikation geeigneter CO₂-Speicher im geologischen Untergrund vorgestellt. Kapitel 3 bildet somit die Grundlage für die spätere Bewertung der bestehenden Ansätze hinsichtlich der Eignung zur Identifikation umweltverträglicher CO₂-Speicher und möglicher Verfahrensstufen für eine vertiefte Prüfung umweltverträglicher Standorte.

Zunächst geht das Kapitel 3.1 auf in der Literatur bereits existierende Ansätze zur Ermittlung von Standortauswahlkriterien und Verfahren zur Identifikation für geeignete CO₂-Speicher ein. Dafür werden bestehende Ansätze zur Identifikation geeigneter CO₂-Speicherstandorte vorgestellt und wissenschaftliche Konzepte beschrieben, die sich mit einer ersten generischen und systematischen Bewertung potenzieller Speicher befassen. Anschließend liegt der Schwerpunkt auf Ansätzen, die für die Identifikation von CO₂-Speichern in Deutschland besonders relevant sind. Kapitel 3.2 liefert Beispiele bereits bestehender Verfahren zur Identifikation unterirdischer Lagerstätten und Speichern für vergleichende Nutzungen, von denen wertvolle Schlüsse für die Identifikation umweltverträglicher CO₂-Speicher gezogen werden können.

3.1 Ansätze zur Ermittlung von Standortauswahlkriterien und Verfahren zur Identifikation geeigneter CO₂-Speicher

Seit den frühen 2000er Jahren wurden zahlreiche Studien veröffentlicht, die sich mit einer umfassenden systematischen und strukturierten Standortprüfung und -auswahl (engl.: site screening and selection) für die CO₂-Speicherung in geologischen Formationen befassen. Erste grundlegenden Rahmenmodelle basieren auf allgemeinen Kriterienkatalogen für eine erste generische Potentialanalyse überregionaler sedimentärer Becken (Bachu, 2000, 2003). Diese frühen Ansätze konzentrierten sich vor allem auf geologische Faktoren wie Tektonik, Gesteinseigenschaften, die hydrodynamischen und geothermischen Bedingungen des Formationswassers sowie das Speicherverhalten von CO₂. Ergänzend wurden bereits frühzeitig wirtschaftliche Aspekte wie Erreichbarkeit und Infrastruktur sowie soziopolitische Rahmenbedingungen berücksichtigt (Alcalde et al., 2021; Bachu, 2003).

Das zentrale Element der frühen Ansätze zur generischen Bewertung potenzieller CO₂-Speicher war die Analyse von Speicherkapazität, Injektivität und Speichereffizienz – Kriterien, die vor allem unter ökonomischen Gesichtspunkten zur Speichersicherheit und -optimierung betrachtet wurden (Bachu, 2000, 2003; Bachu et al., 2009; Chadwick, 2008; Friedmann, 2007). Bachu (2003) entwickelte zudem Entscheidungshilfen in Form von Kriterienbäumen mit Bewertungsklassen, um die verschiedenen Standortfaktoren systematisch gegeneinander abwägen zu können.

Darauf aufbauend wurden in verschiedenen Studien erste generische Schwellenwerte und Standortkriterien definiert und in Kriterienbäumen mit Indikatoren und Bewertungsklassen überführt (siehe A.1, Abbildung 4 – Abbildung 13) (Bachu, 2003; Chadwick, 2008; Oldenburg, 2008; Raza et al., 2016). Zu den zentralen Standortkriterien zählten die Tiefe und Mächtigkeit der Speicherformationen sowie geologische Eigenschaften wie z. B. die Porosität, Permeabilität, Dichtigkeit und der Salzgehalt (Chadwick, 2008). Chadwick (2008) hob außerdem die laterale Ausdehnung und Mächtigkeit der Deckschichten hervor, womit auch die Stabilität und Integrität der geologischen Barrieren als Kriterium in den Fokus rückten. Bereits zu diesem frühen Zeitpunkt wurde darauf hingewiesen, dass Nutzungskonflikte entstehen können – etwa dann,

wenn die Nutzung von CO₂-Speicheranlagen an der Erdoberfläche mit Grundwasserschutz- oder Naturschutzgebieten kollidieren und bei der Standortauswahl berücksichtigt werden müssten.

Oldenburg (2008) entwickelte erstmals ein sogenanntes „Screening and Ranking Framework (SRF)“, um potenzielle CO₂-Speicher gezielt im Hinblick auf Gesundheits-, Sicherheits- und Umweltrisiken (engl. health, safety and environment, HSE) zu bewerten. In diesem Modell werden Speicher anhand ihrer Sicherheitsreserven für den langfristigen Einschluss von CO₂ beurteilt. Die generische Bewertung berücksichtigt drei zentrale Aspekte: das Einschlusspotenzial der Speicherformation selbst, das Vorhandensein einer sekundären Barriere sowie die Fähigkeit des gesamten Speicherkomplexes, die Migration von CO₂ zu begrenzen – selbst im Fall einer Undichtigkeit der Barrieren. Zur Einschätzung der Sicherheitsreserve wurden auch Standortmerkmale außerhalb des geologischen Speichers berücksichtigt. Dazu zählen unter anderem Eigenschaften an der Erdoberfläche – etwa Topografie, Landnutzung und Siedlungsstruktur –, hydrogeologische Gegebenheiten wie das Vorkommen und die Zusammensetzung von Grundwässern, potenzielle Risiken durch bestehende Altbohrungen sowie die Lage und Beschaffenheit geologischer Störungszonen (Oldenburg, 2008).

Mit dem Fortschreiten der Arbeiten entwickelten sich schnell multikriterielle Ansätze zur Identifikation geeigneter CO₂-Speicher (Grataloup et al., 2009; Wei et al., 2013). Diese kombinieren Ausschlusskriterien, Mindestanforderungen und Abwägungskriterien. Während Ausschlusskriterien zum direkten Ausschluss ungeeigneter Speicher führen, müssen Mindestanforderungen erfüllt sein, um geologische Formationen überhaupt in die Auswahl potenzieller Speicher einzubeziehen. Abwägungskriterien ermöglichen darüber hinaus einen Vergleich und ggf. eine Rangfolge der potenziellen Speicher und Speicherstandorte.

Grataloup et al. (2009) orientierten sich dabei an vier Zielen: der Speicheroptimierung (z. B. hohe Speicherkapazität, günstige Injektivität), der Risikominimierung (z. B. geringes Leckagerisiko, Schutz sensibler Güter), der Einhaltung rechtlicher Rahmenbedingungen und Umweltvorgaben sowie sozio-ökonomischen Aspekten wie Kosten und gesellschaftlicher Akzeptanz. Die Auswahlkriterien, die diese Ziele untersetzen können, je nach regionalem Kontext, Zielsetzung und Datenverfügbarkeit variieren. Ihre Bewertung erfolgt entweder qualitativ oder quantitativ, etwa durch bestehende Daten oder ergänzende Untersuchungen (Grataloup et al., 2009; Wei et al., 2013). Auch Bachu et al. (2009) führten ein mehrstufiges Modell mit „kritischen“, „essentiellen“ und „wünschenswerten“ Kriterien– und brachten erstmals die Durchführbarkeit von Überwachung als Ausschlusskriterium ein.

Einige Studien nutzen mathematische Entscheidungsmodelle oder Punktesysteme, um mehrere Standortkriterien gewichtet zu bewerten (Alcalde et al., 2021; Llamas & Cámara, 2014; Llamas & Cienfuegos, 2012; Wei et al., 2013). Mithilfe sogenannter „Multi Criteria Decision Making“ (MCDM)-Methoden können potenzielle Speicher priorisiert analysiert werden. Diese generischen Ansätze integrieren neben geologischen auch sozioökonomische Parameter und ermöglichen damit ein ganzheitlicheres „Screening“ von Speichern bzw. Speicherstandorten (Alcalde et al., 2021).

Parallel zur Ermittlung von Standortfaktoren für CO₂-Speicher formulierten bereits einige Arbeiten erste Verfahrensschritte für den Prozess von erster Potentialanalyse über umfassende Standortprüfung und -auswahl bis zur Bau- und Betriebsgenehmigung (siehe Kapitel 5) (Aarnes et al., 2009; Alcalde et al., 2021; Carpenter et al., 2011; von Goerne et al., 2010). Ziel ist es, geeignete Speicher auf Basis vorhandener Daten sowie unter Berücksichtigung ökologischer, wirtschaftlicher und logistischer Aspekte zu identifizieren und zu bewerten. Ein wissenschafts- und leistungsbasierter Satz von standortspezifischen Eignungs- und Prüfkriterien hilft dabei, die

wichtigsten Risikofaktoren zu berücksichtigen und somit auch eine Grundlage für gesellschaftliche Akzeptanz zu schaffen (Aarnes et al., 2009).

Neuere Studien beschäftigen sich auch verstärkt mit der generischen Bewertung der Eignung von CO₂-Speichern in ausgedienten Erdgas- und -ölfeldern, bzw. mit dem Vergleich zwischen diesen und Speichern in salinaren Aquiferen (Bump et al., 2022; Callas et al., 2022; Razak et al., 2023; Worden, 2024). Wohingegen anfangs noch eher Onshore-Speicher im Fokus standen, fokussieren sich neuere Studien vermehrt auf die Standortprüfung von Offshore-Speichern in salinaren Aquiferen (Alcalde et al., 2021; Mears et al., 2025)

Im Folgenden lohnt es sich einige Ansätze mit besonderer Relevanz für die mögliche CO₂-Speicherung in geologischen Formationen hervorzuheben.

Von Goerne et al. (2010) hat mit ihren generischen Betrachtungen zu methodischen Mindestanforderungen für eine Standortauswahl von Speichern für die CO₂-Speicherung in salinaren Aquiferen an Land und unter dem Meer eine sehr umfassende Ausgangslage geschaffen, um einen CO₂-Speicherstandort zu finden, der die „größtmögliche Sicherheit für Mensch, Natur, Grundwasser und Klima über einen sehr langen Zeitraum gewährleisten kann“. Die theoretischen Überlegungen bauen auf den Kriterienkatalogen von Chadwick (2008) und Oldenburg (2008) auf und geben eine umfangreiche Übersicht über gängige Untersuchungsmethoden.

Die vorgeschlagene Standortsuche der BGR lehnt sich stark an ersten Überlegungen für das Standortauswahlverfahren für einen Standort für die Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen¹⁵ (StandAV) an und wurde auf die spezifischen Bedingungen für den dauerhaften Einschluss von CO₂ angepasst (von Goerne et al., 2010). Von Goerne et al. (2010) formuliert jeweils einen Verfahrensschritt für die (1) Planung und Eingrenzung möglicher zu untersuchender Gebiete, (2) die Präzisierung zur Bildung von Teilgebieten, (3) die Erstellung einer Rangliste der ausgewählten Standortregionen für die Erkundung und (4) die Erkundung selbst mit dem die Standortauswahl abgeschlossen werden soll. Für jeden Verfahrensschritt werden Kriterien der drei Gewichtungsklassen (Ausschluss, Mindestanforderung und Abwägung) vorgeschlagen, um zu einer Schritt für Schritt vertieften Prüfung potenzieller CO₂-Speicherstandorte zu gelangen (von Goerne et al., 2010).

Bereits seit der EU-CCS-Richtlinie (Richtlinie 2009/31/EG) und dem London Protokoll (International Maritime Organization [IMO], 2012) bestehen Vorgaben für die zu erhebenden Daten bei der umfassenden Charakterisierung von CO₂-Speichern, die auch in das (KSpG, 2012/10.08.2021) und (KSpTG/25.11.2025) Eingang gefunden haben. Diese Vorgaben zur Erhebung von Daten während der umfassenden Standortuntersuchung erfolgt jedoch meist erst in späteren Phasen eines Standortauswahlprozesses und werden daher an dieser Stelle nicht tiefergehend betrachtet (ISO, 2017, 2026). Im Rahmen der Berechnung statischer CO₂-Speicherkapazitäten haben Fuhrmann et al. (2024) bereits erste Ausschlusskriterien formuliert, um als erste Einschätzung potenziell geeignete geologische Formationen im Untergrund unter der AWZ der deutschen Nordsee für die dauerhafte CO₂-Speicherung zu identifizieren (Tabelle 1).

¹⁵ Das StandAV besteht erst seit der Verabschiedung des Standortauswahlgesetzes im Jahr 2017 Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle (Standortauswahlgesetz, StandAG, 2017), Vgl. siehe Kapitel 3.2.2. Die BGR lehnt sich für ihre Betrachtungen an den Vorarbeiten des Arbeitskreises Auswahlverfahren Endlagerstandorte an (AkEnd, Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte, 2002).

Tabelle 1: Ausschlusskriterien für die Identifikation potenziell geeigneter geologischer Formationen unter der AWZ der deutschen Nordsee nach (Fuhrmann et al., 2024)

Kriterien	Erklärung
Mindesttiefe > 800 m	Speicherstrukturen, deren oberste Speichereinheiten in Tiefen von weniger als 800 m Tiefe liegen, wurden aus Gründen der Speichersicherheit ausgeschlossen.
Maximale Tiefe < 4500 m	Speicherstrukturen, deren oberste Speichereinheiten in Tiefen von mehr als 4500 m Tiefe liegen, wurden aus geotechnischen und wirtschaftlichen Gründen und mangels Datenverfügbarkeit ausgeschlossen.
Mindestdicke der Barrieregesteine > 20 m	Speichergesteine mit einer Barrierenmächtigkeit von weniger als 20 m wurden ausgeschlossen, da eine ausreichende Mächtigkeit erforderlich ist, um eine Barrierenintegrität sicherzustellen.
Speicherkapazität > 5 Mt CO ₂	Speicherstrukturen mit einem P50-Wert ¹⁶ (Median) von weniger als 5 Mt CO ₂ wurden ausgeschlossen, da ihr begrenztes Speichervolumen für großskalige Speicherprojekte unzureichend ist.
Störungsklassifikation Ausschluss Klasse 1	Speicherstrukturen, die von Störungen der Klasse 1 ¹⁷ beeinflusst sind, wurden ausgeschlossen, da sie ein erhöhtes Risiko für CO ₂ -Leckagen darstellen.

Quelle: Eigene Darstellung nach Fuhrmann et al., 2024.

ISO (2017) formuliert bereits Standortauswahlkriterien zur Abwägung zwischen potenziellen CO₂-Speichern, die das erste Standort-Screening überstanden haben. Die Kriterien dienen dazu eine Vergleichbarkeit zwischen Standorten zu schaffen, um zwischen diesen auswählen zu können (Tabelle 2).

Tabelle 2: Standortauswahlkriterien zur Abwägung zwischen potenziellen CO₂-Speicherstandorten nach (ISO, 2017)

Kriterien	Erklärung
Untergrund	
Speicherkapazität*	weitere Verfeinerung der Speicherkapazität des Standorts, wenn mehr Informationen gesammelt werden und das Injektionspotenzial besser verstanden wird.
Injektivität*	beeinflusst die Anzahl der Bohrungen, das Bohrungsdesign (horizontal oder vertikal) und den Injektionsdruck.
Speichersicherheit*	Eindämmung der CO ₂ -Fahne und der verdrängten Flüssigkeiten, einschließlich des Potenzials für Leckagen durch unzureichende Abdichtungen, Verwerfungen und Störungen und Altbohrungen.

¹⁶ Statische CO₂-Speicherkapazitäten werden mit Monte-Carlo-Simulationen (mit 10.000 Durchläufen) berechnet und ermöglichen Wahrscheinlichkeitsverteilungen der potenziellen CO₂-Speicherkapazitäten für jede Speicherstruktur abzuleiten. Dazu werden Perzentilwerte von 10 % (P10), 50 % (P50) und 90 % (P90) berechnet, um die Wahrscheinlichkeit P10, P50 und P90 von sowohl optimistischen, mittleren, als auch konservativen Schätzungen abzubilden. Der P50 gilt als realistischer Median und wird oft bei ersten theoretischen Abschätzungen von CO₂-Speichern herangezogen (z. B. Alcalde et al., 2021; Fuhrmann et al., 2024; Wallmann, K. und das GEOSTOR-Konsortium, 2025).

¹⁷ Klasse 1 Störungen verlaufen vom Top der Speicherformationen bis nahe an den Meeresboden und weisen große Störungsversätze auf, wodurch laterale Wegsamkeiten zu barriereunwirksamen Gesteinseinheiten entstehen können (Wallmann, K. und das GEOSTOR-Konsortium, 2025).

Kriterien	Erklärung
Eigentumsrechte	am Porenraum (Identifizierung der Eigentümer des Porenraums in dem zu prüfenden Gebiet), Bohrkonzessionen und Explorationsgenehmigungen.
Nähe zu/Auswirkungen auf Untergrundnutzungen*	mögliche Auswirkungen auf andere unterirdische Aktivitäten, z. B. andere CCS-Projekte, Entsorgungsmaßnahmen, Öl- und Gasförderung, Bergbau, Erdgasspeicherung und Fracking in oder in der Nähe von primären oder sekundären Dichtungen (z. B. für die Gewinnung von Schieferöl oder -gas).
Nähe zu/Auswirkungen auf Untergrundressourcen*	potenzielle Auswirkungen auf wertvolle Natur-, Energie- und Mineralressourcen, trinkbares Grundwasser, geothermische Energie, Schieferöl oder -gas, gelöste Mineralien und Mineralien aus dem Sedimentgestein.
Formationsflüssigkeiten	Handhabung und Entsorgung von produzierten Formationsflüssigkeiten.
Erdoberfläche	
Vorhandensein/Nähe zu Wegerechten	Zwischen CO ₂ -Quelle und CO ₂ -Speicherstätten.
Vorhandensein/Möglichkeit zur Errichtung von Wegerechten	Zum Bau für die erforderlichen Infrastruktur, wie Hubs, Pipelines, Stromleitungen, Verkehrswege.
Bevölkerungsverteilung- und dichte	Im Gebiet über der Speicherstätte und entlang des voraussichtlichen Verlaufs der CO ₂ -Fahne.
Landbesitz	Des zu prüfenden Gebiets.
Nähe zu anderen Industrieanlagen	u. a. auch land- und forstwirtschaftliche Flächen.
Nähe und Exposition gegenüber Verkehr	Fahrzeugverkehr, Straßen, Eisenbahnen, Flugzeugen, Schiffsverkehr.
Nähe zu Naturschutzgebieten	geschützten Wildtierhabitaten (einschließlich gefährdeter Arten) und ökologisch sensiblen Gebieten (Wildtiermanagementgebiete, kommunale Wassereinzugsgebiete, Naturschutzgebiete, ökologische Reservate und Schutzgebiete).
Nähe zu Gewässern	Flüssen und anderen Süßwasserkörpern.
Nähe zu Nationalparks	und anderen Schutzgebieten (z. B. Militärstützpunkte, Reservate der Ureinwohner und Stammes- und Territorialgebiete) (z. B. Militärbasen, Reservate der Ureinwohner, Stammes- und Territorialgebiete).
Nähe zu Offshore-Projekten	z. B. Wind- und Fischzucht, Sand- und Kiesabbau.
Entwicklung der Grundstücksverhältnisse	derzeitige und voraussichtliche Entwicklung der angrenzenden Grundstücke.
Topografie	des Standorts und Variabilität der Wetter- und Meeresbedingungen.
Kulturelle und historische Ressourcen	z. B. Bau- und Bodendenkmäler, Parks, archäologische Stätten etc.
Sozioökonomische Bedingungen	z. B. Kosten, Erreichbarkeit, gesellschaftliche Akzeptanz.

Quelle: Eigene Darstellung nach ISO, 2017, 2026. *: Kriterien auch enthalten in ISO 27914:2026. Anmerkung: ISO (2026) führt die Kriterien an der Erdoberfläche der ISO (2017) nicht mehr explizit auf. Dagegen fasst ISO (2026) dementsprechende

Faktoren aber weiterhin als oberflächenbezogene Aspekte unter „angemessene Erreichbarkeit bzw. Anbindung des Standorts and die CO₂-Quelle (1), Auswirkungen auf die lokale Bevölkerung bzw. das lokale Umfeld, Auswirkungen auf bestehende Industriebetriebe in der Umgebung und Umweltauswirkungen zusammen.

3.2 Beispiele bereits bestehender Verfahren zur Identifikation unterirdischer Lagerstätten und Speichern

Der geologische Untergrund wird in Deutschland bereits seit vielen Jahrzehnten bzw. soll auch in Zukunft zur längerfristigen bzw. möglichst dauerhaften Lagerung oder Speicherung verschiedener Stoffe genutzt werden. Je nach einzulagerndem Stoff und geeigneten Speichergesteinen ergeben sich spezifische Standortmerkmale und Anforderungen an die Verfahren zur Identifizierung geeigneter untertägiger Lagerstätten und Speichern.

Während bei den jeweiligen Verfahren zur Ermittlung geeigneter unterirdischer Lagerstätten und Speicher fast immer stoffspezifische Anforderungen bei der Anwendung von Standortauswahlkriterien im Vordergrund stehen, erfordert die unterirdische Lagerung und Speicherung auch übergreifende Ansätze, z. B. hinsichtlich der geologischen Standortmerkmale. Im Folgenden werden einige Beispiele für die Nutzung unterirdischer Lagerstätten und Speichern und deren wesentliche Verfahrensschritte bzw. Standortkriterien bei der Ermittlung geeigneter Standorte aufgeführt.

3.2.1 Verbringung von Sonderabfällen in Untertagedeponien (DepV)

Sonderabfälle, die aufgrund ihrer Gefährlichkeit oder besonderen Eigenschaften einer speziellen Entsorgung bedürfen, werden in tiefen, geologisch stabilen Salzgesteinen im Untergrund gelagert. Zu den Sonderabfällen zählen giftige oder umweltgefährdende Substanzen wie Industriechemikalien, Asbest oder Schlämme.

In Deutschland wird die Entsorgung von Sonderabfällen durch die Verordnung über die Entsorgung von Abfällen durch Verbringung (DepV, (DepV, 2009/03.07.2024)) geregelt. Auf EU-Ebene wird sie durch die Abfallrahmenrichtlinie (2008/98/EG/19. November 2008) und spezifische Vorschriften zur Entsorgung gefährlicher Abfälle unterstützt.

Die DepV fordert eine detaillierte Überprüfung der geologischen, hydrologischen und sicherheitsrelevanten Merkmale eines Standorts. So müssen u. a. die geotechnische Eignung und Stabilität nachgewiesen werden. Außerdem muss der Antragsteller eine Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) durchführen. Diese ist Teil des behördlichen Genehmigungsverfahrens (DepV, 2009/03.07.2024).

Gemäß DepV muss ein Standort so gewählt werden, dass die Abfälle dauerhaft von der Biosphäre ferngehalten werden und keine Nachsorgemaßnahmen erforderlich sind. Hierfür sind die langfristige Wirksamkeit und Integrität der Salzbarriere wichtige Merkmale eines Standorts. Das Gestein als maßgebliche geologische Barriere muss dicht gegenüber dem Eintritt bzw. Austritt von Flüssigkeiten und Gasen sein, eine ausreichende räumliche Ausdehnung besitzen und die Barrierefunktion darf auf Dauer¹⁸ nicht beeinträchtigt werden (ausreichende unverritzte Salzmächtigkeit). Darüber hinaus sind das Konvergenzverhalten des Salzes, seine Standsicherheit mindestens für die Einlagerungs- und Stilllegungsphase sowie die Erdbebenwahrscheinlichkeit am Standort relevant (DepV, 2009/03.07.2024). Relevante Standortmerkmale sind u. a. die Mächtigkeit des Salzes, der Aufschlussgrad, die Stratigraphie, Zusammensetzung des Salzes, die Salzlagerstättenstruktur sowie mögliche Änderungen dieser und vorhandene Grundwässer und deren Eigenschaften (Vgl. siehe A.3, TextBox 1)

¹⁸ Die Dauer der sicheren Lagerung wird in der DepV nicht spezifiziert.

Der Nachweis der Eignung des Gebirges für eine Untertagedeponie muss durch eine standortbezogene Sicherheitsbeurteilung erbracht werden. Grundlage dieser ist die Analyse der zu beachtenden Gefährdungsmöglichkeiten bei Errichtung, beim Betrieb und in der Nachbetriebsphase. Hieraus sind die erforderlichen Kontroll- und Schutzmaßnahmen abzuleiten. Die Sicherheitsbeurteilung beinhaltet einen geotechnischen Standortsicherheitsnachweis, einen Sicherheitsnachweis für die Ablagerungs- und Stilllegungsphase sowie einen Langzeitsicherheitsnachweis. Der Langzeitsicherheitsnachweis ist für das Gesamtsystem „Abfall/Untertagebauwerk/Gebirgskörper“ unter Berücksichtigung einer planmäßigen und außerplanmäßigen (hypothetischen) Szenarienanalyse zu führen, wobei den standortspezifischen Gegebenheiten Rechnung zu tragen ist.

3.2.2 Entsorgung von hochradioaktiven Abfällen (gemäß StandAG)

Ende April 2023 ist Deutschland aus der Atomenergie ausgestiegen. Neben zunehmenden Sicherheitsbedenken infolge der Reaktorunfälle in Fukushima (2011) und Tschernobyl (1986) sowie der breiten gesellschaftlichen Ablehnung trug auch die ungelöste Abfallproblematik maßgeblich zu diesem Schritt bei. Bereits rund zwei Jahrzehnte zuvor war mit der Einführung des Standortauswahlverfahrens (StandAV) versucht worden, dieser Herausforderung zu begegnen (Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte [AkEnd], 2002).

Ziel des StandAV ist es, einen geeigneten Standort für die dauerhafte Endlagerung hoch radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen in Deutschland zu finden. Der Standort soll die bestmögliche Sicherheit für den dauerhaften Schutz von Mensch und Umwelt vor ionisierender Strahlung und sonstigen schädlichen Wirkungen dieser Abfälle für einen Zeitraum von einer Million Jahren gewährleisten.

Die Entsorgung hochradioaktiver Abfälle wird durch das Standortauswahlgesetz (StandAG, 2017/07.12.2020) geregelt, das die wesentlichen Verfahrensschritte für den Vorhabenträger, die Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE), und die Aufsichtsbehörde, das Bundesamt für Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE) festlegt. Das (StandAG, 2017/07.12.2020) gibt dabei auch die Ausgestaltung der Öffentlichkeitsbeteiligung vor. Zudem geben die beiden Verordnungen zu den Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle (EndlSiAnfV, 2020) und die Anforderungen an die Durchführung der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen (EndlSiUntV, 2020) weitere zu prüfenden Standortmerkmale vor.

Das StandAV gliedert sich in drei Phasen. In Phase I werden Gebiete, die günstige geologische Voraussetzungen für die sichere Endlagerung radioaktiver Abfälle erwarten lassen, auf der Basis vorhandener geologischer Daten bewertet und eingegrenzt, um geeignete Standortregionen für die übertägige Erkundung auszuwählen. In Phase II werden diese Standortregionen übertägig erkundet und geeignete Standorte für die untertägige Erkundung in Phase III vorgeschlagen. Erst nach der untertägigen Erkundung in Phase III wird die BGE den Endlagerstandort mit der bestmöglichen Sicherheit vorschlagen, der von der Bundesregierung am Ende des StandAV per Gesetz festgelegt wird (StandAG, 2017/07.12.2020).

Geeignete Standorte zeichnen sich durch geologische Formationen in den Wirtsgesteinen Tonstein, Steinsalz oder kristallinem Wirtsgestein in Tiefen zwischen 500 und 1.000 m aus. Im Laufe des StandAV werden eine Vielzahl wiederkehrender und sich weiterentwickelnder Ausschlusskriterien, Mindestanforderungen, geowissenschaftlicher Abwägungskriterien und umfangreiche und vertiefende Sicherheitsuntersuchungen angewandt und durchgeführt (Vgl. siehe A.3, TextBox 2) So erhofft sich die BGE die Gebiete mit zunehmendem Wissensstand immer detaillierter untersuchen, bewerten und eingrenzen zu können. Wichtiger Bestandteil des StandAV sind ebenso frühzeitige Umweltverträglichkeitsinstrumente wie zwei Strategische

Umweltprüfungen (SUP) in Phase I und II gemäß (UVPG, 2021/23.10.2024), eine sozio-ökonomische Potenzialanalyse (SöPa) in Phase II, und eine Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) der verbliebenen Standorte gemäß (UVPG, 2021/23.10.2024) kurz vor der Standortentscheidung (StandAG, 2017/07.12.2020; Krohn et al., 2024).

Weiter sind für die Auslegung des Endlagers und die Bewertung der Langzeitsicherheit relevanten Entwicklungen des Endlagersystems über den Zeitraum und der geologischen Situation am Endlagerstandort innerhalb des Bewertungszeitraumes von einer Million Jahre systematisch zu ermitteln, zu beschreiben und begründet einzuordnen als zu erwartende Entwicklungen oder abweichende Entwicklungen. Außerdem sind hypothetische Entwicklungen und Entwicklungen auf der Grundlage zukünftiger menschlicher Aktivitäten zu beschreiben. Für die zu erwartenden Entwicklungen ist eine maximale Freisetzungsrates der eingelagerten Radionuklide definiert und die Integrität des Systems ist darzustellen. Das vorgesehene Endlagersystem hat den sicheren Einschluss der Abfälle passiv und wartungsfrei zu gewährleisten und ist räumlich eindeutig zu definieren. Die Erkundung des Standortes ist so durchzuführen, dass die einschlusswirksamen Eigenschaften des Standortes erhalten bleiben.

Das StandAV ist ein überaus ambitionierter, komplexer und vielschichtiger Prozess zur Identifikation eines Standortes mit bestmöglicher Sicherheit und bedient sich neuartiger Formate zur Öffentlichkeitsbeteiligung. Nach aktuellen Schätzungen wird das StandAV noch mehrere Jahrzehnte andauern (Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH [BGE], 2022; Krohn et al., 2024) und wird deshalb kritisch gesehen (z. B. Entsorgungskommission [ESK], 2024).

3.2.3 Temporäre Speicherung von Erdgas und Wasserstoff im geologischen Untergrund

Während Erdgas in Deutschland bereits in großem Umfang gespeichert wird und auf ein gut ausgebautes Netz von Untergrundgasspeichern zurückgegriffen werden kann, befindet sich die Speicherung von Wasserstoff in geologischen Formationen noch im Aufbau (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie [BMWE], 2020; BMWK, 2023). Derzeit werden beispielsweise erste Projekte zur Umrüstung bestehender Erdgasspeicher für die Speicherung von Wasserstoff oder zum Bau neuer Speicher realisiert (Warnecke & Röhling, 2021).

Sowohl Erdgas als auch Wasserstoff sollen in großvolumigen Untergrundspeichern gelagert werden, um als Reserve saisonale Schwankungen in der Energieversorgung auszugleichen. Als Untergrundspeicher kommen Porenspeicher (ehemalige Erdgaslagerstätten oder neu erschlossene Aquiferspeicher) und Kavernenspeicher (umgerüstete oder neu gebaute Salzkavernen) in Frage (Harati et al., 2024; Lewandowska-Śmierzchalska et al., 2018; B. Uliasz-Misiak & Misiak, 2024). Die Speicherung erfolgt in einer geeigneten geologischen Formation in Tiefen von mehreren hundert bis etwa 3.000 m, je nach Speicherverfahren. Während Salzkavernen als besonders geeignet für Wasserstoff gelten, sind Porenspeicher technisch einsetzbar, bedürfen aber weiterer Untersuchungen zur Langzeitstabilität und Abdichtung (Harati et al., 2024; Warnecke & Röhling, 2021; Zhong et al., 2024).

Die Speicherung von Erdgas und gasförmigem Wasserstoff ist durch das Energiewirtschaftsgesetz (EnWG/23.12.2024) geregelt. Für die Untersuchung des Untergrundes auf seine Eignung als Untergrundspeicher sowie für die Errichtung und den Betrieb von Kavernenspeichern gilt das Bundesberggesetz (BbergG/23.10.2024). Darüber hinaus gelten länderspezifische Regelungen, insbesondere für Umweltauflagen, Genehmigungsverfahren und Sicherheitsstandards. Ergänzt werden diese Regelungen z. B. durch das Wasserstoffbeschleunigungsgesetz (Bundesregierung, 2025)¹⁹, das den Aufbau einer

¹⁹ Zum Zeitpunkt der Veröffentlichung dieser Studie handelt es sich um einen Gesetzentwurf der Bundesregierung.

Wasserstoffinfrastruktur ermöglichen soll. Den nationalen Regelungen unterliegen den Vorgaben der Europäischen Kommission (z. B. Europäische Kommission, 2020).

Der Standortauswahlprozess beginnt mit geologischen Untersuchungen, um geeignete Formationen zu identifizieren. Es folgen Machbarkeitsstudien, Umweltverträglichkeitsprüfungen und Genehmigungsverfahren unter Berücksichtigung nationaler und europäischer Regelungen (BbergG/23.10.2024; Bundesregierung, 2025; Harati et al., 2024; Warnecke & Röhling, 2021).

Wesentliche Kriterien für die Eignung eines Standortes sind Speicher- und Gesteinseigenschaften, die eine hohe Speichereffizienz, langfristige Barrierewirksamkeit sowie eine günstige Langzeitstabilität und -sicherheit aufweisen können (Vgl. siehe A.3, TextBox 3). Da bei der Speicherung von Erdgas und Wasserstoff das Ziel verfolgt wird, die Gase bei Bedarf nach gewisser Zeit wieder aus dem Untergrund zu entnehmen, muss ein geeigneter Speicher dies ebenfalls gewährleisten (Harati et al., 2024; B. Uliasz-Misiak & Misiak, 2024; Uliasz-Misiak et al., 2024; Warnecke & Röhling, 2021; Zhong et al., 2024).

Umweltschutzfaktoren zur Minimierung möglicher Risiken für Mensch und Umwelt betreffen bspw. die Vermeidung von Wasserschutzgebieten. Darüber hinaus muss der Speicherraum so abgedichtet werden, dass eine Migration des Gases in angrenzende Gesteinsschichten und eine Kontamination benachbarter Grundwasserleiter verhindert oder ausreichend begrenzt wird. Gebiete mit hohem Grundwasserstand kommen wegen der Gefahr einer Grundwasserverunreinigung als Standorte nicht in Frage. Bei der Nachnutzung ausgeförderter Erdgaslagerstätten und der Nachrüstung von Kavernen stellen die vorhandenen Bohrungen potenzielle Leckstellen für Gasaustritte dar. Die technischen Einrichtungen müssen an die veränderte Nutzung angepasst werden (Harati et al., 2024; Warnecke & Röhling, 2021).

Die Standorte müssen gute Voraussetzungen für die Einbindung in die Versorgungsinfrastruktur bieten. Dadurch können Kosten und logistischer Aufwand optimiert werden. Der Aufbau der Wasserstoffinfrastruktur erfolgt im Rahmen der nationalen Wasserstoffstrategie (BMWE, 2020; BMWK, 2023). Aufgrund der spezifischen Eigenschaften von Wasserstoff sind jedoch zusätzliche technische und sicherheitstechnische Bewertungen erforderlich.

Für die Genehmigung von Erdgas- und Wasserstoffspeichern müssen spezifische Sicherheitsnachweise erbracht werden, die die geomechanische Stabilität der Speicherformation, die Dichtheit gegenüber Wasserstoff und die Korrosionsbeständigkeit der verwendeten Materialien umfassen. Darüber hinaus sind Notfallpläne und Risikoanalysen erforderlich, um mögliche Gefahren zu minimieren (Harati et al., 2024; Warnecke & Röhling, 2021).

Letztendlich müssen auch für die Auswahl von Standorten zur wiederholten temporären Speicherung von Erdgas und Wasserstoff als Zwischenspeicherung für die Versorgungssicherung raumplanerische Festlegungen und Nutzungskonkurrenzen berücksichtigt werden. Gerade im Zuge des Hochlaufs der Wasserstoffnutzung ist abzusehen, dass perspektivisch ein größerer Bedarf bestehen wird. Da Wasserstoff über eine geringere Energiedichte verfügt als Erdgas werden für die Speicherung größere Lagervolumina benötigt. Im Falle der Nutzung von Porenspeichern könnten zusätzliche Nutzungskonkurrenzen beispielsweise durch die einmalige dauerhafte Speicherung von CO₂ in geologischen Formationen entstehen, da diese dann nicht mehr für die Zwischenspeicherung zur Versorgungssicherung zur Verfügung stehen.

4 Bewertung potenzieller Ansätze hinsichtlich ihrer Eignung zur Identifikation umweltverträglicher CO₂-Speicher und Eckpunkte für eine erste Potentialanalyse

Zunächst bewertet Kapitel 4.1 die bereits bestehenden Ansätze aus der Literatur (Vgl. Kapitel 3.1) hinsichtlich ihrer Eignung zur Identifikation umweltverträglicher CO₂-Speicher. Anschließend formuliert Kapitel 4.2 Eckpunkte für eine erste generische Potentialanalyse auf Basis der bestehenden Ansätze und Beispiele (Vgl. Kapitel 3).

4.1 Bewertung potenzieller Ansätze hinsichtlich ihrer Eignung zur Identifikation umweltverträglicher CO₂-Speicher

Bei der Bewertung bestehender Ansätze zur Identifikation geeigneter CO₂-Speicher zeigt sich, dass bereits eine Vielzahl von Studien mögliche Standortauswahlkriterien sowie systematische Bewertungsansätze für erste generische Potenzialanalysen potenzieller CO₂-Speicher formuliert haben (Alcalde et al., 2021). Trotz dieser Vielfalt bestehender Ansätze fehlt bislang ein international standardisierter Kriterienkatalog. Die meisten Ansätze bleiben generisch, legen sich nicht auf eine klare Auswahl von Bewertungskriterien fest und formulieren keine verbindlichen Anforderungen an potenzielle Speicherstandorte (Richtlinie 2009/31/EG; IMO, 2012; ISO, 2017, 2026).

Obwohl vielfach betont wird, dass ein standardisierter Kriterienkatalog mit klar definierten Prüf- und Schwellenwerten wünschenswert und prinzipiell auch ableitbar wäre, stellt die hohe Komplexität geologischer Systeme eine erhebliche Herausforderung dar (von Goerne et al., 2010). Die zahlreichen Wechselwirkungen und Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Parametern führen dazu, dass potenzielle CO₂-Speicher nur anhand stark standortspezifischer Kriterien zuverlässig bewertet werden können. So muss beispielsweise eine 100 m mächtige barriereschaffende Deckschicht nicht zwangsläufig eine höhere Speicherintegrität gewährleisten als eine nur 40 m mächtige Deckschicht, da die Eignung maßgeblich von weiteren Faktoren wie Lithologie, Permeabilität oder mechanischer Stabilität der barriereschaffenden Gesteinsschichten abhängt. Eine Risikobewertung und Umweltverträglichkeitsbewertung ist nicht ohne weiteres anhand definierter Prüf- bzw. Schwellenwerte möglich und muss darüber hinaus grundsätzlich einzelfallbezogen und standortspezifisch erfolgen (Cames et al., 2024; von Goerne et al., 2010).

Dennoch bieten die bereits veröffentlichten Studien Ansätze, um großräumige geographische Suchräume einzugrenzen und für diese erste generische Potenzialanalysen durchzuführen. Insgesamt sind die Ansätze somit gut dazu geeignet, potenzielle geologische Speicherformationen zu identifizieren und eine erste Vorauswahl von Standorten zu treffen, die dann anschließend in einer vertieften Standortprüfung detailliert untersucht werden müssen. Für eine vertiefte Standortprüfung sind jedoch spezifischere Ansätze erforderlich (Alcalde et al., 2021).

Als übergeordnetes Ziel verfolgen alle Ansätze darüber hinaus, den möglichst sicheren und dauerhaften Einschluss von CO₂. In fast allen Fällen liegt der Schwerpunkt der Studien jedoch, wie bei ersten Potenzialanalysen üblich, auf der Bewertung der geotechnischen und auch wirtschaftlichen Standortmerkmale (u. a. Bachu, 2000, 2003; Chadwick, 2008). Die meisten Ansätze gehen von einer sogenannten hypothetischen „source to sink“-Betrachtung aus, bei der für die abgeschiedenen und somit hypothetisch perspektivisch zur Verfügung stehenden CO₂-Mengen ein geeigneter CO₂-Speicher gefunden werden muss. Dementsprechend liegt der Fokus

auf der Speichereffizienz und -optimierung, um möglichst große Mengen CO₂ möglichst sicher und dauerhaft, aber auch effizient und kostengünstig einspeichern zu können. Daher werden zunächst potenziell geeignete geologische Formationen nach den Kriterien statische Speicherkapazität und Injektivität bewertet, ausgewählt und eingegrenzt (u. a. Alcalde et al., 2021; IMO, 2012; Razak et al., 2023; Wei et al., 2013).

Dieses Vorgehen ist im Rahmen einer ersten Identifikation von potenziell geeigneten CO₂-Speichern auch sinnvoll und trägt im Sinne eines nachhaltigen Vorsorgeprinzips zur Erhöhung der Umweltverträglichkeit bei. Auch die aktuelle europäische CCS-Richtlinie betont, dass Speichervolumen und Injektionsraten bereits in frühen Phasen des Auswahlprozesses abgeschätzt werden müssen, um technisch und wirtschaftlich geeignete Speicher zu identifizieren (Richtlinie 2009/31/EG). Auch die Forschungsarbeiten im Rahmen von GEOSTOR (siehe Kapitel 3.1, Tabelle 1) und die Kriteriensätze der beiden Versionen der ISO-Leitlinien 27914 (siehe Kapitel 3.1, Tabelle 2) basieren im Kern zunächst auf der Bewertung von Speicherkapazität und geotechnischer Speicheroptimierung (Fuhrmann et al., 2024; ISO, 2017, 2026, Wallmann, K. und das GEOSTOR-Konsortium, 2025).

Obwohl bereits einige Studien weitere Umweltfaktoren und -risiken bei der Identifikation potenziell geeigneter CO₂-Speicher in die Betrachtung einbeziehen, fehlt es jedoch bei der Bewertung der Umweltverträglichkeit vor allem an der Berücksichtigung indirekter Auswirkungen. Diese indirekten Umweltauswirkungen können entlang der gesamten Prozesskette (Erkundung, Errichtung, Transport und Betrieb, Verschluss sowie Überwachung) der CO₂-Speicherung entstehen (Cames et al., 2024). Geotechnische Standortauswahlkriterien zur Speichereffizienz und -optimierung tragen bereits zu einer Erhöhung der Sicherheit und Dauerhaftigkeit und somit auch zu einer umweltverträglicheren CO₂-Speicherung bei. Nichtsdestotrotz ist eine stärkere Fokussierung auf die Minimierung von Umweltrisiken und indirekten Auswirkungen sowie eine Berücksichtigung von sozio-ökonomischen Aspekten (z. B. Akzeptanz, Nutzungskonflikte und finanzielle Aspekte) erforderlich, um eine möglichst umweltverträgliche CO₂-Speicherung realisieren zu können.

Mit dem Ziel, die Umweltverträglichkeit von CO₂-Speicherprojekten stärker bei der Auswahl und vertieften Prüfung von CO₂-Speichern zu berücksichtigen gehen bestimmte Anforderungen einher. Hierfür ist es notwendig, mögliche Standortauswahlkriterien zu klassifizieren und Ausschlusskriterien, die zum Ausschluss von potenziellen Speichern zu benennen sowie Mindestanforderungen, welche potenzielle Speicher zwingend erfüllen müssen, zu definieren. Wie in Kapitel 3.1 beschrieben, haben einige Ansätze aus der Literatur bereits Vorschläge für mögliche Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen formuliert (Alcalde et al., 2021; von Goerne et al., 2010; z. B. Grataloup et al., 2009; Wei et al., 2013). Bereits von Goerne et al. (2010) bezog sich bei ihren Betrachtungen auf die Überlegungen des AkEnd zur Suche nach einem Endlager für hochradioaktive Abfälle in Deutschland. Das Standortauswahlverfahren für ein Endlager zur Entsorgung der hochradioaktiven Abfälle ist fortgeschritten. Es ist bereits abzusehen, dass sich die Klassifizierung der Kriteriensätze als geeignet erwiesen hat, um eine erste Standortregionenauswahl und -eingrenzung durchzuführen (Vgl. siehe Kapitel 3.2.2).

Einige dieser Ausschlusskriterien, Mindestanforderungen und geowissenschaftlichen Abwägungskriterien könnten sich auf die Identifikation umweltverträglicher CO₂-Speicher übertragen lassen. Andere beziehen sich stark auf die stoffspezifischen Eigenschaften von hochradioaktiven Abfällen bzw. deren notwendige Isolationszeiträume und müssten auf die stoffspezifischen Eigenschaften von CO₂ und entsprechende Umweltrisiken angepasst werden. Auch aus den bestehenden Ansätzen zur Identifikation, Auswahl und Prüfung potenzieller Erdgas- und Wasserstoffspeicher können wertvolle Erkenntnisse gezogen werden, auch wenn diese ebenfalls nicht eins zu eins auf die CO₂-Speicherung angewendet werden können und eine

anpassungslose Übertragung unwahrscheinlich ist. Im Besonderen hinsichtlich der Langzeitsicherheit und der Überwachungsmethoden bedarf es CO₂-spezifischer Anforderungen an umweltverträgliche Speicher und entsprechender Leitfäden (von Goerne et al., 2010).

4.2 Eckpunkte für eine erste Potenzialanalyse

Auf der Basis der vorhandenen Ansätze für die Identifikation potenzieller CO₂-Speicher (Kapitel 3.1) und analog den Beispielen zur Auswahl anderer Lagerstätten und Speicher für die Untergrundnutzung (Kapitel 3.2) ergeben sich generische Eckpunkte für eine erste Potentialanalyse. In Zuge dessen lassen sich mögliche Mindestanforderungen (Kapitel 4.2.1, Tabelle 3) und Ausschlusskriterien (Kapitel 4.2.2, Tabelle 4) ableiten, die die Umweltverträglichkeitsaspekte stärker in den Vordergrund rücken. Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass potenzielle Kriteriensätze zum gegenwärtigen Zeitpunkt ausschließlich auf generischen Annahmen basieren und sich standortspezifisch verändern und unterscheiden können. So ist zu erwarten, dass sich die Kriterien für Speicher unter Land und unter dem Meer teilweise unterscheiden werden. Wohingegen bspw. anzunehmen ist, dass bei der Onshore-CO₂-Speicherung Speicher unter Besiedlungsflächen ausgeschlossen würden, stünden bei der Offshore-Speicherung andere Überwachungsmethoden zur Verfügung als an Land. Die nachfolgenden Kriteriensätze sind als generische Vorschläge zu verstehen, die sich in erster Linie auf die Offshore-Speicherung beziehen.

4.2.1 Mindestanforderungen

Eine **ausreichende Speicherkapazität** (Tabelle 3) stellt eine unverzichtbare Mindestanforderung an geologische Formationen dar, um deren grundsätzliche Eignung als umweltverträgliche CO₂-Speicher zu gewährleisten (z. B. Chadwick, 2008; von Goerne et al., 2010). Im Rahmen der statischen Kapazitätsabschätzung für potenzielle Speicherformationen unter der AWZ der deutschen Nordsee haben Fuhrmann et al. (2024) Speicherstrukturen ausgeschlossen, deren geometrische und geologische Eigenschaften auf eine P50-Speicherkapazität²⁰ von weniger als 5 Mt CO₂ schließen lassen. Ein solch geringes Volumen beeinträchtigt nicht nur die Injektivität und damit die Speichersicherheit, sondern könne auch den technischen Aufwand wirtschaftlich nicht rechtfertigen (Fuhrmann et al., 2024).

Ausreichende Speicherkapazitäten schaffen Sicherheitsreserven bezüglich des Speicherbetriebs. Die Wahrscheinlichkeit steigt, dass die Speicherformation das CO₂ aufnehmen kann, ohne dass es zu Unregelmäßigkeiten im Betrieb durch bspw. starke Druckanstiege bei der Injektion kommt. Darüber hinaus erzeugt die Erschließung (z. B. Aufbau der Infrastruktur) und der Betrieb (z. B. Injektion und Überwachung) jedes CO₂-Speichers zusätzliche indirekte Umweltauswirkungen. Im Sinne der Umweltverträglichkeit muss das Ziel daher darin bestehen, möglichst wenige CO₂-Speicher zu erschließen und sich daher frühzeitig auf Speicherformationen mit ausreichend großem Speichervolumen zu konzentrieren. Wallmann, K. und das GEOSTOR-Konsortium (2025) gehen bei der Modellierung zur Abschätzung der dynamischen Speicherkapazität in ihrem Pilotgebiet (Vgl. siehe Wallmann, K. und das GEOSTOR-Konsortium, 2025, S. 37) von einem ambitionierten Injektionsziel von rund 300 Mt CO₂ über einen Zeitraum von 30 Jahren aus. Ein derartiges Ziel sollte bereits in frühen Phasen der Standortidentifikation berücksichtigt werden, um langfristig geeignete und effiziente

²⁰ Statische CO₂-Speicherkapazitäten werden mit Monte-Carlo-Simulationen (mit 10.000 Durchläufen) berechnet und ermöglichen Wahrscheinlichkeitsverteilungen der potenziellen CO₂-Speicherkapazitäten für jede Speicherstruktur abzuleiten. Dazu werden Perzentilwerte von 10 % (P10), 50 % (P50) und 90 % (P90) berechnet, um die Wahrscheinlichkeit P10, P50 und P90 von sowohl optimistischen, mittleren, als auch konservativen Schätzungen abzubilden. Der P50 gilt als realistischer Median und wird oft bei ersten theoretischen Abschätzungen von CO₂-Speichern herangezogen (Alcalde et al., 2021; Fuhrmann et al., 2024; Wallmann, K. und das GEOSTOR-Konsortium, 2025).

Speicherlösungen zu entwickeln. Idealerweise könnten ein bis zwei großvolumige Speicher ausreichen, um die erwarteten Bedarfe zu decken. Darüber hinaus biete eine sogenannte „Überkapazität“ einerseits eine erhebliche Sicherheitsreserve, sollte im Bedarfsfall deutlich mehr CO₂ eingespeichert werden können als der geplanten Menge der Quelle entspricht (Wallmann, K. und das GEOSTOR-Konsortium, 2025). Andererseits bringen hohe erwartbare Speicherkapazitäten auch Sicherheitsreserven hinsichtlich des Betriebs der Speicheranlagen mit sich. So besteht bei größeren CO₂-Speichern eher die Möglichkeit über mehrere Injektionsanlagen mit jeweils niedrigeren Injektionsdrücken einzuspeichern oder bei Unregelmäßigkeiten durch Ausweichen auf andere Injektionsbohrungen besser auf ein unvorhergesehenes Einspeicherungsverhalten des CO₂ reagieren zu können (Dutta et al., 2025; Lane et al., 2021).

Gemäß des Vorsorgeprinzips – insbesondere zur Vermeidung einer Überbeanspruchung des Untergrundes, der Meeressäule sowie der Nutzungsflächen an und über der Meeresoberfläche – erscheint eine Mindestanforderung von nur 5 Mt CO₂ an die statische Gesamtspeicherkapazität eines einzelnen Speichers im Kontext ambitionierter Injektionsziele als deutlich zu niedrig. Vielmehr sollte die Identifikation und vertiefte Prüfung umweltverträglicher Speicher bzw. -standorte frühzeitig auf großvolumige Formationen fokussieren, da davon auszugehen ist, dass die tatsächlich nutzbaren Speicherkapazitäten deutlich unter den in der Potenzialanalyse ausgewiesenen statischen Werten liegen werden (Vgl. siehe Kapitel 1). Vor diesem Hintergrund wäre ein deutlich höherer Schwellenwert als die von Fuhrmann et al. (2024) vorgeschlagenen 5 Mt CO₂ als Mindestanforderung erforderlich.

Darüber hinaus stellt eine **günstige Injektivität** (Tabelle 3) eine zentrale Mindestanforderung an umweltverträgliche CO₂-Speicher dar. Die geologische Formation muss dafür über geeignete Eigenschaften wie hohe Porosität, Permeabilität und günstige Druckverhältnisse verfügen, um die Aufnahme großer CO₂-Mengen sowie eine gleichmäßige und effiziente Verteilung des CO₂ im Porenraum zu ermöglichen (Alcalde et al., 2021; z. B. Chadwick, 2008; von Goerne et al., 2010). Für eine sichere und effiziente Einspeicherung sollten kontinuierlich hohe Injektionsraten erreicht werden, die im Idealfall oberhalb der CO₂-Bereitstellung der Quelle liegen. Nur so lassen sich Sicherheitsreserven aufbauen und unvorhergesehene Druckanstiege vermeiden, die die Integrität des Speichers gefährden können (von Goerne et al., 2010).

Eine **günstige geologische Tiefe** (Tabelle 3) stellt eine weitere Mindestanforderung für umweltverträgliche CO₂-Speicher dar. Umweltverträgliche Speicher liegen in Tiefen von mindestens 800 m Tiefe. Dadurch soll erreicht werden, dass das CO₂ in seinem überkritischen Aggregatzustand verbleibt, welcher Grundvoraussetzung für eine sichere und effiziente Speicherung ist. In geringeren Tiefen (< 800 m) verlässt CO₂ auf Grund der geringeren Druckverhältnisse seine überkritische Phase und geht in die gasförmige Phase über. Dies geht mit einer reduzierten Dichte, erhöhten Mobilität und Auftriebsverhalten sowie einem größerem Volumenbedarf einher und erhöht somit das Leckagerisiko deutlich. Infolgedessen nimmt die Speichersicherheit deutlich ab (Fuhrmann et al., 2024; von Goerne et al., 2010). Einige Studien empfehlen aus Sicherheitsgründen eine Mindesttiefe von 1.000 m, um einen ausreichenden Puffer gegenüber Druck- und Temperaturveränderungen zu gewährleisten (z. B. Chadwick, 2008; Wei et al., 2013). Die Erfahrungen beim CO₂-Speicherprojekt Sleipner zeigen, wie wichtig Sicherheitspuffer bei der Einlagerungstiefe sein können, wenn CO₂ in vorab nicht vorhergesehenen Speicherhorizonte migriert (Sleipner Layer 9) und Bereiche der kritischen Tiefe von 800 m erreichen (Cames et al., 2024; Hauber, 2023).

Mit zunehmender Tiefe (> 2.000 m) nehmen günstige Reservoireigenschaften geologischer Formationen tendenziell ab. Die CO₂-Injektion wird unter diesen Bedingungen geotechnisch anspruchsvoller und ökonomisch weniger rentabel, da höhere Drücke, dichtere Gesteine und

erhöhter technischer Aufwand berücksichtigt werden müssen (Chadwick, 2008; Fuhrmann et al., 2024; Raza et al., 2016). Zudem ist die Datenverfügbarkeit in größeren Tiefen begrenzt, was die Ungewissheiten bei der Standortprüfung erhöht. Während Fuhrmann et al. (2024) eine maximale Speichertiefe von 4.500 m vorschlagen, sehen andere Studien bereits ab etwa 2.500 m Tiefe zunehmende Schwierigkeiten (Chadwick, 2008; von Goerne et al., 2010; Llamas & Cienfuegos, 2012; Raza et al., 2016). Letztlich ist die maximal geeignete Speichertiefe stets standortspezifisch²¹ und muss im Rahmen einer vertieften geologischen Prüfung einzelfallbezogen bewertet werden.

Für die Barrierenwirksamkeit der primären, abdichtenden Deckschicht gilt eine **Mindestmächtigkeit der Barriere** (Tabelle 3) von 20 m als erforderlich, um den sicheren und dauerhaften Einschluss zu gewährleisten (Chadwick, 2008; Fuhrmann et al., 2024; von Goerne et al., 2010). Zwar gilt prinzipiell, dass eine höhere Mächtigkeit eine höhere Abdichtung erzielen kann, entscheidender für die Speicherintegrität sind jedoch zusätzliche Eigenschaften wie eine ungestörte, laterale Kontinuität der primären Barriere über den gesamten Speicherkomplex hinweg (Chadwick, 2008; Grataloup et al., 2009; von Goerne et al., 2010; Raza et al., 2016). Diese gewährleistet eine effektive Rückhaltung des CO₂ auch in größerer Entfernung zur Injektionsstelle. Idealerweise verfügen geeignete Speicherkomplexe über mehrere, übereinanderliegende Deckschichten mit Mächtigkeiten im Bereich mehrerer Zehnermeter, was die langfristige Barrierewirksamkeit erhöht (Oldenburg, 2008; von Goerne et al., 2010).

Eine grundlegende Mindestanforderung an umweltverträgliche CO₂-Speicher ist der Erhalt der Barrierewirkung durch **langfristige Stabilität und Integrität der Barriere(n)** (Tabelle 3). Das Risiko von Leckagen nimmt bei der CO₂-Speicherung mit der Zeit deutlich ab (Metz et al., 2005). Vor diesem Hintergrund erscheint eine Festlegung eines Mindestisoliationszeitraum sinnvoll²². Die geologische Barriere muss während dieses Zeitraums ihre strukturelle Integrität und hydraulische Undurchlässigkeit aufrechterhalten, sodass Mindestanforderungen wie die ausreichende Speicherkapazität, die günstige geologische Tiefe sowie Mindestmächtigkeit der Barriere erfüllt bleiben (Oldenburg, 2008; von Goerne et al., 2010). Insofern dürfen keine Erkenntnisse oder Daten vorliegen, welche die langfristige Stabilität und Integrität der Barriere(n), insbesondere die Einhaltung der Mindestanforderungen über einen Mindestisoliationszeitraum zweifelhaft erscheinen lassen. Dieses Kriterium findet auch im StandAV Anwendung (StandAG, 2017/07.12.2020).

Die Speicherkomplexe umweltverträglicher CO₂-Speicher zeichnen sich durch eine langfristige Beständigkeit der geologischen Barrierewirkung aus. Die bestehenden geologischen Verhältnisse dürfen sich in der Vergangenheit über möglichst lange Zeiträume gegenüber dem Einfluss geogener Prozesse nicht wesentlich verändert haben. Die Länge eines anzusetzenden/nachzuweisenden Mindestisoliationszeitraums ist im Rahmen eines Standortauswahlverfahrens festzulegen (Grataloup et al., 2009; Oldenburg, 2008; von Goerne et al., 2010).

Die **Durchführbarkeit der Überwachung** (Tabelle 3) durch MMV-Programme stellt eine unabdingbare Mindestanforderung für die Gewährleistung der Langzeitsicherheit und Umweltverträglichkeit von CO₂-Speichern dar. Entsprechende Programme müssen daher einerseits aus geotechnischer und umweltrechtlicher Sicht vollumfänglich durchführbar sein

²¹ Z. B. hat Equinor im Rahmen des Northern-Lights-Projekts im August 2025 mit der ersten Einspeicherung von CO₂ in etwa 2.600 m Tiefe unter dem Meeresboden begonnen (Equinor, 2025).

²² Ein solcher Mindestisoliationszeitraum müsste von einer Aufsichtsbehörde vor dem Beginn eines Verfahrens zur Identifikation umweltverträglicher CO₂-Speicher definiert werden. Bspw. benennt der DIN-Gemeinschaftsausschuss „CO₂-Abscheidung, -Transport, -Nutzung und -Speicherung“ in seinem Aufgabenbereich für die langfristige (dauerhafte) Speicherung von CO₂ in unterirdischen Gesteinsschichten einen Zeitraum von mehr als 100.000 Jahren (May, 2024).

und andererseits deren mögliche indirekte Umweltauswirkungen vermieden/möglichst geringgehalten werden sowie im Einklang mit anderen Raumnutzungen und dem Naturschutz stehen (Bachu et al., 2009). Trotz ihrer Bedeutung wird die geotechnische und umweltrechtliche Durchführbarkeit von MMV-Maßnahmen bislang in nur wenigen bestehenden Ansätzen als eigenständiges Standortauswahlkriterium berücksichtigt.

Tabelle 3: Mögliche Mindestanforderungen zur Identifikation umweltgerechter CO₂-Speicher

Mindestanforderungen	Erklärung
Ausreichende Speicherkapazität	Speicher müssen über ausreichende Speicherkapazitäten verfügen. Größere Speicherkapazitäten bieten mehr Sicherheitsreserven. Im Sinne des Vorsorgeprinzips ist es sinnvoll sich auf die Speicher mit den größten Speicherkapazitäten zu fokussieren.
Günstige Injektivität	Speicher müssen möglichst günstige geologische Eigenschaften aufweisen, die einen sicheren Injektionsbetrieb ermöglichen und das Risiko von Unregelmäßigkeiten während der Injektion minimieren.
Günstige geologische Tiefe	Speicher mit günstigen geologischen Tiefen liegen zwischen 1.000 und 2.500 m Tiefe, da in diesen Tiefen größere Sicherheitsreserven bestehen und die günstigen Reservoireigenschaften optimal genutzt werden können.
Mindestmächtigkeit der Barriere	Um die Barrierewirksamkeit der Deckschichten und somit einen möglichst sicheren und dauerhaften Einschluss sicherzustellen, müssen Speicherstrukturen mindestens eine Deckschicht mit Mächtigkeiten von mindestens 20 m aufweisen. Die Mächtigkeit muss über den gesamten Speicherkomplex hinweg gegeben sein. Durch die effektive Rückhaltung des CO ₂ können direkte Umweltauswirkungen verhindert werden.
Langfristige Stabilität und Integrität (Erhalt der Barrierewirkung)	Es dürfen keine Erkenntnisse oder Daten vorliegen, welche die langfristige Stabilität und Integrität der Barriere(n), insbesondere die Einhaltung der Mindestanforderungen, über einen festzulegenden Mindestisoliationszeitraum zweifelhaft erscheinen lassen. Der Erhalt der Barrierewirkung ist Grundlage für die Langzeitsicherheit.
Durchführbarkeit der Überwachung	Programme zur Überwachung gelten als unabdingbare Voraussetzung für die Gewährleistung der Langzeitsicherheit und Umweltverträglichkeit und müssen daher einerseits aus geotechnischer und umweltrechtlicher Sicht durchführbar sein und andererseits deren mögliche indirekte Umweltauswirkungen vermieden/möglichst geringgehalten werden.
Einhaltung regulatorischer Rahmen hinsichtlich Raumordnung & Naturschutzgebiete	Potenzielle Speicher müssen den regulatorischen Vorgaben und Auflagen hinsichtlich der Einhaltung der Raumordnung und des Natur- und Umweltschutzes gerecht werden und im Einklang mit anderen Oberflächen- und Untergrundnutzungen stehen, diese nicht beeinträchtigen und auf Grund der Koexistenz indirekte Umweltauswirkungen vermieden/möglichst geringgehalten werden.

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut

Zu guter Letzt stellt die **Einhaltung des regulatorischen Rahmens hinsichtlich der Raumordnung & Naturschutzgebiete** eine zentrale Mindestanforderung dar (Tabelle 3). Umweltverträgliche Speicher müssen den regulatorischen Vorgaben und Auflagen hinsichtlich der Einhaltung der Raumordnung und des Natur- und Umweltschutzes gerecht werden und im Einklang mit anderen Oberflächen- und Untergrundnutzungen stehen, diese nicht beeinträchtigen und auf Grund der Koexistenz die indirekten Umweltauswirkungen vermieden/möglichst geringgehalten werden (Bartel & Janssen, 2016; Janssen, 2024; Purr & Spindler, 2023; Rütters & Löschke, 2024; von Goerne et al., 2010).

4.2.2 Ausschlusskriterien

Tektonische **Störungszonen und großräumige Vertikalbewegungen** sind ein wesentliches Ausschlusskriterium für umweltverträgliche CO₂-Speicher (Tabelle 4). CO₂-Speicher sind auszuschließen, wenn deren barriereschaffende Deckschichten bzw. deren Speicherkomplex von aktiven Störungen und Störungszonen durchzogen werden oder Erkenntnisse vorliegen, dass großräumige Vertikalbewegungen die Einhaltung der Mindestanforderungen für die Zeitdauer eines Mindestisoliationszeitraumes zweifelhaft erscheinen lassen (z. B. Chadwick, 2008; Grataloup et al., 2009; von Goerne et al., 2010; Raza et al., 2016). Dies gilt insbesondere für die günstigen geologischen Tiefen, die Mindestmächtigkeit der Barriere und den Erhalt der Barrierewirkung.

Auch passive Störungen sind zu vermeiden, sofern sie eine potenzielle hydraulische Verbindung zwischen dem Speicherreservoir und oberflächennahen Schichten bzw. dem Meeresboden darstellen (Fuhrmann et al., 2024). Es besteht die Gefahr, dass sowohl aktive als auch passive Störungszonen, durch Veränderungen des Stressfeldes und Druckanstieg im Speichergestein, während der Injektion reaktiviert werden. Dadurch können Wegsamkeiten für bspw. CO₂-Leckagen oder mit CO₂-angereicherten Formationswassern entstehen. Indikatoren wie Pockmarks²³ am Meeresboden sowie Sole- oder Thermalquellen können auf geomechanische Schwächezonen oder aktive Störungszonen im Untergrund hinweisen und müssen daher standortspezifisch geprüft werden (von Goerne et al., 2010). Das Ausschlusskriterium großräumige Vertikalbewegungen kommt auch im StandAV zur Anwendung (StandAG, 2017/07.12.2020).

Fuhrmann et al. (2024) bewerten das Risiko potenzieller Leckagen entlang geologischer Störungen mithilfe der Störungsklassifikation²⁴ nach (Thöle et al., 2022). Speicherstrukturen der Klasse I, bei denen Störungen vom Top der Speicherformation bis zum Meeresboden reichen und somit potenzielle hydraulische Verbindungen zu nicht-barrierewirksamen Gesteinseinheiten bestehen, gelten aufgrund des erhöhten Leckagerisikos als nicht geeignet und sind auszuschließen. Speicherstrukturen der Klassen IV und V weisen das geringste Risiko für Leckagen auf und sind bevorzugt auszuwählen. Vor dem Hintergrund der Identifikation möglichst umweltverträglicher Speicher erscheint es zudem sinnvoll zu prüfen, ob auch Speicherstrukturen der Klassen II und III – bei denen ein erhöhtes Restrisiko nicht auszuschließen ist – von vornherein ausgeschlossen werden sollten.

Das Auftreten von natürlicher **seismischer Aktivität** ist ein Ausschlusskriterium für umweltverträgliche CO₂-Speicher (Tabelle 4). CO₂-Speicher sind auszuschließen, wenn für deren Speicherkomplex Erkenntnisse vorliegen, durch die die Einhaltung der Mindestanforderungen, insbesondere des Erhalts der Barrierewirkung, über einen festzulegenden Mindestisoliationszeitraum zweifelhaft erscheinen lassen (Wei et al., 2013). Darüber hinaus kann natürliche Seismizität den sicheren Injektionsbetrieb beeinträchtigen, etwa durch Druck- oder Spannungsänderungen, die zu unerwarteten Wegsamkeiten und somit zu einer Gefährdung des sicheren und dauerhaften Einschlusses von CO₂ führen können. Im StandAV kommt das Ausschlusskriterium ebenfalls zur Anwendung²⁵ (StandAG, 2017/07.12.2020). Vor dem

²³ Pockmarks sind kraterartige Vertiefungen am Meeresboden, die durch den Austritt von Erdgasen am Meeresboden entstehen.

²⁴ Für die Störungsklassifikation werden Störungsflächen des TUNB (Tiefer Untergrund Norddeutsches Becken)-Modells genutzt, um Speicherstrukturen in fünf Klassen zu unterteilen. Bei der Bewertung der Störungsflächen werden sowohl die räumliche Ausdehnung der Störungen als auch deren potenzieller Einfluss auf die Barriereintegrität der Speicherstrukturen berücksichtigt (Thöle et al., 2022).

²⁵ Potenzielle Endlagergebiete werden ausgeschlossen, wenn die örtliche seismische Gefährdung größer als in Erdbebenzone 1 nach DIN EN 1998-1/NA 20011-01 ist Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle (Standortauswahlgesetz, 2017).

Hintergrund der Anforderungen an eine umweltverträgliche CO₂-Speicherung erscheint es notwendig, spezifische seismische Gefährdungsschwellen zu definieren, ab denen potenzielle Speicher auszuschließen sind.

Tabelle 4: Mögliche Ausschlusskriterien zur Identifikation möglichst umweltgerechter CO₂-Speicher

Ausschlusskriterium	Erklärung
Störungszonen und großräumige Vertikalbewegungen	Potenzielle Speicher, deren Deckschichten bzw. deren Speicherkomplex von aktiven Störungen und Störungszonen durchzogen werden oder Erkenntnisse bestehen, dass großräumige Vertikalbewegungen die Einhaltung der Mindestanforderungen für die Zeitdauer eines festzulegenden Mindestisolationszeitraumes zweifelhaft erscheinen lassen, sind auszuschließen. Passive Störungen sind zu vermeiden, wenn sie eine potenzielle hydraulische Verbindung von Speicherreservoir bis in Schichten nahe der Erdoberfläche/Meeresboden und anderen Schutzgütern darstellen.
Seismische Aktivität	Potenzielle Speicher sind auszuschließen, wenn für deren Speicherkomplex Erkenntnisse vorliegen, dass natürliche seismische Aktivität die Einhaltung der Mindestanforderungen, insbesondere des Erhalts der Barrierewirkung, über einen festzulegenden Mindestisolationszeitraum zweifelhaft erscheinen lassen.
Vulkanische Aktivität	Potenzielle Speicher sind auszuschließen, wenn für deren Speicherkomplex in der Vergangenheit oder in der Zukunft Erkenntnisse vorliegen, dass vulkanische Aktivität die Einhaltung der Mindestanforderungen, insbesondere des Erhalts der Barrierewirkung, über einen festzulegenden Mindestisolationszeitraum zweifelhaft erscheinen lassen.
Einflüsse aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Aktivität	Potenzielle Speicher sind auszuschließen, wenn Erkenntnisse vorliegen, dass deren Speicherkomplex durch den Einfluss aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Aktivität (Untertageabbau, Altbohrungen, etc.) so geschädigt ist, so dass die Einhaltung der Mindestanforderungen, insbesondere des Erhalts der Barrierewirkung, über einen festzulegenden Mindestisolationszeitraum zweifelhaft erscheinen.
Beeinträchtigung nutzbarer Grundwasser	Potenzielle Speicher sind auszuschließen, wenn Erkenntnisse vorliegen, dass deren Speicherkomplex Vorkommen nutzbarer Grundwässer aufweisen bzw. eine potenzielle hydraulische Verbindung zu nutzbaren Grundwasserreservoirs haben, die durch austretendes CO ₂ oder mit CO ₂ -angereichertes Formationswasser beeinträchtigt würden.

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut

Das Vorhandensein von **vulkanischer Aktivität** ist ein Ausschlusskriterium für umweltverträgliche CO₂-Speicher (Tabelle 4). CO₂-Speicher sind auszuschließen, wenn für deren Speicherkomplex sowohl in der Vergangenheit als auch in der Zukunft Erkenntnisse vorliegen, dass vulkanische Aktivität die Einhaltung der Mindestanforderungen, insbesondere des Erhalts der Barrierewirkung, über einen festzulegenden Mindestisolationszeitraum zweifelhaft erscheinen lassen (von Goerne et al., 2010).

Innerhalb des StandAV kommt das Ausschlusskriterium ebenfalls zur Anwendung²⁶ (StandAG, 2017/07.12.2020). Vor dem Hintergrund der Anforderungen an eine umweltverträgliche CO₂-Speicherung erscheint es notwendig, spezifische Gefährdungsschwellen vulkanischer Aktivität zu definieren, ab denen potenzielle Speicher auszuschließen sind.

Einfluss aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Aktivität stellt ein wesentliches Ausschlusskriterium für umweltverträgliche CO₂-Speicher dar (Tabelle 4). CO₂-Speicher sind auszuschließen, wenn Erkenntnisse vorliegen, dass deren Speicherkomplex durch den Einfluss aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Aktivität (Untertageabbau, Altbohrungen, etc.) so geschädigt ist bzw. ein grundsätzliches Risiko besteht, dass die Einhaltung der Mindestanforderungen, insbesondere des Erhalts der Barrierewirkung, über einen festzulegenden Mindestisoliationszeitraum zweifelhaft erscheint (Fuhrmann et al., 2024; Grataloup et al., 2009; ISO, 2017, 2026; von Goerne et al., 2010; Wei et al., 2013). Vor allem aufgegebene, schlecht dokumentierte oder unzureichend verschlossene Altbohrungen am Meeresboden stellen eines der größten Risiken für Leckagen von CO₂ oder von CO₂-angereichertem Formationswasser dar.

Innerhalb des StandAV werden Standortregionen ausgeschlossen, wenn der Untergrund durch bergbauliche Aktivitäten so geschädigt ist, dass daraus negative Einschlüsse auf den Spannungszustand und die Permeabilität der Barrieren zu besorgen sind (StandAG, 2017/07.12.2020). Darüber hinaus ist der Sicherheitsnachweis zu führen, dass vorhandene alte Bohrungen die Barrieren, die den sicheren Einschluss gewährleisten, in ihrer Einschlussfunktion nicht beeinträchtigen. Vor dem Hintergrund der Anforderungen an eine umweltverträgliche CO₂-Speicherung erscheint es notwendig, spezifische Gefährdungsschwellen aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Aktivität zu definieren, ab denen potenzielle Speicher auszuschließen sind.

Die **Beeinträchtigung nutzbarer Grundwässer** ist ein weiteres Ausschlusskriterium für umweltverträgliche CO₂-Speicher (Tabelle 4). CO₂-Speicher sind auszuschließen, wenn Erkenntnisse vorliegen, dass deren Speicherkomplex Vorkommen nutzbarer Grundwässer aufweist bzw. eine potenzielle hydraulische Verbindung zu nutzbaren Grundwasserreservoirs besteht, die durch austretendes CO₂ oder CO₂-angereichertes Formationswasser beeinträchtigt würden (Grataloup et al., 2009; ISO, 2017, 2026; Oldenburg, 2008).

Bei der Speicherung von Erdgas und gasförmigem Wasserstoff im Untergrund (Vgl. siehe Kapitel 3.2.3) führt dies dazu, dass Wasserschutzgebiete zur Minimierung möglicher Risiken für Mensch und Umwelt für Speicherstätten ausgeschlossen werden. Darüber hinaus muss der Nachweis geführt werden, dass die Migration des Gases in angrenzende Gesteinsschichten und eine mögliche Kontamination benachbarter Grundwasserleiter verhindert oder ausreichend begrenzt wird. Gebiete mit hohen Grundwasserständen sollten wegen der Gefahr einer Grundwasserverunreinigung als Standorte nicht in Frage kommen (Harati et al., 2024; Warnecke & Röhling, 2021). Diese Anforderungen sind auf die CO₂-Speicherung zu übertragen.

Innerhalb des StandAV kommt das Ausschlusskriterium ebenfalls zur Anwendung (StandAG, 2017/07.12.2020). Gebiete werden ausgeschlossen, wenn in den Einschlussrelevanten Bereichen im Untergrund junge Grundwässer nachgewiesen wurden. Vor dem Hintergrund der Anforderungen an eine umweltverträgliche CO₂-Speicherung erscheint es daher notwendig, spezifische Beeinträchtigungsschwellen nutzbarer Grundwässer zu definieren, ab denen potenzielle Speicher auszuschließen sind.

²⁶ Gemäß Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle (Standortauswahlgesetz, 2017) werden potenzielle Standortregionen ausgeschlossen, wenn quartärer Vulkanismus (jünger als ca. 2,5 Millionen Jahre) vorliegt oder zukünftig vulkanische Aktivität zu erwarten ist.

4.3 Abschließende Betrachtung

Bei der Identifikation möglichst umweltverträglicher CO₂-Speicher muss es das Ziel sein, potenziell geeignete geologische Formationen und Speicherstrukturen schrittweise nach ihrer Eignung einzugrenzen. Eine Implementierung dieser möglichen Mindestanforderungen und Ausschlusskriterien bietet die Möglichkeit bei der Abschätzung der statischen Speicherkapazitäten für die CO₂-Speicherung in geologischen Formationen unter der AWZ der deutschen Nordsee potenziell geeignete Gebiete weiter einzugrenzen und möglichst umweltgerechte CO₂-Speicher zu identifizieren.

Dennoch bestehen auch bei der Identifikation möglichst umweltverträglicher CO₂-Speicher erhebliche Ungewissheiten, für die es erforderlich ist, einen geeigneten Umgang zu finden. Bspw. ist zu erwarten, dass ein erstes Screening fast ausschließlich auf bereits bestehenden und auszuwertenden geologischen Daten fußen muss. Umfassende Untersuchungen vor Ort und Erkundungen des Untergrunds werden erst bei der vertieften Prüfung im weiteren Verlauf der Standortauswahl durchgeführt. Dies führt dazu, dass beim Screening Bewertungen oft auf der Basis von generischen Annahmen hinsichtlich der gebietsspezifischen, geologischen Begebenheiten getroffen werden müssen. Gerade Aussagen bezüglich günstiger Eigenschaften eines CO₂-Speichers hinsichtlich der Injektivität und Speicherkapazität werden so mit hohen Ungewissheiten behaftet sein. Zudem unterliegen diese Eigenschaften dynamischen Prozessen. Zunächst als günstig beurteilte Verhältnisse können sich sowohl kurz nach Beginn der Injektion als auch in der späteren Betriebsphase schnell und deutlich verschlechtern (Lane et al., 2021).

Insgesamt ist festzuhalten, dass hinsichtlich der verlässlichen Einschätzung der Injektivität und Speicherkapazität wenig Erfahrungen vorliegen. Auch Alcalde et al. (2018) betonen, dass gerade langfristige Risiken und das Langzeitverhalten des CO₂ im Untergrund nur mit großen Ungewissheiten zu beurteilen sind. Darüber hinaus bleiben gewisse Ungewissheiten auch nach der Erkundung und Analyse gebietsspezifischer geologischer Daten bestehen.

Daher gilt es, diese bei der Identifikation von möglichst umweltverträglichen CO₂-Speichern zu berücksichtigen und sukzessive, z. B. in einer Risikoanalyse, zu adressieren. Die Erfahrungen aus dem StandAV zeigen, dass sich eine stufenweise und wiederholte Anwendung der Mindestanforderungen und Ausschlusskriterien als sinnvoll erweisen kann. So kann mit fortschreitendem Prozess und der Ansammlung vertiefter Erkenntnisse ein höherer Detailgrad erreicht werden.

Darüber hinaus ist für die weiterführende vertiefte Prüfung einzelner CO₂-Speicher und die Auswahl geeigneter, möglichst umweltverträglicher CO₂-Speicherstandorte die Anwendung ergänzender Abwägungs- und Vergleichskriterien erforderlich. Diese können einerseits geowissenschaftlicher Natur sein – etwa analog StandAV (StandAG, 2017/07.12.2020) – andererseits aber auch zusätzliche umweltbezogene, raumplanerische oder sozioökonomische Aspekte einbeziehen, um der Umweltverträglichkeit ein entsprechendes Gewicht zu verleihen.

ISO (2017, 2026) unterscheidet beispielsweise zwischen Kriterien für die geologischen Eigenschaften des Untergrunds sowie Kriterien für den Schutz oberflächennaher Schutzgüter (Vgl. siehe Tabelle 2). An dieser Stelle bietet sich eine Positivbetrachtung der zur Auswahl stehenden Speicherstandorte an: Ein Standort ist demnach besonders geeignet, wenn er durch größtmögliche Sicherheitsabstände zu vulnerablen Schutzgütern und geringes potenzielles Konfliktpotenzial bei der Raumnutzung zur Risikominimierung beiträgt (Grataloup et al., 2009; ISO, 2017, 2026; Oldenburg, 2008; von Goerne et al., 2010). Vor diesem Hintergrund ist es sinnvoll, wenn an Land potenzielle CO₂-Speicher mit geringeren Sicherheitsabständen zu

gegenwärtigen oder zukünftig konkurrierenden Untergrundnutzungen (z. B. Geothermie²⁷) oder urbanen Gebieten mit hoher Bevölkerungsdichte aus Vorsorgegründen in der Abwägung schlechter abschneiden (ISO, 2017, 2026). Gidden et al. (2025) nehmen bspw. auch einen ein Abstand zu Staatsgrenzen an, um die Unklarheiten, die mit einer grenzüberschreitenden Nutzung von geologischen Formationen zur CO₂-Speicherung einhergehen können zu berücksichtigen. Es ist zu prüfen, inwiefern es sinnvoll ist, dadurch ganze Speicher auszuschließen oder nur CO₂-Speicher in Nähe zu Staats- und Ländergrenzen gegenüber anderen weniger günstig zu bewerten.

Diesbezüglich sind auch hypothetische Entwicklungen und zukünftige gesellschaftliche Einflüsse systematisch zu berücksichtigen. Das StandAV sieht beispielsweise die Festlegung einer maximal tolerierbaren Freisetzungsrates von Radionukliden vor, auf deren Basis die Integrität des Gesamtsystems nachzuweisen ist (StandAG, 2017/07.12.2020). Ein vergleichbarer Ansatz könnte auf die CO₂-Speicherung übertragen werden, bei dem für eine definierte maximale Freisetzungsrates ein belastbarer Sicherheitsnachweis zu erbringen wäre (Richtlinie 2009/31/EG; ISO, 2017, 2026).

Darüber hinaus spielen bei der vergleichenden Bewertung umweltverträglicher CO₂-Speicher weitere Indikatoren eine zentrale Rolle. Hierzu zählen insbesondere die Berücksichtigung bestehender geowissenschaftlicher Ungewissheiten, die Verfügbarkeit und Qualität geologischer Daten, die Robustheit der Speicherformation gegenüber äußeren Einflüssen, das Vorhandensein von Sicherheitsreserven sowie die grundsätzliche Erkundbarkeit und Charakterisierbarkeit des geologischen Untergrunds. Gerade im Hinblick auf die Prognose des Langzeitverhaltens von CO₂ in der Speicherformation stellt die Belastbarkeit der sicherheitsrelevanten Aussagen ein entscheidendes Unterscheidungskriterium dar. Je höher die wissenschaftliche Zuverlässigkeit dieser Aussagen ist, desto größer ist das Vertrauen in die langfristige Umweltverträglichkeit und Sicherheit des Speicherstandortes. Bei der Identifikation möglichst umweltverträglicher CO₂-Speicher können diese Indikatoren dabei helfen, zwischen potenziell geeigneten Speichern abzuwägen und diese zu vergleichen, um sich im Rahmen einer Positivbetrachtung anhand vorhandener Sicherheitsreserven für den aus Sicht der Umweltverträglichkeit geeignetsten Standort zu entscheiden.

Ergänzend lassen sich auch Abwägungskriterien mit sozio-ökonomischem Fokus heranziehen, um zwischen potenziellen Speicherstandorten zu differenzieren. Umweltverträglichkeit bedeutet in diesem Kontext auch, dass der infrastrukturelle Aufwand, um die CO₂-Speicher zu erreichen, möglichst gering sein sollte, um Natur und Umwelt nicht zusätzlich zu belasten. Speicher, die mit geringem Eingriff in Natur und Umwelt erreichbar sind, gelten daher als vorteilhaft. Vor diesem Hintergrund kann die Anbindung an bestehende Transport- und Versorgungsinfrastrukturen – wie CO₂-Pipelines oder Hafenanlagen – als Abwägungskriterium dienen. Die Reinheit des CO₂-Stroms hingegen stellt keine Unterscheidungsgrundlage zwischen Speicherstandorten dar, sondern ist vielmehr eine grundlegende Voraussetzung für die sichere und umweltverträgliche Durchführung von CO₂-Speicherprojekten.

Um der Umweltverträglichkeit möglichst umfassend gerecht zu werden, müssen CO₂-Speicherprojekte in ihrer gesamten Prozesskette betrachtet werden. Ein zentraler Aspekt ist hierbei die eindeutige Definition des Einlagerungsbereichs sowie der Nachweis, dass der möglichst sichere und dauerhafte Einschluss des CO₂ nach der Übergabe der Verantwortung an die zuständigen Behörden ohne größere Nachsorgemaßnahmen (wie z. B. zusätzliche Überwachungsmaßnahmen oder technische Gegenmaßnahmen zur Abdichtung bspw.)

²⁷Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik (2013) kommen zu der Einschätzung, dass lediglich rund 1,2% der Gesamtfläche Deutschlands (Onshore) für eine CO₂-Speicherung als untersuchungswürdig in Frage kommen, ohne in Konkurrenz zur geothermischen Nutzung zu stehen.

gewährleistet ist. Dieser Aspekt ist essenziell, um die langfristige Umweltverträglichkeit und gesellschaftliche Akzeptanz der CO₂-Speicherung sicherzustellen.

Auch im Hinblick auf die Umweltverträglichkeit und Erfolgchancen von Überwachungsprogrammen sowie die Potenziale zur Minimierung indirekter Auswirkungen durch technische Prozesse entlang der gesamten CCS-Prozesskette ist eine standortbezogene Abwägung sinnvoll, um den umweltschonendsten Speicherstandort auszuwählen. Hierfür bilden die für die Erarbeitung der erforderlichen naturschutzfachlichen Grundlagen für die Bewertung nach § 5 gemäß (KSpTG/25.11.2025) Anhang 1, Teil 2 eine wesentliche Grundlage.

Abschließend lässt sich festhalten, dass Umweltverträglichkeitsaspekte in allen Kriterienklassen und über den gesamten Auswahlprozess hinweg – von der ersten Identifikation bis zur vertieften Prüfung potenzieller CO₂-Speicher – eine zentrale Rolle spielen müssen. Es ist daher sinnvoll, die Umweltverträglichkeit bereits bei der Festlegung von Mindestanforderungen und Ausschlusskriterien systematisch zu berücksichtigen. Bei der späteren Abwägung zwischen mehreren potenziell geeigneten Speichern ermöglichen differenzierte Umweltkriterien eine weiterführende Bewertung und Auswahl im Sinne eines besonders umweltschonenden Speicherstandorts.

5 Aspekte und mögliche Verfahrensstufen für eine vertiefte Prüfung von umweltverträglichen Standorten

Ziel eines Verfahrens zur Identifikation und vertieften Prüfung umweltverträglicher CO₂-Speicher ist es, potenzielle Speicherformationen systematisch zu identifizieren, vertieft zu prüfen und auf Basis definierter Kriterien hinsichtlich ihrer Eignung zu bewerten und auszuwählen (Aarnes et al., 2009; Alcalde et al., 2021; Carpenter et al., 2011; von Goerne et al., 2010). Anforderungen an ein solches Verfahren sind hoch. Es sollte wissenschaftlich fundiert, transparent, effizient und konsequent an den Maßstäben der Umweltverträglichkeit ausgerichtet sein (Cames et al., 2024; von Goerne et al., 2010).

Darüber hinaus sind eine frühzeitige Einbindung und kontinuierliche Beteiligung der Öffentlichkeit essenziell, um Akzeptanz zu fördern und Vertrauen in das Verfahren zu schaffen. Das gesamte Verfahren sollte deshalb ergebnisoffen gestaltet werden, um politische, gesellschaftliche und fachliche Anforderungen gleichermaßen zu berücksichtigen (Cames et al., 2024; von Goerne et al., 2010). Dazu ist bspw. eine durchgängig integrative und sich kontinuierlich vertiefende Prüfung potenzieller CO₂-Speicher unerlässlich. Grundlage hierfür ist ein ausgewogener und iterativer Bewertungsansatz, der geowissenschaftliche, technische, ökologische sowie sozioökonomische Aspekte systematisch einbezieht.

Gemäß dem Kohlendioxid-Speicherungsgesetz sind „potenzielle Kohlendioxidspeicher und potenzielle Speicherkomplexe“ zur Feststellung der Eignung „nach Maßgabe einschlägiger Kriterien der Anlage 1 und weiterer geeigneter Methoden zu überprüfen und auf ihre Eignung für eine langzeitsichere Speicherung hin zu charakterisieren und zu bewerten (Vgl. siehe §7 (3) KSpTG/25.11.2025). Diese beziehen sich jedoch nur auf die Feststellung der Eignung potenzieller CO₂-Speicher und sind „auf Grundlage der durch die Untersuchung gewonnenen Erkenntnisse“ zu charakterisieren und zu bewerten. Es gibt im (KSpTG/25.11.2025) nur wenige klare Festlegungen für Ausschlussbereiche für den Bau von CO₂-Speichern, beispielsweise in Meeresschutzgebieten und im angrenzenden Bereich. Mögliche Auswirkungen der CO₂-Speicherung in Bereichen unterhalb von Trinkwasserschutzgebieten werden jedoch erst in weiteren Verfahrensstufen nach der Beantragung der Untersuchungsgenehmigung abgeschätzt.

Ein Verfahren zur Identifikation umweltverträglicher CO₂-Speicher setzt jedoch deutlich früher – vor den Untersuchungen im Gelände durch die Betreiber – an. Es hat die Möglichkeit harte Mindestanforderungen und Ausschlusskriterien zu formulieren, welche potenzielle CO₂-Speicher erfüllen müssen, möglichst schon bevor gemäß § 7 (KSpTG/25.11.2025) eine Untersuchungsgenehmigung zur Untersuchung des Untergrunds auf seine Eignung zur Errichtung von Kohlendioxidspeichern beantragt wird. Demnach wären auf Basis der Anlage 1 (KSpTG/25.11.2025) transparente und belastbare Mindestanforderungen, Ausschlusskriterien sowie differenzierte Abwägungskriterien zu formulieren (Vgl. Kapitel 4.3), welche schon in der frühen Phase der Identifikation möglichst umweltverträglicher CO₂-Speicher Eingang finden könnten (von Goerne et al., 2010). Letztendlich bestehen mehrere Möglichkeiten und Zeitpunkte in einem Standortauswahlverfahren, um harte Mindestanforderungen und Ausschlusskriterien anzuwenden. Darüber hinaus sollten sich diese auch mit dem Stand von Wissenschaft und Technik entwickeln und sofern möglich an neue

Erfordernisse anpassen²⁸. Nichtsdestotrotz gewährleistet eine direkte Berücksichtigung im Gesetzestext die Umsetzung der Umweltvorsorge am ehesten.

Die Umweltverträglichkeit muss integraler Bestandteil des gesamten Verfahrens sein. Sie ist über die gesamte Prozesskette von Speicherprojekten hinweg zu betrachten – von der Standorterkundung über den Betrieb und die Überwachung bis hin zur Nachsorge und der abschließenden Übertragung der Speicher an die zuständige Behörde (Cames et al., 2024). Darüber hinaus ist bereits bei der vertieften Prüfung und Eingrenzung von CO₂-Speichern zu klären, wie die Langzeitsicherheit und damit die Umweltverträglichkeit auch über lange Zeiträume (mehrere hundert bis zehntausend Jahre) nach Übertragung der Verantwortung an die zuständige Behörde zu gewährleisten und nachzuweisen ist. Nur so kann eine umfassende Bewertung erfolgen, die dem Vorsorgeprinzip Rechnung trägt und die Grundlage für einen langfristig möglichst umweltverträglichen Speicherbetrieb bildet.

Am Ende des Verfahrens zur Identifikation und vertieften Prüfung umweltverträglicher CO₂-Speicher muss die Entscheidung über einen Standort stehen. Dieser soll nicht nur eine möglichst sichere und dauerhafte Speicherung von CO₂ gewährleisten, sondern zugleich einen möglichst umfassenden Schutz von Mensch und Umwelt voraussetzen – insbesondere durch die Vermeidung indirekter Auswirkungen und unzumutbarer Belastungen. Diese Entscheidung ist im Rahmen eines Planfeststellungsverfahrens gemäß § 13 (KSpTG/25.11.2025) zu treffen. Spätestens zu diesem Zeitpunkt ist eine Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) nach Anlage 1 Nr. 15.2 (UVPG, 2021/23.10.2024) demnach zwingend erforderlich.

Die UVP ist das zentrale Instrument zur Prüfung der Umweltverträglichkeit in einem Standortauswahlprozess. Dabei werden alle relevanten Umweltaspekte und Schutzgüter²⁹ systematisch erfasst und bewertet und die Abschätzung der Auswirkungen eines Vorhabens auf die Umwelt in die Entscheidungsfindung mit einbezogen.

Während das (KSpTG/25.11.2025) bislang lediglich eine UVP im Rahmen des Planfeststellungsverfahrens vorsieht, ist im StandAV bereits eine Integration der UVP vor dem eigentlichen Genehmigungsverfahren des Endlagers und somit der schlussendlichen Bewertung eines Endlagers vorgesehen. Ergänzend kommen im StandAV bereits in den frühen Phasen zwei strategische Umweltprüfungen (SUP) gemäß (UVPG, 2021/23.10.2024) sowie eine sozio-ökonomische Potenzialanalyse (SöPa) zur Anwendung (StandAG, 2017/07.12.2020; Krohn et al., 2024). Dieses Vorgehen ließe sich prinzipiell ebenfalls auf das Verfahren zur Identifikation und vertieften Prüfung umweltverträglicher CO₂-Speicher übertragen. Eine systematische Anwendung vergleichender Umweltprüfungen, Risiko- und sozio-ökonomischer ermöglichen, die wesentlichen Umweltaspekte schon vor einer Umweltverträglichkeitsprüfung im Planfeststellungsverfahren frühzeitig in den Standortauswahlprozess zu integrieren. Dadurch können bereits bei der Vorauswahl potenzieller CO₂-Speicher aus Sicht der Umweltverträglichkeit weniger geeignete Speicherstandorte vorzeitig ausgeschlossen oder weiter eingegrenzt werden.

Angesichts der fortschreitenden Klimakrise und der gesetzten Klimaziele ist der Faktor Zeit bei der Ausgestaltung möglicher Verfahrensstufen zu berücksichtigen. Es besteht die

²⁸ Z. B. ist die CO₂-Speicherung unterhalb von Meeresschutzgebieten gemäß KSpTG/25.11.2025 ausgeschlossen, an Land unter Trinkwasserschutzgebieten bisher hingegen nicht und aktuell nur als Merkmal in der Umgebung des Speicherkomplexes zu dokumentieren, sowie im Überwachungsprogramm bei der Charakterisierung der Gefahren zu berücksichtigen. Eine Beantragung einer Untersuchungsgenehmigung für einen Standort in oder nahe an einem Trinkwasserschutzgebiet wäre dennoch zum jetzigen Zeitpunkt nicht ausgeschlossen.

²⁹ Gemäß § 2 Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVPG 2021) sind Schutzgüter die Menschen, insbesondere die menschliche Gesundheit, Tiere, Pflanzen, und die biologische Vielfalt, die Fläche, der Boden, Wasser, die Luft, das Klima und die Landschaft sowie das kulturelle Erbe und sonstige Sachgüter und die Wechselwirkungen zwischen den vorgenannten Schutzgütern.

Notwendigkeit, effizient zu handeln – und dabei die Umweltverträglichkeit bei der Standortauswahl und Projektausgestaltung möglichst umfassend zu berücksichtigen. Ein auf Jahrzehnte angelegtes Verfahren, wie es etwa beim StandAV abzusehen ist³⁰, erscheint aber im Kontext der sich zuspitzenden Klimakrise als nicht zielführend, da Verzögerungen potenziell den ökologischen Gesamtschaden erhöhen können.

Daher ist ein effizientes, gleichzeitig jedoch sorgfältiges Vorgehen erforderlich. Aarnes et al. (2009) nehmen an, dass sich die zentralen Verfahrensstufen – von der Identifikation über die vertiefte Prüfung bis hin zur Auswahl geeigneter Speicher – innerhalb eines Zeitrahmens von zwei bis fünf Jahren realisieren lassen. Die Europäische Kommission rechnet mit ähnlichen Zeitbedarfen (European Commission, 2024). Ein zentraler Bestandteil eines Standortauswahlprozesses sollte daher die Entwicklung eines integrierten Projektentwicklungsplans sein, der alle Schritte der CO₂-Prozesskette – von der Planung über die Genehmigung bis zur Inbetriebnahme – koordiniert und zeitlich aufeinander abstimmt (Cames et al., 2024).

Bei der Ausgestaltung des Verfahrens zur Identifikation und vertieften Prüfung umweltverträglicher CO₂-Speicher erscheint es sinnvoll, die Regelungen und Erfahrungen der benachbarten Nordseeanrainerstaaten mit zu berücksichtigen. Die Verfahren für die Identifikation und vertiefte Prüfung von CO₂-Speichern unterscheiden sich von Land zu Land.

Norwegen verfolgt beispielsweise eine flexible „Open-Door“-Strategie (Lindbæck, 2025). Unternehmen können jederzeit eigeninitiativ Gebiete vorschlagen, die sie für potenziell geeignet halten, und dafür Explorationslizenzen beantragen. Die zuständige Behörde (Norwegian Ministry of Petroleum and Energy) prüft die Vorschläge auf technische und rechtliche Eignung. Kommt sie zu einem positiven Ergebnis, wird ein öffentlicher Konsultationsprozess eingeleitet. Es gibt keine festen Ausschreibungsrunden oder vorab definierte Gebietsvorgaben. Der öffentliche Konsultationsprozess ersetzt dabei keine Umweltverträglichkeitsprüfung. Für die eigentliche Betriebsphase sind weitere Genehmigungen nach norwegischem Umwelt- und Gewässerschutzrecht notwendig.

Großbritannien hingegen wählt einen halb offenen, gestuften Ansatz, der sowohl unternehmensgesteuerte Gebietsvorschläge als auch staatlich koordinierte Lizenzierungsrunden kombiniert³¹. Unternehmen nominieren potenzielle Speichergebiete, die durch die North Sea Transition Authority (NSTA) bewertet werden. In einer ersten Vergaberunde können Explorationslizenzen erteilt werden, mit denen die Speicherstätten detailliert untersucht werden. In einer zweiten Runde erfolgt die Vergabe der eigentlichen Betriebslizenz, sofern die Speicherstätten geeignet und genehmigungsfähig sind. Dabei ist ein Environmental Risk Assessment (ERA, Umweltrisikoaanalyse) Bestandteil des Genehmigungsverfahrens, wobei Umweltaspekte im Einklang mit dem Energy Act³² und Offshore Petroleum Activities Regulations³³ berücksichtigt werden.

Die Niederlande konzentrieren sich vorrangig auf strategische Großprojekte wie *Porthos*³⁴ oder *Aramis*³⁵ und verzichten bislang auf ein „Open-Door“-Lizenzsystem. Speicherprojekte werden staatlich initiiert und in enger Zusammenarbeit zwischen Regierung, staatlichen Netzbetreibern

³⁰ Krohn et al., 2024.

³¹ <https://www.gov.uk/government/collections/uk-carbon-capture-usage-and-storage-ccus>

³² <https://www.legislation.gov.uk/ukpga/2023/52/contents>

³³ <https://www.legislation.gov.uk/uksi/2005/2055/contents/made>

³⁴ <https://noordzeeloket.nl/beleid/interdepartementaal-directeuren-overleg-noordzee/idon-nieuwsbrief/nr-44/porthos-gaat-start-eerste-grote-project-co2-opslag>

³⁵ <https://www.aramis-ccs.com>

und beteiligten Industriepartnern weiterentwickelt. Die Lizenzvergabe erfolgt projektspezifisch nach Prüfung des Speicherraums durch die zuständigen Behörden. Umweltaspekte werden im Rahmen der Umweltverträglichkeitsprüfung gemäß niederländischem Umweltrecht geprüft.

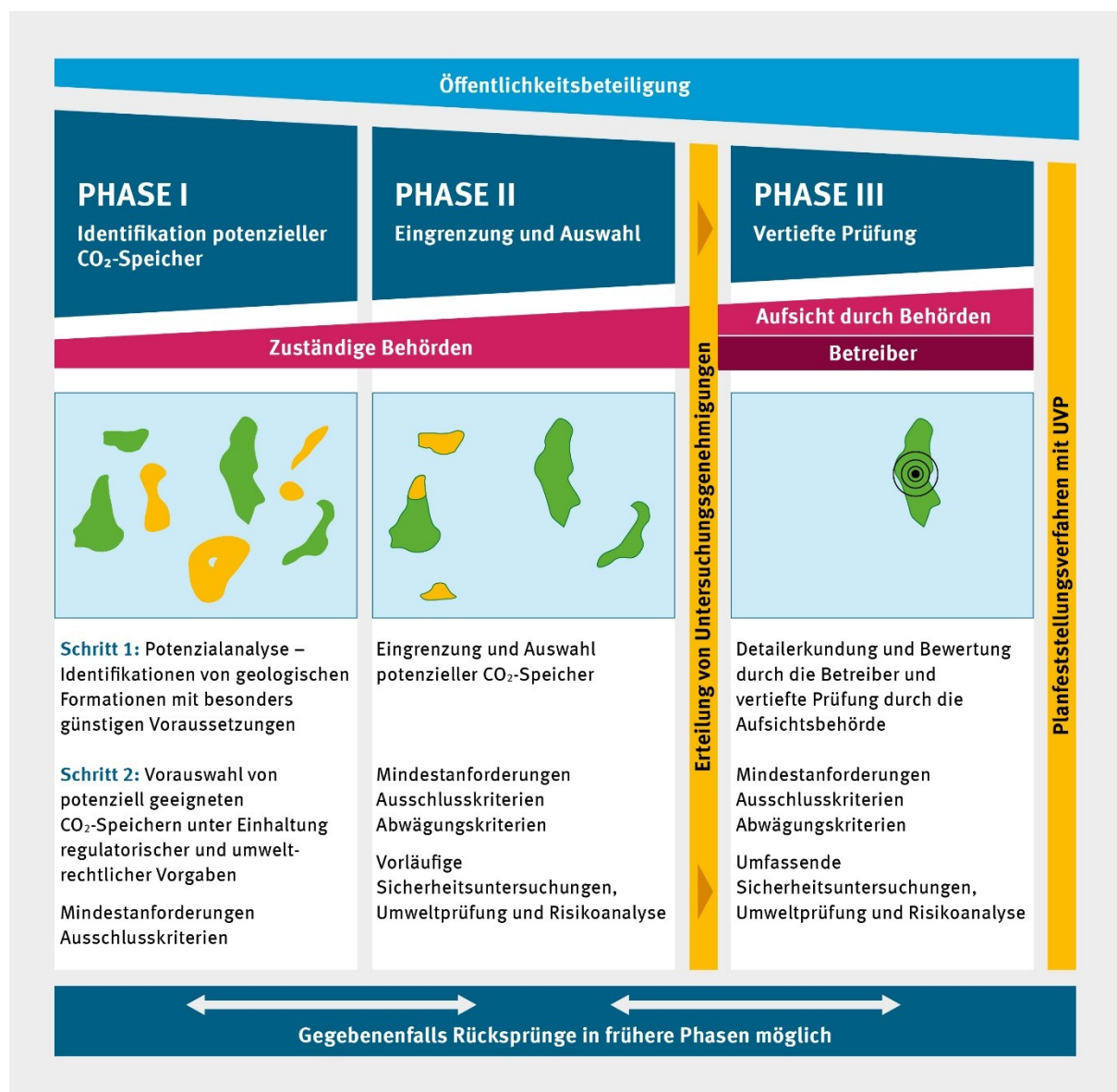
Dänemark verfolgt ein stark staatlich gesteuertes Modell mit klar definierten Lizenzrunden³⁶. Die Danish Energy Agency schreibt gezielt bestimmte Gebiete zur Exploration aus. Unternehmen können ausschließlich für diese Gebiete Untersuchungs- und Erkundungsgenehmigungen beantragen und in einem phasenweisen Verfahren anschließend Betriebsbewilligungen erlangen. Bereits vor der Ausschreibung zur Vergabe der Explorationsgenehmigungen wird für die potenziell geeigneten Gebiete eine Strategische Umweltprüfung (SUP) und ein Environmental Impact Assessment (EIA, Umweltrisikoaanalyse) durchgeführt, deren Ergebnisse in die Ausschreibung einfließen³⁷. In Dänemark wird dieses Vorgehen für die Vergabe von Untersuchungs- und Erkundungsgenehmigungen für festgelegte Gebiete in Offshore-, Küsten-, und Onshore-Bereichen jeweils wiederholt.

Zum jetzigen Zeitpunkt ist nicht abschließend absehbar, welchen konkreten Weg Deutschland bei der Identifikation und vertieften Prüfung von CO₂-Speichern einschlagen wird. Die geplante Novelle des Kohlendioxidspeicherungs- und -Transportgesetzes (KSpTG/25.11.2025) räumt gemäß § 2 Abs. 5 ein, dass die Bundesländer für ihr jeweiliges Landesgebiet regeln können, ob und in welchen Gebieten eine dauerhafte CO₂-Speicherung zulässig ist. Wörtlich heißt es, die Länder können bestimmen, „dass eine dauerhafte Speicherung von Kohlendioxid [im jeweiligen Bundesland] zulässig ist. Sie können dabei festlegen, dass eine Speicherung nur in bestimmten Gebieten [des Bundeslands] zulässig ist“. Daraus ergibt sich grundsätzlich die Möglichkeit, für ausgewiesene Bereiche, schon vor der Beantragung von Untersuchungsgenehmigungen, eine Strategische Umweltprüfung (SUP) und eine Umweltrisikoaanalyse (EIA, Environmental Impact Assessment) durchzuführen, wie es etwa in Dänemark praktiziert wird.

Auf dieser Basis und unter der Berücksichtigung der regulatorischen Vorgaben (KSpTG/25.11.2025; Richtlinie 2009/31/EG; ISO, 2017, 2026) sowie den umfassenden Ansätzen aus der Literatur (Vgl. siehe Kapitel 3.1) lassen sich wesentliche Verfahrensstufen skizzieren (Abbildung 3).

³⁶ <https://ens.dk/en/supply-and-consumption/political-agreements-and-applicable-legislation>

³⁷ <https://ens.dk/en/supply-and-consumption/licenses-exploration-and-storage-co2-including-environmental-consultation?>

Abbildung 3: Mögliche Verfahrensstufen bei der Identifikation umweltverträglicher CO₂-Speicher und deren vertieften Prüfung

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut.

In Anlehnung an das StandAV erscheint es dabei zielführend, den Prozess in klar abgegrenzte, aufeinander aufbauende Phasen zu gliedern. Ziel ist es, durch die wiederholte Anwendung und Weiterentwicklung von Kriteriensätzen (Mindestanforderungen, Ausschluss- und Abwägungskriterien) sowie umfangreichen und vertiefenden Sicherheitsuntersuchungen mit steigendem Wissensstand die Zahl potenziell geeigneter Endlagerstandorte bzw. CO₂-Speicher schrittweise einzugrenzen und deren Eignung fundiert zu bewerten (StandAG, 2017/07.12.2020).

Von Goerne et al. (2010) weisen darauf hin, dass einzelne Verfahrensschritte nicht notwendigerweise linear aufeinander folgen müssen. Bei der Identifikation umweltverträglicher CO₂-Speicher handelt es sich vielmehr um einen iterativen Prozess. Sollten sie potenziell geeignete Speicher während der Voruntersuchung oder nach Inbetriebnahme, entgegen der vorherigen Annahmen, als nicht geeignet herausstellen, ist zu erwarten, dass gegebenenfalls

Rücksprünge auf frühere Verfahrensschritte notwendig sind und dies daher frühzeitig mit eingeplant werden muss.

Die Öffentlichkeit ist frühzeitig in das gesamte Verfahren einzubinden, kontinuierlich über den Fortschritt der Arbeiten zu informieren und bei allen wesentlichen Entscheidungsschritten angemessen zu beteiligen (Abbildung 3). Ziel ist es, breite Teile der Bevölkerung rechtzeitig in die Projektentwicklung einzubeziehen, Transparenz zu schaffen und Akzeptanz zu fördern. Idealerweise erfolgt die Ausgestaltung des Verfahrens bereits unter aktiver Mitwirkung der Öffentlichkeit (AkEnd, 2002; von Goerne et al., 2010; Witte et al., 2023). Nach § 4 Abs. 2 (KSpTG/25.11.2025) wirkt die zuständige Behörde darauf hin, „dass der Träger des Vorhabens die Öffentlichkeit möglichst vor Antragstellung über das planfeststellungspflichtige Vorhaben, insbesondere über die Lage, die Größe und die Technologie der Kohlendioxidleitung, informiert. Dabei ist der Öffentlichkeit Gelegenheit zur Äußerung und Erörterung zu geben“. Weiter sollen für das KSpG die allgemein gültigen Regelungen der frühen Öffentlichkeitsbeteiligung gemäß § 25 des Verwaltungsverfahrensgesetz (VwVfG) gelten (KSpTG/25.11.2025, S. 45).

Phase I: Identifikation von potenziellen CO₂-Speichern

Phase I dient der Identifikation von potenziellen CO₂-Speichern und gliedert sich in zwei aufeinander aufbauende Schritte (Abbildung 3).

Schritt 1 umfasst die Potenzialanalyse gemäß § 5 (KSpTG/25.11.2025), in deren Rahmen geologische Formationen mit besonders günstigen Voraussetzungen für eine sichere und dauerhafte CO₂-Speicherung identifiziert werden. Dieser Schritt ist mit dem „Basis of Design“-Ansatz von Alcalde et al. (2021) zu vergleichen, bei dem anhand bestehender geologischer Daten ein erster Überblick über geeignete Großräume gewonnen wird (Chadwick, 2008; ISO, 2017, 2026). Die aktuellen Arbeiten im Rahmen von GEOSTOR (Wallmann, K. und das GEOSTOR-Konsortium, 2025) können bereits als erste Teilarbeiten für die Analyse und Bewertung der Potenziale für die dauerhafte Speicherung gemäß § 5 (KSpTG/25.11.2025) verstanden werden.

Schritt 2 unterzieht die zuvor identifizierten geologischen Formationen einer ersten Bewertung anhand festgelegter Auswahlkriterien. Dieses Vorgehen entspricht dem „Screening“-Schritt nach Alcalde et al. (2021). Auf Basis definierter Mindestanforderungen und Ausschlusskriterien erfolgt eine systematische Vorauswahl, bei der bereits wesentliche Umweltverträglichkeitsaspekte berücksichtigt werden können (Vgl. Tabelle 3 und Tabelle 4). Diese erste Anwendung ermöglicht es, geologische Formationen mit offensichtlichen Defiziten frühzeitig auszuschneiden (Abbildung 3, siehe linke Grafik, gelbe Flächen) (von Goerne et al., 2010). Am Ende von Phase I steht somit eine Auswahl potenziell geeigneter CO₂-Speicher, die grundlegende regulatorische und umweltrechtliche Anforderungen (z. B. bezüglich Raumordnungsvorgaben, Nutzungskonkurrenzen und Schutzgebieten) erfüllen und in den folgenden Phasen vertiefter untersucht und bewertet werden können (von Goerne et al., 2010).

Phase II: Eingrenzung und Auswahl von potenziellen CO₂-Speichern

Phase II dient der Eingrenzung und Auswahl, der in Phase I identifizierten, potenziellen CO₂-Speicher und zielt darauf ab, Gebiete festzulegen, für die am Ende von Phase II Untersuchungsgenehmigungen erteilt werden können (Abbildung 3). In dieser Bewertungs- und Auswahlphase wird eine belastbare Auswahl der besonders geeigneten Speicher erstellt. Diese Auswahl bildet sowohl die geotechnische als auch die ökologische Eignung der Standorte differenziert ab und schafft somit eine möglichst fundierte Entscheidungsgrundlage für die im Detail zu erkundenden Gebiete (Aarnes et al., 2009; Carpenter et al., 2011). Die Auswahl könnte auch in Form einer Rangfolge („Ranking“) erfolgen, um bevorzugte, besonders geeignete oder möglichst umweltverträgliche Gebiete noch prominenter herauszustellen.

Im Rahmen der fortschreitenden Prüfung in Phase II werden die Mindestanforderungen und Ausschlusskriterien erneut auf Grundlage des fortgeschrittenen Kenntnisstands angewendet. Dabei können die Kriteriensätze weiterentwickelt und an den aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik angepasst werden. Damit könnten sich die für die CO₂-Einspeicherung als geeignet eingeschätzten Bereiche ggf. auch wieder verändern, in diesem Fall kommt es zu einem Rücksprung in Phase I.

In Phase II können ergänzend zu diesen grundlegenden Kriterien nun auch differenzierte Abwägungskriterien zum Einsatz kommen, die geowissenschaftliche, ökologische, rechtliche und sozioökonomische Aspekte einbeziehen. Diese ermöglichen eine vergleichende Bewertung der verbliebenen Speicheroptionen und dienen der fundierten Auswahl derjenigen Standorte, die sich für eine detaillierte Untersuchung in Phase III eignen.

Im Mittelpunkt der fortschreitenden Prüfung und vergleichenden Bewertung potenzieller CO₂-Speicher stehen Aspekte der Langzeitsicherheit und Umweltverträglichkeit. Ein wesentliches Instrument dieser Phase sind vorläufige Sicherheitsuntersuchungen. Sie basieren auf den verfügbaren geologischen Daten und tragen dem Umstand Rechnung, dass die geologischen Eigenschaften der Speicherformationen und des umgebenden Speicherkomplexes häufig noch mit erheblichen Ungewissheiten behaftet sind. Daher laufen vorläufige Sicherheitsuntersuchungen, sofern keine gebiets- bzw. standortspezifischen Daten vorliegen, meist auf generischer Ebene ab. Diese vorläufige Charakterisierung erfordert somit einen methodisch sorgfältigen Umgang mit Datenungleichheiten (von Goerne et al., 2010).

Sicherheitsuntersuchungen können neben Aspekten der Langzeitsicherheit auch erste generische Machbarkeitsstudien, etwa zur Pipeline- und Netzanbindung sowie zur Bereitstellung relevanter CO₂-Mengen („Source to sink“-Betrachtung) erfassen. Darüber hinaus können sie erste generische Auslegungen des Injektions- und Speicherbetriebs umfassen (z. B. mögliche Injektionsstelle und -raten) sowie entsprechende Sicherheitskonzepte. Ergänzend werden bereits Konzepte für sogenannte „Baseline“-Untersuchungen³⁸ sowie MMV-Programme zur späteren Überwachung entwickelt. Ebenso können erste raumordnerische Prüfungen, vorläufige Kostenabschätzungen sowie sozioökonomische Potenzialanalysen Bestandteil dieser Untersuchungen sein. Ziel ist es, eine fundierte Grundlage für die Auswahl geeigneter Speicher unter Berücksichtigung technischer, ökologischer und gesellschaftlicher Rahmenbedingungen zu schaffen.

Ein weiteres wichtiges Instrument in Phase II sind vorläufige Umweltprüfungen und Risikoanalysen. Sie dienen der frühzeitigen Identifikation langfristiger Umweltrisiken sowie besonders schutzwürdiger Umweltgüter, die in die vergleichende Bewertung der Speicher einfließen müssen. Ergänzend sollte in diesem Schritt ein erstes Konzept für ein standortspezifisches Risikomanagement sowie ein übergeordnetes Überwachungsprogramm erarbeitet werden, das mögliche Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen systematisch berücksichtigt (Cames et al., 2024; Richtlinie 2009/31/EG; Furre et al., 2020; ISO, 2017, 2026).

Phase III: Vertiefte Prüfung

Phase III umfasst die Detailerkundung und Bewertung der potenziellen CO₂-Speicher durch die Unternehmen und eine vertiefte Prüfung durch die zuständige Aufsichtsbehörde (Abbildung 3). Voraussetzung für die Detailerkundung durch die Unternehmen ist die Erteilung der Untersuchungsgenehmigung durch die zuständigen Behörden.

³⁸ „Baseline“-Untersuchungen erfassen den Ausgangszustand (engl. baseline) eines Systems vor Beginn eines Eingriffs- oder Projektes. Anhand diesen Referenzbedingungen bzw. dem Istzustand (z.B. von Ökosystemen bezüglich deren Artenvielfalt oder Boden- und Wasserqualität) lassen sich spätere Veränderungen, Auswirkungen oder Schäden bestimmen. „Baseline“-Untersuchungen schaffen eine objektive Grundlage für spätere Umweltprüfungen (Furre et al., 2020; Meneguolo et al., 2024).

Ziel dieser Phase ist alle für das Planfeststellungsverfahren nach § 13 (KSpTG/25.11.2025) notwendigen Prüfungen und Bewertungen für die abschließende Standortentscheidung zusammen zu tragen (Vgl. siehe KSpTG/25.11.2025, Anlage 1). Phase III ist mit dem „Due Diligence“³⁹-Schritt nach Alcalde et al. (2021) zu vergleichen und beinhaltet eine umfassende geowissenschaftliche, technische, umweltbezogene und sozioökonomische Prüfung auf Basis von neuen gebiets- bzw. standortspezifischen Erkundungsdaten.

Die Durchführung gebiets- bzw. standortspezifischer „Baseline“-Untersuchungen bildet den Ausgangspunkt für die Vertiefung und Weiterentwicklung der in Phase II begonnenen Sicherheitsuntersuchungen, Risikoanalysen und Umweltprüfungen (von Goerne et al., 2010). Auf Basis, der im Rahmen der Detailerkundung erhobenen Standortdaten werden in den umfassenden Sicherheitsuntersuchungen alle vorläufig entwickelten Konzepte systematisch überprüft, angepasst und validiert. Ziel der vertieften und abschließenden Bewertung ist die Entwicklung einer belastbaren Injektions- und Speicherauslegung und deren Sicherheitskonzepte, einschließlich Überwachungsstrategie, Injektionsplanung und Nachweiskonzept zur Langzeitsicherheit (von Goerne et al., 2010). Am Ende der Entscheidungsfindung steht der Speicherstandort mit der besten Eignung hinsichtlich Langzeitsicherheit, Speichereffizienz und Umweltverträglichkeit.

Nach der Standortvorauswahl schließt das Planfeststellungsverfahren gemäß § 13 (KSpTG/25.11.2025) an. Ziel des Planfeststellungsverfahrens ist es, die Eignung der vorgeschlagenen Speicherprojekte festzustellen, auf Basis welcher Planfeststellung und -genehmigung an die Unternehmen vergeben werden. Das Planfeststellungsverfahren beinhaltet eine formale UVP gemäß Anlage 1 Nr. 15.2 (UVPG, 2021/23.10.2024), die auf alle absehbaren Umweltauswirkungen der geplanten Speicherinfrastruktur eingeht. Die abschließende Genehmigung kann nur erteilt werden, wenn alle Anforderungen für eine voraussichtliche Umwelt- und Langzeitsicherheit erfüllt sind und eine Übertragbarkeit der Verantwortung auf eine staatliche Behörde langfristig als möglich eingeschätzt wird (Carpenter et al., 2011; Richtlinie 2009/31/EG; ISO, 2017, 2026). Auch nach ausführlicher Vorerkundung kann in der anschließenden Betriebsphase die CO₂-Menge, die in einer geologischen Formation einlagert werden soll, deutlich geringer ausfallen als vorab berechnet wurde (Lane et al., 2021).

Zusammenfassend zeigt sich, dass ein wissenschaftlich fundierter und gesellschaftlich tragfähiger Standortauswahlprozess für CO₂-Speicher nicht allein auf geologische Eignung fokussieren darf. Dieser muss den Schutz von Umwelt und Mensch, die Minimierung indirekter Auswirkungen sowie eine gerechte und nachvollziehbare Abwägung zwischen möglichen Standorten mitberücksichtigen. Die strukturierte Einbindung von Umweltverträglichkeitsinstrumenten in allen drei Phasen ist in diesem Verfahren vorgesehen und auch die Umweltvorsorge.

³⁹ Deutsch: Sorgfaltspflicht.

6 Schlussfolgerungen

Der sichere und dauerhafte Einschluss von CO₂ im Untergrund bildet die wesentliche Grundlage für Langzeitsicherheit und Umweltverträglichkeit. Um dieses Ziel zu erreichen, müssen direkte Umweltauswirkungen, wie technische Risiken beim Transport und der Injektion sowie geologische Gefahren wie CO₂-Leckagen möglichst wirksam vermieden werden. Eine umweltverträgliche CO₂-Speicherung erfordert daher nicht nur ein umfassendes Sicherheits- und Risikomanagement, sondern ebenso ein belastbares Überwachungskonzept, die systematische Berücksichtigung indirekter Umweltauswirkungen und eine frühzeitige sowie transparente Einbindung der Öffentlichkeit.

Darüber hinaus muss die CO₂-Speicherung so gestaltet sein, dass indirekte Umweltauswirkungen jenseits von potenziellen CO₂-Leckagen (bspw. durch den Aufbau von Infrastruktur oder während des Betriebs) und unzumutbare Belastungen für Mensch und Umwelt entlang der gesamten Prozesskette und über lange Zeiträume effektiv vermieden oder minimiert werden. Dies erfordert eine stärkere Berücksichtigung ökologischer und sozioökonomischer Faktoren bei der Identifikation umweltverträglicher CO₂-Speicher. Die Identifikation potenzieller CO₂-Speicher und vertiefte Prüfung umweltverträglicher Speicherstandorte muss daher im Sinne des Vorsorgeprinzips bereits frühzeitig das gesamte System CO₂-Speicherung in geologischen Formationen berücksichtigen.

Zahlreiche Studien liefern bereits fundierte Ansätze für die Identifikation geeigneter CO₂-Speicher und schlagen erste Kriterien zur Eingrenzung großräumiger geologischer Suchräume vor. Diese ermöglichen zwar eine erste generische Potenzialanalyse, zeigen aber besonders im Hinblick auf die Umweltverträglichkeit Lücken. Wohingegen zunehmend Umweltfaktoren berücksichtigt werden, finden insbesondere indirekte Auswirkungen entlang der gesamten Prozesskette bislang nur begrenzt Eingang in bestehende Bewertungsrahmen.

Auch das Kohlendioxid-Speicherungsgesetz (§ 7 Abs. 3 (KSpTG/25.11.2025)) schreibt vor, dass potenzielle Kohlendioxidspeicher und Speicherkomplexe „nach Maßgabe einschlägiger Kriterien der Anlage 1 und weiterer geeigneter Methoden“ auf ihre Eignung für eine langzeitsichere Speicherung zu charakterisieren und zu bewerten sind. Eine Bewertung erfolgt jedoch erst auf Basis von Erkenntnissen aus Geländeuntersuchungen durch die Betreiber. Ein Verfahren zur Identifikation umweltverträglicher CO₂-Speicher sollte hingegen früher ansetzen – also vor Betreiberaktivitäten – und könnte dabei weitergehende verbindliche Mindestanforderungen und Ausschlusskriterien definieren, welche potenzielle CO₂-Speicher erfüllen müssen, bevor Betreiber für diese eine Untersuchungsgenehmigung beantragen.

Für eine umweltgerechte Standortauswahl wäre es daher notwendig, klare Ausschlusskriterien und belastbare Mindestanforderungen zu definieren, die bereits in der frühen Phase der Identifikation umweltverträglicher CO₂-Speicher Anwendung finden. Ergänzend ermöglichen differenzierte Umweltkriterien eine weiterführende vergleichende Abwägung potenzieller Speicher im Rahmen vertiefter Prüfungen. So kann nicht nur die technische und geologische Eignung, sondern auch eine hohe Umweltverträglichkeit im Sinne eines präventiven und nachhaltigen Speicherbetriebs bei der Standortauswahl vorausgesetzt werden.

Dennoch bestehen auch bei der Identifikation umweltverträglicher CO₂-Speicher erhebliche Ungewissheiten, für die es erforderlich ist, einen geeigneten Umgang zu finden. Die Potentialanalyse und Vorauswahl werden weitgehend auf bereits vorliegenden geologischen Daten beruhen müssen. Umfassende Erkundungen des Untergrunds erfolgen erst im Zuge der vertieften Prüfung im weiteren Verlauf der Standortauswahl.

Infolgedessen basieren frühe Bewertungen häufig auf generischen Annahmen zu gebietsspezifischen geologischen Verhältnissen. Aussagen zur Injektivität und Speicherkapazität potenzieller Speicher sind in dieser Phase mit hohen Ungewissheiten behaftet. Diese Eigenschaften unterliegen zudem dynamischen Prozessen – zunächst als günstig bewertete Verhältnisse können sich mit Beginn der Injektion rasch und erheblich verschlechtern. Die Identifikation umweltverträglicher CO₂-Speicher ist daher als iterativer Prozess zu verstehen, wodurch ggf. auch Rücksprünge auf frühere Verfahrensschritte erfolgen können und diese daher frühzeitig mit eingeplant werden müssen. Insgesamt liegen bislang nur begrenzte praktische Erfahrungen zur belastbaren Einschätzung von Injektivität und Speicherkapazität vor. Insbesondere langfristige Risiken und das Langzeitverhalten von CO₂ im Untergrund sind mit großer Ungewissheit behaftet. Selbst nach detaillierter Analyse gebietsspezifischer Daten bleiben Unwägbarkeiten bestehen.

Diese Ungewissheiten müssen im Verfahren zur Identifikation und vertieften Prüfung umweltverträglicher CO₂-Speicher systematisch berücksichtigt und schrittweise – etwa durch eine risikobasierte Analyse – adressiert werden. Erfahrungen aus dem Standortauswahlverfahren für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle zeigen, dass eine stufenweise und iterativ angewendete Methodik mit Mindestanforderungen und Ausschlusskriterien erfolgreich sein kann. So lässt sich mit zunehmendem Erkenntnisfortschritt ein höherer Bewertungsdetailgrad erreichen.

Die Umweltverträglichkeit ist als durchgängiges Leitsystem des gesamten Auswahlverfahrens zu verstehen. Bereits in der vertieften Prüfphase muss geklärt sein, wie die Langzeitsicherheit – und damit der Schutz der Umwelt über Jahrhunderte – voraussichtlich gewährleistet und zukünftig nachgewiesen werden soll. Nur so kann unter Beachtung des Vorsorgeprinzips ein umweltverträglicher Speicherbetrieb möglichst langfristig erfolgen. Die Umweltverträglichkeitsprüfung ist hierbei das zentrale Instrument: Sie bewertet systematisch alle relevanten Umweltaspekte und bringt deren Auswirkungen in die Entscheidungsfindung ein.

Auch wenn eine Umweltverträglichkeitsprüfung gesetzlich erst im Rahmen des Planfeststellungsverfahrens vorgesehen ist, zeigt das Standortauswahlverfahren für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle, dass eine frühere Integration von Umweltprüfungen sinnvoll ist. Strategische Umweltprüfungen sowie sozio-ökonomische Potenzialanalysen können bereits in frühen Verfahrensphasen wesentliche Erkenntnisse liefern. Dieses Vorgehen ließe sich auch auf die CO₂-Speicherung übertragen, um Umweltaspekte schon vor der Umweltverträglichkeitsprüfung systematisch zu erfassen und in die vertiefte Standortbewertung einzubeziehen. Dadurch könnten bereits bei der Vorauswahl potenzieller CO₂-Speicher aus Umweltverträglichkeitssicht weniger geeignete Speicher vorzeitig ausgeschlossen oder eingegrenzt werden.

In der konkreten Ausgestaltung des Vorgehens verfolgen die benachbarten Nordseeanrainerstaaten bereits teils unterschiedliche Ansätze. In Dänemark werden bspw. nach vorangegangener Prüfung und Bewertung gezielt potenziell geeignete Speichergebiete ausgeschrieben, für welche sich Unternehmen bewerben und Untersuchungs- und Erkundungsgenehmigungen beantragen können. Dieses Vorgehen ermöglicht bereits vor der Ausschreibung zur Vergabe der Genehmigungen für die potenziell geeigneten Gebiete eine Strategische Umweltprüfung (SUP) und ein Environmental Impact Assessment (EIA, Umweltrisikoprüfung) durchführen zu können.

Dadurch kann eine systematische Berücksichtigung umwelt- und raumordnungsbezogener Kriterien sichergestellt werden. Nichtsdestotrotz ist abzusehen, dass unter Berücksichtigung

bestehender Nutzungskonkurrenzen wahrscheinlich nur ein Bruchteil, der zum jetzigen Zeitpunkt noch relativ vielversprechenden theoretischen Abschätzungen der CO₂-Speicherpotenziale genutzt werden kann. Hinsichtlich der drohenden Übernutzung räumlicher Kapazitäten und zu erwartenden einhergehenden Umweltauswirkungen, wird Umweltverträglichkeit deshalb am ehesten mit einem möglichst moderaten Einsatz der CO₂-Speicherung zu erreichen sein.

7 Quellenverzeichnis

- Aarnes, J. E., Selmer Olsen, S., Carpenter, M. E., & Flach, T. A. (2009). Towards guidelines for selection, characterization and qualification of sites and projects for geological storage of CO₂. *Energy Procedia*, 1(1), 1735–1742. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2009.01.227>
- Abrahamsen, K. (2012). The ship as an underwater noise source. *Proceedings of Meetings on Acoustics*, 17(1), 070001. <https://doi.org/10.1121/1.4772953>
- Alcalde, J., Flude, S., Wilkinson, M., Johnson, G., Edlmann, K., Bond, C. E., Scott, V., Gilfillan, S. M. V., Ogaya, X., & Haszeldine, R. S. (2018). Estimating geological CO₂ storage security to deliver on climate mitigation. *Nature Communications*, 9, 2201. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-04423-1>
- Alcalde, J., Heinemann, N., James, A., Bond, C. E., Ghanbari, S., Mackay, E. J., Haszeldine, R. S., Faulkner, D. R., Worden, R. H., & Allen, M. J. (2021). A criteria-driven approach to the CO₂ storage site selection of East Mey for the Acorn project in the North Sea. *Marine and Petroleum Geology*, 133, 105309. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2021.105309>
- Anders, S., Liebe, U., & Meyerhoff, J. (2024). Cross-border CO₂ transport decreases public acceptance of carbon capture and storage. *Nature Climate Change*, 14(7), 692–695. <https://doi.org/10.1038/s41558-024-02023-0>
- Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd). (2002). Auswahlverfahren für Endlagerstandorte: Empfehlungen des AkEnd. https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Endlagerung/Downloads/Standortauswahl/Arbeitskreis_Auswahlverfahren_Endlagerstandorte/kmat_01_akend_data.pdf [letzter Aufruf am 06.03.2026]
- Bachu, S. (2000). Sequestration of CO₂ in geological media: Criteria and approach for site selection in response to climate change. *Energy Conversion and Management*, 41(9), 953–970. [https://doi.org/10.1016/S0196-8404\(99\)00149-1](https://doi.org/10.1016/S0196-8404(99)00149-1)
- Bachu, S. (2003). Screening and ranking of sedimentary basins for sequestration of CO₂ in geological media in response to climate change. *Environmental Geology*, 44(3), 277–289. <https://doi.org/10.1007/s00254-003-0762-9>
- Bachu, S., Hawkes, C., Lawton, D., Pooladi-Darvish, M., & Perkins, E. (2009). CCS site characterisation criteria. IEA Greenhouse Gas R&D Programme (IEAGHG). <https://publications.ieaghg.org/technicalreports/2009-10%20CCS%20Site%20Selection%20and%20Characterisation%20Criteria.pdf> [letzter Aufruf am 06.03.2026]
- Bartel, S., & Janssen, G. (2016). Raumplanung im Untergrund unter besonderer Berücksichtigung des Umweltschutzes. *Natur und Recht*, 38(4), 237–246. <https://doi.org/10.1007/s10357-016-2992-0>
- Blohm, M., Erdmenger, C., Ginzky, H., Marty, M., Beckers, R., Briem, S., Clausen, U., Lohse, C., Rechenberg, J., Schäfer, L., & Sternkopf, R. (2006). Technische Abscheidung und Speicherung von CO₂ – nur eine Übergangslösung: Positionspapier des Umweltbundesamtes zu möglichen Auswirkungen, Potenzialen und Anforderungen. Umweltbundesamt (Hrsg.), Dessau-Roßlau. <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/3074.pdf> [letzter Aufruf am 06.03.2026]
- Braun, C. (2017). Not in my backyard: CCS sites and public perception of CCS. *Risk Analysis*, 37(12), 2264–2275. <https://doi.org/10.1111/risa.12793>
- Bump, A., Bakhshian, S., Hovorka, S., & Rhodes, J. (2022). Criteria for depleted reservoirs to be developed for CO₂ storage (IEAGHG Technical Report 2022-01). International Energy Agency Greenhouse Gas R&D Programme. <https://publications.ieaghg.org/technicalreports/2022-01%20Criteria%20for%20Depleted%20Reservoirs%20to%20be%20Developed%20for%20CO2%20Storage.pdf> [letzter Aufruf am 06.03.2026]

Bundesberggesetz (BBergG). (1980, 13. August). BGBl. I S. 1310.

<https://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?jumpTo=bgbl180s1310.pdf>

Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE) mbH. (2022). Zeitliche Betrachtung des Standortauswahlverfahrens aus Sicht der BGE: Rahmenterminplanung für Schritt 2 der Phase I bis zum Vorschlag der Standortregionen und zeitliche Abschätzungen für Phase II und III.

https://www.bge.de/fileadmin/user_upload/Standortsuche/Wesentliche_Unterlagen/05_-_Meilensteine/Zeitliche_Betrachtung_des_Standortauswahlverfahrens_2022/20221216_Zeitliche_Betrachtung_StandAW-48_barrierefrei.pdf [letzter Aufruf am 06.03.2026]

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWE). (2020). Die nationale Wasserstoffstrategie.

<https://www.bundeswirtschaftsministerium.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/die-nationale-wasserstoffstrategie.pdf> [letzter Aufruf am 06.03.2026]

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK). (2022). Evaluierungsbericht der Bundesregierung zum Kohlendioxid-Speicherungsgesetz (KSpG).

<https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/Energiedaten/evaluierungsbericht-bundesregierung-kspg.pdf> [letzter Aufruf am 06.03.2026]

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK). (2023). Fortschreibung der nationalen Wasserstoffstrategie.

<https://www.bundeswirtschaftsministerium.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/fortschreibung-nationale-wasserstoffstrategie.pdf> [letzter Aufruf am 06.03.2026]

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK). (2024a). Eckpunkte der Bundesregierung für eine Carbon Management Strategie. <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/E/240226-eckpunkte-cms.pdf> [letzter Aufruf am 06.03.2026]

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK). (2024b). Langfriststrategie Negativemissionen zum Umgang mit unvermeidbaren Restemissionen (LNe): Eckpunkte.

<https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/E/240226-eckpunkte-negativemissionen.pdf> [letzter Aufruf am 06.03.2026]

Bundesregierung. (2025). Entwurf eines Gesetzes zur Beschleunigung der Verfügbarkeit von Wasserstoff und zur Änderung weiterer rechtlicher Rahmenbedingungen für den Wasserstoffhochlauf sowie zur Änderung weiterer energierechtlicher Vorschriften (Gesetzesentwurf Wasserstoffhochlauf). Deutscher Bundestag, Drucksache 21/2506. <https://dserver.bundestag.de/btd/21/025/2102506.pdf> [letzter Aufruf am 06.03.2026]

Burchardt, J., Franke, K., Herhold, P., Hohaus, M., Humpert, H., Päivärinta, J., Richenhagen, E., Ritter, D., Schönberger, S., Schröder, J., Strobl, S., Tries, C., & Türpitz, A. (2021). Klimapfade 2.0: Ein Wirtschaftsprogramm für Klima und Zukunft – Gutachten für den BDI. Boston Consulting Group. <https://web-assets.bcg.com/58/57/2042392542079ff8c9ee2cb74278/klimapfade-study-german.pdf> [letzter Aufruf am 06.03.2026]

Callas, C., Saltzer, S. D., Davis, J. S., Hashemi, S. S., Kovscek, A. R., Okoroafor, E. R., Wen, G., Zoback, M. D., & Benson, S. M. (2022). Criteria and workflow for selecting depleted hydrocarbon reservoirs for carbon storage. *Applied Energy*, 324, 119668. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119668>

Cames, M., Krob, F., Hermann, H., Kurth, S., & von Vittorelli, L. (2024). Securing the underground: Managing the risks of carbon storage through effective policy design. Öko-Institut.

<https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Securing-the-Underground.pdf> [letzter Aufruf am 06.03.2026]

Cames, M., Mader, C., Hermann, A., Köhler, A. R., Malinverno, N., Möller, M., Niesen, B., Som, C., & Wäger, P. (2023). Chancen und Risiken von Methoden zur Entnahme und Speicherung von CO₂ aus der Atmosphäre. vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich. <https://doi.org/10.3218/4153-8>

- Carpenter, M., Kvien, K., & Aarnes, J. (2011). The CO₂QUALSTORE guideline for selection, characterisation and qualification of sites and projects for geological storage of CO₂. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 5(4), 942–951. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2010.12.005>
- CDRmare. (2023). Chancen und Hürden der marinen geologischen CO₂-Speicherung: Policy brief (CDRmare Research Mission). <https://doi.org/10.3289/CDRmare.15>
- CDU, CSU, & SPD. (2025). Verantwortung für Deutschland: Koalitionsvertrag der 21. Legislaturperiode. https://www.koalitionsvertrag2025.de/sites/www.koalitionsvertrag2025.de/files/koav_2025.pdf [letzter Aufruf am 06.03.2026]
- Center for International Environmental Law (CIEL). (2023). Deep trouble: The risks of offshore carbon capture and storage. <https://www.ciel.org/wp-content/uploads/2023/11/Deep-Trouble-The-Risks-of-Offshore-Carbon-Capture-and-Storage.pdf> [letzter Aufruf am 06.03.2026]
- Chadwick, R. A., Arts, R., Bernstone, C., May, F., Thibeu, S., & Zweigel, P. (Hrsg.). (2008). Best practice for the storage of CO₂ in saline aquifers: Observations and guidelines from the SACS and CO₂STORE projects (British Geological Survey Occasional Publication 14). British Geological Survey. <https://core.ac.uk/download/pdf/63085.pdf> [letzter Aufruf am 06.03.2026]
- Connelly, D. P., Bull, J. M., Flohr, A., Schaap, A., Koopmans, D., Blackford, J. C., White, P. R., James, R. H., Pearce, C., Lichtschlag, A., Achterberg, E. P., de Beer, D., Roche, B., Li, J., Saw, K., Alendal, G., Avlesen, H., Brown, R., Borisov, S. M., & Yakushev, E. (2022). Assuring the integrity of offshore carbon dioxide storage. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 166, 112670. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112670>
- Dean, M., Blackford, J., Connelly, D., & Hines, R. (2020). Insights and guidance for offshore CO₂ storage monitoring based on the QICS, ETI MMV, and STEM-CCS projects. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 100, 103120. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2020.103120>
- de Jonge-Anderson, I., & Underhill, J. R. (2022). Use of subsurface geology in assessing the optimal co-location of CO₂ storage and wind energy sites. *Earth Science, Systems and Society*, 2, 10055. <https://doi.org/10.3389/esss.2022.10055>
- Dütschke, E., Alsheimer, S., Bertoldo, R., Bagci, A., Delicado, A., Gonçalves, L., Kappler, L., López-Asensio, S., Mays, C., Oltra, C., Poumadère, M., Prades, A., Preuß, S., Rowland, J., & Schmidt, L. (2022). Community acceptance: Findings from community profiles and first local survey. <https://doi.org/10.24406/PUBLICA-760>
- Dutta, R., Singh, R., Chakraborty, R., Kundu, G., & Mandal, A. (2025). Optimisation of CO₂ storage in saline aquifers: A field-scale mechanistic study on injection strategies, pressure management, and long-term containment. *Environmental Earth Sciences*, 84(13), 455. <https://doi.org/10.1007/s12665-025-12390-2>
- Entsorgungskommission (ESK). (2024). Positionspapier: Standortauswahlverfahren für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle – Beschleunigungspotenziale und strategische Vorgehensweise bei der Identifikation von Standortregionen (Phase I der Standortauswahl). https://www.entsorgungskommission.de/sites/default/files/reports/ESK_Positionspapier_ZEIT_AuswahlverfahrenBeschleunigungspotenziale_ESK118_251024.pdf [letzter Aufruf am 06.03.2026]
- Equinor. (2025, 25. August). Northern Lights JV has successfully stored first CO₂ [Pressemitteilung]. <https://norlights.com/news/northern-lights-jv-has-successfully-stored-first-co%E2%82%82/> [letzter Aufruf am 06.03.2026]
- Durchführungsverordnung (EU) 2018/2066 der Kommission vom 19. Dezember 2018 über die Überwachung von und die Berichterstattung über Treibhausgasemissionen gemäß der Richtlinie 2003/87/EG des Europäischen Parlaments und des Rates und zur Änderung der Verordnung (EU) Nr. 601/2012 der Kommission. (2018, 19. Dezember). ABl. L 334, 1–94. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018R2066>

Europäische Kommission. (2020). Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen: Eine Wasserstoffstrategie für ein klimaneutrales Europa (COM(2020) 301 final). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:52020DC0301>

European Commission. (2024). Implementation of Directive 2009/31/EC on the geological storage of carbon dioxide: Characterisation of the storage complex, CO₂ stream composition, monitoring and corrective measures (Guidance document 2). <https://doi.org/10.2834/7032239>

European Environment Agency (EEA). (2011). Air pollution impacts from carbon capture and storage (CCS). <https://www.eea.europa.eu/publications/carbon-capture-and-storage> [letzter Aufruf am 06.03.2026]

Fink, M., & Ratter, B. (2024). Blurring societal acceptance by lack of knowledge—insights from a German coastal population study on blue carbon. *Frontiers in Climate*, 6, 1283712. <https://doi.org/10.3389/fclim.2024.1283712>

Friedmann, S. J. (2007). Site characterization and selection guidelines for geological carbon sequestration (UCRL-TR-234408). Lawrence Livermore National Laboratory. <https://doi.org/10.2172/915602>

Fugro. (2022). Safety study CCS and offshore wind farms: Project technical outline (F195696-002). https://offshorewind.rvo.nl/file/download/93d41460-489f-481c-a639-d9c42f62d0c9/f195696-rvo-ccs-owf-report-outline_final_v2.pdf [letzter Aufruf am 06.03.2026]

Fuhrmann, A., Knopf, S., Thöle, H., Kästner, F., Ahlrichs, N., Stück, H. L., Schlieder-Kowitz, A., & Kuhlmann, G. (2024). CO₂ storage potential of the Middle Buntsandstein Subgroup – German sector of the North Sea. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 136, 104175. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2024.104175>

Furre, A.-K., Meneguolo, R., Pinturier, L., & Bakke, K. (2020). Planning deep subsurface CO₂ storage monitoring for the Norwegian full-scale CCS project. *First Break*, 38(10), 55–60. <https://doi.org/10.3997/1365-2397.fb2020074>

Furre, A.-K., Warchol, M. J., Alnes, H., & Pontén, A. S. M. (2024). Sleipner 26 years: How well-established subsurface monitoring work processes have contributed to successful offshore CO₂ injection. *Geoenergy*, 2(1), geoenergy2024-015. <https://doi.org/10.1144/geoenergy2024-015>

Gesetz über die Elektrizitäts- und Gasversorgung (Energiewirtschaftsgesetz – EnWG). (2005, 7. Juli). BGBl. I S. 1970. <https://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?jumpTo=bgbl105s1970.pdf>

Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVPG). (2017, 20. Juli). BGBl. I S. 2808. <https://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?jumpTo=bgbl117s2808.pdf>

Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle (Standortauswahlgesetz – StandAG). (2017, 5. Mai). BGBl. I S. 1074. <https://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?jumpTo=bgbl117s1074.pdf>

Gholami, R., Raza, A., & Iglaier, S. (2021). Leakage risk assessment of a CO₂ storage site: A review. *Earth-Science Reviews*, 223, 103849. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103849>

Gidden, M. J., Joshi, S., Armitage, J. J., Christ, A.-B., Boettcher, M., Brutschin, E., Köberle, A. C., Riahi, K., Schellnhuber, H. J., Schleussner, C.-F., & Rogelj, J. (2025). A prudent planetary limit for geologic carbon storage. *Nature*, 645(8079), 124–132. <https://doi.org/10.1038/s41586-025-09423-y>

Gores, S., Graichen, J., Flohr-Reija, M., & Jörß, W. (2025). Deutsche Szenarien zur Treibhausgasneutralität im Vergleich: Wege zur Treibhausgasneutralität unter Berücksichtigung von technischen und natürlichen Senken (Teilbericht, FKZ 3722 41 502 0). Umweltbundesamt (Hrsg.), Dessau-Roßlau. <https://doi.org/10.60810/openumwelt-7969>

Grataloup, S., Bonijoly, D., Brosse, E., Dreux, R., Garcia, D., Hasanov, V., Lescanne, M., Renoux, P., & Thoraval, A. (2009). A site selection methodology for CO₂ underground storage in deep saline aquifers: Case of the Paris Basin. *Energy Procedia*, 1(1), 2929–2936. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2009.02.068>

Harati, S., Rezaei Gomari, S., Ramegowda, M., & Pak, T. (2024). Multi-criteria site selection workflow for geological storage of hydrogen in depleted gas fields: A case for the UK. *International Journal of Hydrogen Energy*, 51, 143–157. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.10.345>

Harthan, R., Repenning, J., Bei der Wieden, M., Bürger, V., Braungardt, S., Cook, V., Emele, L., Hennenberg, K., Kasten, P., Ludig, S., Mendelevitch, R., Moosmann, L., Pfeiffer, M., Scheffler, M., Steinbach, I., Wiegmann, K., Bussmann, S., Fleiter, T., Lotz, M. T., & Yu, S. (2025). Ambitionierte Pfade für Treibhausgasneutralität in Deutschland: CARESupreme und CARETech – Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt Transformation zu einem vollständig treibhausgasneutralen Deutschland (CARE). Umweltbundesamt (Hrsg.), Dessau-Roßlau. <https://doi.org/10.60810/openumwelt-7983>

Hauber, G. (2023). Norway's Sleipner and Snøhvit CCS: Industry models or cautionary tales? Institute for Energy Economics and Financial Analysis (IEEFA). <https://ieefa.org/sites/default/files/2023-06/Norway%E2%80%99s%20Sleipner%20and%20Sn%C3%B8hvit%20CCS-%20Industry%20models%20or%20cautionary%20tales.pdf> [letzter Aufruf am 06.03.2026]

International Association of Oil & Gas Producers (IOGP) (Hrsg.). (2023). Seabed and overburden integrity monitoring for offshore CO₂ storage (Report 657). <https://www.iogp.org/bookstore/product/seabed-and-overburden-integrity-monitoring-for-offshore-co2-storage/> [letzter Aufruf am 06.03.2026]

International Energy Agency Greenhouse Gas R&D Programme (IEAGHG). (2023a). Risk management: Network meeting report (Technical Report 03). <https://publications.ieaghg.org/technicalreports/2023-TR03%20Risk%20Management%20Network%20Meeting%20Report.pdf> [letzter Aufruf am 06.03.2026]

International Energy Agency Greenhouse Gas R&D Programme (IEAGHG). (2023b). Monitoring: Network meeting report (Technical Report 05). <https://publications.ieaghg.org/technicalreports/2023-TR05%20Monitoring%20Network%20Meeting%20Report.pdf> [letzter Aufruf am 06.03.2026]

International Maritime Organization (IMO). (2012). Specific Guidelines for the Assessment of Carbon Dioxide for Disposal into Sub-Seabed Geological Formations: LC 34/15, annex 8. <https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/2012%20SPECIFIC%20GUIDELINES%20FOR%20THE%20ASSESSMENT%20OF%20CARBON%20DIOXIDE.pdf> [letzter Aufruf am 06.03.2026]

International Organization for Standardization. (2026). ISO 27914:2026: Carbon dioxide capture, transportation and geological storage — Geological storage. <https://www.iso.org/standard/84578.html>

International Organization for Standardization. (2017). ISO 27914:2017: Carbon dioxide capture, transportation and geological storage — Geological storage. <https://www.iso.org/standard/64148.html>

Janssen, G. (2024). Drum plane, wer sich ewig bindet – CCS in der Meeresraumordnung. *Zeitschrift für Europäisches Umwelt- und Planungsrecht*, 22(2), 165–179. <https://eurup.lexxion.eu/article/EURUP/2024/2/6> [letzter Aufruf am 06.03.2026]

Janssen, G., Birnstengel, P., Magel, I., & Zegada, M. E. (2017). Umweltbelange der Meeresraumordnung in der deutschen ausschließlichen Wirtschaftszone (AWZ) unter Berücksichtigung des Ökosystemansatzes: Endbericht. Umweltbundesamt (Hrsg.), Dessau-Roßlau. <https://doi.org/10.60810/openumwelt-7274>

Kahnt, R., Gabriel, A., Seelig, C., Freund, A., & Homilius, A. (2015). Unterirdische Raumplanung - Vorschläge des Umweltschutzes zur Verbesserung der über- und untertägigen Informationsgrundlagen, zur Ausgestaltung des Planungsinstrumentariums und zur nachhaltigen Lösung von Nutzungskonflikten, Teil 1: Geologische Daten. Umweltbundesamt (Hrsg.), Dessau-Roßlau. <https://doi.org/10.60810/openumwelt-5897>

- Kaldi, J. G., Gibson-Poole, C., & Payenberg, T. (2009). Geological input to selection and evaluation of CO₂ geosequestration sites. <https://www.semanticscholar.org/paper/Geological-Input-to-Selection-and-Evaluation-of-CO2-Kaldi-Gibson-Poole/69a07f7dd901009c9f1445fc1d0ac58d425621e6> [letzter Aufruf am 06.03.2026]
- Knopf, S., & May, F. (2017). Comparing methods for the estimation of CO₂ storage capacity in saline aquifers in Germany: Regional aquifer based vs. structural trap-based assessments. *Energy Procedia*, 114, 4710–4721. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.1605>
- Knopf, S., May, F., Müller, C., & Gerling, P. (2010). Neuberechnung möglicher Kapazitäten zur CO₂-Speicherung in tiefen Aquifer-Strukturen. *Energiewirtschaftliche Tagesfragen*, 60(4), 76–80. https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Nutzung-tieferer-Untergrund/Downloads/ET-knopf-2010.pdf?__blob=publicationFile&v=2 [letzter Aufruf am 06.03.2026]
- Kohlendioxid-Speicherung-und-Transport-Gesetz (KSpTG). (2025, 25. November). BGBl. I S. 1726. <https://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?jumpTo=bgbl125s1726.pdf>
- Krohn, J., Spieth-Achnich, A., Schütte, S., Mbah, M., Lampke, A., Hünecke, K., Fouquet, D., Kuhbier, J., & Reinhardt, T. (2024). Unterstützung des BASE bei der Prozessanalyse des Standortauswahlverfahrens (PaSta) (FKZ 4718F10001). Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE). URN-Nr.: urn:nbn:de:0221-2024080245247. https://www.base.bund.de/shareddocs/downloads/de/fachinfo/fa/pasta_abschlussbericht.pdf?__blob=publicationFile&v=2 [letzter Aufruf am 06.03.2026]
- Krupp, R. (2025). Geologische Risiken der CO₂-Verpressung in der Nordsee. <https://www.greenpeace.de/publikationen/20250502-greenpeace-studie-ccs-risiken-nordsee.pdf> [letzter Aufruf am 06.03.2026]
- Kühn, M. (2011). CO₂-Speicherung: Chancen und Risiken. *Chemie in unserer Zeit*, 45(2), 126–138. <https://doi.org/10.1002/ciuz.201100538>
- Lane, J., Greig, C., & Garnett, A. (2021). Uncertain storage prospects create a conundrum for carbon capture and storage ambitions. *Nature Climate Change*, 11(11), 925–936. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01175-7>
- Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik. (2013). Geothermie-Atlas zur Darstellung möglicher Nutzungskonkurrenzen zwischen CCS und tiefer Geothermie: Endbericht (FKZ 0325257A/B). https://www.geotis.de/homepage/sitecontent/info/publication_data/final_reports/final_reports_data/Endbericht_Geothermie_Atlas.pdf [letzter Aufruf am 06.03.2026]
- Lewandowska-Śmierzchalska, J., Tarkowski, R., & Uliasz-Misiak, B. (2018). Screening and ranking framework for underground hydrogen storage site selection in Poland. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(9), 4401–4414. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.01.089>
- Lindbæck, M. E. (2025, 25. März). Norway storage licences: Carbon capture, utilisation, and storage [Präsentation]. Norwegian Ministry of Energy. <https://unece.org/sites/default/files/2025-04/Item%2010%20-%20Morten%20Lindbaeck%20-%20CCS.pdf> [letzter Aufruf am 06.03.2026]
- Llamas, B., & Cámara, A. (2014). Application of multicriteria algorithm to select suitable areas for storing CO₂: CO₂SiteAssess software. *Energy Procedia*, 63, 4977–4986. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.11.527>
- Llamas, B., & Cienfuegos, P. (2012). Multicriteria decision methodology to select suitable areas for storing CO₂ (23 (2-3)). <https://doi.org/10.1260/0958-305X.23.2-3.249>
- Lübbbers, S., Lengning, S., Muralter, F., Kulkarni, P., Krob, F., Köhler, A. R., & Jörß, W. (2026). Techno-ökonomische Analyse von CO₂-Entnahmetechnologien und Bewertung der CO₂-Speicherkapazitäten und -Projekte in Europa (FKZ 3722 41 502 0). Umweltbundesamt (Hrsg.), Dessau-Roßlau <https://doi.org/10.60810/openumwelt-7960>

- May, F. (2024). Geotechnische Implikationen rechtlicher Rahmenbedingungen für die Erkundung und Überwachung von CO₂-Speichern unter dem Meeresboden. GEOSTOR/Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). <https://doi.org/10.3289/CDRmare.35>
- McCauley, R. D., Day, R. D., Swadling, K. M., Fitzgibbon, Q. P., Watson, R. A., & Semmens, J. M. (2017). Widely used marine seismic survey air gun operations negatively impact zooplankton. *Nature Ecology & Evolution*, 1(7), 195. <https://doi.org/10.1038/s41559-017-0195>
- McLean, D. J., Bond, T., Partridge, J. C., Rouse, S., & Love, M. S. (2020). The impact of oil and gas infrastructure in marine ecosystems: A global vision for informing decommissioning decisions. *The APPEA Journal*, 60(2), 476–479. <https://doi.org/10.1071/AJ19153>
- Mears, E. M., Underhill, J. R., & de Jonge-Anderson, I. (2025). The role of structural compartmentalization in carbon storage site selection in Permian (Rotliegend Group) reservoirs in the southern North Sea. *Energy Geoscience Conference Series*, 1(1), egc1-2023-36. <https://doi.org/10.1144/egc1-2023-36>
- Meneguolo, R., Thompson, N., Acuna, C., Furre, A.-K., & Milovanova, E. (2024). Subsurface maturation in a saline aquifer CCS project development: Experience from the Northern Lights project, offshore Norway. *Geoenergy*, 2(1), geoenergy2024-013. <https://doi.org/10.1144/geoenergy2024-013>
- Metz, B., Davidson, O., de Coninck, H., Loos, M., & Meyer, L. (2005). Special report on carbon dioxide capture and storage. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPPC). https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/srccs_wholereport-1.pdf [letzter Aufruf am 06.03.2026]
- Nesselhauf, L., Fischer, C., Müller, S., Godron, P., Huneke, F., Koch, M., Wauer, N., Weiß, U., Metz, J., Münnich, P., Brizay, A., Chemnitz, C., Klümper, W., Elmer, C.-F., Vieweg, M., & Wietschel, J. (2024). Klimaneutrales Deutschland – Von der Zielsetzung zur Umsetzung: Vertiefung der Szenarienpfade. *Agora Energiewende*. https://www.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2023/2023-30_DE_KNDE_Update/A-EW_344_Klimaneutrales_Deutschland_WEB.pdf [letzter Aufruf am 06.03.2026]
- Oldenburg, C. M. (2008). Screening and ranking framework for geologic CO₂ storage site selection on the basis of health, safety, and environmental risk. *Environmental Geology*, 54(8), 1687–1694. <https://doi.org/10.1007/s00254-007-0947-8>
- Oldenburg, C. M., Jordan, P. D., Nicot, J.-P., Mazzoldi, A., Gupta, A. K., & Bryant, S. L. (2011). Leakage risk assessment of the In Salah CO₂ storage project: Applying the certification framework in a dynamic context. *Energy Procedia*, 4, 4154–4161. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.02.360>
- Popper, A. N., & Hawkins, A. D. (Eds.). (2023). *Effects of noise on aquatic life*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-10417-6>
- Purr, K., & Spindler, J. (2023). Carbon Capture and Storage (CCS) - Diskussionsbeitrag zur Integration in die nationalen Klimaschutzstrategien, Position. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau. <https://doi.org/10.60810/openumwelt-3631>
- Raumordnungsgesetz (ROG). (2008, 22. Dezember). BGBl. I S. 2986. <https://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?jumpTo=bgbl108s2986.pdf>
- Raumordnungsplan für die deutsche ausschließliche Wirtschaftszone in der Nordsee und in der Ostsee (Anlage zur Verordnung über die Raumordnung in der deutschen ausschließlichen Wirtschaftszone in der Nordsee und in der Ostsee). (2021, 19. August). BGBl. I S. 3886. <https://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?jumpTo=bgbl121s3886.pdf>
- Raza, A., Rezaee, R., Gholami, R., Bing, C. H., Nagarajan, R., & Hamid, M. A. (2016). A screening criterion for selection of suitable CO₂ storage sites. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 28, 317–327. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2015.11.053>

Razak, A. A., Saaid, I. M., Husein, N., Zaidin, M. F., & Mohamad Sabil, K. (2023). Physical and chemical effect of impurities in carbon capture, utilisation and storage. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 1–12. <https://doi.org/10.1007/s13202-023-01616-3>

Richtlinie 2009/31/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. April 2009 über die geologische Speicherung von Kohlendioxid und zur Änderung der Richtlinie 85/337/EWG des Rates sowie der Richtlinien 2000/60/EG, 2001/80/EG, 2004/35/EG, 2006/12/EG und 2008/1/EG des Europäischen Parlaments und des Rates sowie der Verordnung (EG) Nr. 1013/2006. (2009, 23. April). ABl. L 140, 114–135. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:02009L0031-20181224>

Ringrose, P. S., & Sæther, Ø. (2020, 26. Oktober). CO₂ injection operations: Insights from Sleipner and Snøhvit [Präsentation]. Carbon Capture Utilisation and Storage Conference (virtuelle Veranstaltung), Aberdeen. https://www.spe-aberdeen.org/wp-content/uploads/2020/11/Mon_Equinor_SPE-CCUS-Insights-from-Sleipner-and-Sn%C2%A2hvit-26Oct2020.pdf [letzter Aufruf am 06.03.2026]

Rütters, H., & Löschke, S. (2024). CO₂-Speicherung im Meeresgebiet – Nutzungskonflikte und Einbeziehung in die Meeresraumplanung? Bericht zum Fachworkshop des Forschungsverbundes GEOSTOR der Forschungsmission CDRmare am 11. Oktober 2023 im Geozentrum Hannover. CDRmare. <https://doi.org/10.3289/CDRmare.34>

Schulze, F., Keimeyer, F., Schöne, R., Westphal, I., Janssen, G., Bartel, S. & Seiffert, S. (2015). Unterirdische Raumplanung – Vorschläge des Umweltschutzes zur Verbesserung der über- und untertägigen Informationsgrundlagen, zur Ausgestaltung des Planungsinstrumentariums und zur nachhaltigen Lösung von Nutzungskonflikten, Teil 2: planerische und rechtliche Aspekte. Umweltbundesamt (Hrsg.), Dessau-Roßlau. <https://www.uba.de/n34663de> [letzter Aufruf am 19.05.2026]

Schütte, P., Kohls, M., Kattau, S., Wittrock, E., Warnke, M., & Lienemann, A. (2018). Beschreibung und Bewertung möglicher Auswirkungen einer unterirdischen Speicherung von Kohlendioxid auf ausgewählte Umweltschutzgüter. Umweltbundesamt (Hrsg.), Dessau-Roßlau. <https://doi.org/10.60810/openumwelt-6568>

Sivle, L. D., Vereide, E. H., de Jong, K., Forland, T. N., Dalen, J., & Wehde, H. (2021). Effects of sound from seismic surveys on fish reproduction, the management case from Norway. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(4), 436. <https://doi.org/10.3390/jmse9040436>

Slade, R., Fradera, R., Pathak, M., Al Khourdajie, A., Belkacemi, M., van Diemen, R., Hasija, A., Lisboa, G., Luz, S., Malley, J., McCollum, D., Some, S., & Vyas, P. (2022). Climate change 2022: Mitigation of climate change: Working Group III contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). <https://doi.org/10.1017/9781009157926>

Solé, M., Kaifu, K., Mooney, T. A., Nedelec, S. L., Olivier, F., Radford, A. N., Vazzana, M., Wale, M. A., Semmens, J. M., Simpson, S. D., Buscaino, G., Hawkins, A., Aguilar de Soto, N., Akamatsu, T., Chauvaud, L., Day, R. D., Fitzgibbon, Q., McCauley, R. D., & André, M. (2023). Marine invertebrates and noise. *Frontiers in Marine Science*, 10, 1129057. <https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1129057>

Stiftung Wissenschaft und Politik (SWP). (2022). CO₂-Entnahme als integraler Baustein des europäischen »Green Deal«. SWP-Aktuell. <https://www.swp-berlin.org/publikation/co2-entnahme-als-integraler-baustein-des-europaeischen-green-deal> [letzter Aufruf am 06.03.2026]

Thöle, H., Bense, F., Stück, H., & Jähne-Klingberg, F. (2022). Potenziale des unterirdischen Speicher- und Wirtschaftsraumes im Norddeutschen Becken (TUNB): Abschlussbericht Teilprojekt 6: 3D-Strukturmodell Deutsche Nordsee. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). https://www.bgr.bund.de/EN/Themen/Nutzung-tieferer-Untergrund/Downloads/TUNB_AB_Synthesel_2022_en.pdf?__blob=publicationFile&v=2 [letzter Aufruf am 06.03.2026]

Uliasz-Misiak, B., Lewandowska-Śmierzchalska, J., & Matuła, R. (2024). Hydrogen storage potential in natural gas deposits in the Polish lowlands. *Energies*, 17(2), 374. <https://doi.org/10.3390/en17020374>

Uliasz-Misiak, B., & Misiak, J. (2024). Underground gas storage in saline aquifers: Geological aspects. *Energies*, 17(7), 1666. <https://doi.org/10.3390/en17071666>

Blohm, M., Erdmenger, C., Ginzky, H., Marty, M., Beckers, R., Briem, S., Clausen, U., Lohse, C., Rechenberg, J., Schäfer, L., & Sternkopf, R. (2006). Technische Abscheidung und Speicherung von CO₂ – nur eine Übergangslösung: Positionspapier des Umweltbundesamtes zu möglichen Auswirkungen, Potenzialen und Anforderungen. Umweltbundesamt (Hrsg.), Dessau-Roßlau. <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/3074.pdf> [letzter Aufruf am 06.03.2026]

Umweltbundesamt (UBA) (Hrsg.). (2008). CO₂-Abscheidung und Speicherung im Meeresgrund: Meeresökologische und geologische Anforderungen für deren langfristige Sicherheit sowie Ausgestaltung des rechtlichen Rahmens. <https://www.umweltbundesamt.de/system/files/medien/publikation/long/3667.pdf> [letzter Aufruf am 06.03.2026]

Upham, P., & Roberts, T. (2011). Public perceptions of CCS in context: Results of NearCO₂ focus groups in the UK, Belgium, the Netherlands, Germany, Spain and Poland. *Energy Procedia*, 4, 6338–6344. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.02.650>

Vereide, E. H., Khodabandeloo, B., & de Jong, K. (2024). The copepod *Acartia* sp. is more sensitive to a rapid pressure drop associated with seismic airguns than *Calanus* sp. *Marine Ecology Progress Series*, 730, 15–30. <https://doi.org/10.3354/meps14515>

Vereide, E. H., & Kühn, S. (2023). Effects of anthropogenic noise on marine zooplankton. In *Effects of noise on aquatic life* (1–24). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-10417-6_63-1

Verordnung über Anforderungen an die Durchführung der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen im Standortauswahlverfahren für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle (Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung – EndlSiUntV). (2020, 6. Oktober). BGBl. I S. 2255–2266. <https://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?jumpTo=bgbl120s2255.pdf>

Verordnung über Deponien und Langzeitlager (Deponieverordnung – DepV). (2009, 27. April). BGBl. I S. 900, zuletzt geändert durch Art. 3 G v. 03.07.2024 (BGBl. 2024 I Nr. 225). <https://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?jumpTo=bgbl109s0900.pdf>

Verordnung über Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle (Endlagersicherheitsanforderungsverordnung – EndlSiAnfV). (2020, 6. Oktober). BGBl. I S. 2094. <https://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?jumpTo=bgbl120s2094.pdf>

Vielstädte, L., Haeckel, M., Karstens, J., Linke, P., Schmidt, M., Steinle, L., & Wallmann, K. (2017). Shallow gas migration along hydrocarbon wells – an unconsidered, anthropogenic source of biogenic methane in the North Sea. *Environmental Science & Technology*, 51(17), 10217–10226. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b02732>

Vielstädte, L., Linke, P., Schmidt, M., Sommer, S., Haeckel, M., Braack, M., & Wallmann, K. (2019). Footprint and detectability of a well leaking CO₂ in the central North Sea: Implications from a field experiment and numerical modelling. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 84, 190–203. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2019.03.012>

Voelsen, D. (2024). Maritime kritische Infrastrukturen. Stiftung Wissenschaft und Politik. <https://doi.org/10.18449/2024S03>

von Goerne, G., Weinlich, F. H., & May, F. (2010). STABILITY – CO₂ storage ability of deep saline formations: Anforderungen und Vorschläge zur Erstellung von Leitfäden und Richtlinien für eine dauerhafte und sichere Speicherung von CO₂ (05-0013). Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. <https://www.deutsche->

rohstoffagentur.de/DE/Themen/Nutzung-tieferer-Untergrund/Downloads/stability-abschlussbericht.pdf?__blob=publicationFile&v=1 [letzter Aufruf am 06.03.2026]

Wallmann, K. (2023). CCS (carbon capture and storage): CO₂-Speicherung unter der Nordsee. In J. L. Lozán, H. Graßl, S.-W. Breckle, D. Kasang, & M. Quante (Hrsg.), Warnsignal Klima: Hilft Technik gegen die Erderwärmung? Climate engineering in der Diskussion – wissenschaftliche Fakten (S. 120–125). Wissenschaftliche Auswertungen. <https://doi.org/10.25592/uuhfdm.12816>

Wallmann, K., & ECO₂ Consortium. (2015). ECO₂ final publishable summary report (Nr. 265847). [https://www.eco2-project.eu/ECO2\(265847\)%20Final%20Publishable%20Summary%20Report.pdf](https://www.eco2-project.eu/ECO2(265847)%20Final%20Publishable%20Summary%20Report.pdf) [letzter Aufruf am 06.03.2026]

Wallmann, K., & GEOSTOR-Konsortium. (2025). CO₂-Speicherung unter der deutschen Nordsee? Ergebnisse aus drei Jahren Forschung: Ergebnisse Phase I. <https://doi.org/10.3289/CDRmare.49>

Warnecke, M., & Röhling, S. (2021). Untertägige Speicherung von Wasserstoff – Status quo. Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, 172, 641–659. <https://doi.org/10.1127/zdgg/2021/0295>

Wei, N., Li, X., Wang, Y., Dahowski, R. T., Davidson, C. L., & Bromhal, G. S. (2013). A preliminary sub-basin scale evaluation framework of site suitability for onshore aquifer-based CO₂ storage in China. International Journal of Greenhouse Gas Control, 12, 231–246. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2012.10.012>

White, J. A., & Foxall, W. (2016). Assessing induced seismicity risk at CO₂ storage projects: Recent progress and remaining challenges. International Journal of Greenhouse Gas Control, 49, 413–424. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2016.03.021>

Witte, K., Große-Kreul, F., Reichmann, A., Weber, N., & Altstadt, L. (2023). Akzeptanz von industriellem CCS in Nordrhein-Westfalen: Empfehlungen für Politik und Industrie (Wuppertaler Impulse zur Nachhaltigkeit Nr. 11). Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie. <https://doi.org/10.48506/OPUS-8496>

Worden, R. H. (2024). Carbon dioxide capture and storage (CCS) in saline aquifers versus depleted gas fields. Geosciences, 14(6), 146. <https://doi.org/10.3390/geosciences14060146>

Yao, W., Morganti, T. M., Wu, J., Borchers, M., Anschütz, A., Bednarz, L.-K., Bhaumik, K. A., Böttcher, M., Burkhard, K., Cabus, T., Chua, A. S., Diercks, I., Esposito, M., Fink, M., Fouqueray, M., Gasanzade, F., Geilert, S., Hauck, J., Havermann, F., & Mengis, N. (2025). Exploring site-specific carbon dioxide removal options with storage or sequestration in the marine environment – The 10 Mt CO₂ yr⁻¹ removal challenge for Germany. Earth's Future, 13(4), e2024EF004902. <https://doi.org/10.1029/2024EF004902>

Zhang, Y., Jackson, C., & Krevor, S. (2024). The feasibility of reaching gigatonne scale CO₂ storage by mid-century. Nature Communications, 15(1), 1–13. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-51226-8>

Zhong, H., Wang, Z., Zhang, Y., Suo, S., Hong, Y., Wang, L., & Gan, Y. (2024). Gas storage in geological formations: A comparative review on carbon dioxide and hydrogen storage. Materials Today Sustainability, 26, 100720. <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2024.100720>

A Anhang

A.1 Beispiele für Ansätze zu Standortauswahlkriterien zur Identifikation für CO₂-Speicher aus der Literatur

Anhang A.1 zeigt ausgewählte Literaturbeispiele für Ansätze zu Standortauswahlkriterien zur Identifikation für CO₂-Speicher.

Abbildung 4: Kriterien für die Bewertung von Sedimentbecken für die geologische CO₂-Speicherung nach (Bachu, 2003)

Criteria for assessing sedimentary basins for CO ₂ geological sequestration						
	Criterion	Classes				
		1	2	3	4	5
1	Tectonic setting	Convergent oceanic	Convergent intramontane	Divergent continental shelf	Divergent foredeep	Divergent cratonic
2	Size	Small	Medium	Large	Giant	
3	Depth	Shallow (<1,500 m)	Intermediate (1,500–3,500 m)	Deep (>3,500 m)		
4	Geology	Extensively faulted and fractured	Moderately faulted and fractured	Limited faulting and fracturing, extensive shales		
5	Hydrogeology	Shallow, short flow systems, or compaction flow	Intermediate flow systems	Regional, long-range flow systems; topography or erosional flow		
6	Geothermal	Warm basin	Moderate	Cold basin		
7	Hydrocarbon potential	None	Small	Medium	Large	Giant
8	Maturity	Unexplored	Exploration	Developing	Mature	Over mature
9	Coal and CBM	None	Deep (>800 m)	Shallow (200–800 m)		
10	Salts	None	Domes	Beds		
11	On/Off Shore	Deep offshore	Shallow offshore	Onshore		
12	Climate	Arctic	Sub-Arctic	Desert	Tropical	Temperate
13	Accessibility	Inaccessible	Difficult	Acceptable	Easy	
14	Infrastructure	None	Minor	Moderate	Extensive	
15	CO ₂ Sources	None	Few	Moderate	Major	

Quelle: (Bachu, 2003)

Abbildung 5: Geologische Schlüsselindikatoren für die Eignung von CO₂-Speichern nach (Chadwick, 2008)

	Positive indicators	Cautionary indicators
RESERVOIR EFFICACY		
Static storage capacity	Estimated effective storage capacity much larger than total amount of CO ₂ to be injected	Estimated effective storage capacity similar to total amount of CO ₂ to be injected
Dynamic storage capacity	Predicted injection-induced pressures well below levels likely to induce geomechanical damage to reservoir or caprock	Injection-induced pressures approach geomechanical instability limits
Reservoir properties		
Depth	>1000 m < 2500m	< 800 m > 2500 m
Reservoir thickness (net)	> 50 m	< 20 m
Porosity	> 20%	< 10%
Permeability	> 500 mD	< 200 mD
Salinity	> 100 g ⁻¹	< 30 g ⁻¹
Stratigraphy	Uniform	Complex lateral variation and complex connectivity of reservoir facies
CAPROCK EFFICACY		
Lateral continuity	Stratigraphically uniform, small or no faults	Lateral variations, medium to large faults
Thickness	> 100 m	< 20 m
Capillary entry pressure	Much greater than maximum predicted injection-induced pressure increase	Similar to maximum predicted injection-induced pressure increase

Quelle: (Chadwick, 2008)

Abbildung 6: CO₂-Speicher Charakteristika und deren Attribute, Eigenschaften und Proxies nach (Oldenburg, 2008)

Characteristics	Attributes (<i>i</i>)	Properties (<i>j</i>)	Proxy for..
Potential for primary containment	Primary seal	Thickness	Likely sealing effectiveness
		Lithology	Permeability, porosity
		Demonstrated sealing	Leakage potential
		Lateral continuity	Integrity and spillpoint
		Depth	Density of CO ₂ in reservoir
	Reservoir	Lithology	Likely storage effectiveness
		Permeability and porosity	Injectivity, capacity
		Thickness	Areal extent of injected plume
		Fracture or primary porosity	Migration potential
		Pore fluid	Injectivity, displacement
		Pressure	Capacity, tendency to fracture
		Tectonics	Induced fracturing, seismicity
		Hydrology	Transport by groundwater
		Deep wells	Likelihood of well pathways
		Fault permeability	Likelihood of fault pathways
Potential for secondary containment	Secondary seal	Thickness	Likely sealing effectiveness
		Lithology	Permeability, porosity
		Demonstrated sealing	Leakage potential
		Lateral continuity	Integrity and spillpoint
	Shallower seals	Depth	Density of CO ₂
		Thickness	Likely sealing effectiveness
		Lithology	Permeability, porosity
Attenuation potential	Surface characteristics	Lateral continuity	Integrity and spillpoint
		Evidence of seepage	Effectiveness of all seals
		Topography	CO ₂ plume spreading
		Wind	Plume dispersion
		Climate	Plume dispersion
	Groundwater hydrology	Land use	Tendency for exposure
		Population	Tendency for exposure
		Surface water	Form of seepage
		Regional flow	Dispersion/dissolution
		Pressure	Solubility
		Geochemistry	Solubility
		Salinity	Solubility
	Existing wells	Deep wells	Direct pathway from depth
		Shallow wells	Direct pathway
		Abandoned wells	Direct pathway, poorly known
	Faults	Disposal wells	New fluids, disturbance
		Tectonic faults	Large permeable fault zones
		Normal faults	Seal short-circuiting
		Strike-slip faults	Permeable fault zones
		Fault permeability	Travel time

Quelle: (Oldenburg, 2008)

Abbildung 7: Bei der Standortauswahl für CO₂-Speicher zu berücksichtigende Kriterien nach (Grataloup et al., 2009)

<i>Objective</i>		<i>Criteria</i>	<i>Object/area</i>
<i>Storage optimization</i>	<i>Storage capacity</i>	(total, effective) porosity	Target aquifer
		(total, net) thickness	Target aquifer
		Trap dimensions	Target aquifer and cap-rock
		Pressure and temperature conditions	Target aquifer
	<i>injectivity</i>	(relative) permeability	Target aquifer
		(total, effective) porosity	Target aquifer
		Pressure and temperature conditions	Target aquifer
		Injection thickness	Target aquifer
		Reservoir failure ((pressure build-up)	Target aquifer
		Entry pressure (pressure build-up)	Cap-rock
<i>Risks minimization</i>	<i>Storage confinement</i>	thickness	Cap-rock
		Permeability, entry pressure	Cap-rock
		Lateral continuity	Cap-rock
		Entry pressure (pressure build-up)	Cap-rock
		Secondary containment system	overburden
	<i>Leakage pathways</i>	Abandoned wells	Target aquifer, cap-rock and overburden
		(conductive) faults	Target aquifer, cap-rock and overburden
		Exutories/migration pathways	Target aquifer, cap-rock and overburden
	<i>Storage integrity</i>	Seismic hazard	Storage area
		Landslides hazard	Storage area
	<i>vulnerability</i>	Vulnerability urban or industrial areas....	Storage area
<i>Respect of regulation, and spatial constraints</i>	<i>Environmental constraints</i>	Protected areas	Storage area
	<i>Underground use</i>	Existing exploitation of target aquifer	Storage area
	<i>Land-use</i>	Exploration or exploitation licenses	Storage area
<i>Consideration of social and economic aspects</i>	<i>Economic aspects</i>	Source-sink distance	Storage area and more
		Accessibility of site storage	Storage area and more
		Existing surface infrastructures	Storage area and more
		Surface and underground infrastructures to build	Storage area
	<i>Social aspects</i>	Population acceptance	Storage area and more

Quelle: (Grataloup et al., 2009)

Abbildung 8: Klassifikation von Standortauswahlkriterien für CO₂-Speicher nach (Bachu et al., 2009)

Criterion Level	No	Criterion	Eliminatory or unfavourable	Preferred or Favourable
Critical	1	Reservoir-seal pairs; extensive and competent barrier to vertical flow	Poor, discontinuous, faulted and/or breached	Intermediate and excellent; many pairs (multi-layered system)
	2	Pressure regime	Overpressured: pressure gradients greater than 14 kPa/m	Pressure gradients less than 12 kPa/m
	3	Monitoring potential	Absent	Present
	4	Affecting protected groundwater quality	Yes	No
Essential	5	Seismicity	High	Moderate and less
	6	Faulting and fracturing intensity	Extensive	Limited to moderate
	7	Hydrogeology	Short flow systems, or compaction flow; Saline aquifers in communication with protected groundwater aquifers	Intermediate and regional-scale flow
Desirable	8	Depth	< 750-800 m	>800 m
	9	Located within fold belts	Yes	No
	10	Adverse diagenesis ⁺	Significant	Low to moderate
	11	Geothermal regime	Gradients ≥ 35 °C/km and/or high surface temperature	Gradients < 35 °C/km and low surface temperature
	12	Temperature	< 35 °C	≥ 35 °C
	13	Pressure	< 7.5 MPa	≥ 7.5 MPa
	14	Thickness	< 20 m	≥ 20 m
	15	Porosity	< 10%	$\geq 10\%$
	16	Permeability	< 20 mD	≥ 20 mD
	17	Caprock thickness	< 10 m	≥ 10 m
	18	Well density	High	Low to moderate

⁺ Adverse diagenesis is that which reduces porosity and permeability

Quelle: (Bachu et al., 2009)

Abbildung 9: Klassifikation von technischen Standortauswahlkriterien und ihren untersetzenden Indikatoren für CO₂-Speicher nach (Llamas & Cienfuegos, 2012)

Level		I	II	III	IV	V
Criteria						
(math) VALUE		1	3	5	7	9
Tectonic, structural	Geo mechanical		Unstable domain		Stable domain	
	Lateral continuity	Convergent Basins. Volcanic Activity	Convergent Basins. Neo tectonics		Divergent Basins.	
			Syncline		Horizontal or sub horizontal	Anticline
	Fractures		Strongly fractured. Many faults		Weakly fractured. Few faults	
Storage	Porosity (%)	< 10		10~25		>25
	Permeability	< 1 mD		1~100 mD		> 1 D
	Thickness (m)		< 10	10~100		> 100
	Lithology		Other		Carbonates	Sandstone
Caprock	Plasticity	Fragile		Intermediate		Ductile
	Thickness (m)	< 10		Active region 10~100	Stable region 10~100	> 100
	Porosity	> 10		10 ~ 5		< 5
Hydrogeology	TDS	< 3000		3000~10 000 >260 000		> 10 000
	Hydro-dynamic	Local < 100 years		Area 100~1000 years		Regional >1 000 years
	Deep (m)	< 600		600~900	> 2000	900~2000
	Temperature		Warm basin	Mild temperate basin	Cold basin	
	Capacity (Mt CO ₂)	< 10	10~50	50~100	100~150	> 150
Otras formaciones	Oil or gas		NO	Yes, small volume	Yes. Medium volume	Yes, huge volume
	Coal beds		NO	Yes. No methane presence	Yes; deep > 800m	Yes; deep 200~800m
	Massive saline		NO	Domes	Beds	
	Other	Exploration		Evidence. Exploration or research permits		Exploitation permits

Quelle: (Llamas & Cienfuegos, 2012)

Abbildung 10: Klassifikation von sozio-ökonomischen Standortauswahlkriterien und ihren untersetzenden Indikatoren für CO₂-Speicher nach (Llamas & Cienfuegos, 2012)

	Class	I	II	III	IV	V
Criteria						
(math) VALUE		1	3	5	7	9
Quality of the information		None data. It isn't possible to make any geological interpretation	Few data. It's possible to make an interpretation based on adjacent regions	Detail data and enough deep. General or shallow data.	Digital regional data (GIS).	Detail data (GIS) based on deep data (wells and seismic)
Distance (km)		> 250	250~100	100~50	50~25	< 25
CO ₂ Quality		Impurity content up to 2%		Impurity content between 1-2%		Impurity content less than 1%
Population (km)		< 10	10~25 Desfavourable topography	10~25 Favourable topography	25~50	>50
Environmental resources (km)		0		10~20		>20
Cultural resources (km)		0		10~20		>20
Location			Offshore (deep)	Offshore (shallow)	Onshore	
Climatology			Extreme		Warm	
Affected Infrastructure			None	Little		All
New infrastructure			All	Little		None

Quelle: (Llamas & Cienfuegos, 2012)

Abbildung 11: Wichtige Bewertungskriterien für die Beurteilung der Standorteignung von CO₂-Speicher nach (Wei et al., 2013)

Criterion	Classes							Weight
First order	Second order	Disqualifying threshold	j=1	j=2	j=3	j=4	j=5	
	Scores	–99	1	2	3	4	5	
Storage optimization	Size of secondary tectonic units	<500 km ²	<1000 km ²	Small <5000 km ²	Medium <10,000 km ²	Large <50,000 km ²	Giant >50,000 km ²	0.01
	Maximum depth of storage formation	<1000 m	Shallow (<1500 m)		Intermediate (1500–3000 m)		Deep (>3000 m)	0.03
	Representative permeability	<1 mD	1–10 mD	10–50 mD	50–100 mD	100–500 mD	>500 mD	0.1
	(total, effective) Porosity	<5%	5–10%	10–15%	15–20%	20–25%	>25%	0.02
	Fluid pressure ratio		Pressure ratio (>1.2)		Pressure ratio (1.0–1.2)		Pressure ratio (<1.0)	0.01
	Effective injection thickness	<10 m	10–20 m	20–50 m	50–100 m	100–300 m	>300 m	0.08
	Reservoir failure pressure buildup		Pluvial and alluvial facies		Fluvial facies		Lacustrine and paludal facies	0.02
	Primary seal formation		Seal by different lithology		Regional seal formation		Basin scale seal formation	0.01
	Geothermal gradient		Warm basin (>40 °C/km)		Moderate (20–40 °C/km)		Cold basin (<20 °C/km)	0.05
Risk minimization	Geology		Extensively faulted and fractured		Moderately faulted and fractured		Limited faulting	0.02
	Major active faults	<10 km	10–20 km		20–40 km		>40 km	0.06
	In situ stress zone		Extension zone	Small	Strike-slip zone		Compression zone	0.01
	Hydrocarbon potential		None		Medium	Large	Giant	0.02
	Distance from hydrocarbon fields		>40 km		20–40 km		<20 km	0.04
	Sedimentary facies		Pluvial and alluvial		Fluvial		Lacustrine and paludal	0.03
	Primary seal formation		Seal by different lithology		Regional seal formation		Basin scale seal formation	0.03
	Buffer formations		Pluvial and alluvial		Fluvial		Lacustrine	0.01
	Distance between the outcrops and storage site	<20 km	20–40 km		40–60 km		>60 km	0.08
Risk minimization	Sedimentary system of Cenozoic era (E and Q)		None				Deposits	0.04
	Hydrogeological dynamics		Shallow, short flow systems, or compaction flow		Intermediate flow systems		Regional, long-range flow systems	0.03
	Earthquake record	Ms > V (10 km range)						0
	Seismicity intensity	>VIII	High (VII)		Intermediate (VI)		Low (<IV)	0.08
Environmental constraints	City nearby	Within cities						0
	Distribution of natural resources	<10 km						0
	Depth of natural resource (likely to be explored in future research)		800–2000 m		200–800 m		<200 m	0.04
	Coal resources		Deep (>800 m)		Shallow (<800 m)		None	0.06
	Site distance to existing deep coal mines		5 km		5–10 km		>10 km	0.02
Consideration of economic aspects	City nearby	Within cities	<5 km	<10 km	<15 km	<20 km	<25 km	0.1

Quelle: (Wei et al., 2013)

Abbildung 12: Standortauswahlkriterien zur Identifikation potenzieller CO₂-Speicher nach (Raza et al., 2016)

Parameters	Positive Indicators	Cautionary Indicators	Indication of Aspect
CO ₂ source and total Storage Capacity	Total capacity of reservoir estimated to be much larger than the total amount produced from the CO ₂ source	Total capacity of reservoir estimated to be similar or less than the total amount produced from the CO ₂ source	Storage Potential
Depth	>800m	800m>depth>2000m	Storage Capacity
CO ₂ density	high	low	Storage Capacity
Porosity	>20%	<10%	Storage Capacity Capillary trapping
Thickness (net)	>>50m	<20m	Storage Capacity Injectivity
Permeability (near-wellbore)	>100mD	10-100mD	Injectivity
Well type	horizontal well with or without hydraulic fracture/vertical well with hydraulic fracture	vertical well without hydraulic fracture	Injectivity
Type of minerals	Ca-, Mg-, or Fe-rich framework minerals such as (feldspars, clays, micas, and Fe-oxides)	fast reacting carbonates minerals	Injectivity/mineral trapping
Residual gas /water saturation	less	high	Injectivity
Pore throat size distribution	less heterogeneous	high heterogeneous	Injectivity and Trapping
Salinity	low	high	Solubility trapping
Temperature	low temperature gradient	High temperature gradient	Solubility trapping
Pressure	under pressure	overpressure	Solubility trapping
Gravity number	less	high	Capillary trapping
Rock type	quartz rich sandstones and carbonates	highly stress sensitive carbonates	Capillary trapping
Rock wettability	strong water wet	less water wet or oil-wet	Capillary trapping
Interfacial tension	high	low	Capillary trapping
Hydraulic integrity	Reservoir type	reservoir without compaction/ aquifer support	Containment
		have not experienced any injection in past	
		less faults and fractures	
	Well location & condition	good completion condition and away from faults & fractures	Injectivity
		poor completion and near to faults & fractures	
Seal capacity - CO ₂ column height	capillary entry pressure much greater than buoyancy force of maximum produced CO ₂ column high	capillary entry pressure similar to buoyancy force of maximum produced CO ₂ column height	Containment
Seal geometry - Lateral continuity	un-faulted	laterally variable faults	Containment
Seal geometry -Thickness	>100 m	<20 m	Containment
Hydraulic integrity: Seal	presence of mineral and stress characterization data of seal	absence of mineral and stress characterization data of seal	Containment
Distance between CO ₂ emissions source and target medium	<300km	>300km	Transportation Cost

Quelle: (Raza et al., 2016)

Abbildung 13: Übergreifende Standortkriterien für CO₂-Speicher nach (Alcalde et al., 2021)

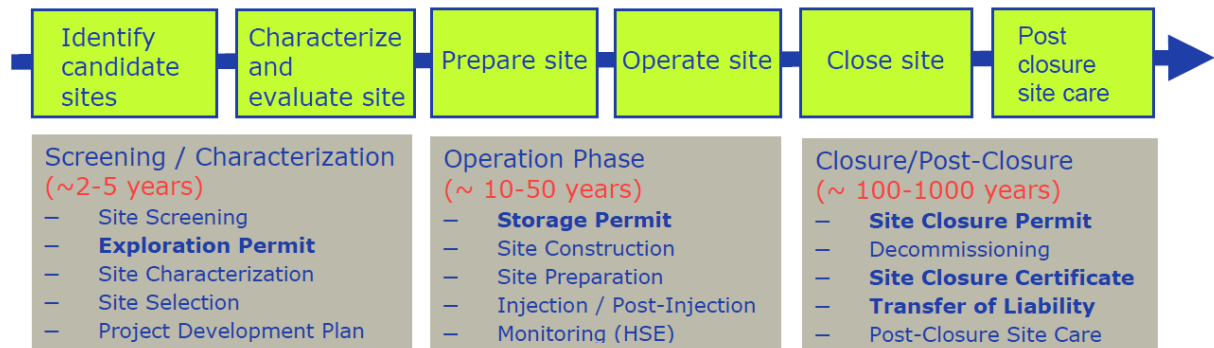
Screening criterion	Description	Rationale	Sites failing the criterion (percentage of the total, N = 113 selectable sites)
Capacity	Screening out of sites with a P50 capacity less than 50 Mt CO ₂	Relatively high capacities needed for the expansion stage of the project	64 (57%)
Porosity	Screening out of sites with porosities lower than 10%	High porosity to ensure high storage efficiency	2 (2%)
Permeability	Screening out of sites with permeabilities lower than 10 mD	High permeability to ensure high injectivity	23 (20%)
Age of the reservoir formation	Screening out of sites older than the Mesozoic	Older formation tend to have lower reservoir quality, more clay minerals and more carbonate cement than younger formations	22 (19%)
Cessation of production	Screening out of hydrocarbon fields which expected cessation of production is later than 2022	Acorn project expected to be in operation by 2022, so potential hydrocarbon fields must have finished operation by then	9 (8%)
Well data availability	Screening out of sites not sampled by wells	Needed to ensure the availability of information about the reservoir and the caprock	5 (4%)
Seismic data availability	Screening out of sites not characterised with the 3D seismic data	Needed to characterise and create the geological model of the site	4 (4%)

Quelle: (Alcalde et al., 2021)

A.2 Beispiele für Ansätze zu Standortauswahlverfahren zur Identifikation für CO₂-Speicher aus der Literatur

Anhang A.1 zeigt ausgewählte Literaturbeispiele für Ansätze zu Standortauswahlverfahren zur Identifikation für CO₂-Speicher.

Abbildung 14: Verfahrensstufen zur Identifikation, Charakterisierung, Auswahl und dem Betrieb bis zur Nachsorgephase von CO₂-Speichern nach (Aarnes et al., 2009)



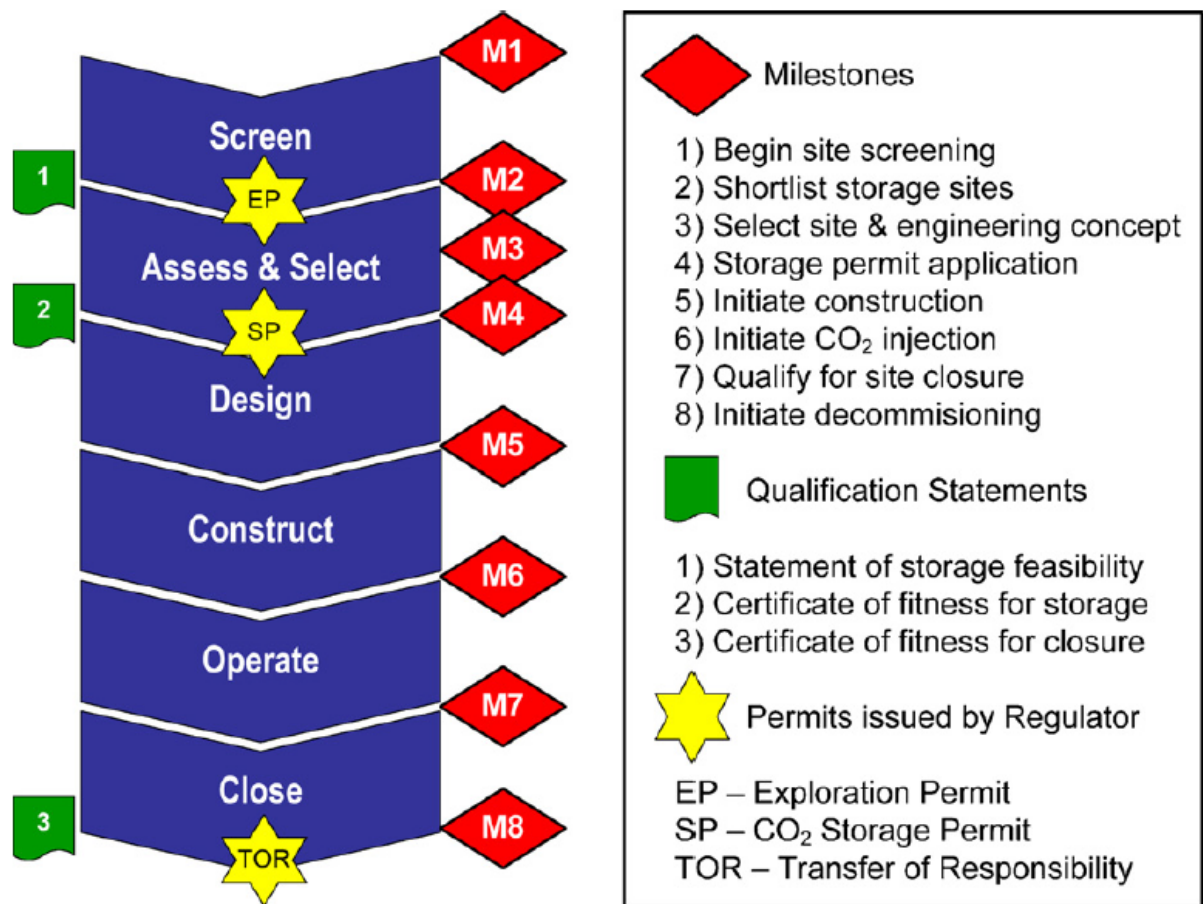
Quelle: (Aarnes et al., 2009)

Abbildung 15: Verfahrensschritte bei der Standortsuche von CO₂-Speichern und deren Bewertungskriterien nach (von Goerne et al., 2010)

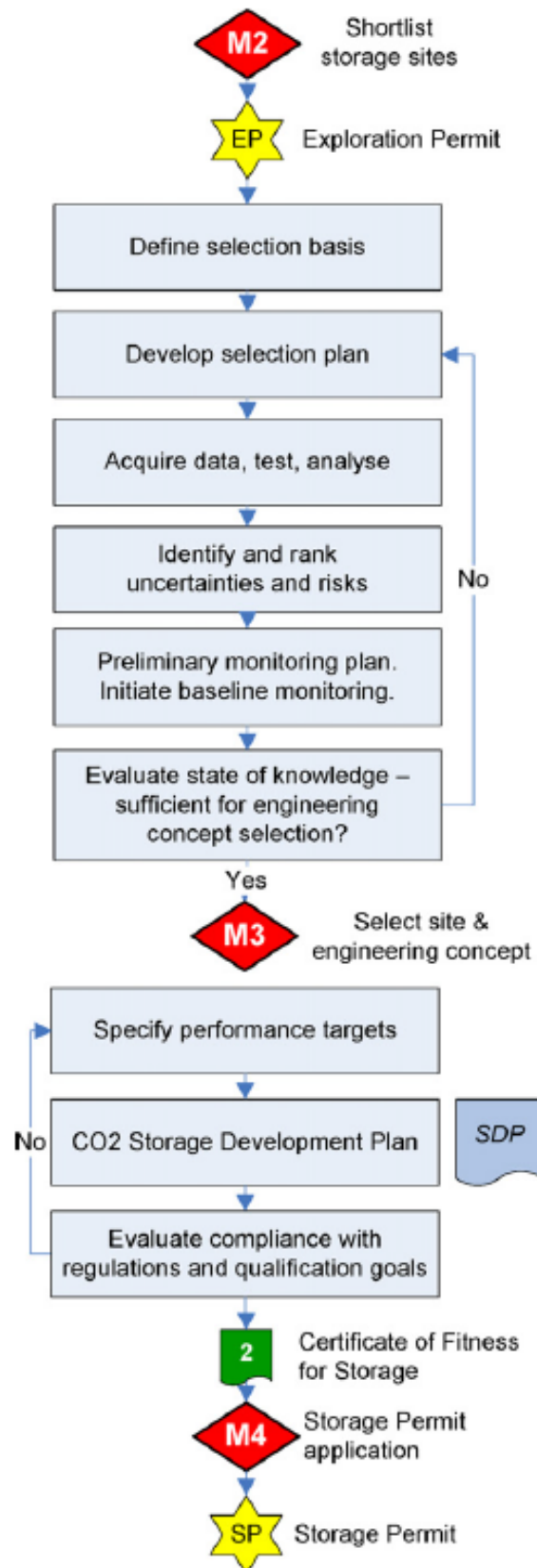

Verfahrensschritt	Vorgehen, Bewertung	Faktor, Genehmigung
1. Schritt Auffinden von Regionen, die bestimmte Anforderungen erfüllen Eingrenzung möglicher zu untersuchender Gebiete	geowissenschaftliche Mindestanforderungen Abwägungskriterien	regional Geologie Speichergestein Deckschichten Tektonik
2. Schritt Auswahl von Gebieten mit besonders günstigen geologischen Voraussetzungen Bildung von Teilgebieten	Sozioökonomische Randbedingungen Datenerfassung Geowissenschaftliche Abwägungskriterien	Speichersicherheit Speicherkapazität Injektivität
3. Schritt Auswahl von Standort für die Detail-Erkundung	Mindestanforderungen Abwägungskriterien Vergleich der Standorte	Speichersicherheit Speicherkapazität Injektivität „informelle“ Öffentlichkeitsbeteiligung Antrag auf Untersuchungs-genehmigung
4. Schritt Detailerkundung: Standortentscheidung	Erkundung Ausschlusskriterien Abwägungskriterien	Speicherkapazität Injektivität „formelle“ Öffentlichkeitsbeteiligung Sicherheitsnachweis Antrag auf Errichtung und Aufnahme Betrieb

Quelle: (von Goerne et al., 2010)

Abbildung 16: Verfahrensstufen zu Charakterisierung, Auswahl, Entwicklung, Errichtung, Betrieb und Verschluss von CO₂-Speichern nach (Carpenter et al., 2011)

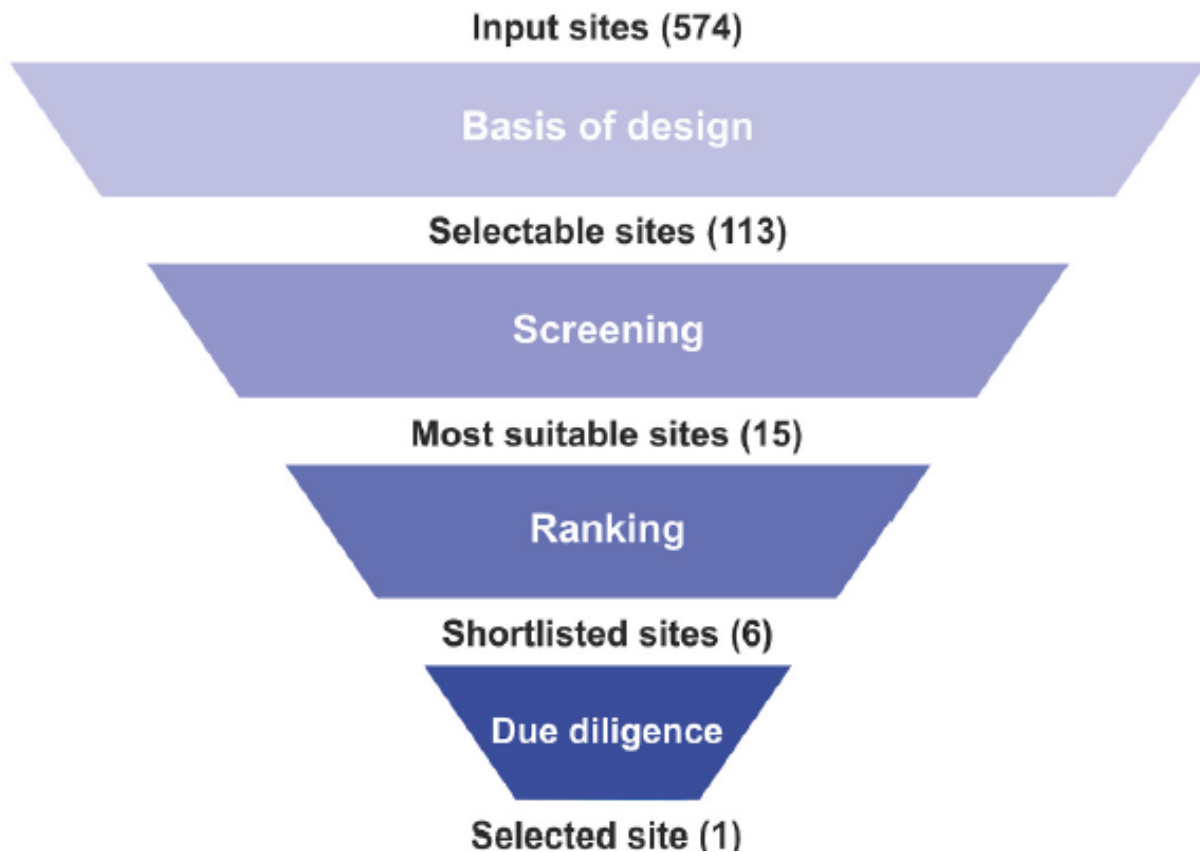


Quelle: (Carpenter et al., 2011)

Abbildung 17: Vorgehen zur Untersuchung und Auswahl von CO₂-Speichern nach (Carpenter et al., 2011)

Quelle: (Carpenter et al., 2011)

Abbildung 18: Verfahrensschritte bei der Standortauswahl von CO₂-Speichern nach (Alcalde et al., 2021)



Quelle: (Alcalde et al., 2021)

A.3 Wesentliche Standortmerkmale und Standortauswahlkriterien zur Identifikation von geeigneten Standorten zur Nutzung unterirdischer Lagerstätten und Speicher

TextBox 1: Wesentliche Standortmerkmale von Standorten für Deponien der Klasse IV gemäß (DepV, 2009/03.07.2024)

Hier stehen Ihre Informationen.

- ▶ Dauerhafter, sicherer Einschluss der Abfälle vor der Biosphäre
- ▶ Erhalt der geologischen Barrierewirkung insbesondere gegenüber dem Eintritt bzw. Austritt von Flüssigkeiten und Gasen
- ▶ Ausreichende Ausdehnung und Mächtigkeit des Speichergesteins
- ▶ Geomechanische Stabilität der Speicherformation
- ▶ Ausreichende unverritzte Salzmächtigkeit im Ablagerungsbereich
- ▶ Vollständiger Verschluss der Abfälle durch Konvergenzverhalten
- ▶ Langzeitbeständigkeit der unterirdischen Hohlräume und Kavernen
- ▶ Ausschluss von Standorten mit seismischer Aktivität

TextBox 2: Wesentliche Standortmerkmale bzw. Standortauswahlkriterien bei der Ermittlung eines Standorts zur Entsorgung von hochradioaktiven Abfällen nach (EndlSiUntV, 2020; StandAG, 2017/07.12.2020; EndlSiAnfV, 2020)

Ausschlusskriterien:

- ▶ Auftreten großräumiger Vertikalbewegungen
- ▶ Anwesenheit aktive Störungszonen
- ▶ Einflüsse aus bergbaulichen Tätigkeiten
- ▶ Vorhandensein von seismischer Aktivität
- ▶ Vorhandensein vulkanischer Aktivität
- ▶ Anwesenheit junger Grundwässer

Mindestanforderungen:

- ▶ Art des Wirtsgesteins
- ▶ Möglichst geringe Gebirgsdurchlässigkeit
- ▶ Mindestmächtigkeit des ewG
- ▶ Minimale Mindestteufe des ewG
- ▶ Ausreichende Fläche des Endlagers
- ▶ Langfristiger Erhalt der Barrierewirkung

Geowissenschaftliche Abwägungskriterien:

- ▶ Transport durch Grundwasser
- ▶ Konfiguration der Gesteinskörper
- ▶ Räumlichen Charakterisierbarkeit
- ▶ Langfristigen Stabilität der günstigen Verhältnisse
- ▶ Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten
- ▶ Gasbildung
- ▶ Temperaturverträglichkeit
- ▶ Rückhaltevermögen im ewG
- ▶ Hydrochemische Verhältnisse
- ▶ Schutz des ewG durch das Deckgebirge

Hauptkriteriengruppen in den rvSU:

- ▶ Einschlusseigenschaften des Wirtsgesteines

- ▶ Langfristige Stabilität und Integrität (Erhalt der Barrierewirkung)
- ▶ Räumliche Charakterisierbarkeit und Zuverlässigkeit der Sicherheitsaussage
- ▶ Betriebssicherheit und technische Realisierbarkeit

TextBox 3: Wesentliche Standortmerkmale bei der Speicherung von Erdgas und gasförmigem Wasserstoff im geologischen Untergrund (Harati et al., 2024; Uliasz-Misiak & Misiak, 2024; Warnecke & Röhling, 2021)

- ▶ Speichereigenschaften (Tiefe, Mächtigkeit, Geometrie, Tektonik,)
- ▶ Gesteinseigenschaften (Lithologie, Porosität, Permeabilität, Temperatur, Druck, Mineralangebot, Hydrogeologie)
- ▶ Barriereigenschaften (Mächtigkeit, Sicherheitsabstände zu potenziellen Wegsamkeiten)
- ▶ Langzeitstabilität und -sicherheit (Sicherheitsabstände zu aktiven Störungen, vulkanischer und seismischer Aktivität)
- ▶ Speichereffizienz (Speicherkapazität und Injektivität)
- ▶ Umweltfaktoren (z.B. Grundwasserschutz)
- ▶ Infrastruktur und Marktintegration
- ▶ Entfernung zu Industrieclustern
- ▶ Sozio-politische Aspekte