

TEXTE

08/2018

Beschreibung und Bewertung möglicher Auswirkungen einer unterirdischen Speicherung von Kohlendioxid auf ausgewählte Umweltschutzgüter

Potenzialbewertung nach § 5 des Kohlendioxid-
Speicherungsgesetzes
Abschlussbericht

TEXTE 08/2018

Umweltforschungsplan des
Bundesministeriums für Umwelt,
Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit

Forschungskennzahl 3711 16 125
UBA-FB 002531

Beschreibung und Bewertung möglicher Auswirkungen einer unterirdischen Speicherung von Kohlendioxid auf ausgewählte Umweltschutzwerte

Potenzialbewertung § 5 des Kohlendioxid-Speicherungsgesetzes

von

Dr. Peter Schütte, Dr. Malte Kohls und Sandra Kattau, LL.M.Eur.
BBG und Partner, Bremen

Dipl.-Biologin Elith Wittrock, Dipl.-Landschaftsökologin Michaela Warnke
und Dipl.-Biologin Annette Lienemann
ARSU GmbH, Oldenburg

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber:

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

 /umweltbundesamt.de
 /umweltbundesamt

Durchführung der Studie:

BBG und Partner
Contrescarpe 75 A
28195 Bremen

ARSU GmbH
Escherweg 1
26121 Oldenburg

Abschlussdatum:
Juni 2015

Redaktion:
Fachgebiet I 3.5 Nachhaltige Raumentwicklung, Umweltprüfungen
Carsten Alsleben

Publikationen als pdf:
<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>

ISSN 1862-4359

Dessau-Roßlau, Januar 2018

Das diesem Bericht zu Grunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit unter der Forschungskennzahl 3711 16 125 finanziert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Kurzbeschreibung

Am 24.08.2012 ist das Kohlendioxid-Speicherungsgesetz (KSpG) in Kraft getreten, das in Umsetzung der CCS-Richtlinie (CCS-RL) die großmaßstäbliche Speicherung von CO₂ betrifft. Die CCS-RL sowie das KSpG zielen darauf ab, dass die CO₂-Speicherung umweltverträglich und unter Vermeidung von negativen Auswirkungen und Risiken für die Umwelt und die menschliche Gesundheit erfolgt. § 5 KSpG sieht eine Bewertung der in Deutschland vorhandenen Speicherpotenziale vor (Potenzialbewertung), für die das Umweltbundesamt die fachlichen Grundlagen für eine wirksame Umweltvorsorge zu erarbeiten hat.

Ziel dieses Gutachtens war es, für die Potenzialbewertung handhabbare Bewertungsmaßstäbe und -methoden zu entwickeln, mit denen das Umweltbundesamt die Auswirkungen auf die Schutzgüter Tiere, Pflanzen, biologische Vielfalt, Landschaft, Kultur- und sonstige Sachgüter sowie den Mensch bewerten kann. Darüber hinaus sollten Handreichungen für Stellungnahmen des Umweltbundesamtes bei Genehmigungsverfahren geschaffen werden.

Für die Auswirkungsabschätzung im Rahmen der Potenzialbewertung wurden Bereiche/Flächen ermittelt, die eine besondere Empfindlichkeit und daher ein hohes Konfliktpotenzial in Bezug auf Kohlendioxid-Speichervorhaben aufweisen. Aus Gründen der Umweltvorsorge sollten diese Bereiche bei der Ausweisung von potenziellen Speichern gemieden werden. Soweit ein vollkommener Ausschluss der konfliktären Ausprägungen im Bereich des Speicherkomplexes nicht möglich ist, so sollten die betreffenden Flächen zumindest bei der Errichtung der Übertageanlagen, in deren Bereich auch im bestimmungsgemäßem Betrieb Auswirkungen nicht vollständig vermieden werden können, ausgespart werden.

Für die Zulassungsverfahren konnte für den bestimmungsgemäßem Betrieb, während dessen das injizierte CO₂ in seiner Gesamtheit prognosegemäß in der Speicherstätte verbleibt und der Speicher sich prognosegemäß entwickelt, eine vorläufige Abschätzung der möglichen Auswirkungen vorgenommen werden. Danach sind die meisten Beeinträchtigungen im Rahmen eines Zulassungsverfahrens durch Auflagen, Vermeidungs- und Ausgleichsmaßnahmen regelbar. Jedoch sind auch Fragen bezüglich der Eintrittswahrscheinlichkeiten und der Risiken für den nicht bestimmungsgemäßem Betrieb, d.h. für den Fall des Eintritts unplanmäßiger Ereignisse, die nie vollständig ausgeschlossen werden können und nicht der Genehmigung entsprechen, zu beantworten. Insoweit sind eine Vielzahl von Gutachten, u. a. Prognosen zu der zu erwartenden Intensität der spezifischen Wirkfaktoren einer CO₂-Speicherung, erforderlich. Dies betrifft insbesondere Aussagen zu maximal zulässigen Raten und Absolutbeträgen für Landhebungen und -senkungen, zur Wahrscheinlichkeit und möglichen Magnitude von vorhabenbedingten Erdbeben, zur Wahrscheinlichkeit und zum möglichen Ausmaß von Veränderungen der Salzgehalte im (nutzbaren) Grundwasser und in Oberflächengewässern sowie zu potenziellen Wegsamkeiten bei CO₂-Leckagen. Für die abschließende Bewertung im Rahmen der UVP fehlt es in vielen Fällen noch an Grenz- und Richtwerten in Bezug auf Beeinträchtigungen für den Menschen sowie für Lebensräume und Arten, so dass hier weitergehender Forschungsbedarf besteht.

Abstract

The Carbon Dioxide Storage Act (Kohlendioxid-Speicherungsgesetz, KSpG) took effect as of 24 August 2012, which, in implementation the Carbon Capture and Storage Directive (CCS Directive) concerns the large-scale storage of CO₂. The CCS Directive and the Carbon Dioxide

Storage Act aim to ensure that CO₂ is stored in an environmentally-friendly manner that avoids negative effects on and risks to the environment and human health. Section 5 of the Carbon Dioxide Storage Act provides for the assessment of the available storage potential in Germany (assessment of potential storage availabilities), for which the Federal Environmental Office must develop the technical basis for effective environmental precautions.

The objective of this legal opinion was to develop manageable standards and methods for the assessment of potential storage availabilities with which the UBA (German Federal Environmental Agency) can assess the effects on the protectable goods of animals, plants, biological diversity, landscape, culture and other material goods as well as humans. Guidelines were also to be provided for statements of the UBA for approval proceedings.

In order to estimate the impact within the framework of the assessment of potential storage facilities, particularly sensitive areas/spaces were determined which thus have a higher potential for conflict with regard to CO₂ storage projects. As an environmental precaution, these areas should be avoided in the identification of potential storage areas. If it is not possible to completely exclude the conflictual characteristics in the area of the storage complex, the affected areas should at least be avoided in the construction of above-ground sites, in the area of which impact cannot be completely avoided even during operation as intended.

A preliminary estimate of the potential effects could be made for the approval proceedings for the operation as intended during which the injected CO₂ remains entirely in the storage site as predicted and the storage site develops as predicted. In accordance therewith, most of the impairments can be regulated in the framework of approval proceedings through conditions, avoidance and compensatory measures. However, questions regarding the probability and risks for operation contrary to intended operation – i.e., in the event of irregular events which can never be completely ruled out and do not correspond to the approval – are to be answered.

A multitude of legal opinions, such as predictions of the expected intensity of the specific active factors of CO₂ storage, are necessary. This affects in particular statements regarding maximum permitted installments and absolute amounts for landrises or subsidence, the probability and possible magnitude of earthquakes caused by the project, the probability and potential extent of changes in salt content in (usable) groundwater and in surface waters and on potential paths in case of CO₂ leakages. In many cases, limit values and guidelines with regard to the impairments for humans, habitats, and species are still lacking a conclusive assessment within the framework of the EIA. Therefore, further research is necessary.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis

Tabellenverzeichnis

1	Einleitung.....	1
1.1	Hintergrund des Projektes.....	1
1.2	Gegenstand der Untersuchung	2
1.3	Rechtliche Grundlagen	3
1.3.1	Europäische Vorgaben.....	3
1.3.2	Umsetzung in Deutschland	3
2	Fachliche Grundlagen zur CO ₂ -Speicherung	5
2.1	Erdöl- und Erdgaslagerstätten.....	7
2.2	Tiefe Kohleflöze	7
2.3	Tiefe Saline Aquifere	7
3	Beschreibung möglicher Auswirkungen der CO ₂ -Speicherung auf die zu betrachtenden Schutzgüter	8
3.1	Ermittlung der vorhabenspezifischen Wirkfaktoren	9
3.1.1	Vorhabenübersicht.....	10
3.1.2	Wirkfaktoren des bestimmungsgemäßen Betriebs	15
3.1.3	Wirkfaktoren des nicht bestimmungsgemäßen Betriebs.....	16
3.1.4	Erläuterungen zu den Wirkfaktoren	18
3.2	Mögliche Auswirkungen auf die Schutzgüter.....	37
3.2.1	Definitionen der Schutzgüter	39
3.2.2	Menschen und menschliche Gesundheit.....	40
3.2.3	Pflanzen	56
3.2.4	Tiere	66
3.2.5	Biologische Vielfalt.....	77
3.2.6	Landschaft	85
3.2.7	Kulturgüter.....	93
3.2.8	Sonstige Sachgüter	103
4	Bewertung möglicher Umweltauswirkungen im Rahmen der Potenzialbewertung nach § 5 KSpG	113
4.1	Rechtliche Grundlagen, Bewertungsmaßstab	113
4.2	Ansatz zur Bewertung der Auswirkungen	119

4.3	Bereiche der einzelnen Schutzgüter mit voraussichtlich hohem Konfliktpotenzial	120
4.3.1	Menschen und menschliche Gesundheit.....	120
4.3.2	Pflanzen und Tiere	122
4.3.3	Biologische Vielfalt.....	123
4.3.4	Landschaft	124
4.3.5	Kulturgüter.....	126
4.3.6	Sonstige Sachgüter	126
4.3.7	Natürliche und anthropogene Strukturen, von denen eine besondere Gefährdung der Schutzgüter gegenüber den vorhabenspezifischen Wirkfaktoren ausgeht.....	127
4.4	Empfehlungen für die Potenzialbewertung im Sinne von § 5 Abs. 3 KSpG	128
5	Bewertung möglicher Umweltauswirkungen im Rahmen von Zulassungsverfahren	133
5.1	Rechtliche Grundlagen, verschiedene Zulassungsverfahren, Bewertungsmaßstäbe	133
5.1.1	Untersuchungsgenehmigung gemäß § 7 KSpG.....	133
5.1.2	Planfeststellung für Errichtung und Betrieb eines Kohlendioxidspeichers gemäß §§ 11 ff. KSpG	135
5.2	Übertragbarkeit von Bewertungsmethoden, Anwendungsregeln	137
5.3	Leitlinien, Grenz-, Richt- oder Schwellenwerte	141
5.4	Anforderungen an die Verfahrensunterlagen	145
6	Diskussion	150
7	Zusammenfassung	151
7.1	Mögliche Auswirkungen auf die Schutzgüter.....	155
7.1.1	Mensch und menschliche Gesundheit.....	155
7.1.2	Pflanzen und Tiere	156
7.1.3	Biologische Vielfalt.....	157
7.1.4	Landschaft	158
7.1.5	Kulturgüter.....	158
7.1.6	Sonstige Sachgüter	159
7.1.7	Natürliche und anthropogene Strukturen, von denen eine besondere Gefährdung der Schutzgüter gegenüber den vorhabenspezifischen Wirkfaktoren ausgeht.....	159
7.2	Empfehlung für die Potenzialbewertung	160
7.3	Bewertung im Rahmen von Zulassungsverfahren	161
7.4	Fazit	162

8 Quellenverzeichnis.....	164
---------------------------	-----

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Übersicht über verschiedene Formen der geologischen Speicherung	6
Abbildung 2: Überblick über potenzielle Wege von CO ₂ aus der Speicherstätte an die Oberfläche	32
Abbildung 3: Potenzielle Wegsamkeiten im Bereich von aktiven und alten Bohrungen.....	34
Abbildung 4: Untersuchung entlang eines Transektes in der Laterna Caldera.....	64
Abbildung 5: Übersicht über mögliche Schäden an Gebäuden und Außenanlagen wie sie durch bergbauliche Bodenbewegungen auftreten können	100
Abbildung 6: Zweistufige Verknüpfung zur Ermittlung der Schwere einer Beeinträchtigung	138
Abbildung 7: Phasen eines CO ₂ -Speichervorhabens, notwendige Anträge und Genehmigungen sowie (in rot gerahmte Blöcke) wesentliche Anforderungen für einzelne Anträge	146

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht über die in den einzelnen Projektphasen auftretenden Wirkfaktoren beim bestimmungsgemäßen Betrieb der Anlagen.....	15
Tabelle 2: Übersicht über die beim nicht bestimmungsgemäßen Betrieb in der Injektions- und Postinjektionsphase möglicherweise auftretenden spezifischen Wirkfaktoren der Kohlendioxid-Speicherung.....	17
Tabelle 3: Zuordnung von KB-Wert (bewertete Schwingungsstärke) und menschlicher Wahrnehmung	44
Tabelle 4: Übersicht zu Angaben in der Literatur zur Bedeutung verschiedener Kohlen-dioxid-Konzentrationen für den Menschen	49
Tabelle 5: Effekte erhöhter CO ₂ -Konzentrationen auf Tiere	74
Tabelle 6: Erschütterungs-Empfindlichkeitsklassen der Schweizer Richtlinie zur Beurteilung von Erschütterungseinwirkungen auf Bauwerke (SN 640 312 a).	107
Tabelle 7: Bereiche mit hoher Empfindlichkeit und hohem Konfliktpotenzial rot hinterlegt: Für drei und mehr Schutzgüter besonders hohes Konfliktpotenzial	131

1 Einleitung

1.1 Hintergrund des Projektes

Zur Umsetzung des im Dezember 2008 verabschiedeten Klimaschutzpakets der EU wurde im Jahr 2009 auf europäischer Ebene u.a. die so genannte CCS-Richtlinie (CCS-RL)¹ (CCS steht für Carbon Dioxide Capture and Storage) erlassen. Die CCS-RL betrifft die großmaßstäbliche Speicherung von CO₂ und hat hierfür einen einheitlichen europäischen Rahmen geschaffen. Nach Art. 4 CCS-RL können die Mitgliedstaaten entscheiden, ob sie überhaupt eine CO₂-Speicherung auf ihrem Hoheitsgebiet zulassen wollen. Ist dies der Fall, bestimmen die Mitgliedstaaten die Gebiete, aus denen Speicherstätten ausgewählt werden können, und bewerten ihre Speicherkapazitäten.

Zur Umsetzung der CCS-RL wurde mittlerweile das Kohlendioxid-Speicherungsgesetz (KSpG)² erlassen. Die CSS-RL sowie das KSpG zielen darauf ab, dass die CO₂-Speicherung umweltverträglich und unter Vermeidung von negativen Auswirkungen und Risiken für die Umwelt und die menschliche Gesundheit erfolgt.

In Umsetzung von Art. 4 Abs. 2 CCS-RL sieht § 5 KSpG eine Bewertung der in Deutschland vorhandenen Speicherpotenziale vor. Gemäß § 5 Abs. 3 KSpG obliegt dem Umweltbundesamt die Aufgabe, für die bundesweite Potenzialbewertung der unterirdischen Kohlendioxidspeicherung (CCS) die fachlichen Grundlagen für eine wirksame Umweltvorsorge zu erarbeiten. Entsprechend § 3 Nr. 14 KSpG, der den Begriff der „Umwelt“ definiert, bezieht sich die wirksame Umweltvorsorge auf Tiere, Pflanzen, die biologische Vielfalt, den Boden, das Wasser, die Luft, das Klima und die Landschaft sowie Kultur- und sonstige Sachgüter (Umweltgüter) einschließlich der Wechselwirkungen zwischen diesen Umweltgütern sowie zwischen diesen Umweltgütern sowie zwischen diesen Umweltgütern und Menschen.

Für die Abschätzung der Umweltauswirkungen auf die abiotischen Schutzgüter (Boden, Wasser, Klima und Luft) werden im Umweltbundesamt eigene Forschungsvorhaben durchgeführt. Gegenstand dieses Berichts ist die Abschätzung der Umweltauswirkungen auf die verbleibenden Schutzgüter Tiere, Pflanzen, biologische Vielfalt, Landschaft sowie Kultur- und sonstige Sachgüter. Als weiteres Schutzgut ist der Mensch zu betrachten, da eine Zulassung für die Errichtung, den Betrieb oder eine wesentliche Änderung eines Kohlendioxidspeichers nach § 11 -13 KSpG nur erteilt werden darf, wenn Gefahren für Mensch und Umwelt nicht hervorgerufen werden und die erforderliche Vorsorge gegen Beeinträchtigungen von Mensch und Umwelt getroffen wird, insbesondere durch Verhinderung von Unregelmäßigkeiten. Es

¹ 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, ABl. Nr. L 140 vom 05.06.2009, S. 114.

² Gesetz zur Demonstration der dauerhaften Speicherung von Kohlendioxid (Kohlendioxid-Speicherungsgesetz - KSpG) vom 17. August 2012 (BGBl. I S. 1726).

wird darauf hingewiesen, dass der Bericht auftragsgemäß auf Grundlage der bisherigen in der Literatur niedergeschriebenen Erkenntnisse zur Speicherung von CO₂ erstellt wurde.

Ziel dieser Expertise ist es, handhabbare Bewertungsmaßstäbe und -methoden zu entwickeln, mit denen das Umweltbundesamt die Auswirkungen auf die genannten Umweltschutzgüter im Rahmen der Potenzialanalyse bewerten kann. Darüber hinaus sollen Handreichungen, die für Stellungnahmen des Umweltbundesamtes vor Entscheidungen nach den §§ 7, 13, 17 und 37 KSpG anwendbar sind, geschaffen werden.

1.2 Gegenstand der Untersuchung

CCS steht für Carbon Dioxide Capture and Storage, also für die Abscheidung und Speicherung von Kohlendioxid. Dabei können drei Schritte unterschieden werden: die Abscheidung des Kohlendioxids (CO₂) aus dem Abgasstrom, der Transport zum Speicherort und die anschließende langfristige Speicherung im Untergrund. Gegenstand der vorliegenden Unterlage sind ausschließlich mögliche Auswirkungen einer langfristigen Speicherung von CO₂, nicht die der Abscheidung oder des Transportes.

Ermittelt und beschrieben werden die möglichen Auswirkungen einer Speicherung von CO₂ auf die Schutzgüter Mensch, Tiere, Pflanzen, biologische Vielfalt, Landschaft, Kultur- und sonstige Sachgüter. Hierzu werden sowohl die Wirkfaktoren des bestimmungsgemäßen Betriebes als auch eines nicht bestimmungsgemäßen Betriebes in die Betrachtung einbezogen.

Wirkfaktoren des bestimmungsgemäßen Betriebes ergeben sich aus den prognostizierten Wirkungen des Speicherbetriebes. Dabei wird davon ausgegangen, "dass das injizierte CO₂ in seiner Gesamtheit prognosegemäß in der Speicherstätte verbleibt und der Speicher sich prognosegemäß entwickelt."³ Wirkfaktoren des nicht bestimmungsgemäßen Betriebs ergeben sich als Folge unplanmäßiger Ereignisse, die nie vollständig ausgeschlossen werden können. In Orientierung an der Klassifikation aus der Störfallverordnung (StörfallV) sind bei der Betrachtung des nicht bestimmungsgemäßen Betriebes diejenigen Gefahren im Fokus, die vernünftigerweise nicht auszuschließen sind. Exzeptionelle Gefahrenquellen wie die eruptive CO₂-Freisetzung aus der Speicherformation über Gesteinsklüfte und Störungen, z. B. in Folge von Starkbeben, Meteoriteinschlägen oder vulkanogenen Ereignissen oder die komplette Zerstörung von Über Tageanlagen⁴ werden nicht betrachtet. Die ursächlich auf die CO₂-Speicherung zurückgehenden Wirkfaktoren bei diesen exzeptionellen Gefahren sind im Wesentlichen mit den hier betrachteten vergleichbar. Zwar ist die Stärke der Wirkung, also beispielsweise die Menge des freigesetzten CO₂, unter Umständen größer, aber die Art der Wirkung ist die Gleiche. Hinzu kommt, dass die auf die CO₂-Speicherung zurückzuführenden Wirkungen stark von denen des exzeptionellen Ereignisses überlagert werden, z.B. von den Schäden, die durch ein Starkbeben verursacht würden.

Für die identifizierten Wirkfaktoren wird (soweit es aus der vorliegenden Literatur ableitbar ist) für jedes betrachtete Schutzgut das mögliche Ausmaß der Beeinträchtigung beschrieben. Für

³ Großmann et al. (2011a), S. 23.

⁴ Vgl. Großmann et al. (2011a), S. 30.

die Auswirkungsabschätzung im Rahmen der Potenzialbewertung werden in Bezug auf die Wirkfaktoren konfliktäre Bereiche bzw. Ausprägungen definiert. Auf der Grundlage der für die Potenzialbewertung identifizierten Auswirkungen wird die Spanne der möglichen Konflikte aufgezeigt und es werden Empfehlungen/Vorschläge abgeleitet. Darüber hinaus wird eine Liste von Informationen entwickelt, die für die Bewertung im Rahmen eines Zulassungsverfahrens grundsätzlich notwendig sind.

1.3 Rechtliche Grundlagen

1.3.1 Europäische Vorgaben

Zur Umsetzung des im Dezember 2008 verabschiedeten Klimaschutzpakets der EU wurde im Jahr 2009 auf europäischer Ebene u.a. die so genannte CCS-Richtlinie⁵ erlassen. Deren erste 30 Artikel haben einen einheitlichen europäischen Rechtsrahmen für die geologische Speicherung von CO₂ geschaffen. Hinsichtlich der Abscheidung und des Transports des CO₂ wurden durch die Artikel 31-37 der CCS-RL Änderungen bestehender EG-Richtlinien vorgenommen. Die CCS-RL betrifft die großmaßstäbliche Speicherung von CO₂ – die in geringem Umfang (< 100.000 t) zu Forschungszwecken bzw. zur Entwicklung oder Erprobung neuer Produkte und Verfahren erfolgende Speicherung von CO₂ ist vom Geltungsbereich der CCS-RL ausdrücklich ausgenommen (Art. 2 Abs. 2 CCS-RL).

Nach Art. 4 CCS-RL können die Mitgliedstaaten entscheiden, ob sie überhaupt eine CO₂-Speicherung auf ihrem Hoheitsgebiet zulassen wollen. Ist dies der Fall, bestimmen die Mitgliedstaaten die Gebiete, aus denen Speicherstätten ausgewählt werden können, und bewerten ihre Speicherkapazitäten. Bei der Bewertung der Eignung von Speicherstätten sind die Kriterien des Anhangs I der Richtlinie zu berücksichtigen, wobei es vor allem auf die Bewertung des Leckagerisikos und der Gefahren für die Umwelt oder die Gesundheit ankommt.⁶ Die Richtlinie enthält zudem u.a. Vorgaben für die Zulassung der Exploration von Speicherstätten und der Speicherung sowie Betreiber- und Überwachungspflichten.

1.3.2 Umsetzung in Deutschland

Die CCS-RL wurde lange Zeit nicht in deutsches Recht umgesetzt. Dabei bestand weitgehend Einigkeit darüber, dass die noch recht junge CCS-Technologie von den deutschen Zulassungsregelungen, wie insbesondere berg-, abfall- und wasserrechtlichen Regelungen, nicht ausreichend erfasst ist.⁷ Nachdem bereits im Jahr 2009 der erste Versuch ein CCS-Gesetz auf den Weg zu bringen aufgrund der sog. Länderklausel im Bundesrat gescheitert war, ist nunmehr das Gesetz zur Umsetzung der CCS-RL – das so genannte Kohlendioxid-Speicherungsgesetz⁸ – in Kraft. Mit dem in seinem Anwendungsbereich stark eingeschränkten

⁵ Siehe Fn. 1.

⁶ *Kohls/Kahle* (2009), S. 126.

⁷ *Kohls/Kahle* (2009), S. 124; vgl. zudem *BMWi/BMU/BMBF* (2007), S. 8.

⁸ Siehe Fn. 2.

Gesetz soll zunächst ein Rechtsrahmen für die Demonstration und Anwendung der Abscheidungs- und Transporttechnologien sowie für die Demonstration der dauerhaften Speicherung in wenigen, kleineren bis mittleren CO₂-Speichern (< 1,3 Mio. t) geschaffen werden, um die Eignung der CCS-Technologien zur Reduktion von Kohlendioxidemissionen ermitteln zu können.⁹ Das Gesetz befand sich recht lang im Gesetzgebungsverfahren: Es wurde vom Deutschen Bundestag am 07.07.2011 in der Fassung des Umweltausschusses verabschiedet.¹⁰ Da der Bundesrat dem Gesetz jedoch am 23.09.2011 seine Zustimmung versagte,¹¹ wurde der Vermittlungsausschuss angerufen.¹² Dieser hatte die Beratungen zu dem CCS-Gesetzentwurf mehrmals vertagt. Nach achtmonatigen Verhandlungen im Vermittlungsausschuss hatten Bund und Länder am 27.06.2012 eine Einigung erreicht, die jedoch noch der Bestätigung durch Bundestag und Bundesrat bedurfte.¹³ Handlungsdruck bestand zumindest von Seiten der Europäischen Union, denn die EU-Kommission hatte im Juli 2011 wegen nicht fristgerechter Umsetzung der CCS-RL¹⁴ ein Vertragsverletzungsverfahren gegen Deutschland eingeleitet. Zudem sah der Ende 2011 von der EU-Kommission vorgelegte Entwurf der Beihilferichtlinien vor, dass eine 15-prozentige Förderung der Investitionen in hocheffiziente Kraftwerke nur zulässig sein sollte, wenn diese CCS-fähig sind und bis 2020 tatsächlich CCS einsetzen. Ansonsten könnten hocheffiziente CCS-fähige Kraftwerke nur mit zehn Prozent der Investitionskosten gefördert werden. Für den Neubau nicht CCS-fähiger hocheffizienter Kraftwerke war der zulässige Fördersatz auf fünf Prozent beschränkt.

Das Kohlendioxid-Speicherungsgesetz wurde schließlich am 17.08.2012 vom Bundestag mit Zustimmung des Bundesrates beschlossen und ist am 24.08. 2012 in Kraft getreten.

Das KSpG ist der CCS-RL in seiner Konzeption ähnlich. Das Gesetz enthält überwiegend Regelungen zur Speicherung von CO₂. Hinsichtlich des Transports via Leitungen ist eine Planfeststellungspflicht vorgesehen. Zur Regelung der Abscheidung von CO₂ erfolgen Ergänzungen in Fachgesetzen, wie beispielsweise dem Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP).

Im Hinblick auf die dauerhafte Speicherung von CO₂ sieht das Gesetz Regelungen für die Untersuchung, Errichtung, den Betrieb, die Überwachung und Stilllegung von CO₂-Speichern sowie zur Übertragung der Verantwortung für stillgelegte CO₂-Speicher auf den Staat und die Regulierung des Anschlusses und des Zugangs zu CO₂-Leitungen und zu CO₂-Speichern vor. In Umsetzung des Art. 4 CCS-RL regelt das Gesetz im Bereich der dauerhaften Speicherung von Kohlendioxid zunächst die Erforschung, Erprobung und Demonstration der CCS-Technik (§ 1

⁹ Gesetzentwurf der Bundesregierung, BR-Drs. 214/11 vom 15.04.2011, S. 1 Punkt A.

¹⁰ BT-Plenarprotokoll 17/120 v. 07.07.2011, S. 13967A.

¹¹ BR-Plenarprotokoll 886 vom 23.09.2011, TOP 10, S. 397B – 402A.

¹² Vgl. BT-Drs. 17/7543 vom 26.10.2011, Unterrichtung des Bundestages über die Anrufung des Vermittlungsausschusses durch die Bundesregierung.

¹³ Bundesrat (2012).

¹⁴ Die Umsetzungsfrist lief am 25.06.2011 ab, Art. 39 Abs. 1 CCS-RL.

Satz 2 KSpG). Mit der beschränkten Zulassung einer kleinen Anzahl von Demonstrationsspeichern und der vorgesehenen Evaluierung des Gesetzes soll der Bundesregierung zufolge herausgestellt werden, dass die weitere Entwicklung und kommerzielle Anwendung der CCS-Technologien von den Ergebnissen der durch das Gesetz vorgesehenen Erprobungs- und Demonstrationsphase abhängt.¹⁵

In Umsetzung von Art. 4 Abs. 2 CCS-RL sieht § 5 KSpG eine Bewertung der in Deutschland vorhandenen Speicherpotenziale vor. Für diese Potenzialanalyse und -bewertung soll gemäß § 5 Abs. 3 KSpG das Umweltbundesamt die Grundlagen erarbeiten, die für eine wirksame Umweltvorsorge erforderlich sind. Dies soll insbesondere durch Ermittlung und Abschätzung der mit der dauerhaften Speicherung verbundenen Umweltauswirkungen erfolgen. Hierbei ist zu beachten, dass der Vorsorgemaßstab bei Kohlendioxidspeichern besonders hoch ist, indem § 13 Abs. 1 Nr. 4 KSpG auf den „Stand von Wissenschaft und Technik“ rekuriert. Diesem – bislang nur aus dem Atomrecht¹⁶ bekannten – besonders hohen Vorsorgestandard ist bei der Entwicklung der Bewertungsmaßstäbe und -methoden Rechnung zu tragen. Die Ermittlung und Abschätzung der Umweltauswirkungen ist Gegenstand dieses Berichts.

2 Fachliche Grundlagen zur CO₂-Speicherung

CCS ist ein Prozess, der aus der Abscheidung von CO₂, dem Transport zum Speicherort und der anschließenden langfristigen Speicherung im Untergrund besteht. Durch die dauerhafte Speicherung von CO₂ und damit Verringerung der Treibhausgasemission soll ein Beitrag zum Klimaschutz geleistet werden. Die Technik ist vor allem für Emittenten von großen CO₂-Mengen, wie Kohlekraftwerken oder der Stahl- und Zement-Industrie, von Interesse¹⁷.

Es gibt verschiedene Möglichkeiten CO₂ zu speichern. Neben der geologischen Speicherung von CO₂ kann es durch chemische Prozesse in anorganische Carbonate umgewandelt und dann gelagert werden. Darüber hinaus wird die industrielle Nutzung von CO₂ (z.B. Produktion von Mikroalgen, Urea und Methanol) zur Reduktion der Emissionen diskutiert. Die Einsparpotenziale sind jedoch nach gegenwärtigem Kenntnisstand relativ gering¹⁸.

Diskutiert wurde auch eine Speicherung im Meer. Hierbei wird das CO₂ in die Wassersäule injiziert oder auf dem Meeresboden in hyperkritischer Form abgelagert. Aufgrund der hohen Risiken für die Umwelt ist dieses Verfahren aber entsprechend Art. 2 der europäischen Richtlinie 2009/31/EG verboten.

Die CCS-Richtlinie befasst sich mit der geologischen Speicherung von CO₂. Bei der geologischen Speicherung wird das verflüssigte CO₂ in tiefe poröse geologische Formationen wie z. B. ehemalige Erdöl- und Erdgaslagerstätten, tiefe Kohleflöze oder Saline Aquifere injiziert (s. Abbildung 1). Bei der geologischen CO₂-Speicherung kommen Techniken zum Einsatz, die sich

¹⁵ Gesetzentwurf der Bundesregierung, BR-Drs. 214/11 vom 15.04.2011, S. 1 f. Punkt B.

¹⁶ Vgl. hierzu *Kloepfer* (2004), § 15 Rn. 70.

¹⁷ *Ipcc* (2005), S. 3.

¹⁸ *Peters* (2011); *Ipcc* (2005), S. 319 ff.

bereits im Rahmen der Öl- und Gasförderung bewährt haben. Speziell zur Speicherung von Erdgas, flüssigen Abfallprodukten und Sauergas gibt es in Kanada und den USA seit 1990 umfangreiche Erfahrungen. Wird das flüssige CO₂ in geologische Formationen in über 800 m Tiefe injiziert, so gibt es eine Reihe physikalischer und geochemischer Barrieren, die ein Aufsteigen an die Oberfläche in der Regel verhindern.

Essentiell ist eine undurchlässige Deckschicht, denn in großen Tiefen bleibt das Gas aufgrund der herrschenden Drücke und Temperaturen in flüssiger Form und aufgrund der, im Vergleich zum Formationswasser, geringeren Dichte herrschenden Auftriebskräfte¹⁹.

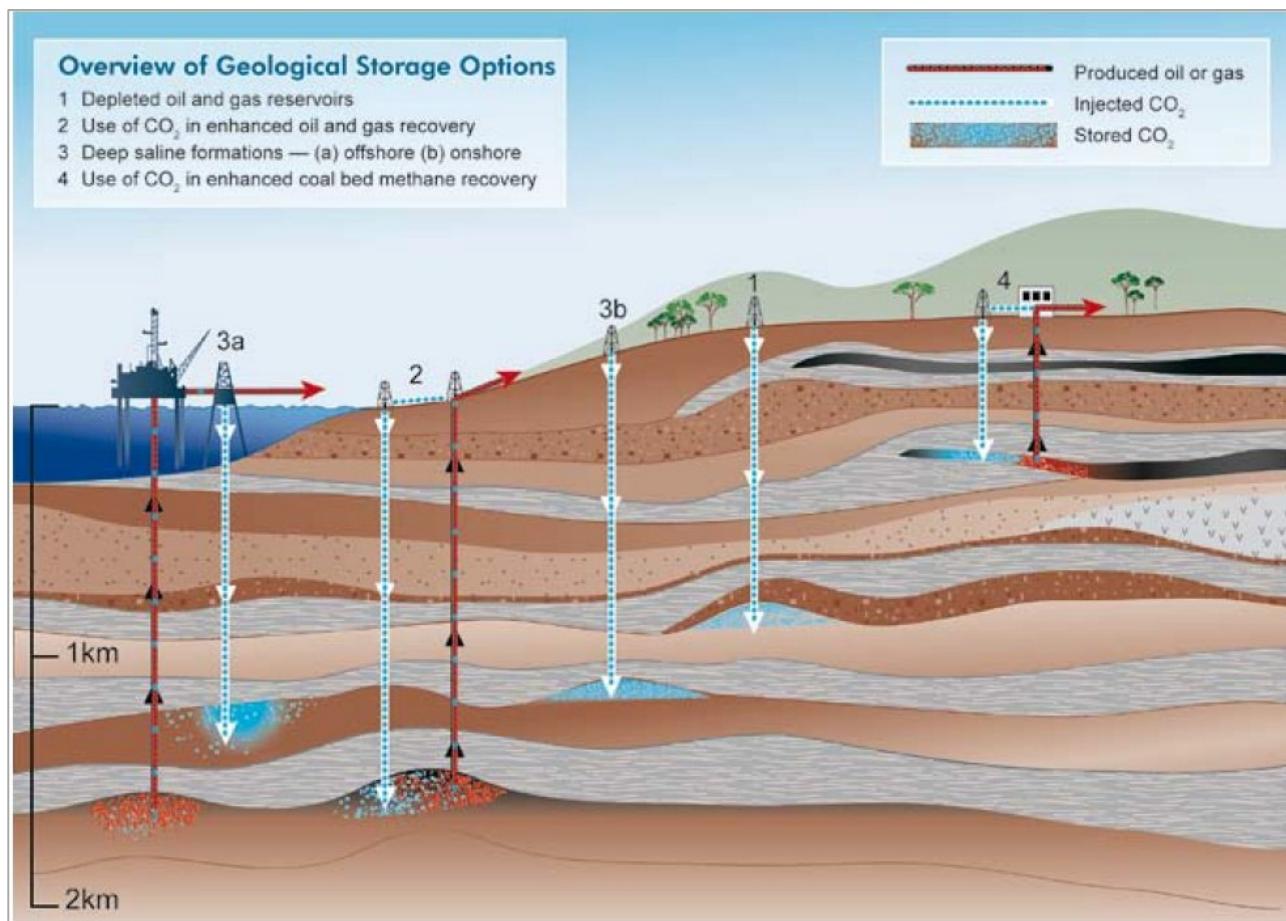


Abbildung 1: Übersicht über verschiedene Formen der geologischen Speicherung²⁰

Legende:

- 1 Erschöpfte Öl- und Gaslagerstätten
- 2 Nutzung von CO₂ zur verbesserten Öl- und Gasgewinnung
- 3 Tiefe Saline Formationen – (a)Offshore (b)Onshore

¹⁹ *Ipcc* (2005), S. 197 ff.

²⁰ *Ipcc* (2005), S. 6.

4 Nutzung von CO₂ zur verbesserten Methangewinnung aus Kohleflözen

2.1 Erdöl- und Erdgaslagerstätten

Ausgeförderte Erdöl- und Erdgaslagerstätten werden im Allgemeinen als gut geeignete CO₂-Speicher angesehen, da ihre Dichtheit bereits erwiesen ist. Diese Speicher haben über Jahrtausende eine geeignete Abdeckung für Erdöl und Erdgas aufgewiesen. CO₂ hat allerdings andere chemische Eigenschaften, die beachtet werden müssen. Beispielsweise könnte Kohlensäure zu einem sauren und korrosiven Milieu führen, wodurch chemische Reaktionen mit den umgebenden geologischen Strukturen ausgelöst werden können²¹.

Bei der Enhanced Oil Recovery (EOR) wird bereits heute CO₂ in Ölfelder injiziert, um die Ausbeute zu steigern. Ähnliche Techniken werden zurzeit auch bei Gasfeldern erprobt (Enhanced Gas Recovery, EGR).

2.2 Tiefe Kohleflöze

Als weitere Speichermöglichkeit wird die Einspeisung von CO₂ in tiefe, nicht abbaubare Kohleflöze angesehen. Durch den Kontakt mit der Kohleoberfläche soll das Gas adsorbiert und dadurch gebunden werden. Dieser Effekt wurde aber bisher nur im Labormaßstab nachgewiesen. In Deutschland wird diese Ablagerungsoption nicht verfolgt, da der Untergrund durch die Kohleförderung offenbar zu zerklüftet ist²².

2.3 Tiefe Saline Aquifere

Den volumenmäßigen größten Anteil potenzieller geologischer Speichermöglichkeiten stellen die tiefen Salinen Aquifere²³ dar. In Deutschland sind die Salinen Aquifere im Bereich der norddeutschen Tiefebene und der Nordsee verbreitet. Nach der Injektion des CO₂ in das Aquifer wird das Porenwasser zunächst durch das verflüssigte Gas verdrängt. Da es eine geringere Dichte als das umgebende Wasser hat, steigt das CO₂ in der Formation bis zur Deckschicht auf. Dabei wird ein kleiner Teil kapillar in den Poren des Untergrundes eingelagert. Das unter der Deckschicht gesammelte CO₂ löst sich nach und nach an der Grenzfläche zur Wasserschicht und es bildet sich Kohlensäure. Da das CO₂-haltige Wasser eine höhere Dichte hat und damit schwerer ist als das Salzwasser sinkt es ab. Dadurch kann weiteres CO₂-freies Wasser nachströmen und CO₂ aufnehmen. Langfristig geht so das gesamte mobile CO₂ in Lösung. Nach CO₂-Sättigung des Wassers tritt, bei ausreichender Kationenverfügbarkeit, eine mineralogische Fällung von Karbonaten ein. Dieser Prozess wird aber erst im Laufe von Jahrtausenden relevant und trägt dann zur Langzeitsicherheit bei²⁴. Diese grundlegenden Ablagerungsmechanismen stellen einen theoretischen optimalen Verlauf dar. Über das

²¹ Wuppertal Institut Für Klima Umwelt Energie GmbH (2010), S. 113.

²² Wuppertal Institut Für Klima Umwelt Energie GmbH (2010), S. 114; Ipcc (2005), S. 217-219.

²³ Aquifere sind Grundwasserleiter, deren poröse Sedimentschichten mit Trinkwasser oder wie in diesem Fall mit Sole gesättigt sind.

²⁴ Wuppertal Institut Für Klima Umwelt Energie GmbH (2010), S. 113 u. 118.

tatsächliche Verhalten des CO₂ in der Speicherstätte liegen bisher keine Langzeiterfahrungen vor, da sich die Prozesse in einem Zeitraum von hunderten bis tausenden Jahren abspielen.

3 Beschreibung möglicher Auswirkungen der CO₂-Speicherung auf die zu betrachtenden Schutzgüter

In der Erwägung der Gründe zur CCS-Richtlinie heißt es, dass eine Speicherstätte u.a. nur dann genutzt werden sollte, wenn nicht mit erheblichen Auswirkungen auf die Umwelt und die Gesundheit zu rechnen ist.²⁵ Nach Artikel 1 Abs. 2 der Richtlinie sind negative Auswirkungen und Risiken für die Umwelt und die menschliche Gesundheit zu vermeiden, oder wenn dies nicht möglich ist, so weit wie möglich zu beseitigen.

In diesem Sinne unterliegt die Speicherung von CO₂ im geologischen Untergrund im Zulassungsverfahren der UVP, entsprechende Unterlagen sind gemäß § 12 Abs. 2 KSpG einem Antrag auf Planfeststellung für Errichtung und Betrieb beizufügen. Dementsprechend orientiert sich die nachfolgende Untersuchung und Bewertung möglicher Auswirkungen der Kohlendioxid-Speicherung an den Maßstäben einer solchen Umweltverträglichkeitsuntersuchung und einer erheblichen Beeinträchtigung im Sinne des UVPG.

Basis für die Ermittlung und Bewertung der Auswirkungen eines Vorhabens auf die Umwelt sind üblicherweise einerseits die Bestandteile des Vorhabens in all seinen Teilen und Wirkungen und andererseits die im Einwirkungsbereich des Vorhabens tatsächlich vorhandenen Werte und Funktionen für die verschiedenen Schutzgüter. Auf dieser Grundlage werden die vom Vorhaben ausgehenden Wirkungen (Wirkfaktoren) nach Art, Ausmaß und Intensität identifiziert und dann die voraussichtlichen Auswirkungen auf die Schutzgüter ermittelt. Dabei sind die konkrete räumlich differenzierte Ausprägung, der Wert und der Schutzstatus sowie die spezifische Empfindlichkeit der Schutzgüter ebenso zu berücksichtigen, wie vorhandene Vorbelastungen und bestehende Wechselwirkungen.

Für die vorliegende Untersuchung stehen diese Grundlagen jedoch nicht mit der entsprechenden Informationstiefe zur Verfügung. Gegenstand der Untersuchung ist weder ein konkretes Vorhaben noch ein bestimmter Raum, sondern allgemein der Vorhabentyp Kohlendioxid-Speicherung im tiefen Untergrund, für den eine Abschätzung grundsätzlich möglicher Auswirkungen auf verschiedene Schutzgüter erfolgt.

Die Literatur zum Thema Kohlendioxid-Speicherung ist zwar umfangreich, aber umfassende und ausreichend konkrete Beschreibungen geplanter Vorhaben mit allen Phasen und Maßnahmen liegen nicht vor. Zwar werden in der Literatur bestimmte Wirkungen, die von den verschiedenen Maßnahmen und Phasen eines CO₂-Speichervorhabens ausgehen bzw. ausgehen könnten, thematisiert, aber die Erfassung der möglichen Wirkfaktoren bleibt unvollständig. Ganz besonders zur Erkundung und zum Monitoring werden eine Vielzahl möglicher

²⁵ Vgl. Nr. 20 der erwogenen Gründe.

Methoden genannt²⁶, ohne dass erkennbar ist, welche tatsächlich zur Anwendung kommen werden.

Insbesondere die vorliegenden Gutachten zur "Sicherheit und Umweltverträglichkeit der CO₂-Speicherung – Speicherprozesse"²⁷ und "Sicherheit und Umweltverträglichkeit der CO₂-Speicherung – Risikoanalyse und systematische Risikominimierung (SUCOR)"²⁸ geben gute Einblicke in einige für diesen Vorhabentyp spezifische Vorhabenbestandteile und -wirkungen. Ergänzend wird für die Auswirkungsabschätzung auf die gutachterliche Erfahrung mit anderen Vorhabentypen zurückgegriffen.

Auf dieser Datenbasis kann eine Reihe von zu erwartenden oder denkbaren Wirkungen benannt werden. Es ist aber weder möglich das Ausmaß, die Intensität, die räumliche oder die zeitliche Verteilung der Wirkungen anzugeben, noch die tatsächlich von Auswirkungen betroffenen Werte und Funktionen auf Seiten der einzelnen Schutzgüter zu konkretisieren. Betont werden muss daher, dass eine belastbare Auswirkungsprognose, die nur auf der Basis der spezifischen Angaben zu einem konkreten Vorhaben und der Bestandsanalyse für die Schutzgüter im betroffenen Wirkraum dieses Vorhabens möglich ist, einem entsprechenden Gutachten für ein geplantes Vorhaben beispielsweise im Rahmen eines Genehmigungsverfahrens vorbehalten ist.

3.1 Ermittlung der vorhabenspezifischen Wirkfaktoren

Bei einer umfassenden Analyse möglicher Auswirkungen der Kohlendioxid-Speichervorhaben sind neben den voraussichtlichen Wirkungen der planmäßigen Speicherung auch die möglichen Wirkungen denkbarer, unplanmäßiger Gefahren, Unfälle und Störfälle zu berücksichtigen. Großmann et al.²⁹ unterscheiden entsprechend bei ihren Untersuchungen zwischen dem "bestimmungsgemäßen Betrieb" und dem "nicht bestimmungsgemäßen Betrieb". Dieses Begriffspaar ist der Vollzugshilfe zur Störfall-Verordnung³⁰ entnommen. Dort ist der bestimmungsgemäße Betrieb "der zulässige Betrieb, für den die Anlagen, Infrastrukturen und Tätigkeiten in einem Betriebsbereich nach ihrem technischen Zweck bestimmt, ausgelegt und geeignet sind. [...] Betriebszustände, die der erteilten Genehmigung, vollziehbaren nachträglichen Anordnungen oder Rechtsvorschriften nicht entsprechen, gehören zum nicht bestimmungsgemäßen Betrieb."

Großmann et al.³¹ verstehen unter dem bestimmungsgemäßen Betrieb, "*dass das injizierte CO₂ in seiner Gesamtheit prognosegemäß in der Speicherstätte verbleibt und der Speicher sich*

²⁶ Vgl. Schilling/Krawczyk (2011).

²⁷ Bauer/Schäfer (2011); Großmann et al. (2011a); Großmann et al. (2011b); Großmann/Woiwode/Dahmke (2011); Schäfer (2011); Schilling/Krawczyk (2011).

²⁸ Kronimus et al. (2011).

²⁹ Großmann et al. (2011a).

³⁰ BMU (2004), Punkt 2, S. 3.

³¹ Großmann et al. (2011a), S. 23.

prognosegemäß entwickelt. Eine begrenzte Druckausbreitung innerhalb der Speicherstätte und den rückhaltenden Formationen wird als bestimmungs-gemäß betrachtet, sofern er im Prognoserahmen liegt".³² Demgemäß schließen sie im bestimmungsgemäßen Betrieb eine Freisetzung von CO₂ und Begleitstoffen in Schichten oberhalb der Speicher- und der Rückhalteformationen aus. Entsprechend schließen sie für den bestimmungsgemäßen Betrieb auch eine nachfolgende Freisetzung des gespeicherten CO₂ in den Bereich der oberflächennahen Schutzgüter aus³³. Diese Auffassung deckt sich mit dem in § 1 KSpG formulierten Zweck des Gesetzes, das der Gewährleistung einer dauerhaften Speicherung von Kohlendioxid in unterirdischen Gesteinsschichten dient. Unter einer dauerhaften Speicherung ist gemäß § 3 Nr. 1 KSpG die Injektion und behälterlose Lagerung von Kohlendioxid und Nebenbestandteilen des Kohlendioxidstroms (Begleitstoffen) in tiefen unterirdischen Gesteinsschichten mit dem Ziel zu verstehen, auf unbestimmte Zeit eine Leckage zu verhindern. Eine Leckage, d. h. ein Austritt von Kohlendioxid oder von Begleitstoffen aus dem Speicherkomplex, widerspricht somit dem Ziel des Gesetzes, wobei der Speicherkomplex sowohl das Speichergestein und die umgebenden geologischen Barrieren als auch die oberirdischen Einrichtungen umfasst.³⁴

Großmann et al.³⁵ verweisen aber auch darauf, dass zulässige Leckageraten diskutiert werden. Stange & Duijnisveld³⁶ halten die Annahme einer Leckagerate von 0,01 % der gespeicherten CO₂-Menge pro Jahr für eine realistische Größenordnung, da in Berichten von Enhanced-Oil-Recovery-Projekten jährliche CO₂-Emissionen in die Atmosphäre in der Höhe von ca. 0,01 % der jährlichen Injektion genannt werden.

Bei der Ermittlung der Wirkfaktoren des bestimmungsgemäßen Betriebs wird der Auffassung von Großmann et al. gefolgt und eine Freisetzung von CO₂ und Begleitstoffen in Schichten oberhalb der Speicher- und der Rückhalteformationen ausgeschlossen. Dennoch ist der bestimmungsgemäße Betrieb nicht ohne Auswirkungen auf die Umwelt. Als voraussichtliche Auswirkungen werden von Großmann et al.³⁷ unter Anderem großflächige Landhebungen im Zenti- bis Dezimeterbereich, die Erhöhung der Seismizität und Veränderungen der Flüssigkeitsströmungen im Untergrund genannt.

3.1.1 Vorhabenübersicht

Üblicherweise unterscheidet man bei geplanten Vorhaben zwischen der Bau- und der Betriebsphase sowie zwischen den bau-, anlagen- und betriebsbedingten Wirkungen. Bei

³² Dabei ist klarzustellen, dass ein Betrieb, der nicht der Zulassung entspricht, nicht mehr bestimmungsgemäß ist. Zudem muss sich die Prognose innerhalb des rechtlich Zulässigen bewegen.

³³ Großmann et al. (2011a), S. 24–25.

³⁴ Vgl. Begriffsbestimmungen in § 3 KSpG und Artikel 3 der Richtlinie 2009/31/EG.

³⁵ Großmann et al. (2011a), S. 24–25.

³⁶ Stange/Duijnisveld (2011), S. 11 und 21.

³⁷ Großmann et al. (2011a), S. 23–28.

Vorhaben, die auf eine bestimmte überschaubare Zeit angelegt sind, kommt gegebenenfalls noch die Rückbauphase mit den rückbaubedingten Wirkungen hinzu.

Gegenstand der vorliegenden Untersuchung ist die Speicherung von Kohlendioxid im tiefen Untergrund (vgl. Kap. 1.2). Das ist ein Vorhabentyp, bei dem deutlich mehr Phasen mit möglichen Wirkungen und Risiken für Natur und Umwelt unterschieden werden müssen.

Die nachfolgende Übersicht über die Vorhabensbestandteile basiert im Wesentlichen auf den im Auftrag des UBA erstellten Forschungsberichten zur Sicherheit und Umweltverträglichkeit der CO₂-Speicherung.³⁸

Untersuchungs- und Erkundungsphase (zwei bis vier Jahre³⁹)

Zu der Untersuchungs- und Erkundungsphase gehört voraussichtlich⁴⁰:

- die Auswertung von vorhandenen Daten;
- computergestützte Modellierungen, die durch weitere Daten zunehmend verfeinert werden;
- die Gewinnung zusätzlicher Daten etwa durch:
 1. Erkundungsbohrungen mit Bohrlochuntersuchungen, Gewinnung von Gesteinskernen und Fluidproben;
 2. aktive und passive seismische Verfahren von der Oberfläche und aus Bohrlöchern;
 3. aktive geoelektrische Verfahren von der Oberfläche und aus Bohrlöchern;
 4. passive geoelektrische Verfahren (Magnetotellurik) aus der Luft (Hubschrauber, Flugzeuge), vom Boden oder aus Bohrlöchern;
 5. Gravimetrie und Deformationsmessungen mit Hilfe von satellitengestützten GPS-basierten Systemen (auch mit emittierten Radarwellen), Nivellements und Neigungsmessungen;
 6. geomechanische Messverfahren mit Deformationssonden im Untergrund, mit GPS-gestützten Messungen oder satellitengestützten Verfahren wie Radarinterferometrie.

Wirkfaktoren in dieser Phase sind voraussichtlich:

- Flächeninanspruchnahme, Boden- bzw. Sedimentverluste;
- im aquatischen Bereich auch Sedimentverwirbelung und Trübung;

³⁸ Bauer/Schäfer (2011); Großmann et al. (2011a); Großmann et al. (2011b); Großmann/Woiwode/Dahmke (2011); Kronimus et al. (2011); Schäfer (2011); Schilling/ Krawczyk (2011).

³⁹ Von Goerne/Weinlich/May (2010), S. 31.

⁴⁰ Vgl. Schilling/Krawczyk (2011)

- Erschütterungen durch Seismiken, Bohrungen und den sonstigen Erkundungsbetrieb;
- Schallemissionen durch Seismiken, Bohrungen, Flugzeuge, Hubschrauber und den sonstigen Erkundungsbetrieb;
- optische Emissionen durch den Erkundungsbetrieb;
- stoffliche Emissionen durch Bohrungen, Fahrzeuge, Schiffe, Flugzeuge, Hubschrauber, Maschinen und Geräte des Erkundungsbetriebs.

Bauphase (ein bis mehrere Jahre)

In dieser Phase erfolgt die Errichtung der zur Einspeicherung und zum begleitenden Monitoring erforderlichen Anlagen über- und untertage (also an der Oberfläche und im Untergrund). Dazu gehören voraussichtlich:

- die der Injektion dienenden Bohrungen;
- Bohrungen für Monitoringzwecke, wobei nach Schilling & Krawczyk⁴¹ für eine gute räumliche Überdeckung ein Abstand von 2–3 km zwischen den Bohrlöchern zweckmäßig ist;
- die Errichtung der für die Einspeicherung erforderlichen Anlagen;
- die Installation der für das Monitoring erforderlichen Anlagen;
- die temporäre baubedingte Inanspruchnahme von Flächen für die Baulogistik (Baustraßen, Lagerflächen etc.).

Baubedingte Wirkfaktoren sind voraussichtlich:

- Flächeninanspruchnahme, Boden- bzw. Sedimentverluste;
- im aquatischen Bereich auch Sedimentverwirbelung und Trübung;
- Erschütterungen durch Bohrungen und den sonstigen Baubetrieb;
- Schallemissionen durch Bohrungen und den sonstigen Baubetrieb;
- optische Emissionen durch den Baubetrieb;
- stoffliche Emissionen durch die Bohrungen und durch Fahrzeuge, Schiffe, Maschinen und Geräte des Baubetriebs.

Injectionsphase (ca. 30-50 Jahre)

In dieser Phase bestehen die für die Einspeicherung und das begleitende Monitoring errichteten Anlagen und entfalten ihre anlagenbedingten Wirkungen auf Natur und Umwelt. Hinzu kommen die betriebsbedingten Wirkungen der errichteten Anlagen und ihrer Nutzung (Verdichter, Pumpen, sonstiger Maschinenbetrieb, betriebsbedingter Verkehr etc.) sowie des eingespeicherten CO₂ und möglicher Begleitstoffe. Außerdem sind die Wirkungen des betriebsbegleitenden Monitorings zu berücksichtigen, für das die gleichen Methoden wie in der

⁴¹ Vgl. Schilling/Krawczyk (2011), S. 28.

Erkundungsphase in Frage kommen. Darüber hinaus ist mit phasenweise auftretenden Maßnahmen zur Optimierung der Betriebsanlagen oder der Anlagen für das Monitoring zu rechnen.

Voraussichtlich sind folgende Wirkfaktoren anlagen- und betriebsbedingt zu berücksichtigen:

- Flächeninanspruchnahme durch die Anlagen über- und unterteg einschließlich der Anlagen des Monitorings;
- Erschütterungen durch den Einspeicher- und Monitoringbetrieb;
- Schallemissionen durch den Einspeicher- und Monitoringbetrieb;
- optische Emissionen durch den Einspeicher- und Monitoringbetrieb;
- stoffliche Emissionen durch Fahrzeuge, Schiffe, Flugzeuge, Hubschrauber, Maschinen und Geräte des Einspeicher- und Monitoringbetriebs;
- im aquatischen Bereich auch Sedimentverwirbelung und Trübung durch den Monitoringbetrieb;
- Anwesenheit und Migration des CO₂ und der Begleitstoffe im Speicher als flüssige Phase;
- langsame Lösung des CO₂ im Speicherstättenfluid, möglicherweise auch Reaktionen mit Bestandteilen der Lagerstättenfluide oder des Umgebungsgesteins;
- Verdrängung von Lagerstättenfluiden;
- Entstehung bzw. Bestehen eines großräumigen Druckfeldes im Untergrund;
- großflächige Landhebungen;
- erhöhte Seismizität.

Postinjektionsphase

Diese Phase kann in vier Abschnitte unterschiedlicher Dauer unterteilt werden:

1. Einspeicherungs-Beendigungsphase (ein bis mehrere Jahre)

Nach Ende der Injektion bleiben die Anlagen zunächst bestehen und das Monitoring läuft weiter, das heißt:

- die anlagenbedingten Wirkfaktoren bestehen weiter;
- die allgemeinen betriebsbedingten Wirkfaktoren bestehen ebenfalls weiter, möglicherweise in reduziertem Umfang, lediglich spezifische Wirkfaktoren der Injektion entfallen;
- die durch das Monitoring bedingten Wirkfaktoren bestehen ebenfalls weiter.

2. Teil-Rückbauphase (ein bis mehrere Jahre)

Ist sichergestellt, dass sich der CO₂-Speicher entsprechend der Prognose verhält, erfolgt nun das dauerhafte Verschließen der Injektionsbohrungen und der Rückbau der oberirdischen Anlagen. Das Monitoring läuft weiter, die dafür benötigten Anlagen bleiben bestehen. Das bedeutet:

- rückbaubedingt kommt es zu einer temporären Flächeninanspruchnahme, zu Erschütterungen, optischen, akustischen und stofflichen Emissionen infolge des Rückbaubetriebes;
- die anlagenbedingten Wirkfaktoren der Übertage-Einrichtungen reduzieren sich entsprechend;
- betriebsbedingt kommt es zu Erschütterungen, optischen, akustischen und stofflichen Emissionen infolge der Überwachung und des Monitorings für den Speicher.

3. Beobachtungsphase (wenige Jahre bis Jahrhunderte)

Die anlagenbedingten Wirkfaktoren der nicht zurückgebauten Anlagenteile und des geologischen Speichers bleiben bestehen, ebenso die Wirkungen des begleitenden Monitorings.

4. Speicherfortbestandsphase (Jahrtausende)

Das regelmäßige Monitoring wird eingestellt, eventuell dafür noch vorgehaltene Anlagen zurückgebaut, was gegebenenfalls kurzzeitig mit entsprechenden rückbaubedingten Wirkungen verbunden ist. Die anlagenbedingten Wirkungen reduzieren sich auf die Untertage-Einrichtungen und den CO₂-Speicher, die betriebsbedingten Wirkfaktoren des begleitenden Monitorings entfallen.

Insgesamt sind für die Postinjektionsphase voraussichtlich die folgenden teils temporären und teils dauerhaften Wirkfaktoren zu berücksichtigen:

- Flächen- bzw. Rauminanspruchnahme der Untertage befindlichen Teile und des Speichers;
- Flächeninanspruchnahme der übertägigen Injektions- und Monitoring-Anlagen;
- rückbaubedingte Flächeninanspruchnahme;
- Erschütterungen durch den Rückbau- und durch den Monitoringbetrieb;
- Schallemissionen durch den Rückbau- und durch den Monitoringbetrieb;
- optische Emissionen durch den Rückbau- und den Monitoringbetrieb;
- stoffliche Emissionen durch Fahrzeuge, Schiffe, Flugzeuge, Hubschrauber, Maschinen und Geräte des Rückbau- und des Monitoringbetriebs;
- im aquatischen Bereich auch Sedimentverwirbelung und Trübung durch den Rückbau- und durch den Monitoringbetrieb;
- Anwesenheit und Migration des CO₂ und der Begleitstoffe im Speicher als flüssige Phase;
- langsame Lösung des CO₂ im Speicherstättenfluid, möglicherweise auch Reaktionen mit den Lagerstättenfluiden und dem Umgebungsgestein;
- Bestehen und langsame Abnahme eines großräumigen Druckfeldes im Untergrund;
- großflächige Landsenkungen durch Abnahme des Druckes infolge der Lösungsprozesse;
- erhöhte Seismizität infolge der Druckänderung;
- Verdrängung von Lagerstättenfluiden infolge des weiterhin bestehenden Druckes.

Maßnahmen der Sicherheits- und Sanierungskonzepte

Zur Abwehr von möglichen Gefahren werden die Sicherheits- und Sanierungskonzepte der CO₂-Speichervorhaben Maßnahmen für den Fall erster Anzeichen eines nicht bestimmungsgemäßen Betriebs vorsehen, also beispielsweise für den Fall, dass eine von der Prognose abweichende Ausdehnung der Speicherstätte oder ein abweichen-der Druck festgestellt wird. Diese Konzepte werden auch Maßnahmen umfassen, die mit zusätzlichen Auswirkungen auf die Umwelt verbunden sein können, beispielsweise:⁴²

- zusätzliche Monitoringmaßnahmen, wie beispielsweise Seismiken;
- kontrolliertes Ablassen von CO₂ (und möglichen Begleitstoffen);
- Injektionsmaßnahmen zum Verschließen von Wegsamkeiten;
- Maßnahmen zur Sanierung der Bodenluft, z. B. durch Abpumpen über Bodenlanzen;
- Förderung von Formationswasser und Verpressung an anderer Stelle;
- verschiedene Maßnahmen zur Grundwassersanierung;
- Sanierungsmaßnahmen an alten Bohrungen.

Diese Maßnahmen werden voraussichtlich mit zusätzlicher Flächeninanspruchnahme, zusätzlichen Erschütterungen sowie zusätzlichen akustischen, optischen und stofflichen Emissionen verbunden sein. Weitere Wirkfaktoren, die sich in Folge dieser Maßnahmen ergeben sind möglich, jedoch ohne Kenntnis der erforderlichen Maßnahmen nicht absehbar. Diese Maßnahmen werden daher nachfolgend nicht weiter berücksichtigt.

3.1.2 Wirkfaktoren des bestimmungsgemäßen Betriebs

Ausgehend von der Vorhabenübersicht in Kapitel 3.1.1 sind in Tabelle 1 die für Speichervorhaben beim bestimmungsgemäßen Betrieb absehbaren Wirkfaktoren zusammengestellt. Zu den Wirkfaktoren sind jeweils die Projektphasen angegeben, in denen sie wirksam werden bzw. auftreten. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Postinjektionsphase weiter in verschiedene Phasen untergliedert werden kann und die Wirkfaktoren nicht immer über die gesamte sehr lange Postinjektionsphase wirksam sind. Im Allgemeinen ist davon auszugehen, dass sich die Wirkfaktoren im Laufe der Postinjektionsphase abschwächen. Insbesondere die Wirkfaktoren der Übertage-Einrichtungen und des Monitorings entfallen in der letzten, Jahrtausende dauernden Phase.

Tabelle 1: Übersicht über die in den einzelnen Projektphasen auftretenden Wirkfaktoren beim bestimmungsgemäßen Betrieb der Anlagen

Wirkfaktor	Erkundungsphase	Bauphase	Injektionsphase	Postinjektionsphase
Flächeninanspruchnahme, Boden- bzw. Sedimentverluste	x	x	x	x
Erschütterung	x	x	x	x

⁴² Vgl. Großmann et al. (2011a), Kapitel 6.

Wirkfaktor	Erkundungsphase	Bauphase	Injektionsphase	Postinjektionsphase
akustische Emissionen	X	X	X	X
optische Emissionen	X	X	X	X
stoffliche Emissionen	X	X	X	X
Sedimentverwirbelungen	X	X	X	X
Anwesenheit von CO ₂ und Begleitstoffen im Speicherkomplex	-	-	X	X
Verdrängung von Lagerstättenfluiden	-	-	X	X
Druckänderungen im Speicher und seiner Umgebung	-	-	X	X
Lösung des CO ₂ im Speicherstättenfluid, und evt. Reaktionen mit Bestandteilen der Lagerstättenfluide oder des Umgebungsgesteins	-	-	X	X
Veränderung des Reliefs durch großflächige Landhebungen	-	-	X	-
Veränderung des Reliefs durch großflächige Landsenkungen	-	-	-	X
Erhöhte Seismizität (Mikrobeben)	-	-	X	X

3.1.3 Wirkfaktoren des nicht bestimmungsgemäßen Betriebs

Das Auftreten von nicht bestimmungsgemäßen Betriebszuständen kann nie ausgeschlossen werden.⁴³ Es ist daher angezeigt, nicht nur die voraussichtlichen Wirkungen des bestimmungsgemäßen Betriebs zu betrachten sondern darüber hinaus auch die nicht auszuschließenden Wirkungen bei nicht bestimmungsgemäßen Betriebszuständen. Diese können nach Großmann et al.⁴⁴ verschiedene Ursachen "wie Materialversagen, unvorhergesehene Prozessabläufe und vor allem menschliches Versagen haben". Die Autoren der Studien zur "Sicherheit und Umweltverträglichkeit der CO₂-Speicherung – Speicherprozesse" weisen außerdem darauf hin, dass es so-wohl bezüglich der Methoden zur Erkundung und Charakterisierung potenzieller Speicherstätten und zum Monitoring wie auch zu den Modellen, die den Prognosen für den bestimmungsgemäßen Betrieb zugrunde liegen, an Erfahrungen fehlt und es noch Forschungs- und Entwicklungsbedarf gibt⁴⁵. Daher sind Fehleinschätzungen und Abweichungen von prognostizierten Entwicklungen des Speicherkomplexes nicht ausgeschlossen.

⁴³ Großmann et al. (2011a), S. 29.

⁴⁴ Großmann et al. (2011a), S. 29.

⁴⁵ vgl. beispielsweise Großmann et al. (2011a), z.B. S. 52, 53, 55, 56, 57/58, 61, 62, 63 und 73 sowie Schilling/Krawczyk (2011), S. 8/9, 16, 17, 21, 22 und 29.

Nach den vorliegenden Gutachten zur Sicherheit und Umweltverträglichkeit der CO₂-Speicherung⁴⁶ sind für den Fall eines nicht bestimmungsgemäßen Betriebs folgende Gefahren möglich:

- Landhebungen bzw. Landsenkungen, die über das für den bestimmungsgemäßen Betrieb prognostizierte (geringe) Maß hinausgehen;
- eine erhöhte Seismizität während der Injektions- und der Postinjektionsphase, die über das prognostizierte geringe Maß hinausgeht;
- Aufstieg von Salzwasser in oberflächennahe Schichten bzw. an die Oberfläche;
- die Freisetzung von CO₂ aus einer Punktquelle (z. B. durch einen Blowout, aus Überage-Einrichtungen, aus einer undichten (alten) Bohrung oder durch unbeabsichtigte zukünftige Erschließung);
- die (schleichende) Freisetzung von CO₂ über größere Flächen (z. B. entlang von Klüften);
- die Leckage anderer Gase (beispielsweise CH₄, H₂S, SO₂, NO oder CO) in oberflächennahe Schichten bzw. in die Atmosphäre.

Einen Überblick über die daraus resultierenden Wirkfaktoren des nicht bestimmungsgemäßen Betriebs gibt Tabelle 2.

Tabelle 2: Übersicht über die beim nicht bestimmungsgemäßen Betrieb in der Injektions- und Postinjektionsphase möglicherweise auftretenden spezifischen Wirkfaktoren der Kohlendioxid-Speicherung

Wirkfaktor	Injektionsphase	Postinjektionsphase
größere Veränderung des Reliefs durch stärkere Landhebungen	x	-
größere Veränderung des Reliefs durch stärkere Landsenkungen	-	x
stärkere Erhöhung der Seismizität	x	x
Aufstieg von salzigem Formationswasser	x	x
Freisetzung von CO ₂ durch Leckage aus dem Speicherkomplex (einschließlich eines Blowout)	x	x
Freisetzung von CO ₂ durch Leckage aus Überage-anlagen	x	-
Freisetzung von Begleitstoffen durch Leckage aus dem Speicherkomplex	x	x
Freisetzung von Begleitstoffen durch Leckage aus Überageanlagen	x	-

Berücksichtigt sind hier lediglich die spezifischen Gefahren, die sich aus der CO₂-Speicherung ergeben. Nicht berücksichtigt sind die Wirkfaktoren denkbarer Unfälle und Störfälle, wie sie auch im Zusammenhang mit anderen Vorhabentypen auftreten können und die beispielsweise zur Freisetzung von Kraftstoffen, Schmiermitteln oder sonstigen Betriebsstoffen führen.

⁴⁶ Bauer/Schäfer (2011); Großmann et al. (2011a); Großmann et al. (2011b); Großmann/Woiwode/Dahmke (2011); Schäfer (2011); Schilling/Krawczyk (2011) Kronimus et al. (2011).

3.1.4 Erläuterungen zu den Wirkfaktoren

Nachfolgend sind für die einzelnen Wirkfaktoren die vorliegenden Kenntnisse zu Ausmaß und Intensität sowie räumlicher und zeitlicher Variabilität zusammengetragen. Darüber hinaus wurden einige Hinweise auf grundsätzlich mögliche Vermeidungs- und Minimierungsmaßnahmen aufgenommen.

Eine Unterscheidung nach bestimmungsgemäßem und nicht bestimmungsgemäßem Betrieb erfolgt an dieser Stelle nicht.

Flächeninanspruchnahme, Boden- bzw. Sedimentverluste

Die Flächeninanspruchnahme im Rahmen der Speichervorhaben ist voraussichtlich sehr vielfältig. Größere zusammenhängende Flächen werden für die Injektionsbohrung(en) und die Übertage-Einrichtungen über einen längeren Zeitraum in Anspruch genommen. Weitere damit in Verbindung stehende Flächen werden wahrscheinlich temporär für die Bau- und Rückbaulogistik als Lagerflächen oder Baustraßen genutzt.

Auch Untersuchung, Erkundung und Monitoring sind voraussichtlich mit einer Inanspruchnahme von Flächen verbunden, die jedoch über einen größeren Raum verteilt sein wird. Genauere Angaben zu Art, Umfang und Dauer der einzelnen Maßnahmen sind gegenwärtig kaum möglich. Das Spektrum reicht von temporären, eventuell wiederholten Nutzungen, über langfristige Einrichtungen bis hin zu dauerhaften Flächenveränderungen durch Bohrungen oder stationäre Anlagen. Voraussichtlich werden auch Messnetze eingerichtet, die in einem regelmäßigen Raster über größere Gebiete verteilt werden. So empfehlen Schilling & Krawczyk⁴⁷ die Installation eines Bohrlochseismometer-Netzwerkes und halten einen Abstand von 2–3 km zwischen den Bohrlöchern für zweckmäßig, um eine gute räumliche Überdeckung zu erreichen.

Boden- und Sedimentverluste entstehen in erster Linie durch die Bohrungen. Aber auch durch Baugruben, Gründungen etc. sind Verluste zu erwarten.

Im Sinne der Vermeidung und Minimierung von Beeinträchtigungen ist die Inanspruchnahme von Flächen, die für ein Schutzgut eine hohe Bedeutung haben, nach Möglichkeit zu vermeiden. Zu empfindlichen Strukturen ist gegebenenfalls ein Abstand einzuhalten, der auch indirekte Schädigungen vermeidet.

Erschütterungen

Die Quellen für mögliche Erschütterungen sind vielfältig. Erschütterungen gehen von jeder Bautätigkeit, von Maschinen und industriellen Anlagen ebenso aus wie von der Nutzung von Verkehrswegen. So sind Erschütterungen in allen Phasen der CO₂-Speichervorhaben zu erwarten. Untersuchungs-, Erkundungs- und Monitoringmaßnahmen können ebenso zu Erschütterungen führen wie Bau, Rückbau und Betrieb der Anlagen. Sie entstehen bei seismischen Untersuchungen, beim Abteufen von Bohrungen, beim Rammen bzw. Einvibrieren

⁴⁷ Schilling/Krawczyk (2011), S. 28.

von Standrohren, von Gründungspfählen und Spundwänden sowie bei bau-, rückbau- oder betriebsbedingten Transportvorgängen.

Für die Bestimmung von Ausmaß und räumlich-zeitlicher Verteilung der Erschütterungen durch die einzelnen vorhabenbedingten Maßnahmen liegen nur wenige Anhaltspunkte vor. Es können nur Annahmen aufgrund von gutachterlichen Erfahrungen mit anderen Vorhaben gemacht werden. Zu erwarten sind vor allem typische verkehrs- und baubedingte Erschütterungen. Hinweise auf starke oder sehr starke vorhabenspezifische Erschütterungsquellen liegen nicht vor.

Voraussichtlich werden sich die Erschütterungen überwiegend auf den Bereich der Injektionsbohrungen, der Übertageeinrichtungen und der zugehörigen Zufahrten konzentrieren. Hier lassen sich signifikante und über längere Zeiträume anhaltende Erschütterungen nicht ausschließen. Im Bereich des von Untersuchung, Erkundung und Monitoring betroffenen Raumes kommt es wahrscheinlich vorwiegend zu geringen, lokal begrenzten und vorübergehenden Erschütterungen, die sich aber in nicht bekannten zeitlichen Abständen durch das Monitoring wiederholen können.

Erschütterungen breiten sich im Boden als Wellen aus und werden dabei an geologischen Schichtengrenzen und teilweise an der Oberfläche des Grundwassers reflektiert und gebrochen. Oberflächennahe Quellen erzeugen überwiegend Oberflächenwellen, bei tiefliegenden Quellen herrschen Raumwellen vor. Die Ausbreitung von Erschütterungen ist ein komplexer Prozess, der nicht nur von der Quelle selbst, sondern auch vom angrenzenden Übertragungsmedium abhängt. Auch die Eigenschaften der Empfänger, also der Körper, auf die die Erschütterungen einwirken, haben Einfluss auf die Stärke der Erschütterungswirkung.⁴⁸

Adäquate Vermeidungsmaßnahmen sind in der Regel zunächst Maßnahmen zur Optimierung des gewählten Verfahrens (beispielsweise Einvibrieren statt Rammen, Ein-pressen statt Vibrieren, passive statt aktive seismische Verfahren, Anlieferung des CO₂ über Pipelines statt per Lkw etc.) und der eingesetzten Maschinen oder Fahrzeuge (optimale Wartung und Pflege von Maschinen und Werkzeugen, Vermeidung unnötiger Lagerspiele, Verwendung scharfer Werkzeuge wie Bohrer und Meißel etc.) sowie – analog zur Flächeninanspruchnahme – das Einhalten von ausreichenden Abständen. Wenn erforderlich können weitere aktive Schutzmaßnahmen ergriffen werden. Zum Beispiel können senkrecht zur Ausbreitungsrichtung vertikale Schlitze oder Kanäle in den Boden eingebracht werden, die zusätzlich gasgefüllte Matten enthalten. Nahe der Erschütterungsquelle angebracht, haben sie in einigen Fällen zu einer spürbaren Verminderung der Erschütterungen geführt.⁴⁹

Akustische und optische Emissionen

Optische Emissionen gehen in erster Linie von den Übertageanlagen aus und sind vergleichbar mit denen anderer Industriebetriebe. Durch die Errichtung der Bohranlage und weiterer Gebäude bzw. der Bohrplattform im marinen Bereich wird der visuelle Charakter der

⁴⁸ Vgl. *Studer/Laue/Koller* (2007), S. 142 und 146.

⁴⁹ Vgl. *Lai* (2000), S. 17–18 und *Studer/Laue/Koller* (2007), S. 164–169.

Landschaft verändert. Die durch die Baukörper hervorgerufene Beeinflussung der Landschaft wirkt sich auch auf die landschaftsgebundene Erholungsfunktion für den Menschen aus. Daneben können die Baukörper Wirkungen auf die Fauna (z.B. Ausweichverhalten von Vögeln) hervorrufen.

Durch den Betrieb der Anlagen (Bewegung, Verkehr, Licht) entstehen weitere optische Effekte. Diese Effekte sind durch die Voruntersuchungen sowie die Monitoringaktivitäten punktuell und temporär im gesamten Speichergebiet zu erwarten. Außerdem treten sie während der Bauarbeiten zur Errichtung der Übertageanlagen verstärkt auf.

Während der Bauphase sind durch den Betrieb von Baumaschinen sowie den Baustellenverkehr baubedingte Geräuschemissionen in der Nachbarschaft zu erwarten. Diese Geräuschemissionen können durch eine geeignete Auswahl der Baumaschinen entsprechend dem Stand der Technik minimiert werden.

Durch den Betrieb der Injektionsanlage und dem damit verbundenen Verkehr sind dauerhafte akustische Emissionen zu erwarten. Darüber hinaus treten im Rahmen der Voruntersuchungen und des Monitorings punktuell im gesamten Speichergebiet wiederkehrende Geräuschimmissionen auf. Eine besondere Relevanz haben dabei die Seismiken, bei denen kurzfristig sehr hohe Geräuschimmissionen erzeugt werden. Bei der Landseismik werden beispielsweise Hammerschläge oder Sprengungen zur Erzeugung der notwendigen Schallwellen eingesetzt. Ein gängiges Verfahren bei der Seeseismik ist der Einsatz von Luftpulsern (Airguns). Die erzeugten Schallwellen können sich im Wasser weit ausbreiten und zu Beeinträchtigungen von empfindlichen Tierarten führen.

Stoffliche Emissionen

In allen Phasen eines CO₂-Speichervorhabens ist die Emission von Luftschadstoffen aus dem Betrieb von Fahrzeugen, Maschinen etc. zu erwarten. Prognosen über den Umfang der Emissionen liegen nicht vor. In jedem Fall werden die Emissionen zur Globalbelastung beitragen. Nach dem gegenwärtigen Kenntnisstand ist aber nicht zu erwarten, dass sie ein größeres Ausmaß erreichen. Durch die Verwendung und optimale Wartung von emissionsarmen Maschinen und Fahrzeugen, die dem Stand der Technik entsprechen und hohen Sicherheits- und Umweltanforderungen gerecht werden, lassen sich diese betriebsbedingten stofflichen Emissionen minimieren. Geht man davon aus, dass die Anlieferung des CO₂ per Pipeline erfolgt, dann können auch ein extrem hoher zusätzlicher Lkw- oder Schiffsverkehr und damit verbundene Schadstoffemissionen vermieden werden.

Stoffliche Emissionen ins Wasser sind durch betriebliche Abwässer und Oberflächenentwässerungen möglich. Ihr Ausmaß kann in der Regel durch geeignete Vermeidungsmaßnahmen (Kläranlagen, Rückhaltebecken etc.) effektiv verringert werden. Zudem sind stoffliche Emissionen aus dem Schiffstransport sowie aus aktiven und passiven Korrosionsschutzmaßnahmen an Schiffen und Betriebsanlagen in die Meeresumwelt zu erwarten.

Inhaltsstoffe der für Erkundungs- und Injektionsbohrungen verwendeten Bohrspülungen können lokal in das umgebende Gestein eindringen, in das Grundwasser oder die Meeresumwelt gelangen. Im aquatischen Bereich ist auch mit einer Verklappung des Bohrkleins ins Meer zu rechnen. Unter Vermeidungsgesichtspunkten ist bei den Bohrspülungen

die Verwendung möglichst wenig schädlicher Zusammensetzungen anzustreben. Die Hersteller der Spülung sollten Mitglied der European Oilfield Speciality Chemicals Association (EOSCA)⁵⁰ sein. Im Offshore-Bereich sollten alle verwendeten Chemikalien entsprechend der „Regelungen bezüglich der Verwendung und Einleitung von Offshore-Chemikalien“ wie sie der OSPAR-Beschluss 2000/2⁵¹ vorsieht, behandelt werden. Gefährliche Stoffe sollten durch ungefährlichere ersetzt werden soweit weniger gefährliche Stoffe verfügbar sind, und es sollten nur Stoffe eingesetzt werden, die entweder auf der PLONOR-Liste⁵² stehen oder nach dem "Gefahrenbewertungs-Modul" von CHARM klassifiziert wurden. Für alle Stoffe sollte ein vollständiges HOCNF⁵³ vorgelegt werden.

Sedimentverwirbelungen

Im aquatischen Bereich kann eine Vielzahl von baulichen und betrieblichen Maßnahmen zu Sedimentverwirbelungen und damit verbundenen Gewässertrübungen und Sedimentverlagerungen (z.B. Auskolkungen) führen, beispielsweise Schiffsverkehr im Flachwasser, die Wirkung von Betriebsanlagen als Strömungshindernis, Erkundungs- und Injektionsbohrungen oder bau- bzw. rückbaubedingte Sedimentumlagerungen (Baugruben etc.).

Vermeidungsmöglichkeiten bestehen beispielsweise in der Optimierung der Anlagengestaltung in Bezug auf Wirbelbildungen, der Wahl geeigneter Standorte (sandige Sedimente setzen sich in der Regel schneller ab als schlickige, was die Wirkung lokal begrenzt) und Routen (Meidung

⁵⁰ Die EOSCA wurde 1990 gegründet und repräsentiert heute fast alle Firmen, die mit der Produktion und Anwendung von Chemikalien für die Öl- und Gas-Industrie in Europa zu tun haben. Hauptaufgabe ist es, Umwelt- und Sicherheitsaspekte zu berücksichtigen. Die Vereinigung ist eine voll anerkannte nichtstaatliche Organisation innerhalb OSPAR (vgl. auch <http://www.eosca.com>, Stand: 26.06.2012).

⁵¹ OSPAR-Beschluss 2000/2: Abgestimmtes verbindliches System zur Regelung der Verwendung von Offshore-Chemikalien und der Verringerung ihrer Einleitung; Stand 15.08.2001; geändert durch "OSPAR DECISION 2005/1 AMENDING OSPAR DECISION 2000/2 ON A HARMONISED MANDATORY CONTROL SYSTEM FOR THE USE AND REDUCTION OF THE DISCHARGE OF OFFSHORE CHEMICALS".

⁵² OSPAR List of Substances/Preparations Used and Discharged Offshore which Are Considered to Pose Little or No Risk to the Environment.

⁵³ OSPAR Recommendation 2000/5 on a Harmonised Offshore Chemical Notification Format (HOCNF), as amended by OSPAR Recommendation 2005/3. Diese Empfehlung hat zum Ziel, den Genehmigungsbehörden Angaben und Daten über die verwendeten Offshore-Chemikalien zur Verfügung zu stellen, um der OSPAR-Konvention entsprechende regulatorische Maßnahmen treffen zu können. Sie trat am 21. Januar 2001 in Kraft und beinhaltet in ihrem Anhang ein Formular, in dem die erforderlichen Produktinformationen anzugeben sind. Dazu gehören z. B. Art und Weise der Offshore-Anwendung, Verbleib, chemische Zusammensetzung und zu erwartende Konzentrationen sowie Angaben zur Ökotoxizität (u. a. Bioakkumulationspotenzial, Abbaubarkeit, Toxizität). Zur Durchführung der Tests wurden standardisierte Richtlinien und Modelle (z. B. "CHARM" - das "Chemical Hazard Assessment and Risk Management" Modell) entwickelt.

von Schiffs Routen durch Flachwasser), der Minimierung von baubedingten Sedimentumlagerungen und der Vermeidung von Sedimentverklappungen.

Anwesenheit von CO₂ und Begleitstoffen im Speicherkomplex

Das Kohlendioxid (einschließlich der Begleitstoffe) wird in flüssiger Form in die tiefen geologischen Speicher injiziert und breitet sich innerhalb des Speicherkomplexes aus (Migration). Die geologischen Speicher werden in einer Tiefe von 800 m liegen. Aufgrund der dort herrschenden Drücke und Temperaturen ist das CO₂ dort überkritisch, d. h. es kann nicht mehr vom flüssigen in den gasförmigen Zustand übergehen. Das flüssige CO₂ verdrängt die im Speichergestein vorhandenen Fluide (salziges Formationswasser oder Kohlenwasserstoffe). Da es leichter ist als das Formationswasser bildet es unterhalb der undurchlässigen Deckschicht eine Blase rund um die Injektionsstelle.

An der Grenzschicht zwischen Formationswasser und flüssigem Kohlendioxid geht das CO₂ in Lösung. Dies ist jedoch ein sehr langsamer Prozess. Nach Kronimus et al.⁵⁴ können sich entsprechend der typischerweise geringen Fließgeschwindigkeiten in tiefen salinen Aquiferen (sie liegt in der Größenordnung von Millimeter bis Zentimeter pro Jahr) innerhalb von Dekaden bis zu 30 % des injizierten CO₂ im Formationswasser lösen. Eine Lösung des gesamten injizierten CO₂ ist nur über einen Zeitraum von Jahr-hunderten zu erwarten.

Die Lösung von CO₂ im Wasser führt zu einer schwachen Versauerung des Formationswassers. In der Folge kann es zu chemischen Reaktionen mit Substanzen des Formationswassers (Fällungsreaktionen) und des Umgebungsgesteins (Lösungsreaktionen) kommen. Durch die Lösungsreaktionen können Schadstoffe wie Arsen und Schwermetalle mobilisiert werden.

Durch Mineralreaktionen kann das CO₂ letztlich auch geochemisch fixiert werden. Zwar können solche Reaktionen grundsätzlich innerhalb von Tagen und Wochen ablaufen, jedoch legen Modellrechnungen nahe, dass die CO₂-Mineralisierung durch Reaktionen mit Silikaten unter realistischen Bedingungen Jahrtausende erfordern kann.⁵⁵

Wird Kohlendioxid in Öl- oder Gaslagerstätten gespeichert, kann das flüssige CO₂ auf organische Bestandteile wie ein Lösungsmittel wirken und auf diese Weise Methan und andere organische Substanzen mobilisieren.⁵⁶

Druckänderungen im Speicher und seiner Umgebung

Die CO₂-Injektion führt zu einer Verdrängung der Lagerstättenfluide durch das eingespeicherte flüssige Kohlendioxid und infolgedessen zu einem erhöhten Druck in der Lagerstätte sowie in einem weit darüber hinausreichenden Druckfeld, wobei der Druck nach außen stark abnimmt. Die Untersuchung der Ausdehnung von CO₂ und Druck mittels eines schematischen Radialmodells hat gezeigt, dass es große Unterschiede gibt. Während sich die flüssige CO₂-

⁵⁴ Kronimus et al. (2011). S. 106.

⁵⁵ Vgl. Kronimus et al. (2011) S. 108.

⁵⁶ Vgl. Kronimus et al. (2011), S. 149.

Phase nur in einem relativ begrenzten Raum um den Injektionsbrunnen ausbreitet (im Modell ca. 4–5 km) ist die Druckausbreitung viel großflächiger (im Modell mehrere Zehnkilometer)⁵⁷.

Nach Kronimus et al.⁵⁸ kann der erhöhte Druck zu einem Bruch im Deckgestein führen. Der Druck setzt dabei bestehende tektonische Spannungen frei und es kommt zur Bewegung tektonischer Schollen entlang von Störungsflächen (erhöhte Seismizität, siehe Kap. 3.1.4 „Erhöhte Seismizität“); dabei wirkt die Druckinjektion katalysierend und trägt zur freigesetzten Energie nur in vernachlässigbarem Umfang bei, letztlich können die Brüche Wegsamkeiten für die Lagerstättenfluide und das injizierte CO₂ erzeugen (Aufstieg von salzigem Wasser, CO₂ und Begleitstoffen, vgl. Kap. 3.1.4 „Erhöhte Seismizität“, Kap. 3.1.4 „Freisetzung von CO₂ durch Leckage aus dem Speicher oder aus Übertageanlagen“ und Kap. 3.1.4 „Freisetzung von Begleitstoffen durch Leckage aus dem Speicherkomplex oder aus Übertageanlagen“) – also zu einem nicht bestimmungsgemäßen Betriebszustand führen.

Der Druck, der im Speicher entsteht, wird durch die Injektionsrate beeinflusst. Da eine Beeinträchtigung der Deckschicht durch die Bildung von Mikrorissen oder Reaktivierung von Störungen vermieden werden soll, ist der Überdruck, der in der Formation maximal vorliegen darf, im Wesentlichen durch geomechanische Vorgaben limitiert. Der zulässige Druck kann aber auch aufgrund möglicher induzierter Seismizität oder zur Vermeidung zu hoher Druckgradienten über die Barrièreschicht hinweg limitiert sein.⁵⁹

Veränderung des Reliefs durch Landhebungen und Landsenkungen

Die Druckerhöhung während der Injektionsphase kann sich auch bei bestimmungsgemäßen Betrieb an der Oberfläche bemerkbar machen. Großmann et al.⁶⁰ gehen davon aus, dass großflächige Landhebungen bis in den Dezimeterbereich auftreten können, so wie es bei der Erdgasförderung zu einer großflächigen Senkung der Landoberfläche mit ähnlichen Setzungsgraten kommen kann. Dass die resultierende Bodenbewegung bei der CO₂-Speicherung in tiefen salinen Aquiferen signifikant sein kann, zeigt das Beispiel in Salah, wo nach Kronimus et al.⁶¹ Hebungen von bis zu 30 mm beobachtet wurden. Mathieson et al.⁶² geben für In Salah Landhebungsgraten von ca. 3 mm/Jahr an.

Das Ausmaß der zu erwartenden Hebung kann aus Reservoirmodellen abgeleitet und vor Beginn der Injektion prognostiziert werden.⁶³ Da die Landhebungen durch das Druckfeld der

⁵⁷ Vgl. Bauer/Schäfer (2011), S. 24.

⁵⁸ Kronimus et al. (2011), S. 112.

⁵⁹ Bauer/Schäfer (2011), S. 22.

⁶⁰ Großmann et al. (2011a), S. 26.

⁶¹ Kronimus et al. (2011), S. 102.

⁶² Mathieson et al. (2011), S. 3601.

⁶³ Kronimus et al. (2011), S. 111-112.

Injektion verursacht werden, ist es auch möglich sie durch Injektionsraten und -mengen zu beeinflussen und mit Hilfe der Modelle auf ein verträgliches Maß zu beschränken.

Großflächige (z. B. 100 km² große) homogene Landhebungen im Zentimeter- bis Dezimeterbereich liegen nach Großmann et al.⁶⁴ in der typischen Amplitude der Erdzeiten, daher halten sie Schäden an Gebäuden für unwahrscheinlich und erwarten nur geringe Auswirkungen auf die Grundwasserströmung und damit in Verbindung stehende Prozesse.

Extrem ungünstige geomechanische und hydrogeologische Bedingungen können im Falle eines nicht bestimmungsgemäßen Betriebs zu Hebungen und Senkungen größeren Ausmaßes führen, die Einfluss auf Gebäude haben und zu Schäden führen können. Auch eine Veränderung der hydraulischen Gradienten im Grundwasser kann nicht ausgeschlossen werden.⁶⁵

Bei einem stark heterogenen Aufbau des geologischen Untergrundes z. B. mit Störungssystemen, die bis zur Oberfläche reichen, können auch oberflächennahe vertikale Relativbewegungen (also unterschiedliche Bewegungen benachbarter Flächen) nicht vollkommen ausgeschlossen werden, so dass Großmann et al.⁶⁶ eine standortspezifische Festlegung von Landhebungsgraten empfehlen. Bezuglich der regional unterschiedlichen verträglichen Raten besteht jedoch noch Forschungsbedarf.

Wird CO₂ in ein erschöpftes Erdöl- oder Erdgasfeld eingespeichert, kann es nach Kronimus et al.⁶⁷ zu einer Hebung an der Oberfläche kommen, die der Absenkung während der Produktion entspricht und im Allgemeinen gering ist.

In der Postinjektionsphase nimmt der Druck langsam wieder ab und es ist davon auszugehen, dass sich auch die großflächige Landhebung wieder zurückbildet.⁶⁸

Erhöhte Seismizität

Dass bei der Verpressung von Flüssigkeiten in den Untergrund eine erhöhte Seismizität induziert werden kann, ist ein bekanntes Phänomen.⁶⁹ Prinzipiell kann so eine Störungsaktivierung nicht nur Mikrobeben, d.h. Beben die vom Menschen an der Oberfläche nicht gespürt werden, auslösen, sondern auch Erdbeben erzeugen, die aufgrund ihrer Magnitude Schäden anrichten können.

⁶⁴ Großmann et al. (2011a), S. 31.

⁶⁵ Großmann et al. (2011a), S. 31.

⁶⁶ Großmann et al. (2011a), S. 31.

⁶⁷ Kronimus et al. (2011), S. 102.

⁶⁸ Großmann et al. (2011a), S. 27.

⁶⁹ Schilling/Krawczyk (2011), S. 38.

Nach Kronimus et al.⁷⁰ können Fluidinjektionen in den tiefen Untergrund Erdbeben moderater Magnitude auslösen. Die dabei auftretenden Störungsreaktivierungen machen sie eher von der Injektionsmasse und –rate abhängig als vom injizierten Fluid selbst. Schilling & Krawczyk⁷¹ erläutern, dass durch die Injektion der lokale Spannungszustand im Speicher und im Deckgebirge beeinflusst wird und die durch die CO₂-Injektion eingebrachte Energie zu Erdbeben führen kann. Die maximal mögliche Amplitude ist dabei durch die Ausdehnung potenzieller Störungszonen und die Festigkeit der Gesteine begrenzt. Die CO₂-Injektion erhöht weniger die maximale Magnitude sondern vielmehr die Wahrscheinlichkeit der Auslösung eines Bebens. Schilling & Krawczyk gehen daher davon aus, dass in Regionen mit geringem seismischem Risiko auch die Wahrscheinlichkeit geringer ist, dass es zu einer erhöhten induzierten Seismizität kommt.

Kronimus et al.⁷² weisen jedoch darauf hin, dass die Quantifizierung der Wahrscheinlichkeit einer Zunahme der Seismizität in Gebieten mit aktuell sehr niedriger seismischer Aktivität sehr schwierig und subjektiv ist. Nach Bauer & Schäfer⁷³ nimmt mit zunehmender Tiefe des Speichers das Risiko eines induzierten seismischen Ereignisses zu, da in größeren Tiefen mehr Energie aufgestaut werden kann.

Aus Frankreich sind durch Erdgasspeicherung in einem Aquifer induzierte Beben mit Magnituden bis zu 1,5 bekannt.⁷⁴ Maximal wurde bei einer Verpressung von Flüssigkeiten (im Paradox Valley, Colorado) eine Magnitude von 4,5 aufgezeichnet.⁷⁵ Die Magnitude ist ein Maß für die gesamte bei einem Beben freigesetzte seismische Schwingungsenergie. Sie wird aus den seismischen Messungen und der Entfernung der Aufzeichnung zum Erdbebenherd (Epizentrum) ermittelt. Die Magnituden-Skala ist logarithmisch, d. h. ein Zuwachs um eine Magnituden-Einheit (etwa von 5 auf 6) bedeutet eine 10-fach größere Bodenbewegung und eine Zunahme der Bebenenergie um etwa das 30-fache.⁷⁶

Kronimus et al.⁷⁷ weisen darauf hin, dass induzierte Erdbeben, die messbare Schäden verursacht haben, von Ölfeldern bekannt sind, aus denen über 10 Jahre gefördert wurde. Ob

⁷⁰ *Kronimus et al.* (2011), S. 112-113.

⁷¹ *Schilling/Krawczyk* (2011), S. 36.

⁷² *Kronimus et al.* (2011), S. 123.

⁷³ *Bauer/Schäfer* (2011), S. 22.

⁷⁴ *Kronimus et al.* (2011), S. 112.

⁷⁵ *Schilling/Krawczyk* (2011), S. 38.

⁷⁶ Vgl. www.bib.gfz-potsdam.de/pub/schule/magnitude_0209.pdf, <http://www.seismo.uni-koeln.de/edu/mag.htm>, <http://www.hlug.de/start/geologie/erdbeben/erdbebengefaehrdung/magnitude-und-intensitaet.html>.

Die Magnitude geht auf die Arbeiten des kalifornischen Seismologen Richter zurück, jedoch gibt es heute verschiedene Modifikationen. Obwohl es verschiedene Magnitudenskalen gibt, werden in der hier und im Folgenden zitierten Literatur keine Angaben zur verwendeten Skala gemacht.

⁷⁷ *Kronimus et al.* (2011), S. 126.

die Gasförderung in Norddeutschland stärkere seismische Ereignisse induziert, ist nach Kronimus et al.⁷⁸ noch umstritten. Als mögliche Kandidaten nennen sie das Erdbeben in der Lüneburger Heide bei Rotenburg (2004) sowie die Beben von Syke (2005) und Weyhe (2002). Das Beben von 2004 in der Lüneburger Heide hatte eine Stärke von 4,5 und ist gemäß der Pressemitteilung der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)⁷⁹ vom 03.12.2004 auf natürliche Ursachen zurückzuführen. Aktuell hat es jedoch am 13.02.2012 in der gleichen Region ein Beben der Stärke 3,0 gegeben, das Pressemeldungen zufolge auf die Erdgasförderung zurückzuführen sein könnte.⁸⁰

Ein induziertes Beben kann in der unmittelbaren Nähe des Injektionspunktes aber auch bis in Entfernungen von mehreren zehn Kilometern auftreten. Dabei kann die Zeitspanne, die zwischen Injektion und Auftreten der seismischen Ereignisse vergeht, nach Kronimus et al.⁸¹ von einigen Tagen bis zu mehreren Jahren betragen. Auch nach der Beendigung einer Injektion ist noch für einige Zeit eine erhöhte Seismizität zu beobachten. Wird angestrebt, Erdbeben einer bestimmten Magnitude zu vermeiden, empfehlen Schilling & Krawczyk⁸² die Injektion bereits bei Auftreten von um eine Magnitude geringeren Ereignissen einzustellen, denn nachfolgende Ereignisse fallen nach weltweiten Beobachtungen maximal eine Magnitude höher aus, als vor der Beendigung der Verpressung beobachtet.

In Baden-Württemberg wird zurzeit auch das Risiko induzierter Seismizität beim Bohren thematisiert. Schilling & Krawczyk⁸³ kommen jedoch zu dem Schluss, dass bei Bohrungen nach dem Stand der Technik mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit nicht mit spürbaren Erdbeben gerechnet werden muss.

In der Regel ist davon auszugehen:⁸⁴

- dass Beben mit Magnituden von 2 bis 3 gerade noch spürbar sind und keine Schäden verursachen;
- dass Beben mit Magnituden von 3 bis 3,9 nur von wenigen Menschen, vor allem von Menschen in Ruhe und in den oberen Stockwerken von Gebäuden, wahrgenommen

⁷⁸ Kronimus et al. (2011), S. 129-130.

⁷⁹ http://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Erdbeben-Gefahrungsanalysen/Seismologie/Downloads/germany-041020ergebnisse-presse-mitteilung.pdf;jsessionid=B1E8002F6C6875EF185C0B0ABA315507.2_cid135?__blob=publicationFile&v=2 (Stand: 26.08.2012).

⁸⁰ <http://www.abendblatt.de/region/niedersachsen/article2187124/Leichtes-Erdbeben-in-der-Lueneburger-Heide.html> (Stand: 26.08.2012).

⁸¹ Kronimus et al. (2011), S. 126.

⁸² Schilling/Krawczyk (2011), S. 38.

⁸³ Schilling/Krawczyk (2011), S. 34-36.

⁸⁴ <http://survival.4u.org/katastrophen/erdbeben-staerke.htm>, <http://www.code-knacker.de/erdbeben.htm>, http://earthquake.usgs.gov/learn/topics/mag_vs_int.php (Stand: 26.08.2012).

werden und nach Angaben des United States Geological Survey (USGS) mit den Erschütterungen durch vorbeifahrende Trucks vergleichbar sind, und somit oft nicht als Erdbeben erkannt werden;

- dass Beben mit Magnituden von 4 bis 4,9 von den meisten wachen Menschen wahrgenommen werden, einige schlafende Menschen könnten auch geweckt werden, instabile Gegenstände umfallen können, Geschirr und Scheiben klirren oder sogar zu Bruch gehen können und Wände krachende Geräusche von sich geben können, Fensterläden schwingen und geringste Schäden auftreten können;
- dass Beben mit Magnituden von 5 bis 5,9 von allen Menschen mit Schrecken wahrgenommen werden, hierbei viele Menschen ihre Häuser verlassen und die Gefahr von Verletzungen besteht, Möbel sich bewegen, Schornsteine einstürzen und Risse im Putz entstehen können und nach USGS-Angaben die Schäden an Gebäuden je nach Entwurf und Bauausführung geringfügig bis beträchtlich sind;
- dass Beben mit Magnituden von 6 bis 6,9 von allen Menschen mit großem Schrecken wahrgenommen werden und es teilweise zur Panik kommt oder Schocks auftreten, wobei es oft auch Verletzte gibt und Gefahr für Leib und Leben besteht, Gebäude erhebliche Beschädigungen erleiden und einstürzen, an den Küsten auch Flutwellen möglich sind⁸⁵.

Beben, die vom Menschen an der Oberfläche nicht gespürt werden, werden als Mikrobeben bezeichnet.

Aufstieg von salzigem Formationswasser

Mit der zu erwartenden Verdrängung des Formationswassers haben sich vor allem Bauer & Schäfer⁸⁶ befasst.

Im gesamten Norddeutschen Becken ist das süße Grundwasser generell von Salzwasser unterschichtet. Prinzipiell steigt der Salzgehalt in den tieferen Grundwasserleitersystemen Norddeutschlands mit zunehmender Tiefe an. Der Übergang zwischen Süß- und Salzwasser vollzieht sich dabei allmählich und ist weder scharf noch stabil. Er variiert stark und kann in einer Tiefe von 600 m bis oberflächennah oder direkt an der Oberfläche liegen.⁸⁷

Natürliche Versalzungen von flachen Grundwasserleitern sind in den Küstengebieten meist auf Meerwasserintrusionen zurückzuführen, den größten Einfluss haben jedoch aufsteigende Tiefenwässer, die in Norddeutschland großflächig vorhanden sind. Regional sind großräumig auftretende Grundwasserstauer von Bedeutung, die das salzhaltige Tiefenwasser von den ausgesüßten Grundwasserleitern trennen. Rinnenstrukturen und damit verbundene Einschnitte können einen Salzwasseraufstieg begünstigen oder steuern. Sie können bis zu über 500 m tief

⁸⁵ Beben können grundsätzlich auch Lawinen oder Erdrutsche auslösen. Es liegen jedoch keine Angaben dazu vor, bei welcher Magnitude sie beobachtet werden.

⁸⁶ Bauer/Schäfer (2011).

⁸⁷ Bauer/Schäfer (2011), S. 13.

reichen und Migrationspfade für versalzte Grundwässer in flachere Grundwasserleitersysteme bilden.⁸⁸

Die durch die Injektion des CO₂ verursachte Druckerhöhung in der Formation induziert eine Bewegung des Formationswassers. Ist die Speicherformation hydraulisch geschlossen, kann das Formationsfluid nicht entweichen, ist die Formation zu den Rändern offen, kann sich das Formationswasser weiter ausbreiten. Auf diese Weise können großräumige Strömungen der Formationsfluide induziert werden, die allerdings mit geringen Flüssen hinterlegt sein können.⁸⁹

Dabei kann Tiefenwasser durch die Deckschicht in den darüber liegenden salinen Grundwasserleiter gepresst werden, wo es sich aufgrund seiner höheren Salinität und Dichte im unteren Aquiferbereich einschichtet und wahrscheinlich nicht weiter aufsteigt.⁹⁰

Aber nach Bauer & Schäfer⁹¹ gibt es auch verschiedene Szenarien zur Ausbreitung von Formationswasser in höhere Schichten:

- Sind keine erheblichen vertikalen Wegsamkeiten vorhanden, kann durch den Druck eine flächenhafte Migration des Formationswassers durch die Deckschicht in die darüber befindliche Formation ausgelöst werden, die jedoch entsprechend der geringen Permeabilität der Deckschicht nur mit sehr geringen Flüssen verbunden ist.
- Ist die Formation nach oben durch die Deckschicht geschlossen, so breitet sich der Druck lateral aus. Ist die Formation sehr groß und steigt sie bis an die Oberfläche auf, kann eine direkte Verbindung zwischen Formation und Geländeoberkante bestehen.
- Ist eine Störstelle mit einer lokalen, hohen vertikalen Permeabilität vorhanden, kann sich das Formationswasser entlang dieses vertikalen Pfades bewegen.

Allen Szenarien ist gemein, dass sich das Salzwasser stockwerksweise ausbreiten würde, also dass das Formationswasser, das durch die Deckschicht in die darüber liegende Formation aufsteigt, das dort vorhandene Salzwasser verdrängt und ersetzt. Den oberflächennahen Grundwasserleiter erreicht auf diese Weise vermutlich nicht Tiefenwasser, sondern Salzwasser aus dem Grundwasserleiter unter dem oberflächennahen Grundwasserleiter.⁹²

Ein direkter Aufstieg von salinem Tiefenwasser aus dem Speicherhorizont in Süßwasseraquifere ist nur möglich, wenn eine direkte hydraulische Verbindung zwischen dem Speicher und oberflächennahen Grundwasserleitern existiert. Dieses Szenario ist zwar möglich, wird aber von Bauer & Schäfer⁹³ als unwahrscheinlich eingestuft.

⁸⁸ Bauer/Schäfer (2011), S. 13-14.

⁸⁹ Bauer/Schäfer (2011), S. 26-27.

⁹⁰ Bauer/Schäfer (2011), S. 15.

⁹¹ Bauer/Schäfer (2011), S. 27-28.

⁹² Bauer/Schäfer (2011), S. 15 und 28.

⁹³ Bauer/Schäfer (2011), S. 32.

Im Liegenden⁹⁴ sind die Süßwasser enthaltenden Aquifere meist durch tertiäre Tone von salinen Grundwasserleitern getrennt, so dass eine Vermischung von salinem Wasser und Süßwasser im Allgemeinen nicht vorkommt.⁹⁵ Mögliche Leckagepfade sind alle Schwachstellen in den gering durchlässigen tertiären Tonen, also eiszeitliche Rinnen, Randlagen von Salzstöcken, geologische Störungen, hydraulische Schwachstellen und Fenster sowie Brunnen oder Bohrungen, die die Tone durchstoßen. Da salines Wasser kaum gefördert wird, sind kaum Förderbrunnen vorhanden. Die Tone werden jedoch zur Erkundung des Speicherreservoirs und für Anlagen der Geothermie durchstoßen. Aufgrund der weiträumigen Druckausbreitung (vgl. Kap. 3.1.4 „Druckänderungen im Speicher und seiner Umgebung“) ist der Aufstieg von Formationswasser auch über Wegsamkeiten möglich, die in größerer Entfernung zur Injektionsstelle liegen.⁹⁶

Sehr tiefe saline Grundwasserleiter enthalten neben hohen Salzkonzentrationen, Spuren- und Schwermetallen auch natürlich vorkommende radioaktive Substanzen, die bei diesem unwahrscheinlichen Szenario in oberflächennahes Grundwasser eingetragen werden könnten. Bei einem stockwerksweisen Aufstieg scheint die Gefährdung durch natürliche Radioaktivität gering zu sein.⁹⁷

Bereits geringe Zuflüsse salinen Wassers können zu einer relevanten Versalzung eines Trinkwasseraquifers führen.⁹⁸ Eine höhere Salinität kann das Potenzial des Wassers zur Lösung von Mineralien erhöhen.⁹⁹

Wird das CO₂ in ein ausgeförderter Erdgaslager verpresst, befindet sich dort noch nicht gefördertes Restgas, salines Tiefenwasser liegt nicht vor. Nur falls während oder nach der Erdgasförderung umgebendes Formationswasser in den Speicher eingedrungen ist und die gesamte Mächtigkeit des Reservoirs füllt, ist eine Migration von Formationswasser in hangende, also darüber liegende Schichten möglich.¹⁰⁰

Da die Injektionsraten laufender Projekte, bei denen Flüssigkeiten in den tiefen Untergrund injiziert werden, vergleichbar sind mit denen der CO₂-Speicherung im tiefen Untergrund geht der IPCC Special Report¹⁰¹ davon aus, dass auch die Auswirkungen durch die Verdrängung von Formationswasser vergleichbar sind. Bisher ist bei den vergleichbaren Projekten die Verunreinigung von oberflächennahem Grundwasser selten, daher wird erwartet, dass auch bei

⁹⁴ Liegendes ist die bergmännisch-geologische Lagebezeichnung für ein Gestein, das eine Bezugsschicht, hier den Süßwasser-Aquifer, unterlagert, Hangendes ist die entsprechende Bezeichnung für ein überlagerndes Gestein.

⁹⁵ Bauer/Schäfer (2011), S. 31.

⁹⁶ Bauer/Schäfer (2011), S. 33.

⁹⁷ Bauer/Schäfer (2011), S. 15.

⁹⁸ Bauer/Schäfer (2011), S. 37.

⁹⁹ Bauer/Schäfer (2011), S. 38.

¹⁰⁰ Bauer/Schäfer (2011), S. 32.

¹⁰¹ Ipcc (2005), S. 248.

großtechnischen Projekten zur Kohlendioxidspeicherung nur selten Belastungen durch aufsteigendes salziges Formationswasser in Süßwasser-Aquifere zu erwarten sind.

Freisetzung von CO₂ durch Leckage aus dem Speicher oder aus Übertageanlagen

Eine Leckage von CO₂ aus dem Speicherkomplex ist grundsätzlich möglich. Leckagen sind primär entlang von bevorzugten Wegsamkeiten zu erwarten. Denkbar sind verschiedene Wege.

Nach der Injektion liegt das CO₂ noch über einen größeren Zeitraum als flüssige Phase vor. Das flüssige CO₂ hat eine geringere Dichte als Wasser und steigt nach oben. Da der Druck in der Speicherformation durch die Injektion erhöht ist, wird das CO₂ gegebenenfalls vorhandene vertikale Wegsamkeiten nutzen, um weiter aufzusteigen. Einerseits kann das CO₂ lokal konzentriert die Bodenschicht bzw. die Atmosphäre erreichen und somit eine Punktquelle mit sehr hohen Flussdichten darstellen. Andererseits kann das CO₂ beim Durchgang durch geologische Strukturen und Grundwasserleiter flächig verteilt werden, was Flächenquellen mit in der Regel geringerer Flussdichte erwarten lässt, die zudem räumlich heterogen sein kann.¹⁰² Bei der direkten Freisetzung in die Atmosphäre durch Blowouts oder aus Übertageanlagen kommt es meist zu einer schnellen Freisetzung größerer Mengen, aber bei kleineren Lecks sind auch schleichende kleinere Verluste möglich.

Auch wenn die Deckschichten für überschaubare Zeiträume als nahezu undurchlässig erscheinen, können sie über geologische Zeiträume betrachtet durchlässig sein. Bauer & Schäfer¹⁰³ weisen jedoch darauf hin, dass signifikante Mengen von CO₂ sehr lange Zeiträume (in der Größenordnung von zehntausenden von Jahren) benötigen, um durch eine Deckschicht zu gelangen. Stange & Duijnisveld¹⁰⁴ verweisen auf Untersuchungen, die davon ausgehen, dass es über der für die CO₂-Speicherung notwendigen Fläche keine vollständig geschlossenen Formationen gibt und dass es nur eine Frage der Zeit ist, wann das CO₂ die Atmosphäre erreicht

Großmann et al.¹⁰⁵ weisen darauf hin, dass es mit den gegenwärtig verfügbaren Monitoringmethoden noch nicht möglich ist, die CO₂-Freisetzung aus der Speicherformation nach Ort und Stoffstrom hinreichend genau zu bestimmen und daraus Aussagen zur Freisetzung von CO₂ in die Atmosphäre abzuleiten. Auch Kronimus et al.¹⁰⁶ weisen darauf hin, dass es gegenwärtig nicht möglich ist, für den Fall einer Leckage die Flussdichten von CO₂ oder das betroffene Areal verlässlich abzuschätzen. Auch wenn man eine maximale Leckage von 0,01 % der gespeicherten CO₂-Menge pro Jahr annimmt, kann man daraus die resultierenden

¹⁰² Vgl. *Stange/Duijnisveld* (2011), S. 10.

¹⁰³ *Bauer/Schäfer* (2011), S. 40.

¹⁰⁴ *Stange/Duijnisveld* (2011), S. 17.

¹⁰⁵ *Großmann et al.* (2011b), S. 20.

¹⁰⁶ *Kronimus et al.* (2011), S. 2 und 9.

Flussdichten nicht ableiten, weil die Fläche, über die dieser angenommene maximale Fluss die Erdoberfläche erreicht, nicht bekannt ist.

Ein Sonderfall ist die flächige Freisetzung von CO₂ am Boden eines tiefen, dauerhaft geschichteten Sees. Dies könnte dazu führen, dass sich zunächst größere Mengen CO₂ am Grund des Sees sammeln und dann schlagartig in einer großen Wolke an die Oberfläche gelangen. Dies war z. B. 1986 am Lake Nyos in Afrika der Fall, wo es zum Tod von 1.700 Menschen und 3.500 Stück Vieh kam.¹⁰⁷

Als Beurteilungswert für eine Gefährdung des Menschen durch CO₂-Freisetzungen ziehen Großmann et al¹⁰⁸ vorwiegend eine Konzentration von 4 Vol.-% heran und berücksichtigen teilweise auch einen Wert von 0,5 Vol.-%. Der Beurteilungswert von 4 Vol.-% ist nach Großmann et al¹⁰⁹ der IDLH-Wert (Immediately Dangerous to Life and Health) für Kohlendioxid, bei dem bei einer 30-minütigen Einwirkung die Wiederherstellung der Gesundheit ohne bleibende Folgen möglich ist. Der Wert von 0,5 Vol.-% entspricht der maximalen Arbeitsplatzkonzentration, bei der auch bei täglicher Exposition von acht Stunden keine Schadwirkung besteht.

¹⁰⁷ Vgl. *Kronimus et al.* (2011), S. 134 und 215.

¹⁰⁸ *Großmann/Woiwode/Dahmke* (2011), S. 25-26.

¹⁰⁹ *Großmann/Woiwode/Dahmke* (2011), S. 25-26.

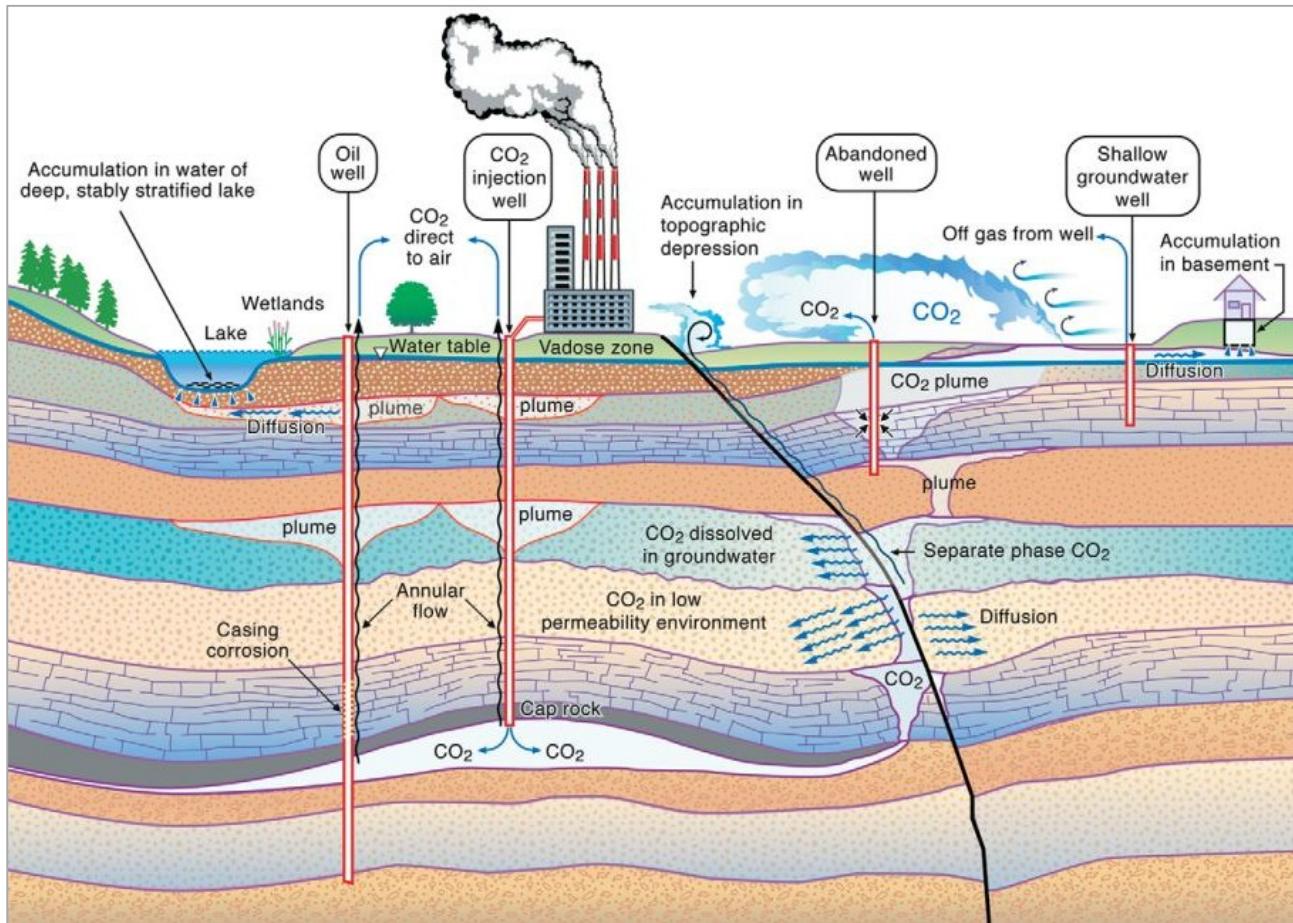


Abbildung 2: Überblick über potenzielle Wege von CO₂ aus der Speicherstätte an die Oberfläche¹¹⁰

Einen Überblick über verschiedene denkbare Wege, auf denen CO₂ in den Bereich der Schutzgüter an der Erdoberfläche gelangen kann, gibt Abbildung 2. Sie werden im Folgenden näher erläutert.

Freisetzung über geologische Störungen, Risse und Klüfte

Geologische Störungen können dicht sein und als Fallen für Erdöl, Erdgas oder eben CO₂ dienen. Sie können aber auch durchlässig sein und entlang von Rissen und Klüften Wegsamkeiten aufweisen, die bis in höhere Schichten oder bis an die Oberfläche reichen (vgl. Abbildung 2).

Auch wenn ein Speicherort intensiv untersucht wurde, besteht das Risiko, dass kleinere Störungen in der Deckschicht nicht entdeckt werden oder dass sich Fließwege durch chemische Korrosion im Kontaktbereich mit CO₂ oder aufgrund des Injektionsdrucks bilden.¹¹¹ Wird bei der Injektion von CO₂ ein zu hoher Druck erreicht, können Störungen reaktiviert werden und Risse in den Deckschichten verursacht werden, so dass Wegsamkeiten entstehen. Dabei sind

¹¹⁰ Stange/Duijnsveld (2011), S. 15.

¹¹¹ Bauer/Schäfer (2011), S. 32.

Deckschichten aus Salz für CO₂ nicht nur praktisch undurchlässig, sondern haben den Vorteil der Selbstheilung aufgrund ihres plastischen Verhaltens.¹¹²

Wegsamkeiten in der Deckschicht der Speicherformation ermöglichen zunächst nur den Aufstieg des CO₂ in den nächst höheren Aquifer. Nur wenn darüber hangende Deckschichten fehlen oder ebenfalls Wegsamkeiten aufweisen, kann das CO₂ bis an die Oberfläche gelangen.

Nach Stange & Duijnisveld¹¹³ ist von natürlichen Analoga bekannt, dass CO₂-Quellen an der Oberfläche häufig als geclusterte Schlotte auftreten. Auf einem größeren Areal (1–100 km²) treten Stellen von wenigen Quadratdezimetern bis Quadratmetern auf, an denen der Übergang von CO₂ in die Atmosphäre vorwiegend stattfindet.

Freisetzung über aktive oder alte Bohrungen

In bestehenden Bohrungen können Wegsamkeiten entstehen, sei es durch nicht fachgerechte Ausführung oder durch Materialalterung und Korrosion. Wegsamkeiten entlang von Bohrungen werden häufig als bedeutendster Leckagepfad angeführt.¹¹⁴ Denkbar ist nach Großmann et al.¹¹⁵ ein Aufstieg des CO₂ durch das Futterrohr bzw. den Zement im Futterrohr bei alten, verschlossenen Bohrungen außen zwischen Rohr und Zement, durch Risse im Zement, durch Wegsamkeiten zwischen Umgebungsgestein und Zement sowie durch eine Auflockerungszone in der Formation (vgl. Abbildung 3).

¹¹² Vgl. *Bauer/Schäfer* (2011), S. 18.

¹¹³ *Stange/Duijnisveld* (2011), S. 16.

¹¹⁴ Vgl. z. B. *Kronimus et al.* (2011), S. 100.

¹¹⁵ *Großmann et al.* (2011a), S. 33.

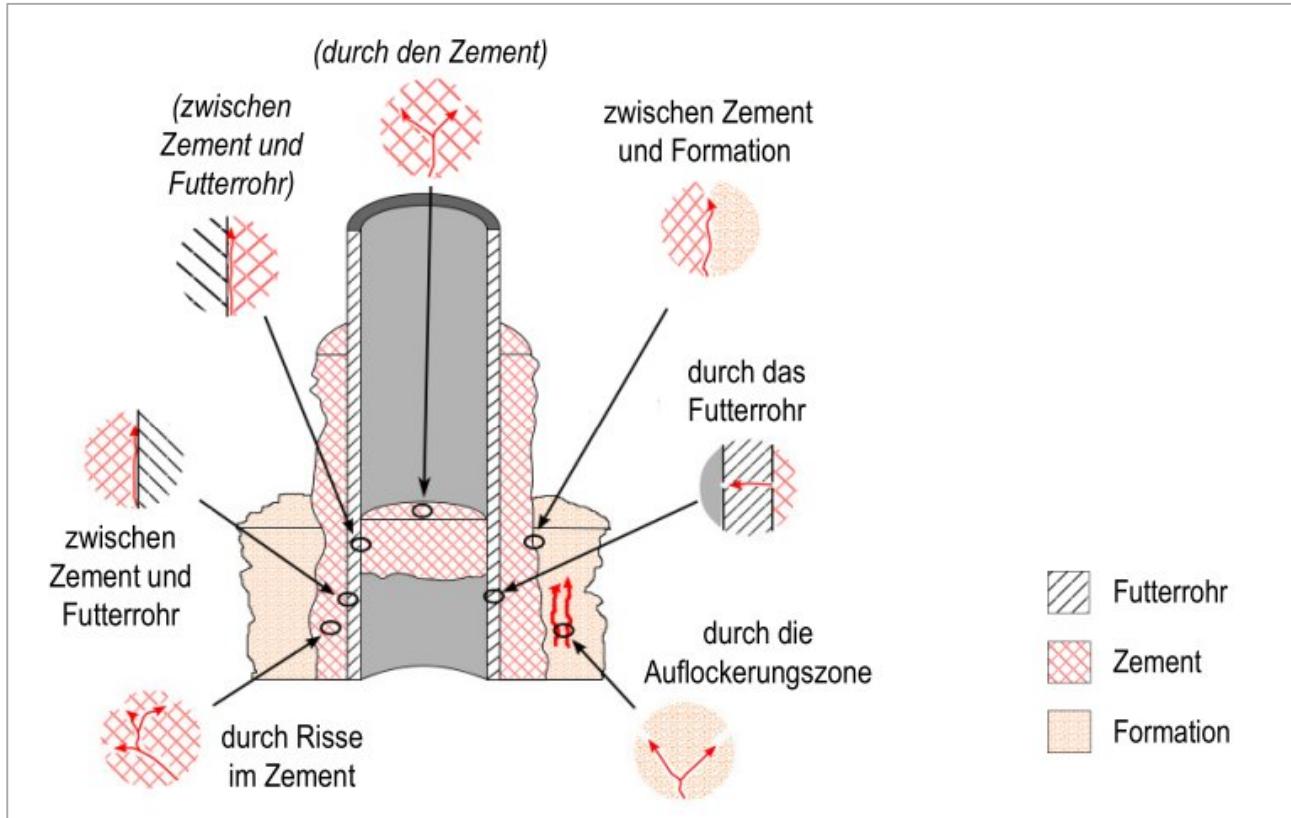


Abbildung 3: Potentielle Wegsamkeiten im Bereich von aktiven und alten Bohrungen¹¹⁶

Die schwachsaure Lösung von CO₂ in Wasser kann z. B. zur Korrosion bei Metallen und Zement führen. Dies ist für die Beständigkeit der Verrohrung der Bohrungen von Bedeutung.¹¹⁷

In den Sedimentbecken gibt es kaum ein größeres zusammenhängendes Gebiet, das frei von Tiefbohrungen ist. Allerdings ist bei einer angenommenen Ausbreitung der flüssigen CO₂-Phase im Speicher von ca. 100 km² statistisch gesehen die Anzahl der Altbohrungen, die bis in den Bereich des Speicherkomplexes reichen, klein. Daher sollten sie gut zu überwachen sein. Zwar ist nach Großmann et al.¹¹⁸ der überwiegende Teil der Bohrungen aufgrund ihrer geringen Tiefe nicht relevant, jedoch können in ungünstigeren Fällen auch flachere und weiter von der Injektionsstelle entfernte Bohrungen zu Wege samkeiten führen. Dies ist immer dann der Fall, wenn das CO₂ über andere Wege samkeiten (die nicht bis zur Oberfläche reichen) höhere Schichten erreicht bzw. wenn es horizontal große Strecken überwunden hat.

Freisetzung durch Blowouts

¹¹⁶ Großmann et al. (2011a), S. 33.

¹¹⁷ Vgl. Kronimus et al. (2011), S. 101.

¹¹⁸ Großmann et al. (2011a), S. 34-35.

Auch bevor das CO₂ in den Speicher gelangt ist, kann es zu einer Freisetzung kommen. In der Literatur werden gemäß Großmann et al.¹¹⁹ eine ganze Reihe von CO₂-Freisetzungen aus Injektionsbohrungen genannt. Berichtet wird von jährlich etwa zwei CO₂-Blowouts in den letzten 27 Jahren. Je nach Freisetzungsbedingungen verdampft das CO₂ vollständig und breitet sich als Gaswolke aus, oder ein Teil des CO₂ schlägt sich zunächst als vereiste Flüssigkeitslache nieder, verdampft dann und fließt als Schwergaswolke dem Relief folgend ab.

Blowouts können nicht nur an den Injektionsbohrungen auftreten.¹²⁰ Sie können auch bei stillgelegten, alten Bohrungen auftreten, die sich im Bereich des Speicherkomplexes befinden. Großmann et al.¹²¹ nennen als Ursachen für die CO₂-Freisetzung insbesondere menschliches Versagen bei der Prozessführung und Korrosion. Nach Kronimus et al.¹²² sind Fehler an technischen Komponenten (Pumpen, Ventile) häufiger für Zwischenfälle verantwortlich als Korrosion oder menschliches Versagen. Sie weisen darauf hin, dass bei Produktionsfirmen, die mehrere Öl- bzw. Gasfelder betreiben, ein bis zwei Blowout-Ereignisse pro Jahr vorkommen, schätzen die Wahrscheinlichkeit bei kommerziellen CO₂-Speicherprojekten aber als geringer ein.

Nach Kronimus et al.¹²³ erstrecken sich Blowout-Ereignisse meist über wenige Tage. Die pro Tag freigesetzte CO₂-Menge wird dabei auf bis zu 280.000 m³ geschätzt.

Die Untersuchungen von Großmann et al.¹²⁴ zeigen, "dass keine pauschale Aussage zu den sich bei einer Eruption aus einer Bohrung ergebenden Gefährdungsbereichen möglich ist. Die möglichen Gefahrensituationen müssen vielmehr ereignis- und ortskonkret ermittelt werden. Basierend darauf sind jedoch standortkonkrete Prognosen und somit die Einleitung spezifischer Überwachungs- und Interventionsmaßnahmen möglich."

Beispielsweise kommt eine Studie unter den untersuchten Bedingungen zu einem maximalen Gefährdungsbereich von ca. 35 m bei einer Vertikal- oder einer Lateraleruption über dem Bohrungskeller mit Freisetzung von ausschließlich gasförmigem CO₂.¹²⁵

Großmann et al. haben beispielhaft die Freisetzung als Gemisch aus gasförmigem und flüssigem CO₂ untersucht. Unter den von ihnen betrachteten Bedingungen kommen sie bei einer Ausbreitung des freien Strahls unter Berücksichtigung der Verdünnung der entstehenden CO₂-Fahne durch Wind zu dem Fazit, dass in Bodennähe (bis 10 m Höhe) die CO₂-Konzentration

¹¹⁹ Großmann et al. (2011a), S. 42-43.

¹²⁰ Kronimus et al. (2011), S. 121.

¹²¹ Großmann et al. (2011a), S. 43.

¹²² Kronimus et al. (2011), S. 122.

¹²³ Kronimus et al. (2011). S. 121.

¹²⁴ Großmann et al. (2011b), S. 43.

¹²⁵ Vgl. Großmann et al. (2011b), S. 36.

von 0,5 Vol.-% in mehr als 36 m Entfernung nicht überschritten wird. Im Abstand von mehr als 12 m wird in Bodennähe der Wert von 4 Vol.-% CO₂ nicht überschritten.¹²⁶

Darüber hinaus haben Großmann et al. auch den Fall der Freisetzung von flüssigem CO₂ mit einem Niederschlag von Schnee und Eis an der Erdoberfläche untersucht. Je nach angenommener Wurffparabel erstrecken sich die Niederschlagsbereiche in bis zu 500 m Entfernung von der Austrittsstelle. Von der Verdampfung der Lache ist bei ungünstigen Bedingungen ein angrenzender Bereich bis in ca. 175 m Entfernung gefährdet. Der Wert von 0,5 Vol.-% kann unter ungünstigen Ausbreitungsbedingungen bis in eine Entfernung von rund 700 m überschritten werden.¹²⁷

Freisetzung aus Über Tageanlagen

Auch an den Über Tageeinrichtungen kann es zur Freisetzung von CO₂ kommen, beispielsweise durch Lecks an Tanks, Leitungen und Verbindungen, bei Umfüllvorgängen etwa durch das Abreißen eines Schlauchs oder durch das Abblasen über Sicherheitsventile. Im Extremfall könnten auch Behälter völlig zerstört werden. Entsprechende Szenarien haben Großmann et al.¹²⁸ beispielhaft untersucht. Großmann et al.¹²⁹ kommen zu folgenden Schlussfolgerungen:

- Bei ordnungsgemäßer Anordnung der Ausbläser von Sicherheitsventilen können Gefährdungen außerhalb des Betriebsgeländes mit Sicherheit verhindert werden.
- Bei der Freisetzung von CO₂ durch den Abriss eines Schlauches zwischen Tank-wagen und Injektionsanlage können gefährliche Auswirkungen außerhalb des Betriebsgeländes ausgeschlossen werden.
- Bei Lecks an Behältern oder Leitungen der Über Tageanlagen kann davon ausgegangen werden, dass Gefahren für Schutzgüter außerhalb des Betriebsgeländes ausgeschlossen werden können.
- Bei der Freisetzung des kompletten Inhalts eines Lagerbehälters können auch Bereiche außerhalb des Betriebsgeländes betroffen sein. Je nach Ausbreitungssituation werden in bis zu rund 500 m Entfernung noch Konzentrationen von bis zu 4 Vol.-% erreicht. Bei Windstille und geneigtem Gelände ist es möglich, dass das gasförmige CO₂ dem Gefälle folgend bodennah abfließt (Schwergasabfluss). Dabei reicht schon ein Gefälle von wenigen Metern aus, um die Richtung des Abflusses zu bestimmen. Bei Wiedereinsetzen des Windes wird das CO₂ dann in die Umgebungsluft eingemischt.

Großmann et al.¹³⁰ weisen aber darauf hin, dass es notwendig ist, die Einschätzungen, wie bei jeder sicherheitstechnischen Betrachtung, anlagenkonkret zu spezifizieren.

¹²⁶ Großmann et al. (2011b), S. 39.

¹²⁷ Großmann et al. (2011b), S. 40-43.

¹²⁸ Großmann et al. (2011b).

¹²⁹ Großmann et al. (2011b).

¹³⁰ Großmann et al. (2011b), S. 31.

Freisetzung von Begleitstoffen durch Leckage aus dem Speicherkomplex oder aus Überageanlagen

Zu den möglicherweise bei einem Blowout oder auch bei Leckagen in geringeren Mengen frei werdenden Begleitstoffen gehören H₂S, SO₂, NO_x, H₂SO₃, H₂SO₄ und HNO₃. Jede dieser Substanzen weist eine höhere Toxizität auf als CO₂ und ist daher auch mit entsprechenden Gefahren für Mensch, Natur und Umwelt verbunden. Schwefel- und Stickoxide bilden darüber hinaus in wässriger Lösung Säuren und verursachen dadurch die Verringerung der pH-Werte von Böden, Grund- und Oberflächenwasser, was in der Regel wiederum die Mobilisierung von Schwermetallen nach sich zieht.¹³¹

3.2 Mögliche Auswirkungen auf die Schutzgüter

Die im vorangegangenen Kapitel ermittelten Wirkfaktoren haben z.T. Auswirkungen auf den tiefen geologischen Untergrund, z.T. auch auf die oberflächennahen Schutzgutformen.¹³²

Auf Grundlage der o. a. gesetzlichen Anforderungen und des skizzierten Sach- und Kenntnisstandes wird bei den nachfolgenden Überlegungen zu den möglichen Auswirkungen der Kohlendioxidspeicherung davon ausgegangen, dass alle Möglichkeiten zur Vermeidung und Minimierung von Beeinträchtigungen ausgeschöpft werden, insbesondere dass die Injektion so erfolgt, dass für den bestimmungsgemäßen Betrieb

- das injizierte CO₂ einschließlich möglicher Begleitstoffe in seiner Gesamtheit im Speicherkomplex verbleibt, bzw. allenfalls in die Rückhalteformation (Deckschicht) und die unteren Transferpfadformationen¹³³ (darüber liegende Schichten) gelangt, aber keinesfalls die oberflächennahen Schutzgutformationen erreicht;
- keine nennenswerte Freisetzung von CO₂ aus den Überageeinrichtungen erfolgt;
- der Aufstieg von salzigem Formationswasser in höhere Schichten auf die unteren Transferpfadformationen beschränkt bleibt und nicht die oberflächennahen Schutzgutformationen betrifft;
- die möglicherweise auftretenden großflächigen Landhebungen (Injektionsphase) und nachfolgenden Landsenkungen (Postinjektionsphase) gering sind, langsam und großflächig gleichmäßig verlaufen;
- die möglicherweise induzierte Seismizität nur zu Mikrobeben (also zu nicht vom Menschen spürbaren Beben bis Magnitude 2) führt.

¹³¹ Kronimus et al. (2011), S. 113.

¹³² Im Hinblick auf tiefliegendes (gegebenenfalls salziges) Grundwasser ist darauf hinzuweisen, dass das Schutzgut „Wasser“ – und damit auch jegliches Grundwasser – nicht betrachtet wird. Grund hierfür ist die in der Leistungsbeschreibung vorgesehene Beschränkung der zu betrachtenden Schutzgüter auf Tiere, Pflanzen, die biologische Vielfalt, die Landschaft sowie Kultur- und sonstige Sachgüter und – in Abstimmung mit dem Umweltbundesamt (siehe hierzu das Protokoll der Besprechung zwischen Auftraggeber und Forschungsnehmer vom 07.11.2011) – den Menschen.

¹³³ Vgl. Großmann et al. (2011a), S. 18, Abb. 1.

Die direkten Wirkungen der Anwesenheit des CO₂ im Speicher und des darüber hinausgehenden Druckfelds beschränken sich auf den geologischen Untergrund. Nur Folgewirkungen wie Landhebungen, Aufstieg von Formationswasser oder Leckagen können auch im Bereich der oberflächennahen abiotischen und biotischen Schutzgüter zu Beeinträchtigungen führen.

Auswirkungen auf den tiefen geologischen Untergrund

Zwar ist inzwischen bekannt, dass auch im tiefen geologischen Untergrund Leben existiert, jedoch weiß man noch sehr wenig darüber. In erster Näherung muss man davon ausgehen,

- dass mit dem Formationswasser auch die in diesem Wasser lebenden Mikroorganismen verdrängt werden;
- dass Organismen, die dem verdrängten Formationswasser nicht folgen können, getötet werden;
- dass die Lösung von CO₂ und von Begleitstoffen im Formationswasser zu einer Veränderung der Lebensbedingungen führt, die möglicherweise auch die Zusammensetzung der Lebensgemeinschaft ändert;
- dass die Druckerhöhung und Strömungsveränderungen auch im weiteren Umfeld der Injektion die Lebensbedingungen der Mikroorganismen des tiefen Untergrundes beeinträchtigen.

Durch die CO₂-Speicherung sind daher Auswirkungen auf die Mikroorganismen des geologischen Untergrundes zu erwarten, die jedoch nicht näher spezifiziert werden können. Zudem sind Mikroorganismen des geologischen Untergrundes ausdrücklich weder vom Umweltbegriff des KSpG in § 3 Nr. 14 noch von allgemeinen Definitionen und dem Begriffsverständnis von Umwelt, Tieren, Pflanzen oder Biodiversität in anderen umweltrelevanten Gesetzen (inklusive dem Bundes-Bodenschutzgesetz und dem Bundesberggesetz) umfasst. Zwar ist es nicht ausgeschlossen, dass diese Mikroorganismen bei näherer bzw. fortschreitender Kenntnis über sie unter die Begrifflichkeiten einzuordnen sind. Jedoch sind Mikroorganismen des geologischen Untergrundes aktuell weder von der gängigen Praxis im Bergbau noch vom herrschenden Begriffsverständnis erfasst. Auswirkungen auf die Mikroorganismen des geologischen Untergrundes werden daher nachfolgend nicht weiter betrachtet. Entsprechend der Definition der Schutzgüter (jeweils am Beginn der nachfolgenden Unterkapitel)¹³⁴ werden im Folgenden nur noch die oberflächennahen Schutzgüter und die Wirkfaktoren berücksichtigt, die möglicherweise Auswirkungen auf die oberflächennahen Schutzgutformationen haben.

¹³⁴ Mensch: 3.2.2; Pflanzen: 3.2.3; Tiere: 3.2.4; biologische Vielfalt: 3.2.5; Landschaft: 3.2.6; Kulturgüter: 3.2.7; sonstige Sachgüter: 3.2.8.

Relevante Wirkfaktoren der Kohlendioxidspeicherung bei bestimmungsgemäßem Betrieb

In Tabelle 1 wurden die Wirkfaktoren des bestimmungsgemäßen Betriebes, die in den einzelnen Projektphasen auftreten, zusammengefasst. Hiervon können die folgenden Wirkfaktoren möglicherweise Auswirkungen auf die oberflächennahen Schutzgüter haben:

- Flächeninanspruchnahme, Boden- bzw. Sedimentverluste,
- Erschütterungen,
- akustische und optische Emissionen,
- stoffliche Emissionen,
- Sedimentverwirbelungen,
- Veränderung des Reliefs durch geringe, langsam und großflächig gleichmäßig verlaufende Landhebungen und -senkungen,
- Mikrobeben durch erhöhte Seismizität.

Die ersten sechs Wirkfaktoren können in allen Projektphasen auftreten, also von der Erkundungsphase über die Bauphase und die Injektionsphase bis hin zur Postinjektionsphase. Dabei ist zu beachten, dass die Postinjektionsphase sehr lang ist und diese Wirkfaktoren nach Rückbau der Übertageeinrichtungen und Beendigung des Monitorings nicht mehr wirksam sein werden. Die beiden letztgenannten Wirkfaktoren kommen in der Injektions- und in der Postinjektionsphase zum Tragen.

Relevante Wirkfaktoren des nicht bestimmungsgemäßen Betriebs

- In Tabelle 2 wurden die Wirkfaktoren des nicht bestimmungsgemäßen Betriebes zusammengefasst. Hiervon können die folgenden Wirkfaktoren möglicherweise Auswirkungen auf die oberflächennahen Schutzgüter haben: größere Veränderungen des Reliefs durch Landhebungen und -senkungen;
- größere Beben durch erhöhte Seismizität;
- Versalzungen durch Aufstieg von Formationswasser;
- Freisetzung von Kohlendioxid und Begleitstoffen durch Leckage aus dem Speicher oder aus Oberageanlagen

3.2.1 Definitionen der Schutzgüter

Bevor die betrachteten Schutzgüter definiert werden, ist Folgendes vorwegzunehmen:

Das KSpG enthält keine Begriffsbestimmung für das Schutzgut „Mensch“. Gleches gilt für die weiteren betrachteten Schutzgüter. Zwar ist in § 3 Nr. 14 KSpG eine Begriffsbestimmung für den Begriff „Umwelt“ zu finden: Danach umfasst der Begriff „Umwelt“ die Schutzgüter Tiere, Pflanzen, Biologische Vielfalt, Landschaft sowie Kultur- und sonstige Sachgüter. Weitere Begriffsbestimmungen für diese Schutzgüter enthält das KSpG-E jedoch nicht. Der weitere Wortlaut und die Gesetzesystematik des KSpG lassen zum Teil zwar Rückschlüsse auf den

Stellenwert der einzelnen Schutzgüter zu,¹³⁵ geben aber keinen Aufschluss über das Verständnis der Begriffe an sich.

Daher ist für eine Definition der Schutzgüter auf allgemeine Definitionen und das Begriffsverständnis in anderen Gesetzen zurückzugreifen. Für die Herleitung der Definitionen der genannten Schutzgüter werden unter anderem die Kommentarliteratur zum UVPG und die Kommentarliteratur zum BImSchG herangezogen. Denn zum einen weist das KSpG insbesondere im Bereich der Voraussetzungen der Zulassung von Kohlendioxid-Speichern starke Bezüge zur Schutz- und Vorsorgepflicht des Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG) auf. Zum anderen enthält das KSpG Bezüge zum Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVPG) – so unterliegt z.B. die Planfeststellung von Kohlendioxidspeichern der UV-Pflicht. Auch wird in der Gesetzesbegründung zu § 3 Nr. 14 KSpG-E, der den Begriff „Umwelt“ definiert, auf die in § 2 Abs. 1 Satz 2 UVPG genannten Umweltgüter verwiesen.¹³⁶ Daher liegt es nahe, das Begriffsverständnis des UVPG auf die im KSpG verwendeten Begriffe zu übertragen, da ansonsten jedenfalls im Verhältnis von § 5 KSpG und § 13 KSpG zwei unterschiedliche Begriffe Anwendung fänden, wofür keine Rechtfertigung erkennbar ist.¹³⁷

3.2.2 Menschen und menschliche Gesundheit

Definition

Das KSpG enthält keine Begriffsbestimmung für das Schutzgut „Mensch“. Die Gesetzessystematik des KSpG lässt zwar Rückschlüsse auf den Stellenwert des Menschen zu: So ist der Schutz des Menschen und der Umwelt in § 1 KSpG ausdrücklich als Zweck des Gesetzes benannt. Damit wird klargestellt, dass andere Zwecke – beispielsweise der Schutz des Klimas und das Interesse an der Sicherung der Energieversorgung und der Industrieproduktion – nicht zu Lasten des Menschen und der Umwelt gehen dürfen.¹³⁸ Auch in weiteren Vorschriften des KSpG – so beispielsweise in §§ 13 Abs. 1 Nr. 3, 18, 20 Abs. 2 KSpG – ist der Mensch ausdrücklich benannt; insoweit steht stets die Vermeidung von Beeinträchtigungen, Risiken oder Gefahren für den Menschen im Fokus. Die Gesetzessystematik des KSpG gibt aber keinen Aufschluss über das Verständnis des Begriffes an sich. Daher ist auf allgemeine Definitionen und das Begriffsverständnis in anderen Gesetzen zurückzugreifen.¹³⁹

¹³⁵ Siehe hierzu sogleich.

¹³⁶ Ziffer 15.2 der Anlage 1 zum UVPG.

¹³⁷ *Bundesregierung* (2011), Begründung zu § 3, S. 64.

¹³⁸ *Bundesregierung* (2011), Begründung zu § 1, S. 60.

¹³⁹ Zur weiteren Begründung wird auf 3.2.1 verwiesen.

Das Schutzgut „Mensch“¹⁴⁰ betrifft – juristisch betrachtet – sowohl den einzelnen Menschen als auch eine Gruppe von Menschen.¹⁴¹ Der Schutz des Menschen hat – wie sich auch aus dem Zweck des Gesetzes in § 1 KSpG ableiten lässt – Vorrang vor den weiteren Schutzgütern.¹⁴² Von diesem Schutzgut ist das menschliche Leben einschließlich der menschlichen Gesundheit umfasst (Lebens- und Gesundheitsschutz).¹⁴³

Unter menschlicher Gesundheit ist grundsätzlich die körperliche (physisch-organische) wie auch die psychische Unversehrtheit zu verstehen.¹⁴⁴ Beeinträchtigende Auswirkungen auf das Schutzgut Mensch sind beispielsweise Krankheit, Körperschäden, somatische Funktionsstörungen sowie Beeinträchtigungen der körperlichen Integrität.

Zudem ist das physische und psychische Wohlempfinden als vom Schutzgut Mensch umfasst zu betrachten.¹⁴⁵ Dies lässt sich aus dem UVP-Recht und dem Immissionsschutzrecht ableiten und ist auf den Anwendungsbereich des KSpG übertragbar: Denn das KSpG dient dem Schutz des Menschen unter anderem vor möglichen, im Zusammenhang mit der Speicherung von Kohlendioxid erfolgenden Immissionen (siehe hierzu z.B. §§ 13 Abs. 1 Nr. 4, 18, 20 KSpG). Des Weiteren ist neben den einleitend angesprochenen Bezügen des KSpG zum BImSchG eine Vergleichbarkeit mit dem Schutzgut des Immissionsschutzrechts gegeben.¹⁴⁶ Auch die Vergleichbarkeit mit dem UVP-Recht ist gegeben, da sowohl das KSpG als auch das UVPG die Auswirkungen von Vorhaben auf den Menschen¹⁴⁷ und die weiteren eingangs genannten Schutzgüter, betreffen.

Im Zusammenhang mit der menschlichen Gesundheit sowie dem physischen und psychischen Wohlempfinden sind beispielsweise Wirkfaktoren wie Lärm oder Schadstoffe zu nennen. Diese Wirkfaktoren können direkte, beeinträchtigende Auswirkungen auf die Gesundheit sowie das physische und psychische Wohlempfinden des Menschen und damit auf das Schutzgut Mensch haben.

¹⁴⁰ In Abstimmung mit dem Umweltbundesamt und über die Leistungsbeschreibung hin-ausgehend zählt auch der Mensch zu den im Rahmen des Forschungsvorhabens zu betrachtenden Schutzgütern (siehe hierzu das Protokoll der Besprechung zwischen Auftraggeber und Forschungsnehmer vom 07.11.2011).

¹⁴¹ Peters/Balla (2006), § 2 UVPG Rn. 12.

¹⁴² Jarass (2010), § 1 BImSchG Rn. 3; Dietlein, in: Landmann/Rohmer (2011), § 1 BImSchG Rn. 9. Diese Wertung aus dem Immissionsschutzrecht ist auf das KSpG übertragbar, da das KSpG starke Bezüge zur Schutz- und Vorsorgepflicht des BImSchG aufweist.

¹⁴³ Bundesregierung (2011), Begründung zu § 3, S. 64. vgl. auch § 7 Abs. 1 Satz 2 Nr. 5 KSpG.

¹⁴⁴ Appold, in: Hoppe/Beckmann (2012), § 2 UVPG Rn. 25; Peters/Balla (2006), § 2 UVPG Rn. 12.

¹⁴⁵ Appold, in: Hoppe/Beckmann (2012), § 2 UVPG Rn. 25; Peters/Balla (2006), § 2 UVPG Rn. 12; Jarass (2010), § 1 BImSchG Rn. 3.

¹⁴⁶ Siehe hierzu § 1 Abs. 1 BImSchG.

¹⁴⁷ § 1 KsSpG, § 1 Abs. 1 Nr. 1 UVPG.

Frenz¹⁴⁸ verweist auf eine Zulassung eines bergbaulichen Rahmenbetriebsplans, der Ausführungen zum körperlichen, geistigen und sozialen Wohlbefinden enthält. Darin werde nicht nur die fortlaufende Störung der Privatsphäre und die starke Einschränkung der Freizeit durch Feststellungs- und Reparaturarbeiten infolge von Bergschäden betont, sondern auch auf die ständige Geräuschkulisse durch den Bergbau verwiesen. Insbesondere verursachten die plötzlich auftretenden Geräusche der Pressungen und Zerrungen Angst, Schrecken und Schlafstörungen, und die ständige Sorge um das Haus führe zur Verunsicherung der Betroffenen. In dem beispielhaft angeführten Rahmenbetriebsplan werde ausdrücklich darauf hingewiesen, dass die Auswirkungen des betreffenden Vorhabens und der damit einhergehenden Reparatur- und Vorsorgemaßnahmen auf die soziale Lage und die psychische Befindlichkeit des Menschen an die Belastbarkeitsgrenze der Bewohner heranreichten. Damit können Einwirkungen auf soziale Grundbedürfnisse des Menschen das physische und ggf. auch das psychische Wohlempfinden beeinträchtigen. Relevante Auswirkungen können Stress sowie Störungen von Schlaf und Entspannung sein.¹⁴⁹

Gassner et al.¹⁵⁰ nennen auf der Basis der Auswertung von Leitfäden und Gutachten drei Aspekte, die in der UVP bezüglich des Schutzgutes Mensch insbesondere berücksichtigt werden:

- *Gesundheit und Wohlbefinden des Menschen allgemein:*
primär unter dem (medizinischen) Blickwinkel einer Bewertung schädlicher Umweltbelastungen. Indikatoren hierfür sind beispielsweise Lärm, Schadstoffe, Gerüche, Erschütterungen, Licht und Strahlung, Bioklima und Bewegungsfreiheit bzw. deren Einschränkung.
- *Wohn- und Wohnumfeldfunktionen:*
da Menschen einen großen Teil ihrer Freizeit und auch ihrer Arbeitszeit hier verbringen ist ein intaktes Wohn- und Wohnumfeld für die Gesundheit und das Wohlbefinden des Menschen von zentraler Bedeutung. Indikatoren hierfür sind beispielsweise Bauflächen, Art und Zustand der Bausubstanz, Stadt- und Ortsbild, wohnklimatische Verhältnisse, siedlungsnahe und innerörtliche Freiflächen sowie inner- und zwischenörtliche Beziehungen, wie z.B. Wegebeziehungen.
- *Erholungs- und Freizeitfunktion:*
sie ergänzen die Funktionen des Wohnumfeldes für das Wohlbefinden, die Erholung und Gesundheit des Menschen ergänzen und haben für diese eine hohe Bedeutung. Indikatoren hierfür sind beispielsweise Flächen mit Bedeutung für die landschaftsgebundene Erholung, Erholungsgebiete, Erholungswald, Erholungseinrichtungen und -infrastruktur, Beziehungen zwischen Wohn- und Erholungsflächen, Erreichbarkeit, Zugänglichkeit und Erlebbarkeit.

¹⁴⁸ Frenz (2005), S. 3.

¹⁴⁹ Vgl. Gassner/Winkelbrandt/Bernotat (2010), S. 257.

¹⁵⁰ Gassner/Winkelbrandt/Bernotat (2010), S. 254-255, vgl. auch Jessel/Tobias (2002), S. 232.

Da der Mensch eng mit seinem Umfeld verflochten ist und vielfältige Wechselbeziehungen zu den weiteren Schutzgütern bestehen, ist er stets auch von den Auswirkungen auf diese Schutzgüter betroffen. Zumindest indirekt gehen daher auch stets menschliche Bedürfnisse in die für diese Umweltbestandteile festgelegten Schutzziele und Wertmaßstäbe ein.¹⁵¹

Mögliche Auswirkungen bei bestimmungsgemäßem Betrieb

Nachfolgend werden die Wirkfaktoren betrachtet, die voraussichtlich beim bestimmungsgemäßen Betrieb Auswirkungen auf das Schutzgut Mensch haben können.

Relevant für die Ermittlung möglicher Auswirkungen auf den Menschen ist im Wesentlichen der terrestrische Bereich als sein Lebensbereich. Insofern beziehen sich die nachfolgenden Aussagen insbesondere auf diesen.

Auswirkungen auf den Menschen im marinen Bereich sind nur in Bezug auf Erholungs- und Freizeitfunktionen mariner Flächen bzw. die Beeinträchtigung dieser Funktion zu beachten. Da die Parameter für die Bewertung der Funktionen für den Menschen, die Indikatoren für deren Beeinträchtigung und die Art der Wirkungen des Vorhabens im terrestrischen und marinen Bereich vergleichbar sind, ist eine getrennte Auswirkungsanalyse nicht erforderlich.

Flächeninanspruchnahme, Boden- bzw. Sedimentverluste

Geht man davon aus, dass im Sinne der Vermeidung die Injektionsbohrung(en) und die Übertageeinrichtungen einschließlich der Logistikflächen so angeordnet werden,

- dass weder Flächen im Siedlungsbereich noch siedlungsnahe Freiflächen in Anspruch genommen werden;
- dass vorhandene Wegebeziehungen durch die Errichtung der Anlagen nicht unterbrochen werden;
- dass keine Freiflächen mit hoher Bedeutung für die Erholung in Anspruch genommen werden,

dann können Konflikte und erhebliche Beeinträchtigungen durch Flächeninanspruchnahme vermieden werden. Werden entsprechende Vermeidungsmaßnahmen nicht umgesetzt, können Beeinträchtigungen nicht ausgeschlossen werden. Eine vorübergehende oder kleinflächige Flächennutzung im Siedlungsbereich bzw. im Bereich siedlungsnaher Freiflächen wird in der Regel nicht zu erheblichen Beeinträchtigungen des Menschen führen. Eine größere und lang andauernde untersuchungs-, erkundungs- und monitoringbedingte Flächeninanspruchnahme könnte gegebenenfalls eine Beeinträchtigung von Wohn- und Wohnumfeld- sowie von Erholungs- und Freizeitfunktionen zur Folge haben. In diesem Fall müssten gegebenenfalls wiederum die oben genannten Vermeidungsprinzipien zur Anwendung kommen, um erhebliche Beeinträchtigungen zu vermeiden. Bei einem Zusammentreffen von großflächigen Siedlungsbereichen mit regelmäßigen Messnetzrastern ist eine Umsetzung der Vermeidungsprinzipien unter Umständen nicht möglich. In Abhängigkeit von der Art und

¹⁵¹ Vgl. Gassner/Winkelbrandt/Bernotat (2010), S. 254 und Jessel/Tobias (2002), S. 230

Dauer der Flächeninanspruchnahme könnte es gegebenenfalls zu einer Beeinträchtigung der genannten Funktionen kommen.

Insgesamt lassen sich Auswirkungen auf das Schutzgut Mensch durch den Wirkfaktor Flächeninanspruchnahme bei konsequenter Umsetzung entsprechender Optimierungs-, Vermeidungs- und Minimierungsmaßnahmen weitgehend ausschließen. Verbleibende Beeinträchtigungen können in den meisten Fällen in den Zulassungsverfahren voraussichtlich bereits im Rahmen der Prüfung der materiellen Voraussetzungen kompensiert werden; spätestens im Rahmen der Abwägung wird über den Umgang mit verbleibenden Beeinträchtigungen und das Schicksal der beantragten Zulassung entschieden.

Erschütterungen

Erschütterungen sind mechanische Wellen, die sich im Boden ausbreiten, Gebäude zu Schwingungen anregen und dort vom Menschen wahrgenommen werden. Die Ausbreitung von Erschütterungen ist ein komplexer Prozess, der nicht nur von der Quelle selbst, sondern auch vom angrenzenden Übertragungsmedium abhängt. Auch die Eigenschaften der Empfänger, also der Körper, auf die sie dann einwirken, haben Einfluss auf die Stärke der Erschütterungswirkung.¹⁵² So ist die Antwort eines (Wohn-)Gebäudes auf die eindringenden Erschütterungen von den Eigenfrequenzen des Gebäudes und seiner Bauteile abhängig. Auch die Übertragung innerhalb eines Gebäudes hängt stark von den Eigenschaften des Gebäudes ab. Bei einem massiven Mauerwerk ist meist mit zunehmender Höhe über dem Boden eine Abnahme der Erschütterungen festzustellen.¹⁵³

Tabelle 3: Zuordnung von KB-Wert (bewertete Schwingungsstärke) und menschlicher Wahrnehmung¹⁵⁴

KB-Wert	Beschreibung der Wahrnehmung
< 0,1	Nicht spürbar
≈ 0,1 - 0,2	Fühlchwelle
0,1 - 0,4	Gerade spürbar
0,4 - 1,6	Gut spürbar
1,6 - 6,3	Stark spürbar
> 6,3	Sehr stark spürbar

"Ob ein Mensch Erschütterungsimmissionen als belästigend empfindet, hängt nicht nur von physikalischen Parametern wie Stärke, Frequenz und zeitlichem Verlauf des eigentlichen Erschütterungssereignisses ab, sondern auch vom Menschen selbst. Gesundheitszustand, Art der Tätigkeit während der Erschütterungswahrnehmung, Grad der Gewöhnung und der Erwartungshaltung an den Aufenthaltsort sind eher subjektive Parameter, die beeinflussen, ob

¹⁵² Vgl. Studer/Laue/Koller (2007), S. 142 und 146.

¹⁵³ Vgl. Studer/Laue/Koller (2007), S. 150.

¹⁵⁴ Müller-Borutta (o. J.), S. 5.

Erschütterungen als erheblich belästigend empfunden werden. Sekundäreffekte, wie z. B. Schwingungsbewegungen von Pflanzen oder hörbares Klimmen von Gläsern können zudem das Belästigungsempfinden vergrößern.¹⁵⁵ Die Wahrnehmbarkeit der Erschütterungen wird stark von der Aufmerksamkeit der Betroffenen beeinflusst, jede Ablenkung (Lesen, Gespräche, Radio oder Fernsehen) vermindert die Wahrnehmbarkeit deutlich. Die Fühlchwelle ist daher kein fester Wert, sondern abhängig von den Umständen. In der DIN 4150-2 (von 1992) erfolgte eine Zuordnung der KB-Werte (bewertete Schwingstärke) zur subjektiven Wahrnehmung (vgl. Tabelle 3). Der Mensch ist empfindlicher als Bauwerke, er fühlt sich bereits von Erschütterungen belästigt, die noch nicht geeignet sind, Schäden an Bauwerken zu verursachen.¹⁵⁶

Höherfrequente Vibrationen von Decke, Boden und Wänden können in geschlossenen Räumen die Luft zu einem hörbaren Geräusch anregen. Bei diesem so genannten "Luftschall" oder "abgestrahltem Körperschall" handelt es sich meist um ein tieffrequentes Geräusch, das im Raum nicht lokalisiert werden kann. Als Beispiel nennen Studer et al.¹⁵⁷ das Rumpeln in einem Zimmer infolge der Vorbeifahrt eines Zuges in einem nahegelegenen Tunnel. Wie sehr dieses Geräusch wahrgenommen wird, hängt wiederum von der ansonsten vorhandenen Geräuschkulisse ab.

Der Mensch kann in Gebäuden also in zweifacher Weise beeinträchtigt werden, durch eine spürbare Erschütterung und durch den von der Erschütterung verursachten Luftschall. Neben den in Kapitel 3.1.4 „Erschütterungen“ angesprochenen Vermeidungsmaßnahmen sind gegebenenfalls auch Maßnahmen zur Erschütterungsminderung auf der Seite betroffener (Wohn-)Gebäude denkbar. Durch das Anbringen von Versteifungen oder Zusatzmassen können deren Schwingungseigenschaften verändert und gegebenenfalls resonanzbedingte Erschütterungen vermieden oder gemindert werden.¹⁵⁸ Entsprechende Maßnahmen sind aber vergleichsweise aufwendig.

Voraussichtlich lassen sich erhebliche Auswirkungen durch vorhabenbedingte Erschütterungen auf den Menschen einschließlich seiner Gesundheit und seines Wohlbefindens vermeiden. Einzelne vorübergehende Belästigungen sind jedoch möglicherweise nicht auszuschließen.

Akustische und optische Emissionen

Akustische und optische Emissionen sind grundsätzlich geeignet das menschliche Wohlbefinden oder sogar die Gesundheit zu beeinträchtigen. Werden jedoch die oben bezüglich der Flächeninanspruchnahme formulierten Vermeidungsmaßnahmen umgesetzt, lassen sich auch erhebliche Beeinträchtigungen durch akustische und optische Emissionen weitgehend vermeiden. Reichen die Abstände zu den Siedlungsbereichen nicht aus bzw. gehen

¹⁵⁵ <http://www.lanuv.nrw.de/geraeusche/einwmen.htm>, Stand: 05.03.2012.

¹⁵⁶ Vgl. Studer/Laue/Koller (2007), S. 153.

¹⁵⁷ Vgl. Studer/Laue/Koller (2007), S. 161.

¹⁵⁸ Vgl. Lai (2000), S. 18.

die Emissionen von innerörtlichen Untersuchungs- oder Monitoringmaßnahmen aus, sind zusätzlich Lärm- oder Sichtschutzmaßnahmen möglich.

Stoffliche Emissionen

Nach dem gegenwärtigen Kenntnisstand ist nicht zu erwarten, dass stoffliche Emissionen ein Ausmaß erreichen, das zu erheblichen vorhabenbedingten Auswirkungen auf das menschliche Wohlbefinden oder die menschliche Gesundheit führt.

Sedimentverwirbelungen

Dieser Wirkfaktor ist bei Vorhaben im marinen Bereich zu erwarten, direkte Auswirkungen auf den Menschen sind daher ausgeschlossen.

Geringe Veränderungen des Reliefs durch großflächige Landhebungen und -senkungen

Geringe, langsam und großflächig gleichmäßig verlaufende Landhebungen und nachfolgende entsprechende Landsenkungen führen nicht zu direkten erheblichen Auswirkungen auf den Menschen. Sie sind weder geeignet die menschliche Gesundheit und das menschliche Wohlbefinden zu beeinträchtigen, noch führen sie zu direkten Beeinträchtigungen der Wohn- und Wohnumfeld- sowie der Erholungsfunktionen.

Großmann et al.¹⁵⁹ erwarten bei den bestimmungsgemäßen, großflächig gleichmäßigen Landhebungen und -senkungen nur geringe Auswirkungen auf Grundwasserstände und -ströme, schließen aber Änderungen von Grundwasserströmen und -ständen auch nicht ganz aus. Auswirkungen auf innerörtliche oder siedlungsnahe Freiflächen sowie auf Flächen mit Bedeutung für die landschaftsgebundene Erholung, wie die in Kapitel 3.2.2 „Größere Veränderung des Reliefs durch stärkere Landhebungen und -senkungen“ für nicht bestimmungsgemäße größere Landhebungen skizzieren, sind daher voraussichtlich nicht oder nur in Einzelfällen zu erwarten, können aber nicht grundsätzlich ausgeschlossen werden.

Unter Vermeidungsgesichtspunkten sind standort- und vorhabenspezifische Modellierungen und Gutachten erforderlich, um jeweils eine ortsspezifische Obergrenze der Landhebungen und -senkungen unter Berücksichtigung der Erfordernisse zum Schutz der verschiedenen Schutzgüter wie Kultur- und sonstige Sachgüter, Wasser und Vegetation zu ermitteln. Werden diese bei der Festlegung von Speichermengen und Einspeicherraten beachtet, dann sind für den bestimmungsgemäßen Betrieb durch den Wirkfaktor Landhebungen auch keine erheblichen Auswirkungen auf die Wohn- und Wohnumfeldfunktionen sowie die Erholungsfunktionen zu erwarten, da erhebliche Veränderungen relevanter Parameter wie Art und Zustand der Bausubstanz, des Stadt- und Ortsbilds, wohnklimatischer Verhältnisse oder Freiflächen mit Bedeutung für die Erholung weitgehend ausgeschlossen werden können.

Mikrobeben durch erhöhte Seismizität

¹⁵⁹ Großmann et al. (2011a), S. 31.

Mikrobeben haben eine so geringe Magnitude, dass sie zwar messbar aber für den Menschen nicht spürbar sind (vgl. Kap. 3.2). Sie sind daher nicht geeignet, die Gesundheit des Menschen oder sein Wohlbefinden zu beeinträchtigen. Auch Wohn- und Wohnumfeld- sowie Erholungsfunktionen werden durch solche Beben nicht verändert. Erhebliche Auswirkungen auf das Schutzgut Mensch durch Mikrobeben infolge einer induzierten erhöhten Seismizität sind nicht zu erwarten.

Mögliche Auswirkungen des nicht bestimmungsgemäßen Betriebs

Nachfolgend werden die Wirkfaktoren betrachtet, die beim nicht bestimmungsgemäßen Betrieb Auswirkungen auf das Schutzgut Mensch haben können. Das Ausmaß der möglichen Auswirkungen hängt von der Art der Abweichung vom bestimmungsgemäßen Betrieb und der Intensität der damit verbundenen Wirkfaktoren ab.

Relevant ist wiederum im Wesentlichen der terrestrische Bereich als Lebensbereich des Menschen. Im marinen Bereich sind Auswirkungen nur im Hinblick auf Erholungs- und Freizeitfunktionen zu erwarten. Auf eine getrennte Auswirkungsanalyse für diese Bereiche wird aus den in Kap. 3.2.2 „Mögliche Auswirkungen bei bestimmungsgemäßem Betrieb“ bereits genannten Gründen verzichtet.

Größere Veränderung des Reliefs durch stärkere Landhebungen und -senkungen

Auch wenn es zu Landhebungen und zu Landsenkungen kommen sollte, die anders als für den bestimmungsgemäßen Betrieb prognostiziert nicht gering sind und nicht langsam und großflächig gleichmäßig verlaufen, sind direkte Auswirkungen auf den Menschen praktisch ausgeschlossen.

Denkbar sind jedoch Auswirkungen auf Wohn- und Wohnumfeld- sowie auf Erholungsfunktionen. Da größere Hebungen und Senkungen oder Relativbewegungen, also unterschiedliche Hebungen oder Senkungen benachbarter Flächen (s. Kap. 3.1.4 „Veränderung des Reliefs durch Landhebungen und Landsenkungen“), zu Schäden an Gebäuden, an Ver- und Entsorgungs- oder Kommunikationsleitungen führen können, sind auch Beeinträchtigungen des Zustands der Bausubstanz ganzer Orte oder Siedlungsviertel denkbar. Dies könnte auch zur Abwanderung von Bevölkerungsteilen, zu Veränderungen der Bewohnerstruktur von ganzen Orten oder größeren Siedlungsteilen und damit zu Veränderungen des Wohn- und Wohnumfelds führen.

Kommt es fortlaufend zu immer neuen oder weitergehenden Schäden an Wohngebäuden, dann kann dies bei den betroffenen Menschen Stress verursachen, auch wenn die Kosten für Reparaturen vom Verursacher getragen werden müssen. Wiederkehrende Schäden haben zur Folge, dass die Betroffenen gezwungen sind, sich immer wieder um die Beseitigung der Schäden zu kümmern. Sie müssen diese anzeigen, Anträge stellen und Nachweise über die Ursachen erbringen. Termine mit Gutachtern müssen gemacht werden. Handwerker, die Staub und Schmutz verursachen, müssen in der Wohnung geduldet werden. Reparaturbereiche müssen vorher freigeräumt und anschließend wieder eingeräumt werden. Sich immer wieder um all das kümmern zu müssen, kostet Zeit und Kraft, schränkt die Freizeit ein. Es ist außerdem davon auszugehen, dass die Betreiber von Kohlendioxidspeichern ein Interesse daran haben werden, möglichst wenige Schäden anzuerkennen und bezahlen zu müssen. Sie

werden es also den Betroffenen vermutlich nicht leicht machen, ihre Ansprüche durchzusetzen, was gegebenenfalls auch zu Rechtsstreitigkeiten führen wird. Darüber hinaus können häufig wiederkehrende Schäden zu einer erheblichen Verunsicherung der betroffenen Menschen durch die ständige Sorge um Wohnung und Haus führen.

Verunsicherung, Stress und Verringerung der zur freien Verfügung stehenden Zeit können zu einer Störung von Schlaf und Entspannung, zu Beeinträchtigungen von Konzentration, Lernen und Leistung und bei empfindlichen Menschen letztlich sogar zu Beeinträchtigungen des zentralen und vegetativen Nervensystems führen. Auf diese Weise können häufig wiederkehrende Schäden an Gebäuden durch größere Veränderungen des Reliefs auch zu Beeinträchtigungen des Wohlbefindens oder sogar der Gesundheit führen.

Eine weitere denkbare Folge von derartigen Reliefveränderungen sind Beeinträchtigungen von innerörtlichen oder siedlungsnahen Freiflächen und von Flächen mit Bedeutung für die landschaftsgebundene Erholung. Größere Reliefveränderungen könnten erhebliche Auswirkungen auf Grundwasserstände und Vorflutverhältnisse haben. Sowohl steigende als auch fallende Grund- oder Oberflächenwasserspiegel könnten den Charakter von Flächen stark verändern oder Flächen könnten unpassierbar werden. Dies könnte letztlich auch Auswirkungen auf die wohnklimatischen Funktionen und Verhältnisse haben.

Im Extremfall drohen Flächen durch die Unterbrechung der Vorflut und das Entstehen von größeren abflusslosen Senken unbewohnbar zu werden. Dem müsste dann mit aufwendigen und kostenintensiven Maßnahmen wie der Einrichtung und dem Betrieb von Schöpfwerken begegnet werden. Das wäre dann vergleichbar mit den so genannten "Ewigkeitslasten" bzw. "Ewigkeitskosten"¹⁶⁰ des Bergbaus.

Im schlimmsten anzunehmenden Fall sind also durch große und durch ungleichmäßige Landhebungen infolge nicht bestimmungsgemäßer Betriebszustände erhebliche Beeinträchtigungen möglich bzw. aufwendige Gegenmaßnahmen erforderlich.

Größere Beben durch erhöhte Seismizität

Bei nicht bestimmungsgemäßen Betriebszuständen sind auch stärkere Beben möglich, die vom Menschen gespürt werden und die Schäden an Gebäuden und Infrastruktur verursachen könnten.

Sofern es bei nicht bestimmungsgemäßen Betriebszuständen nur zu Beben in der bisher beobachteten Größenordnung (also einer Magnitude von maximal 4,5) kommt, sind erhebliche Beeinträchtigungen von Gesundheit und Wohlbefinden nicht zu erwarten. Allerdings kann es zu Beeinträchtigungen kommen, die z.T. denjenigen, die unter Kap. 3.2.2 „Größere Veränderung des Reliefs durch stärkere Landhebungen und -senkungen“ beschrieben wurden,

¹⁶⁰ Diese Begriffe wurden im Zusammenhang mit der Beendigung des deutschen Steinkohlenbergbaus geprägt, sind aber auch auf die Folgen und Folgekosten anderer Bergbauzweige und anderer Industriezweige anwendbar. Unter die Ewigkeitslasten bzw. -kosten fällt insbesondere das infolge der durch den Bergbau verursachten Landsenkungen und der damit verbundenen Änderungen von Landschaft und Vorflutverhältnissen dauerhaft oder zumindest über sehr lange Zeiträume erforderliche Pumpen von Wasser.

entsprechen. Nach vorliegendem Kenntnisstand sind aber auch Beben größerer Magnitude nicht auszuschließen. Sie könnten zu Verunsicherung, Einschränkung des Wohlbefindens und bei stärkeren Beben auch zur Gefährdung von Leib und Leben sowie zum Verlust von Hab und Gut führen. Bei größeren Beben können im küstennahen Bereich durch Flutwellen, im Gebirge durch Erdrutsche oder Lawinen zusätzliche Gefahren für den Menschen verursacht werden.

Aufstieg von salzigem Formationswasser

Direkte Auswirkungen auf den Menschen durch den Aufstieg von salzigem Formationswasser in oberflächennahe Bereiche oder an die Oberfläche sind nicht zu erwarten.

Denkbar ist, dass eine oberflächliche Versalzung dazu führt, dass siedlungsnahe und innerörtliche Freiflächen oder Flächen mit Bedeutung für die landschaftsgebundene Erholung ihren Charakter verändern und dadurch ihre Funktion für den Menschen beeinträchtigt wird. Prägende Vegetationsbestände, wie Gehölze, Baumreihen oder Wälder könnten absterben. Dies könnte letztlich auch Auswirkungen auf die wohnklimatischen Funktionen und Verhältnisse haben.

Einer erheblichen Einschränkung der Wasserversorgung könnte nur mit kosten- und energieaufwendigen Entsalzungsanlagen mit entsprechenden Folgewirkungen für die Umwelt begegnet werden.

Freisetzung von CO₂ durch Leckage aus dem Speicherkomplex oder aus Über Tageanlagen

Kohlendioxid ist ein natürlicher Bestandteil der Luft. Es handelt sich um ein farbloses Gas, das chemisch wenig reaktiv ist. Es wird als geruchlos¹⁶¹ oder schwach stechend¹⁶² beschrieben und wird entsprechend vom Menschen nicht bzw. kaum wahrgenommen. Kohlendioxid ist vergleichsweise wenig toxisch und Teil des menschlichen Energiestoffwechsels. Die natürliche Konzentration in der Luft ist für die Gesundheit und das Wohlbefinden unproblematisch. Aber Toxizität ist immer eine Frage der Dosis bzw. Konzentration. Erhöhte Konzentrationen führen zu Unwohlsein, Bewusstlosigkeit und Tod (vgl. Tabelle 4).

Tabelle 4: Übersicht zu Angaben in der Literatur zur Bedeutung verschiedener Kohlendioxid-Konzentrationen für den Menschen

CO ₂ -Konzentration [Vol.-%]	Bedeutung für den Menschen	Quelle
0,0385	gegenwärtige Konzentration in der Atemluft (Jahr 2008)	Großmann et al. ¹⁶³

¹⁶¹ Roberts/Wood/Haszeldine (2011), S. 1.

¹⁶² Guais et al. (2011), S. 2061.

¹⁶³ Großmann/Woiwode/Dahmke (2011), S. 25-26.

CO ₂ -Konzentration [Vol.-%]	Bedeutung für den Menschen	Quelle
0,04	(entspricht 400 ppm) wurde nach Angaben der amerikanischen Wetterbehörde NOAA an einer Messstation in der Arktis in diesem Frühjahr erstmals einen Monat lang überschritten und wird vermutlich in Zukunft auch in anderen Regionen erreicht	Pressemeldungen ¹⁶⁴
0,15	empfohlener Richtwert für die Konzentration in Innenräumen	Großmann et al.
≤ 0,3	Ergeben sich nach derzeitigem Erkenntnisstand auch bei dauerhafter Einwirkung keine Gesundheitsbedenken	Großmann et al.
0,3	maximale Immissionskonzentration (MIK), Grenzwert-Empfehlung für bodennahe Luftverunreinigungen im Freien, für Mensch, Tier und Pflanze bei dauernder Einwirkung als unbedenklich einzustufen	Großmann et al.
0,5	maximale Arbeitsplatzkonzentration, keine Schadwirkung bei einer Exposition von acht Stunden täglich	Großmann et al.
0,5-3	wurden als maximal akzeptable Konzentration definiert, je nach Dauer der Exposition	Guais et al. ¹⁶⁵
1-3	verursacht keine physischen Schäden, führt aber zu schnellerer Atmung, Kopfschmerzen und Müdigkeit	Roberts et al. ¹⁶⁶
1,5	führt zur Zunahme des Atemvolumens um mehr als 40 %	Großmann et al.
> 3	führt zu unvollständigem Gasaustausch in der Lunge und dadurch zu Veränderungen des pH-Wertes im Blut, Zustand wird Hypercapnia genannt und führt zu Hirn-Fehlfunktionen und zu Bewusstlosigkeit	Roberts et al.
4	Konzentration in der Atemluft beim Ausatmen IDLH-Wert (Immediately Dangerous to Life and Health), bei dem bei einer 30-minütigen Einwirkung die Wiederherstellung der Gesundheit ohne bleibende Folgen möglich ist	Großmann et al.
5	führt zu erhöhtem Atemvolumen, erhöhte Atemfrequenz und -tiefe	Guais et al.
5	führt zum Auftreten von Kopfschmerzen und Schwindel	Großmann et al.
> 5-10	führt zum Tod	Roberts et al.
8	führt zu Bewusstlosigkeit und nach 30-60 Minuten zum Tod	Großmann et al.
8-10	führt zu Atemnot, beschleunigtem Herzschlag, Anstieg des Blutdrucks, Kopfschmerzen, Ohrensausen, Erregung, Brechreiz, Blaufärbung von Haut und Schleimhäuten, Schwindel, Schwächegefühl, Bewegungsstörungen, krampfartigen Zuckungen und schließlich zu Bewusstlosigkeit und nach ca. 30-60 Minuten zum Tod	Großmann et al.

¹⁶⁴ Z. B. <http://www.abendblatt.de/ratgeber/wissen/article2294500/CO2-Wert-in-der-Arktis-uebersteigt-kritischen-Wert-von-400-ppm.html> und <http://www.spiegel.de/wissenschaft/natur/messungen-in-arktis-treibhausgas-co2-ueberschreitet-erstmals-400-ppm-a-836398.html> (Stand: 26.06.2012).

¹⁶⁵ Guais et al. (2011), S. 2061 bzw. 2065.

¹⁶⁶ Roberts/Wood/Haszeldine (2011), S. 1.

CO ₂ -Konzentration [Vol.-%]	Bedeutung für den Menschen	Quelle
9	tiefste für den Menschen tödliche Konzentration nach 5 Minuten Exposition	Stange & Duijnisveld ¹⁶⁷
10	führt innerhalb von 5 bis 10 Minuten zu Bewusstlosigkeit	
13	Konzentration, der Raucher ausgesetzt sind	Guais et al.
20	führt zu plötzlichem bewusstlosem Zusammenbrechen und nach 5-10 Minuten zum Tod	Großmann et al.
30	führt innerhalb von einer Minute zu Bewusstlosigkeit	Guais et al.

Guais et al. berichten, dass es auch Hinweise auf gesundheitliche Effekte durch geringe aber langfristig erhöhte Kohlendioxidkonzentrationen gibt. Bei einer langfristigen Konzentration des CO₂ in der Atemluft von 1 %¹⁶⁸ werden Sehbehinderungen beobachtet. Kopfschmerzen treten in den ersten Tagen bei einer CO₂-Konzentrationen in der Atemluft von 2 % auf.¹⁶⁹ Das CO₂ verändert die Säure-Basen-Balance im Körper und den zellulären Metabolismus, es stört die Funktion von Lunge, Herz und zentralem Nervensystem. Darüber hinaus gibt es Hinweise auf eine mögliche Reduzierung der Fortpflanzungsfähigkeit und teratogene Wirkungen, also die Verursachung von Fehlbildungen bei Embryonen. Guais et al. sehen außerdem die Notwendigkeit die Folgen von Langzeit-Einwirkungen insbesondere hinsichtlich einer möglichen krebsfördernden Wirkung zu untersuchen.¹⁷⁰

Es ist also davon auszugehen, dass eine erhöhte Kohlendioxidkonzentration zu Beeinträchtigungen des menschlichen Wohlbefindens und der menschlichen Gesundheit führen kann. Die Wirkung ist abhängig von der Konzentration des CO₂ in der Atemluft und der Dauer der Einwirkung, aber auch von der Konstitution der betroffenen Menschen. In Tierversuchen reagierten Jungtiere empfindlicher als erwachsene Tiere.¹⁷¹

Großmann et al.¹⁷² haben beispielhaft die Freisetzung von CO₂ aus Über Tageanlagen unter verschiedenen Bedingungen untersucht (vgl. Kap. 3.1.4 „Freisetzung von CO₂ durch Leckage aus dem Speicher oder aus Über Tageanlagen“). Aufgrund ihrer Ergebnisse gehen sie davon aus, dass bei Kohlendioxidleckagen aus den Über Tageanlagen in der Regel lediglich Auswirkungen im Bereich des Betriebsgeländes zu erwarten sind. Diese Flächen fallen in den Bereich der Vorkehrungen zur Arbeitssicherheit. Von Auswirkungen sind gegebenenfalls die im Bereich des Vorhabens Beschäftigten betroffen. Allerdings haben Großmann et al. vorwiegend nur

¹⁶⁷ Stange/Duijnisveld (2011), S. 45.

¹⁶⁸ Die Autoren machen hier und an anderen Stellen häufig keine Aussagen darüber, ob die Werte der CO₂-Konzentrationen in Vol.-% angegeben wurden. Da es sich aber hierbei um die übliche Einheit für Gaskonzentrationen handelt, ist davon auszugehen.

¹⁶⁹ Guais et al. (2011), S. 2066.

¹⁷⁰ Guais et al. (2011), S. 2068.

¹⁷¹ Guais et al. (2011), S. 2066.

¹⁷² Großmann et al. (2011b), S. 25-31.

untersucht, in welcher Entfernung die CO₂-Konzentration einen Beurteilungswert von 4 Vol.-% noch bzw. nicht mehr überschreitet. Beeinträchtigungen des menschlichen Wohlbefindens wie schnellere Atmung, Kopfschmerzen und Müdigkeit werden aber bereits bei Konzentrationen von 1–3 Vol.-% beobachtet. Die für verschiedene Expositionsbedingungen angegebenen Beurteilungswerte liegen deutlich niedriger (vgl. Tabelle 4). Ergänzend machen Großmann et al. zwar teilweise, aber nicht durchgehend, Angaben dazu, in welcher Entfernung unter den von ihnen untersuchten Bedingungen eine Konzentration von 0,5 Vol.-% unterschritten wird.

Erst bei CO₂-Konzentrationen in der Luft von ≤ 0,3 Vol.-% ergeben sich nach derzeitigem Erkenntnisstand auch bei dauerhafter Einwirkung keine Gesundheitsbedenken (vgl. Tabelle 4). Es ist daher nicht auszuschließen, dass sich auch außerhalb des Betriebsgeländes CO₂-Konzentrationen einstellen, die ein gesundheitliches Risiko bergen.

Für den Fall der Zerstörung eines Lagerbehälters und der Freisetzung seines kompletten Inhalts können Großmann et al.¹⁷³ nicht ausschließen, dass es auch außerhalb des Betriebsgeländes zu signifikant höheren CO₂-Konzentrationen von > 5 Vol.-% kommt (vgl. Kap. 3.1.4 „Freisetzung von CO₂ durch Leckage aus dem Speicher oder aus Übertageanlagen“). Bei einem derartigen Störfall werden deutlich größere CO₂-Mengen freigesetzt als durch ein Sicherheitsventil (Ausbläser) oder beim Abriss eines Tankschlauches. Da CO₂ schwerer ist als Luft, kann es sich bei Windstille bodennah konzentrieren, dem Gefälle folgend abfließen und sich in natürlichen oder anthropogenen Senken (Bodensenken, Höhlen, Gräben, Kellern, Unterführungen etc.) sammeln.

Solange die Übertageeinrichtungen in ausreichendem Abstand außerhalb der Siedlungsbereiche sowie von Bereichen mit hoher Bedeutung für die Erholung errichtet werden und für mögliche Gefahrenbereiche entsprechende Gefahrenabwehr- und Notfallplanungen greifen, können auch lokale direkte Beeinträchtigungen der menschlichen Gesundheit und des menschlichen Wohlbefindens durch eine Freisetzung von CO₂ aus diesen Anlagen vermieden werden. Dies sollte im Genehmigungsverfahren durch entsprechende Gutachten belegt werden: Dabei sollten – anders als bei den exemplarischen Untersuchungen von Großmann et al. – nicht nur der IDLH von 4,0 Vol.-% (vgl. Tabelle 4) oder der Wert für die maximale Arbeitsplatzkonzentration von 0,5 Vol.-% CO₂ in der Luft als Beurteilungswerte herangezogen werden. Vielmehr sollten auch das Unterschreiten des Wertes von 0,3 Vol.-% (vgl. Tabelle 4) und das Erreichen annähernd normaler Luftkonzentration mit Werten unter 0,05 Vol.-% CO₂ berücksichtigt werden. Neben Untersuchungen zur CO₂-Freisetzung und Ausbreitung bei (Wetter-)Bedingungen, die für den geplanten Standort typisch oder durchschnittlich sind, sind auch Untersuchungen für besonders ungünstige Bedingungen zu berücksichtigen, um Anhaltspunkte für das im schlimmsten Fall mögliche Geschehen zu gewinnen.

Zur Abwehr möglicher Gefahren aus der übertägigen CO₂-Freisetzung empfehlen sich daher für die Übertageanlagen Standorte, die kein Gefälle in die Richtung von Siedlungen oder Einrichtungen mit hoher Bedeutung für die Erholung aufweisen, so dass bei Windstille keine

¹⁷³ Großmann et al. (2011b), S. 32-34.

Schwergasabflüsse in Richtung dieser Bereiche auftreten können. Um bei CO₂-Freisetzung gegebenenfalls eine schnelle Verwirbelung und Verdünnung zu gewährleisten, empfehlen sich gut durchlüftete Standorte mit großer Windhäufigkeit und seltenem Auftreten von Inversionswetterlagen, so dass gute Austauschbedingungen bestehen.

Nach den Untersuchungen von Großmann et al.¹⁷⁴ ist von einem Blowout an einer Bohrung vor allem die unmittelbare Umgebung von einer vorübergehend erhöhten CO₂-Konzentration betroffen, bei einer Injektionsbohrung also insbesondere das Betriebsgelände und die dort Beschäftigten. Wie bei Leckagen aus den Übertageeinrichtungen ist aber bei einem Blowout auch auf Flächen, die in der Umgebung des Betriebsgeländes liegen, eine Beeinträchtigung nicht ausgeschlossen. Bis in welche Entfernung Überschreitungen eines Wertes von 0,5 Vol.-% möglich sind, hängt von den jeweiligen Bedingungen ab und kann letztlich nur auf der Basis von standortkonkreten Prognosen ermittelt werden. Nach den bei Großmann et al.¹⁷⁵ gemachten Angaben ist von Bereichen im Umkreis von mehreren hundert bis tausend Metern auszugehen (vgl. Kap. 3.1.4 „Freisetzung von CO₂ durch Leckage aus dem Speicher oder aus Übertageanlagen“).

Die möglichen Auswirkungen eines Blowouts an Injektionsbohrungen auf den Menschen sind grundsätzlich in etwa mit denen der Zerstörung eines Lagerbehälters vergleichbar, obwohl die freigesetzten CO₂-Mengen größer wären. Daher gilt auch für diese, dass direkte Beeinträchtigungen der menschlichen Gesundheit und des menschlichen Wohlbefindens durch eine Freisetzung von CO₂ vermieden werden können, solange die Injektionsbohrungen in ausreichendem Abstand außerhalb der Siedlungsbereiche sowie von Bereichen mit hoher Bedeutung für die Erholung errichtet werden und für mögliche Gefahrenbereiche entsprechende Gefahrenabwehr- und Notfallplanungen greifen.

Problematischer ist die Gefahr von Blowouts an alten Bohrungen, zu denen es etwa durch Korrosion oder unzureichende Abdichtungen kommen könnte. Da die Bohrungen bereits bestehen, ist die Einhaltung eines ausreichenden Abstandes zu Siedlungsbereichen und Flächen mit hoher Bedeutung für die Erholung nicht möglich. Großmann et al.¹⁷⁶ empfehlen neben den primären Maßnahmen zur Vermeidung von Freisetzungen umfassende Maßnahmen zur frühzeitigen Erkennung von Undichtigkeiten, um auf diese Weise die eruptive Freisetzung größerer Mengen zu vermeiden.

Greifen diese Vermeidungsmaßnahmen nicht und liegt die betroffene Bohrung im Siedlungsbereich bzw. in Siedlungsnahe, dann sind gegebenenfalls lokale Beeinträchtigungen von Gesundheit und Wohlbefinden nicht auszuschließen. Will man dieses Risiko eliminieren, dann muss man Speicher im Bereich von siedlungsnahen Altbohrungen ausschließen. Dabei müssen auch siedlungsnahe Altbohrungen berücksichtigt werden, die sich zwar während der Einspeicherung nicht im Einflussbereich der CO₂-Speicherblase befinden, aber im Laufe der Jahrhunderte durch die Migration des CO₂ erreicht werden könnten.

¹⁷⁴ Großmann et al. (2011b), S. 39-43.

¹⁷⁵ Großmann et al. (2011b), S. 39-43.

¹⁷⁶ Großmann et al. (2011b), S. 36.

Eine nicht bestimmungsgemäße Freisetzung von CO₂ aus dem tiefen geologischen Speicher über Wegsamkeiten wie Störungen, Risse und Klüfte ist grundsätzlich im gesamten Einflussbereich des Speichers denkbar, also oberhalb des primär von der Einspeicherung betroffenen Bereiches, des Bereiches der durch eine langfristige Migration des CO₂ erreicht wird sowie eines sich nach oben erweiternden Trichters bis an die Oberfläche. Da davon auszugehen ist, dass Bereiche mit bekannten Wegsamkeiten aufgrund der Anforderungen an die Dichtigkeit des Speichers ausgeschlossen werden, lässt sich nicht vorhersagen, wo möglicherweise CO₂ an die Oberfläche und damit möglicherweise in Kontakt mit dem Menschen gelangt.

Anders als bei einem Blowout oder der Zerstörung eines Lagerbehälters über Tage, ist durch die Leckage aus dem geologischen Speicher eher eine schleichende und diffuse Freisetzung von CO₂ zu erwarten. Aufgrund der vergleichsweise geringen Flüsse besteht einerseits die Gefahr, dass sie unentdeckt bleiben. Andererseits ist aber in gut durchlüfteten Bereichen auch davon auszugehen, dass Verwirbelung und Verdünnung gewährleisten, dass es nicht zu einer signifikanten Erhöhung der CO₂-Konzentration kommt, die Auswirkungen auf Gesundheit und Wohlbefinden hat.

Problematischer sind schlecht oder gar nicht durchlüftete Bereiche, in denen sich das austretende CO₂ sammelt und so Konzentrationen erreicht, von denen eine Gefährdung ausgeht. Diese Gefahr besteht bei mehr oder weniger geschlossenen Strukturen wie Kellern, Unterführungen, Tunnels, Bergwerken etc. oder auch in natürlichen Höhlen.

Aus dem Untertagebergbau ist bekannt, dass schädliche Gase bevorzugt durch Schadstellen wie z. B. Setzungsrisse in Bodenplatten in Keller oder andere Gebäudeteile eindringen können. Auch Einführungsstellen für Ver- und Entsorgungsleitungen in erdberührten Gebäudeteilen sind bezüglich der Dichtheit potenzielle Schwachstellen und damit Strömungswege.¹⁷⁷

Alle potenziell gefährdeten Objekte im Einflussbereich eines Speichers könnten grundsätzlich durch Messgeräte überwacht und mit Warneinrichtungen versehen werden, um das Risiko zu minimieren. Jedoch ist zu bedenken, dass die Funktionsfähigkeit der Systeme und die Ausrüstung jedes neu geschaffenen, potenziell gefährdeten Objektes mit solchen Systemen über einen sehr langen Zeitraum aufrecht erhalten und sichergestellt werden muss – auch dann, wenn lange Zeit keine Akkumulationen festgestellt werden. Dies birgt die Gefahr, dass die potenzielle Gefährdung durch eindringendes CO₂ in Vergessenheit gerät.

Darüber hinaus besteht die Gefahr aber auch im Freien. Denn in natürlichen und anthropogenen Bodensenken aller Art kann sich bei Windstille CO₂ anreichern. Je länger die Windstille anhält, desto mehr steigt das Risiko, dass Konzentrationen erreicht werden, die Menschen gefährden könnten. Je näher am Boden der Mensch atmet, desto größer ist die Gefahr. In diesem Sinne sind kleine Kinder gefährdeter als große Erwachsene, auf der Wiese liegende stärker als bei der Gartenarbeit am Boden hockende Menschen, Sitzende stärker als Stehende.

¹⁷⁷ Kronimus et al. (2011), S. 131.

Bei Speichern in Gebieten mit stetigem Wind, die entsprechend gut durchlüftet sind und selten von Inversionswetterlagen betroffen sind, ist bei einer gegebenen Leckage die Gefahr einer Akkumulation im Freien geringer als in Gebieten mit schlechten Austauschbedingungen.

Ebene Gebiete haben ein geringeres Akkumulationsrisiko als kleinteilig reliefierte Gebiete mit vielen natürlichen Bodensenken oder solche mit vielen anthropogen geschaffenen Senken, wie beispielsweise Gräben und Gruben. In dicht besiedelten Gebieten und solchen mit hoher Bedeutung für die Erholung sind gegebenenfalls mehr Menschen betroffen, als in dünn besiedelten und wenig frequentierten.

Dies bestätigen auch die Untersuchungen von Roberts et al.¹⁷⁸, die Unglücke mit CO₂-Vergiftungen auf der Basis von 286 natürlichen, in der Regel nicht durch Warnhinweise gekennzeichneten CO₂-Quellen in Italien untersucht haben. Die Autoren berichten, dass Todesfälle umso häufiger vorkommen, je dichter besiedelt die Bereiche sind, aber einige Todesfälle auch aus dünn besiedelten Bereichen gemeldet werden. In ländlichen Gebieten traten Todesfälle meist im Zusammenhang mit Aktivitäten auf, bei denen sich die Betroffenen nah an der Geländeoberfläche aufhielten (wie beim Schwimmen und beim Liegen auf dem Boden) oder bei denen sie sich sogar unter der Höhe des umgebenden Geländes befanden (beispielsweise in Bächen oder Gruben).

Neben möglichen direkten Wirkungen einer CO₂-Leckage auf Gesundheit und Wohlbefinden des Menschen sind auch indirekte Wirkungen auf Wohnumfeld- und Erholungsfunktionen denkbar. Diese könnten entstehen, wenn die CO₂-Freisetzung zu erheblichen Veränderungen von prägenden Vegetationsbeständen auf siedlungsnahen und innerörtlichen Freiflächen oder Flächen mit Bedeutung für die landschaftsgebundene Erholung führen, etwa das Absterben von Gehölzen verursachen (vgl. Kap. 3.2.3 „Freisetzung von CO₂ durch Leckage aus dem Speicher oder aus Über Tageanlagen“).

Freisetzung von Begleitstoffen durch Leckage aus dem Speicherkomplex oder aus Über Tageanlagen

Zur Wirkung von Begleitstoffen gibt es in der CCS-Literatur kaum Aussagen. Mögliche Begleitstoffe wie H₂S, SO₂, NO_x, H₂SO₃, H₂SO₄ und HNO₃ weisen aber jeweils eine höhere Toxizität als CO₂ auf. Sie könnten gemeinsam mit dem Kohlendioxid freigesetzt werden und mögliche Schadwirkungen auf den Menschen (siehe Kap. 3.1.4 „Freisetzung von Begleitstoffen durch Leckage aus dem Speicherkomplex oder aus Über Tageanlagen“) noch verstärken.

Schwefelwasserstoff (H₂S) beispielsweise ist zwar in extrem niedriger Konzentration förderlich, wird aber sehr schnell (bei mehr als 0,003 Vol.-%) toxisch für den Menschen und verursacht irreversible Gewebeschäden. Anders als CO₂ wird H₂S vom Menschen aber aufgrund des strengen Geruchs nach verfaulten Eiern bereits in Spuren (ppm) wahrgenommen. Diese Gefahren-Warnung durch den unangenehmen Geruch nimmt jedoch mit zunehmender Expositionszzeit aufgrund sinkender Sensibilität schnell ab.¹⁷⁹

¹⁷⁸ Roberts/Wood/Haszeldine (2011), S. 3.

¹⁷⁹ Roberts/Wood/Haszeldine (2011), S. 1.

Bei Untersuchungen natürlicher Analoga in der Laterna Caldera wurden reaktive Begleitstoffe wie CH₄ oder H₂S in Bereichen mit hohen CO₂-Flussraten im Kern der Austrittsstellen gefunden. In den randlichen Bereichen mit geringen Austrittsraten sanken die Konzentrationen dieser Begleitstoffe auf die Hintergrundwerte.¹⁸⁰ Annunzitallis et al.¹⁸¹ folgern daraus, dass auch bei Speichervorhaben bei einem eventuellen CO₂-Austritt wahrscheinlich andere Gase mit an die Oberfläche gelangen. Sie weisen aber auf die Bedeutung der Bodenhorizonte als Puffer gegen einen Transfer von reduzierten Gasen in die Atmosphäre hin. Die Effizienz dieser Pufferfunktion wird dabei sowohl von den Eigenschaften der Böden (wie Dicke der ungesättigten Zone, Mineralogie und Gasdurchlässigkeit) als auch von den Eigenschaften der Wege samkeiten (wie Fließraten, Gaszusammensetzung) abhängen.

Bei einer Freisetzung aus den Übertageanlagen oder einem Blowout ist davon auszugehen, dass im CO₂-Strom enthaltene Begleitstoffe auch in die Umwelt gelangen und gegebenenfalls die Gesundheit von Menschen gefährden können, sofern die Schutzabstände und -maßnahmen nicht ausreichen. Bei einer Leckage aus dem tiefen geologischen Speicher können einerseits zu den Begleitstoffen aus dem CO₂-Strom auch solche hinzukommen, die aus dem Speicher mobilisiert werden, und andererseits können Begleitstoffe durch die Bodenpassage abgefangen werden. Die bei einer Leckage aus dem geologischen Speicher durch Begleitstoffe entstehende Gefährdung für den Menschen lässt sich daher nicht prognostizieren, ist aber keinesfalls auszuschließen.

3.2.3 Pflanzen

Definition

Das Schutzwert „Pflanzen“ wird in den Begriffsbestimmungen des § 3 KSpG zwar unter Nr. 14 als Bestandteil des Begriffs „Umwelt“ aufgeführt. Das KSpG enthält jedoch keine eigenständige Begriffsbestimmung für das Schutzwert „Pflanzen“. Auch der weitere Wortlaut und die Gesetzes systematik des KSpG lassen keine Rückschlüsse auf das Verständnis von diesem Schutzwert zu. Daher ist auf allgemeine Definitionen und das Begriffsverständnis in anderen Gesetzen zurückzugreifen (siehe zur Übertragbarkeit des Begriffsverständnisses aus anderen Gesetzen bzw. Rechtsbereichen und zur weiteren Begründung die Ausführungen unter 3.2.1.).

Gemäß der Begriffsbestimmung in § 7 Abs. 2 Nr. 2 BNatSchG sind „Pflanzen“

- a. *wild lebende, durch künstliche Vermehrung gewonnene sowie tote Pflanzen wild lebender Arten,*
- b. *Samen, Früchte oder sonstige Entwicklungsformen von Pflanzen wild lebender Arten,*
- c. *ohne Weiteres erkennbare Teile von Pflanzen wild lebender Arten und*
- d. *ohne Weiteres erkennbar aus Pflanzen wild lebender Arten gewonnene Erzeugnisse;*

¹⁸⁰ Annuziatellis et al. (2004); Annuziatellis et al. (2007).

¹⁸¹ Annuziatellis et al. (2004).

als Pflanzen im Sinne dieses Gesetzes gelten auch Flechten und Pilze.“ Nach dem Begriffsverständnis des Immissionsschutz- und UVP-Rechts werden Pflanzen von diesem Schutzgut unabhängig von ihrer Art, ihrer Vegetationsphase, ihrer Verwendung und dem Grad ihres rechtlichen Schutzes (beispielsweise durch das Artenschutzrecht) erfasst.¹⁸²

Das Schutzgut spiegelt komplexe natürliche Verhältnisse wider und bildet durch die Vergesellschaftung verschiedener Pflanzenarten und ihre Lebensraumfunktion einen räumlichen Ausschnitt aus dem Ökosystem. In der Praxis der UVP werden diese räumlichen Ausschnitte überwiegend Biotope genannt. Für die Abgrenzung von Biotopen wird die Vegetation herangezogen und die fachliche Bewertung des Schutzgutes Pflanzen wird daher in der Praxis regelmäßig anhand von Biotoptypen durchgeführt. In der UVP stehen wild wachsende Pflanzenarten als Individuen und Populationen sowie in ihrem Vorkommen in Pflanzengesellschaften und Biotopen im Vordergrund der Betrachtung.¹⁸³ Daher werden im Folgenden unter dem Schutzgut Pflanzen sowohl einzelne Pflanzen als auch Pflanzengesellschaften und Biotope gefasst.¹⁸⁴

Bestandsuntersuchungen oder Bewertungen von Auswirkungen auf einzelne Artengruppen der einzelligen Pflanzen werden in einer UVP regelmäßig nicht durchgeführt, denn sie wären aufgrund des geringen Kenntnisstandes bzw. sehr aufwändiger Untersuchungsmethoden nicht praktikabel. Vor diesem Hintergrund beziehen sich auch die nachfolgenden Darstellungen zum Schutzgut Pflanzen auf die üblicherweise betrachteten Artengruppen, d.h. insbesondere nicht auf Einzeller.

Mögliche Auswirkungen bei bestimmungsgemäßem Betrieb

Nachfolgend werden die Wirkfaktoren betrachtet, die voraussichtlich beim bestimmungsgemäßen Betrieb Auswirkungen auf Pflanzen und Biotope haben können. Eine Betroffenheit ergibt sich überwiegend im terrestrischen Bereich, im marinen Bereich ist das Vorkommen von Pflanzen eingeschränkt (Seegräser und Makroalgen). Um Wiederholungen zu vermeiden erfolgt keine durchgehend getrennte Auswirkungsanalyse für den terrestrischen und marinen Bereich. Auf besondere Aspekte im marinen Bereich wird aber bei den entsprechenden Wirkfaktoren hingewiesen.

Flächeninanspruchnahme, Boden- bzw. Sedimentverluste

Die Flächeninanspruchnahme betrifft nur Pflanzen und Biotope in einem lokal begrenzten Bereich und ist in den Betriebsphasen Erkundung, Bau und Postinjektion nur temporär.

Durch die Vorgaben des BNatSchG wird gewährleistet, dass im Rahmen des Zulassungsverfahrens

¹⁸² Vgl. hierzu auch *Appold*, in: Hoppe/Beckmann (2012), § 2 UVPG Rn. 27; *Peters/Balla* (2006), § 2 UVPG Rn. 13; *Dietlein*, in: Landmann/Rohmer (2011), § 1 BImSchG Rn. 12; *Jarass* (2010), § 1 BImSchG Rn. 3.

¹⁸³ *Gassner/Winkelbrandt/Bernotat* (2010), S. 159f.

¹⁸⁴ Vgl. hierzu auch *Appold*, in: Hoppe/Beckmann (2012), § 2 UVPG Rn. 27; *Dietlein*, in: Landmann/Rohmer (2011), § 1 BImSchG Rn. 12.

- für alle in Anspruch genommenen Biotope ein adäquater Ausgleich entsprechend der Eingriffsregelung erfolgt (§ 13 BNatSchG);
- erhebliche Beeinträchtigungen der Natura-2000-Gebiete vermeiden werden oder zumindest die Sicherung des Zusammenhangs des Netzes "Natura 2000" erfolgt (§ 34 BNatSchG);
- besonders und streng geschützte Arten vor Zugriffen (Tötung, Beschädigung, Störung, Entnahme) geschützt sind (§ 44 Abs. 1 BNatSchG).

Im Sinne der Vermeidung sind nach Möglichkeit grundsätzlich nur Flächen mit eingeschränkter Bedeutung für Pflanzen in Anspruch zu nehmen (der Vermeidungsgrundsatz gilt auch außerhalb von Schutzgebieten). Für eine Inanspruchnahme geschützter Flächen bestehen in den meisten Fällen weniger konflikträchtige Alternativen. Sie darf i.d.R. ohne eine Befreiung oder Ausnahme nicht erfolgen. Somit ist davon auszugehen, dass die Injektionsbohrung(en) und die Übertageeinrichtungen insbesondere so angeordnet werden, dass keine Gebiete mit internationaler oder gesamtstaatlicher Bedeutung¹⁸⁵ für den Biotop- und Pflanzenartenschutz in Anspruch genommen werden, sondern vielmehr ein Abstand dazu eingehalten wird. Zu diesen Gebieten sind Natura-2000-Gebiete, Nationalparke (NP), Nationale Naturmonumente, Naturschutzgebiete (NSG) und Kernzonen von Biosphärenreservaten zu zählen.

Insgesamt lassen sich erhebliche Auswirkungen auf das Schutzgut Pflanzen durch diesen Wirkfaktor bei konsequenter Umsetzung entsprechender Optimierungs-, Vermeidungs- und Minimierungsmaßnahmen weitgehend einschränken. Verbleibende Beeinträchtigungen können in den meisten Fällen in den Zulassungsverfahren voraussichtlich bereits im Rahmen der Prüfung der materiellen Voraussetzungen kompensiert werden; spätestens im Rahmen der Abwägung wird über den Umgang mit verbleibenden Beeinträchtigungen und das Schicksal der beantragten Zulassung entschieden.

Erschütterungen

Der Wirkfaktor ist in der prognostizierten Intensität nicht geeignet, eine erhebliche Beeinträchtigung von Pflanzen und Biotopen hervorzurufen.

Akustische und optische Emissionen

Der Wirkfaktor ist generell nicht geeignet, Beeinträchtigungen von Pflanzen und Biotopen hervorzurufen.

Stoffliche Emissionen

¹⁸⁵ Gebiete mit internationaler oder gesamtstaatlicher Bedeutung erhalten nach der Bewertungsskala von Kaule die höchste Wertstufe für Belange des Artenschutzes (Jessel/Tobias (2002), S. 210). Sie sollten daher im Sinne der Vermeidung vorrangig geschützt werden.

Nach dem gegenwärtigen Kenntnisstand ist nicht zu erwarten, dass stoffliche Emissionen ein Ausmaß erreichen, das im terrestrischen Bereich zu erheblichen vorhabenbedingten Auswirkungen auf Pflanzen oder Biotope führt.

Im marinens Bereich ist neben den Emissionen durch Schiffsverkehr und sonstigem Maschinenbetrieb die Verbringung von evt. auch schadstoffhaltigem Bohrklein ins Meer möglich. Dies kann zu Sedimentüberdeckungen bzw. Veränderung der Sedimentzusammensetzung des Meeresbodens im Bereich der Bohrung führen. In flacheren Meeresbereichen könnten Seegräser oder Makroalgen durch die Schadstoffeinträge betroffen sein. Mögliche Belastungen durch die Verbringung von Bohrklein werden allenfalls sehr lokal begrenzt auftreten, da es schnell zur Durchmischung und Verdünnung kommt bzw. das eingebrachte Material auf den Grund absedimentiert.

Die Stoffeinträge durch betriebliche Abwässer, Oberflächenentwässerungen, Korrosionsschutzmaßnahmen und Inhaltstoffe der Bohrspülungen ins Meer können durch entsprechende Minimierungsmaßnahmen soweit reduziert werden, dass keine relevanten Beeinträchtigungen zu erwarten sind (vgl. Kap. 3.2.2 „Stoffliche Emissionen“).

Sedimentverwirbelungen

Sedimentverwirbelungen und damit verbundene Gewässertrübungen können sich in Flachwasserbereichen negativ auf das Pflanzenwachstum auswirken (Seegräser und Makroalgen), da der Lichteinfall beeinträchtigt wird. Durch die Kleinräumigkeit und Kurzfristigkeit dieser Auswirkungen werden jedoch keine erheblichen Beeinträchtigungen entstehen.

Geringe Veränderungen des Reliefs durch großflächige Landhebungen und -senkungen

Gerade bei diesem Wirkfaktor ist die Abgrenzung der zu erwartenden Auswirkungen im bestimmungsgemäßen Betrieb und möglicher Folgen eines nicht bestimmungsgemäßen Betriebszustands besonders schwierig. Die zu erwartenden Veränderungen des Reliefs hängen sehr von den Umständen des Einzelfalls und dem Charakter des betroffenen Untergrunds ab (Ausprägung und Zusammensetzung der Bodenschichten, Grundwasserverhältnisse usw.). Großmann et al.¹⁸⁶ beschreiben großflächige (z. B. 100 km² große), homogene Landhebungen im Zentimeter- bis Dezimeterbereich und erwarten nur geringe Auswirkungen auf die Grundwasserströmung und damit in Verbindung stehende Prozesse. Allerdings wird auch darauf hingewiesen, dass bei einem stark heterogenen Aufbau des geologischen Untergrundes oberflächennahe vertikale Relativbewegungen möglich sind. Die genauen Landhebungs- und Senkungsraten müssen standortspezifisch prognostiziert werden, um daraufhin Auswirkungen auf das Schutgzug Pflanzen ableiten zu können.

Generell kann es zu erheblichen Beeinträchtigungen des Schutgzutes kommen, wenn durch die Landhebung und -senkung die Standortbedingungen der Pflanzen verändert werden. Vor allem die Bodenwasserverhältnisse spielen hier eine große Rolle. Im schlimmsten Fall können sich die

¹⁸⁶ Großmann et al. (2011a), S. 31.

Wasserbewegungen im Untergrund und der Grundwasserflurabstand ändern. Dadurch kann es zu Veränderungen bei den vorkommenden Biotoptypen kommen. Auch wenn dieses Szenario für den bestimmungsgemäßen Betrieb eher unwahrscheinlich ist, kann die Auswirkungsprognose letztendlich nur auf Grundlage der Modellergebnisse im Rahmen des Zulassungsverfahrens für ein konkretes Speichervorhaben vorgenommen werden. Ggf. können unvermeidbare Beeinträchtigungen von Biotoptypen im Rahmen der Eingriffsregelung kompensiert werden. Falls artenschutzrechtliche Verbotstatbestände berührt werden, ist ggf. eine Ausnahme notwendig oder entsprechende artenschutzrechtliche Ausgleichsmaßnahmen sind durchzuführen.

Wie bereits in Kapitel 3.2.2 „Geringe Veränderungen des Reliefs durch großflächige Landhebungen und -senkungen“ erläutert, sind standort- und vorhabenspezifische Modellierungen und Gutachten erforderlich, um jeweils eine ortsspezifische Obergrenze der Landhebungen und -senkungen unter Berücksichtigung der Erfordernisse zum Schutz der verschiedenen Schutzgüter wie Kultur- und sonstige Sachgüter, Wasser und Vegetation zu ermitteln. Werden diese bei der Festlegung von Speichermengen und Einspeicherraten beachtet und in entsprechenden Nebenbestimmungen bei der Speicherzulassung geregelt, dann können für den bestimmungsgemäßen Betrieb erhebliche Auswirkungen auf die Vegetation durch den Wirkfaktor Veränderung des Reliefs weitgehend ausgeschlossen werden.

Mikrobeben durch erhöhte Seismizität

Mikrobeben haben eine so geringe Magnitude, dass sie zwar messbar aber für den Menschen nicht spürbar sind. Auch auf Beeinträchtigungen von Pflanzen durch Mikrobeben gibt es keine Hinweise. Erhebliche Auswirkungen auf das Schutzgut Pflanzen durch Mikrobeben sind daher nicht zu erwarten.

Mögliche Auswirkungen des nicht bestimmungsgemäßen Betriebs

Nachfolgend werden die Wirkfaktoren betrachtet, die beim nicht bestimmungsgemäßen Betrieb Auswirkungen auf Pflanzen haben können. Das Ausmaß der möglichen Auswirkungen hängt von der Art der Abweichung vom bestimmungsgemäßen Betrieb und der Intensität der damit verbundenen Wirkfaktoren ab.

Wie bereits in Kap. 3.2.2.2 beschrieben, ist das Schutzgut überwiegend im terrestrischen Bereich relevant. Mit Ausnahme in Bezug auf die Freisetzung von CO₂, für die sich milieubedingt deutliche Unterschiede hinsichtlich der Auswirkungen auf das Schutzgut ergeben, sind die Auswirkungen des nicht bestimmungsbemäßen Betriebs auf das Schutzgut Pflanzen im marinen Bereich nicht relevant oder im terrestrischen und marinen Bereich vergleichbar. Ein differenzierte Auswirkungsanalyse erfolgt daher nur für die Freisetzung von CO₂.

Größere Veränderung des Reliefs durch stärkere Landhebungen und -senkungen

Die Spanne der möglichen Auswirkungen wurde bereits in Kap. 3.2.3 „Geringe Veränderungen des Reliefs durch großflächige Landhebungen und -senkungen“ beschrieben, da bei dem Wirkfaktor Landhebung und -senkung ohne konkrete Prognose keine eindeutige Trennung zwischen Auswirkungen des bestimmungsgemäßen und des nicht bestimmungsgemäßen Betriebs möglich ist. Durch größere Landhebungen bzw. Landsenkungen über das

prognostizierte Maß hinaus, können je nach lokalem Relief die Grundwasserströmungen verändert werden oder auch der Wasserspiegel von Seen und das Verhalten von Fließgewässern beeinflusst werden¹⁸⁷. Dadurch können großräumige Veränderungen der Standortbedingungen für Pflanzen verursacht werden, was zu einer Verschiebung der Artengemeinschaften führen würde. Dieses Szenario würde zu erheblichen Beeinträchtigungen des Schutzgutes Pflanzen führen.

Größere Beben durch erhöhte Seismizität

Beeinträchtigungen von Pflanzen und Biotopen sind nur bei sehr starken Beben, die über der bisher beobachteten Größenordnung (Magnitude 4,5) liegen, denkbar. Sie entstünden als indirekte Beeinträchtigungen beispielsweise durch Flutwellen, Lawinen oder einstürzende Gebäude, durch die die Vegetation großflächig beeinträchtigt oder zerstört werden kann.

Aufstieg von salzigem Formationswasser

Wie in Kap. 3.1.4 „Aufstieg von salzigem Formationswasser“ erläutert, erfolgt die Verdrängung von Salzwasser in höhere Stockwerke schichtweise von unten nach oben. In oberflächennahes Grundwasser wird somit nicht das Tiefenwasser sondern salines Wasser aus dem direkt darunter liegenden salinen Aquifer eintreten¹⁸⁸. Wie stark eine mögliche Versalzung der Grundwasserschicht im Wurzelbereich der Pflanzen ist, hängt stark von den lokalen Gegebenheiten ab (z. B. in welcher Tiefe salines Grundwasser ansteht, ob ein trennender Grundwasserstauer vorhanden ist usw.). Im Extremfall können landwirtschaftliche Flächen und terrestrische Ökosysteme wie Oberflächengewässer, Auen u.a. versalzen, d. h. es entstehen Beeinträchtigungen von Pflanzen und Biotopen. Grundsätzlich kann es bei einer anhaltenden Versalzung des Grundwassers im Wurzelbereich der Pflanzen zum Absterben der Vegetation kommen. Es gibt speziell angepasste, salztolerante Pflanzenarten, die sich in kürzester Zeit an Stellen mit Salzaustritten ansiedeln (z. B. *Salicornia europaea*, *Glaux maritima*, *Suaeda maritima*). Diese Halophyten sind extreme Lichtpflanzen und entwickeln sich nur in offenem Gelände, wo sie nicht überschattet werden. Zugvögel sorgen wirksam für ihre Ausbreitung, so dass auch isoliert liegende Salzaustritte besiedelt werden¹⁸⁹. Nicht halophile Pflanzengesellschaften können beispielsweise nur kurzfristige Überflutungen mit Meerwasser überdauern, wie einen Deichbruch, nach dem der Boden in wenigen Monaten wieder aussüßt. Das relative Wurzelwachstum und die Keimungsrate von Mais sinken mit steigendem Salzgehalt und sind bei ca. 1,56% Salz im Bodenwasser fast bei Null¹⁹⁰. Eine Versalzung von Oberflächengewässern kann im schlimmsten Fall zum Absterben der an Süßwasserverhältnisse angepassten Wasserpflanzen führen.

¹⁸⁷ Chadwick et al. (2006), S. 68.

¹⁸⁸ Bauer/Schäfer (2011) Seite 15.

¹⁸⁹ Ellenberg (1996), S. 514.

¹⁹⁰ Ellenberg (1996), S. 522.

Die Spanne der möglichen Auswirkungen reicht von einer kleinräumigen, lokal begrenzten und ggf. auch nur temporären Veränderung der Vegetation mit Ansiedlung halophiler Pflanzenarten bis hin zu einem großflächigen Absterben von Vegetationsbeständen und der vollständigen Veränderung ganzer Ökosysteme, wie z. B. Süßwasserseen.

Freisetzung von CO₂ durch Leckage aus dem Speicher oder aus Über Tageanlagen

Auswirkungsanalyse im terrestrischen Bereich:

Pflanzen sind generell toleranter gegenüber CO₂ als Menschen oder Tiere. Ein geringfügiger, kurzfristiger Gasaustritt würde nur minimale Wirkungen haben. Moderate CO₂-Anstiege in der Luft verbessern sogar das Pflanzenwachstum. Pflanzen reagieren unterschiedlich auf erhöhte CO₂-Konzentration in der Umgebungsluft: „C3-Pflanzen reagieren mit einer proportionalen Erhöhung der Wachstumsrate, welche im Laufe der Zeit auf ein Niveau leicht oberhalb der Rate bei normaler Konzentration absinkt. C4- und CAM-Pflanzen zeigen ein komplexeres Verhalten und eine geringeres Ausmaß der Reaktion“¹⁹¹. Die Wachstumsraten und die Sporenbildung von Pilzen können bei stark erhöhten CO₂-Konzentrationen (im Bereich von 15-20 %) gehemmt werden. Bei einer Konzentration von 30 % war bei einem Experiment mit zwei Pilzarten kein Wachstum mehr messbar und eine Konzentration von 50 % unterband die Sporenbildung vollständig¹⁹².

Da sich CO₂ im Boden sammeln kann, könnten dauernde Leckagen die Wurzelatmung beeinträchtigen und zur Bodenversauerung führen. Dabei ist eine Schädigung der Vegetation vor allem bei langfristig erhöhten CO₂-Konzentrationen zu erwarten. Konzentrationen von 20-30 % CO₂ im Boden führten beispielsweise zum Absterben von Bäumen in Kalifornien (Mammoth Mountain, vulkanischer Gasaustritt seit mind. 1990)¹⁹³. Die jährliche Flussrate in der Mammoth Mountain-Region entspricht ungefähr einer Leckagerate von 0,2 %/a unter Annahme einer Speicherkapazität von 100 Mt CO₂. Dies entspräche einer im Reservoir verbleibenden CO₂ Masse von 13,5 % nach 1.000 Jahren. Bei Kohlendioxidspeichern werden Leckageraten von 0,01 %/a diskutiert, somit ist die Flussrate in der Mammoth Mountain-Region weitaus höher als die Leckagerate die hinsichtlich eines Kohlendioxidspeichers stellenweise in der Literatur genannt wird¹⁹⁴. Nach dem KSPG ist die Errichtung und der Betrieb eines Speichers bei einer Leckage-Rate von über 0% allerdings nicht zulassungsfähig (vgl. Kap. 5.1.2). Leckagen entsprechen einem nicht bestimmungsgemäßen Betriebszustand.

Durch Untersuchungen von natürlichen CO₂-Austritten können die Effekte auf Pflanzen dokumentiert werden. In Italien gibt es sehr viele natürliche CO₂-Quellen aufgrund vulkanischer Aktivität. Diese CO₂-Austritte werden seit Jahren im Rahmen von Forschungsprojekten untersucht. Zum besseren Verständnis der möglichen Auswirkungen eines

¹⁹¹ *Kronimus et al.* (2011), S. 144.

¹⁹² *Kronimus et al.* (2011), S. 142.

¹⁹³ *Benson* (2006), S.16f.

¹⁹⁴ *Kronimus et al.* (2011), S.114f.

Austritts von CO₂ aus einem geologischen Speicher in die Biosphäre wurden detaillierte geochemische und biologische Untersuchungen über zwei Vegetationsperioden an einer natürlichen Gasaustrittsstelle in der Laterna Caldera durchgeführt¹⁹⁵.

Die Ergebnisse der Bodenluft- und Gasflussuntersuchungen, der chemischen und biologischen Analysen von oberflächennahen Bodenproben (aus 0–20 cm Tiefe) und der botanischen Untersuchungen zeigen im ca. 6 m breiten Zentrum der Austrittsstelle signifikante Auswirkungen. Dort wurden CO₂-Fließraten von mehr als 2.000 – 3.000 g/m²d beobachtet. In diesem Zentrum gab es keine Vegetation (s. Abbildung 4), der pH-Wert war niedrig (im Minimum 3,5) und kleine Änderungen in der Mineralogie und Chemie wurden festgestellt. Außerdem wurden die mikrobiellen Populationen und Aktivitäten hier durch die nahezu anoxischen Bedingungen, die erhöhten CO₂-Konzentrationen (> 95 %) und die Spuren von reduzierten Gasen (CH₄, H₂S und H₂) bestimmt¹⁹⁶.

Ein ca. 20 m breiter Hof um den zentralen Kern der Austrittsöffnung bildet eine Übergangszone, in der die CO₂-Konzentration nach außen allmählich abnimmt. Reaktive Gase fehlen hier. In dieser Übergangszone ist die Vegetation von Gräsern dominiert. Erst ab einer Entfernung von ca. 13 m wurde Klee nachgewiesen und die Pflanzenartenvielfalt nahm zu. Auch die physiologischen Parameter (wie pH, Bodenchemie und Mineralogie) und das mikrobiologische System näherten sich in der Übergangszone nach außen hin an die Hintergrundwerte an. Die Ergebnisse der Studie legen den Schluss nahe, dass Zweikeimblättrige Pflanzen (wie z.B. Klee) weniger tolerant gegenüber erhöhten CO₂-Konzentrationen im Boden sind als Einkeimblättrige (z.B. Süßgräser)¹⁹⁷.

¹⁹⁵ Beaubien et al. (2008).

¹⁹⁶ Beaubien et al. (2008), S. 11.

¹⁹⁷ Beaubien et al. (2008), S. 10.



Abbildung 4: Untersuchung entlang eines Transektes in der Laterna Caldera¹⁹⁸

Die Untersuchungen in der Laterna Caldera zeigen, dass sich bei einer Austrittsmenge von 220 kg CO₂/d die messbaren Umweltauswirkungen auf eine Fläche von 250 m² beschränkten, wobei hoch signifikante Einflüsse nur im Kernbereich von 28 m² Größe auftraten (s. Abbildung 4). In den Randbereichen fand bei den auftretenden Pflanzen eine Artenverschiebung statt.¹⁹⁹

In einem Feldexperiment der Universität Nottingham (Großbritannien) wurden 16 quadratische Parzellen unterschiedlich bepflanzt und zum Teil mit CO₂ begast. In den begasten Parzellen konnte eine Verdrängung des Sauerstoffs festgestellt werden. Eine Konzentration von 50 % CO₂ im Bodengas bewirkte die Reduzierung der Sauerstoffkonzentration auf die Hälfte. Außerdem wurde eine signifikante Erniedrigung des pH-Wertes festgestellt. Als Auswirkungen der Begasung auf die Pflanzen wurde eine deutlich geringere Keimung der ausgesäten Winterbohnensamen sowie eine erhebliche Einschränkung der Wachstumsraten der Gräser

¹⁹⁸ Beaubien et al. (2008), S. 18.

¹⁹⁹ Beaubien et al. (2008).

festgestellt²⁰⁰. Hinsichtlich der Artenzusammensetzung wurde wie bei den Untersuchungen in der Laterna Caldera festgestellt, dass Gräser toleranter gegenüber erhöhten CO₂-Konzentrationen im Boden sind als zweikeimblättrige Arten.

Die verschiedenen Untersuchungen haben gezeigt, dass verschiedene Pflanzenarten unterschiedliche CO₂-Toleranzen besitzen. Daher können als Folge von chronischen CO₂-Einwirkungen Verschiebungen der Pflanzengesellschaften hin zu toleranteren Arten auftreten. Konzentrationen von 20-30 % CO₂ im Bodengas (wie sie in Mammoth Mountain gemessen wurden) werden als kritische Schwelle für Pflanzen angesehen, da die Wurzelatmung gehemmt wird. Normale CO₂-Gehalte liegen im Bodengas zwischen ca. 0,4 und 4 %. Durch die CO₂-bedingte Bodenversauerung kann es beim Absinken der pH-Werte auf unter 4,5 zur Freisetzung von Aluminium-Ionen (Al³⁺) kommen, die toxisch auf Pflanzen wirken²⁰¹.

Bisher sind keine Auswirkungen von laufenden Kohlendioxidspeicherprojekten auf terrestrische Ökosysteme bekannt. Auch hinsichtlich EOR-Projekten gibt es keine Hinweise auf Auswirkungen; systematische Studien wurden jedoch bislang nicht durchgeführt²⁰².

Die Auswirkungen einer Freisetzung von Kohlendioxid auf das Schutzgut Pflanzen können im terrestrischen Bereich sehr vielfältig sein und hängen stark von den lokalen Gegebenheiten sowie der Art und Menge des CO₂-Austritts ab. Durch die erhöhten CO₂-Konzentrationen im Boden werden die Standortbedingungen für die Vegetation verändert. Dadurch kommt es zu Veränderungen in der Pflanzenartenzusammensetzung und im schlimmsten Fall zum flächigen Absterben von Vegetation. Je nach der Größe und Wertigkeit der betroffenen Fläche stellt dies eine erhebliche Beeinträchtigung des Schutzgutes dar.

Auswirkungsanalyse im marinen Bereich:

Da entsprechend der Definition nur mehrzellige Pflanzen unter dem Schutzgut zu fassen sind (s. Kap. 3.2.3 „Definition“), erfolgt für den marinen Bereich eine Betrachtung der möglichen Auswirkungen auf Seegräser und Makroalgen, die in flacheren Meeresbereichen vorkommen können. Auswirkungen auf Phytoplankton werden an dieser Stelle nicht betrachtet, finden sich aber beim Schutzgut Biologische Vielfalt (s. Kap. 3.2.5 „Freisetzung von CO₂ durch Leckage aus dem Speicher oder aus Übertragungsanlagen“).

Das CO₂ im Meerwasser kann grundsätzlich das Wachstum der Pflanzen befördern, wodurch es zu Verschiebungen der Artengesellschaften kommen kann. Es sind aber auch direkte toxische Wirkungen möglich und lang anhaltende Kohlendioxidströme können zur lokalen Versauerung der Meere beitragen, was zu Beeinträchtigungen des gesamten Ökosystems führen kann. Beispielsweise ist die chemische Form und biologische Verfügbarkeit

²⁰⁰ Patil/Colls/Steven (2010); Kronimus, S. 144-146.

²⁰¹ Kronimus et al. (2011), S. 114f, 146.

²⁰² Kronimus et al. (2011), S.114f.

verschiedener Nährstoffe stark pH-abhängig (z. B. Ammoniak und Phosphat), daher kann sich die Versauerung auf die Nährstoffverfügbarkeit auswirken²⁰³.

Grundsätzlich kann im marinen Bereich von einem Verdünnungseffekt ausgegangen werden, wenn eine ausreichende Durchmischung des Wassers gegeben ist. Stark erhöhte CO₂-Konzentrationen und Versauerungseffekte sind daher in erster Linie lokal begrenzt zu erwarten. Hinzu kommt, dass in tieferen Meeresbereichen keine relevanten Vorkommen des Schutzbutes Pflanzen vorhanden sind. Da jedoch keine Angaben zum genauen Ausmaß eines CO₂-Austritts vorliegen, können erhebliche Beeinträchtigungen nicht völlig ausgeschlossen werden. Schlimmstenfalls kann es zur großflächigen Zerstörung von Seegras- und/oder Algenbeständen kommen.

Freisetzung von Begleitstoffen durch Leckage aus dem Speicher oder aus Über Tageanlagen

Mögliche Begleitstoffe wie H₂S, SO₂, NO_x, H₂SO₃, H₂SO₄ und HNO₃ weisen jeweils eine höhere Toxizität als CO₂ auf. Sie könnten gemeinsam mit dem Kohlendioxid freigesetzt werden und mögliche Schadwirkungen auf das Schutzbute Pflanzen noch verstärken. Beispielsweise können direkte Schädigungen durch SO₂ die Bildung von Nekrosen hervorrufen. Auch der versauernde Effekt ist bei einigen Begleitstoffen wesentlich höher als bei CO₂ (z.B. NO_x, SO_x). Dadurch kann es zur verstärkten Freisetzung von Schwermetallen kommen, die Wachstumsbeeinträchtigungen, sichtbare Blattschäden oder ein Absterben von Pflanzen verursachen können.

Insgesamt ist zu berücksichtigen, dass die toxischen Beimengungen im CO₂-Strom nur in geringen Konzentrationen zu erwarten sind. Bedenkliche Konzentrationen der Begleitstoffe und damit ggf. erhebliche Beeinträchtigungen des Schutzbutes Pflanzen, sind nur bei sehr großen CO₂-Austritten zu erwarten²⁰⁴.

3.2.4 Tiere

Definition

Das Schutzbute „Tiere“ wird in den Begriffsbestimmungen des § 3 KSpG zwar unter Nr. 14 als Bestandteil des Begriffs „Umwelt“ aufgeführt. Das KSpG enthält jedoch keine eigenständige Begriffsbestimmung für das Schutzbute „Tiere“. Auch der weitere Wortlaut und die Gesetzesystematik des KSpG lassen keine Rückschlüsse auf das Verständnis von diesem Schutzbute zu. Daher ist auf allgemeine Definitionen und das Begriffsverständnis in anderen Gesetzen zurückzugreifen (siehe zur Übertragbarkeit des Begriffsverständnisses aus anderen Gesetzen bzw. Rechtsbereichen und zur weiteren Begründung die Ausführungen unter 3.2.1.).

Gemäß der Begriffsbestimmung in § 7 Abs. 2 Nr. 1 BNatSchG sind „Tiere“

- a. wild lebende, gefangene oder gezüchtete und nicht herrenlos gewordene sowie tote Tiere wild lebender Arten,*
-

²⁰³ Kronimus et al. (2011), S. 115; Umweltbundesamt (2008), S. 78.

²⁰⁴ Kronimus et al. (2011), S. 53 und 222.

- b. *Eier, auch im leeren Zustand, sowie Larven, Puppen und sonstige Entwicklungsformen von Tieren wild lebender Arten,*
- c. *ohne Weiteres erkennbare Teile von Tieren wild lebender Arten und*
- d. *ohne Weiteres erkennbar aus Tieren wild lebender Arten gewonnene Erzeugnisse“.*

Nach dem Begriffsverständnis des Immissionsschutz- und UVP-Rechts sind vom Schutzgut „Tiere“ neben wildlebenden Tiere auch Haus- und Nutztiere unabhängig von ihrer Art, ihrem Entwicklungsgrad und dem Grad ihres rechtlichen Schutzes (beispielsweise durch das Artenschutzrecht) umfasst.²⁰⁵

Im Rahmen von Umweltverträglichkeitsprüfungen wird die Tierwelt in ihren Arten, in ihren Gemeinschaften und in ihren Lebensräumen erfasst. Dabei wird in der Praxis ein repräsentatives und entscheidungserhebliches Artenspektrum erfasst und bewertet. Zur Auswahl der zu untersuchenden Arten werden u. a. die Artenlisten der FFH-Richtlinie²⁰⁶ oder die Roten Listen herangezogen.²⁰⁷ Bestandsuntersuchungen oder Bewertungen von Auswirkungen auf einzelne Artengruppen der einzelligen Tiere und Pflanzen werden regelmäßig nicht durchgeführt und sind aufgrund des geringen Kenntnisstandes bzw. sehr aufwändiger Untersuchungsmethoden nicht praktikabel. Daher beziehen sich die nachfolgenden Darstellungen mit Bezug zum Schutzgut Tiere auf die üblicherweise betrachteten Artengruppen, d.h. insbesondere nicht auf Einzeller.

Mögliche Auswirkungen bei bestimmungsgemäßem Betrieb

Nachfolgend werden die Wirkfaktoren betrachtet, die voraussichtlich beim bestimmungsgemäßen Betrieb Auswirkungen auf das Schutzgut Tiere haben können. Tiere können sowohl im terrestrischen als auch im marinen Bereich durch die Auswirkungen betroffen sein. Die Art der Wirkungen des Vorhabens ist aber für die meisten Wirkfaktoren im terrestrischen und marinen Bereich vergleichbar, so dass keine getrennte Auswirkungsanalyse erforderlich ist. Auf Besonderheiten im marinen Bereich wird an den entsprechenden Stellen hingewiesen.

Flächeninanspruchnahme, Boden- bzw. Sedimentverluste

Die Flächeninanspruchnahme betrifft nur Tiere und ihre Habitate in einem lokal begrenzten Bereich und ist in den meisten Fällen nur temporär

Durch die Vorgaben des BNatSchG wird gewährleistet, dass im Rahmen des Zulassungsverfahrens

²⁰⁵ Appold, in: Hoppe/Beckmann (2012), § 2 UVPG Rn. 27; Peters/Balla (2006), § 2 UVPG Rn. 13; Dietlein, in: Landmann/Rohmer (2011), § 1 BImSchG Rn. 12; Jarass (2010), § 1 BImSchG Rn. 3.

²⁰⁶ Richtlinie 92/43 EWG des Rates vom 21. Mai 1992 zur Erhaltung der natürlichen Lebensräume sowie der wildlebenden Tiere und Pflanzen, ABl. Nr. L 206 vom 22.07.1992 S. 7.

²⁰⁷ Gassner/Winkelbrandt/Bernotat (2010), S. 177ff.

- für alle in Anspruch genommenen Biotope ein adäquater Ausgleich entsprechend der Eingriffsregelung erfolgt (§ 13 BNatSchG);
- erhebliche Beeinträchtigungen der Natura-2000-Gebiete vermieden werden oder zumindest die Sicherung der Kohärenz des Netzes "Natura 2000" erfolgt (§ 34 BNatSchG);
- besonders und streng geschützte Arten vor Zugriffen (Tötung, Beschädigung, Störung, Entnahme) grundsätzlich²⁰⁸ geschützt sind (§ 44 Abs. 1 BNatSchG).

Konflikte durch die Flächeninanspruchnahmen in den verschiedenen Betriebsphasen können somit weitgehend vermieden werden bzw. sind im Rahmen des Zulassungsverfahrens lösbar.

Im Sinne der Vermeidung sind nach Möglichkeit grundsätzlich nur Flächen mit eingeschränkter Bedeutung für Tiere in Anspruch zu nehmen (der Vermeidungsgrundsatz gilt auch außerhalb von Schutzgebieten). Vermeidbare Beeinträchtigungen sind zu unterlassen, ggf. sind weniger konfliktträchtige Alternativen zu suchen. Somit ist von auszugehen, dass die Injektionsbohrung(en) und die Übertageeinrichtungen insbesondere so angeordnet werden, dass keine Gebiete mit internationaler oder gesamtstaatlicher Bedeutung für den Tierartenschutz in Anspruch genommen werden, sondern vielmehr ein Abstand dazu eingehalten wird. Zu diesen Gebieten sind Natura-2000-Gebiete, Nationalparke (NP), Naturschutzgebiete (NSG) und Kernzonen von Biosphärenreservaten zu zählen. .

Insgesamt lassen sich erhebliche Auswirkungen auf das Schutzgut Tiere durch Flächeninanspruchnahmen bei konsequenter Umsetzung entsprechender Optimierungs-, Vermeidungs- und Minimierungsmaßnahmen weitgehend minimieren. Verbleibende Beeinträchtigungen können in den meisten Fällen in den Zulassungsverfahren voraussichtlich bereits im Rahmen der Prüfung der materiellen Voraussetzungen kompensiert werden; spätestens im Rahmen der Abwägung wird über den Umgang mit verbleibenden Beeinträchtigungen und das Schicksal der beantragten Zulassung entschieden.

Erschütterungen

Durch die Erschütterungen kann es zu Störwirkungen auf Tiere kommen, die sich beispielsweise durch Fluchtreaktionen äußern können. Es ist allerdings davon auszugehen, dass sich diese Effekte stark mit Vertreibungswirkungen überlagern, die ohnehin vom Bau und Betrieb der Übertage-Einrichtungen ausgehen. Darüber hinaus werden die Erschütterungen jeweils zeitlich befristet auftreten und können im Rahmen der Zulassungsverfahren zeitlich optimiert und minimiert werden.

Bei Erschütterungen, die beispielsweise durch Landseismiken im Rahmen des Monitorings ausgelöst werden, können vorübergehende Störungen auch von seltenen oder gefährdeten Tierarten nicht gänzlich ausgeschlossen werden, da das zu untersuchende Gebiet unter Umständen sehr groß ist. Diese Störungen sind allerdings nur temporär und werden nur zu kurzfristigen und vorwiegend unerheblichen Beeinträchtigungen führen. Bei den temporären

²⁰⁸ Siehe einschränkend hierzu die Ausnahmemöglichkeiten des § 45 BNatSchG.

Erschütterungen kann als Vermeidungsmaßnahme der zeitliche Ablauf in den meisten Fällen so gesteuert werden, dass besonders sensible Zeiten der betroffenen Arten (z. B. Brut- oder Wanderungszeit) störungsfrei bleiben.

Insgesamt sind bei der Durchführung der Vermeidungs- und Minimierungsmaßnahmen keine erheblichen Beeinträchtigungen durch den Wirkfaktor zu erwarten.

Akustische und optische Emissionen

Grundsätzlich können durch akustische und optische Emissionen Störungen und Vertreibungen von Tieren auftreten. Der Lärm kann darüber hinaus zur Maskierung von akustischen Signalen einiger Tierarten führen. Bei Umsetzung der bezüglich der Flächeninanspruchnahme formulierten Vermeidungsmaßnahmen, lassen sich erhebliche Beeinträchtigungen beim Bau und Betrieb der Übertakeeinrichtung vermeiden. Besonders wichtig ist der ausreichende Abstand zu Schutzgebieten oder Vorkommen gefährdeter Tierarten, der auch die unterschiedlichen Empfindlichkeiten der Tierarten gegenüber Lärm und optischen Beunruhigungen berücksichtigt. Hinweise für solche Mindestabstände finden sich beispielsweise in der „Arbeitshilfe Vögel und Straßenverkehr“²⁰⁹. Neben artspezifischen Störradien werden auch kritische Schallpegel benannt, die bei vielen Vogelarten zu Maskierungseffekten führen können. Ggf. ist als Vermeidungsmaßnahme auch hier die Einhaltung bestimmter Zeitfenster bei lärmintensiven aber temporären Arbeiten zu prüfen. Im terrestrischen Bereich sind zusätzlich Lärm- oder Sichtschutzmaßnahmen möglich, um erhebliche Auswirkungen zu vermeiden.

Bei Speicherprojekten im marinen Bereich ist durch die notwendigen Seismiken mit z. T. erheblichem Unterwasserschall zu rechnen. Marine Säuger sind hoch empfindlich gegenüber Unterwasserschall. Als Auswirkung von Unterwasserlärm werden bei marinen Säugern artspezifische physiologische (Taucherkrankheit, Gewebeschädigung) und auditive Beeinträchtigungen (temporäre und permanente Hörschwellenverschiebungen), Maskierung und Verhaltensänderungen/-störungen diskutiert. Des Weiteren wird davon ausgegangen, dass durch Unterwasserlärm Stress mit ähnlichen Folgeerscheinungen wie bei terrestrischen Säugern hervorgerufen werden kann²¹⁰. Hinzu kommen indirekte Auswirkungen wie eine Abnahme der Habitatqualität oder der Anzahl der Beutetiere. Obwohl noch weiterer Forschungsbedarf hinsichtlich der Grenzen des zumutbaren Lärms für marine Säuger besteht ist es allgemeiner Konsens, dass Schallpegel unter 160 dB re 1 µPa keine physischen Schäden

²⁰⁹ Garniel/ Mierwald (2010).

²¹⁰ Richardson et al. (1995).

verursachen.²¹¹ Schallpegel über 180 dB re 1 µPa (bei Seehunden 190 dB re 1 µPa) gelten als Schwelle, ab der Hörschäden nicht ausgeschlossen werden können²¹².

Die Auswirkungen von Unterwasserlärm auf Fische sind bislang noch weniger gut untersucht als die Auswirkungen auf marine Säuger. Die Empfindlichkeit ist artspezifisch und abhängig von der Fähigkeit der verschiedenen Arten den Lärm wahrzunehmen. Fische können Töne über das Seitenlinienorgan wahrnehmen, das überwiegend Bewegungen im Wasser ganz in der Nähe registriert, und über das Innenohr, das Partikelbewegungen im Wasser wahrnimmt. Fische ohne Schwimm-blase, wie Plattfische, Seeskorpione, Stichlinge und Grundeln, können nur niederfrequente Töne bis zu 300 Hz registrieren, während Fische mit Schwimmblase, wie Dorsche, Schallwellen in Frequenzbereichen bis zu 1.000 Hz registrieren können. Heringe haben ein besonders gutes Gehör und können Töne mit Frequenzen bis zu 3.000 Hz wahrnehmen.²¹³ Dorsche und Heringe haben eine verhältnismäßig niedrige Hörschwelle und sind daher empfindlicher als andere Fischarten. Sehr hohe Pegel an Lärm und Vibrationen können zu Hörschäden oder zum Tod führen. Folgende Schwellenwerte werden in der Literatur angegeben:²¹⁴

Fischgruppe	Schwellenwert bei dem eine Reaktion möglich ist [dB]	50% Meidungsreaktionen [dB] (Nedwell 2007)	100% Meidungsreaktion [dB] (Nedwell 2007)
Gadiden/Clupeiden	75	>145	>165
Andere	90	>160	>180

Da es sich bei dem Schweinswal um eine streng geschützte und in Anhang IV der FFH-Richtlinie gelistete Art handelt, ist eine Beeinträchtigung in jedem Fall zu vermeiden. Die konkreten Auswirkungen hängen allerdings von den Details des Vorhabens (Pegel, Frequenz und Dauer des Unterwasserschalls) und der Bedeutung des betroffenen Gebietes ab. Generell ist es im marinen Bereich schwierig beim Vorliegen von erheblichen Beeinträchtigungen adäquate Ausgleichsmaßnahmen durchzuführen. Daher können unvermeidbare erhebliche Beeinträchtigungen von möglicherweise streng geschützten oder gefährdeten Arten ein Zulassungshindernis darstellen.

Stoffliche Emissionen

²¹¹ * Das deutsche Umweltbundesamt schlägt z. B. für das Einrammen von Pfählen auf hoher See einen Schwellenwert von 160 dBSEL bzw. 190°dBpeak in einem Abstand von 750 m zur Quelle vor, um Störungen und Verletzungsgefahren für alle Meeressäugetierarten zu vermeiden. Der Wert dient zur Regulierung der Unterwasserlärmemissionen durch Einrammen von Pfählen auf hoher See. Gemäß den Anforderungen der deutschen Behörden wird der Schwellenwert als Bewertungskriterium verwendet. Lärmpegel oberhalb des Wertes lassen sehr hohe Beeinträchtigungen erwarten.

²¹² National Research Council 2003 in Tougaard *et al.* (2006).

²¹³ Thomsen *et al.* (2006), Suga *et al.* (2005), Belanger *et al.* (2004), Klastrup *et al.* (2007).

²¹⁴ Nedwell (2007).

Nach dem gegenwärtigen Kenntnisstand ist nicht zu erwarten, dass stoffliche Emissionen ein Ausmaß erreichen, das im terrestrischen Bereich zu erheblichen vorhabenbedingten Auswirkungen auf Tiere oder Habitate führt.

Im marinen Bereich ist neben den Emissionen durch Schiffsverkehr und sonstigem Maschinenbetrieb die Verbringung von evtl. auch schadstoffhaltigem Bohrklein ins Meer möglich. Dies kann zu Sedimentüberdeckungen bzw. Veränderung der Sedimentzusammensetzung des Meeresbodens im Bereich der Bohrung führen. Hierdurch kann es zu lokalen und eher kleinräumigen Lebensraumverlusten des Zoobenthos kommen. Dies wird keine großräumigen Auswirkungen auf marine Tierarten haben. Mögliche negative Effekte sind allenfalls sehr lokal begrenzt.

Die Stoffeinträge durch betriebliche Abwässer, Oberflächenentwässerungen, Korrosionsschutzmaßnahmen und Inhaltstoffe der Bohrspülungen ins Meer können durch entsprechende Minimierungsmaßnahmen soweit reduziert werden, dass keine relevanten Beeinträchtigungen zu erwarten sind (vgl. Kap. 3.2.2 „Stoffliche Emissionen“).

Sedimentverwirbelungen

Sedimentverwirbelungen und damit einhergehende erhöhte Schwebstoffgehalte können z.B. bei Fischen zu mechanischen Verletzungen und zu einem Verkleben der Kiemen infolge einer erhöhten Schleimproduktion führen. Die temporäre Lebensraumbeeinträchtigung wird allerdings nur einzelne Individuen betreffen für die Ausweichmöglichkeiten auf den angrenzenden Flächen bestehen. Aufgrund der lokalen Begrenzung und der zeitlichen Befristung der Auswirkung ist insgesamt nicht von einer erheblichen Beeinträchtigung auszugehen.

Geringe Veränderung des Reliefs durch großflächige Landhebungen und -senkungen

Geringe, langsam und großflächig gleichmäßig verlaufende Landhebungen und nachfolgende entsprechende Landsenkungen führen nicht zu direkten Auswirkungen auf das Schutzgut Tiere. Sie sind nicht geeignet das Leben oder die Gesundheit von Tieren zu beeinträchtigen. In Kap. 3.2.3 „Geringe Veränderungen des Reliefs durch großflächige Landhebungen und -senkungen“ wurde dargestellt, dass die Wirkungen möglicher Landhebungs- und Senkungsraten stark vom jeweiligen Einzelfall abhängen und erst im Rahmen des Zulassungsverfahrens prognostiziert werden können. Falls es langfristig zu Veränderungen der Standortbedingungen und damit zu Veränderungen der Lebensräume von Tieren kommen sollte, sind auch erhebliche Beeinträchtigungen von Tieren nicht ausgeschlossen. Ggf. muss ein Ausgleich im Rahmen der Eingriffsregelung erfolgen.

Wenn unter Vermeidungsgesichtspunkten standort- und vorhabenspezifische Modellierungen und Gutachten genutzt werden, um eine spezifische Obergrenze der Landhebungen und -senkungen unter Berücksichtigung der Erfordernisse zum Schutz der Vegetation festzulegen, lassen sich für den bestimmungsgemäßen Betrieb Auswirkungen auf das Schutzgut Tiere ausschließen.

Mikrobeben durch erhöhte Seismizität

Mikrobeben haben eine so geringe Magnitude, dass sie für den Menschen nicht spürbar sind. Zwar reagieren Tiere wesentlich empfindlicher auf bevorstehende Beben und es ist nicht ausgeschlossen, dass selbst Mikrobeben von ihnen wahrgenommen werden. Eine Gefährdung der Gesundheit oder des Lebens von Tieren durch Mikrobeben bzw. Veränderungen von Populationen können aber ausgeschlossen werden. Erhebliche Auswirkungen auf das Schutzgut Tiere durch Mikrobeben sind also nicht zu erwarten.

Mögliche Auswirkungen des nicht bestimmungsgemäßen Betriebs

Nachfolgend werden die Wirkfaktoren betrachtet, die beim nicht bestimmungsgemäßen Betrieb Auswirkungen auf das Schutzgut Tiere haben können. Das Ausmaß der möglichen Auswirkungen hängt von der Art der Abweichung vom bestimmungsgemäßen Betrieb und der Intensität der damit verbundenen Wirkfaktoren ab.

Tiere können sowohl im terrestrischen als auch im marinen Bereich durch die Auswirkungen betroffen sein. Die Art der Wirkungen des Vorhabens ist aber für die meisten Wirkfaktoren im terrestrischen und marinen Bereich vergleichbar, so dass keine getrennte Auswirkungsanalyse erforderlich ist. Eine getrennte Auswirkungsanalyse für den terrestrischen und marinen Bereich erfolgt für die Freisetzung von CO₂, für die sich milieubedingt deutliche Unterschiede hinsichtlich der Auswirkungen ergeben.

Größere Veränderung des Reliefs durch stärkere Landhebungen und -senkungen

Der Prozess einer Landhebung bzw. -senkung läuft relativ langsam ab, so dass hierdurch keine direkten Gefährdungen für das Leben oder die Gesundheit von Tieren entstehen. Durch größere Landhebungen bzw. Landsenkungen über das prognostizierte Maß hinaus, können allerdings je nach lokalem Relief die Grundwasserströmungen verändert werden oder auch der Wasserspiegel von Seen und das Verhalten von Fließgewässern beeinflusst werden²¹⁵. Durch solche Veränderungen der Standortbedingungen werden Veränderungen der Vegetationszusammensetzung und damit der Habitate von Tieren ausgelöst. Für Arten, die auf ihr lokales Habitat angewiesen und nicht mobil sind, kann der Verlust des angestammten Lebensraums eine erhebliche Gefährdung darstellen. Der Umfang der zu erwartenden Beeinträchtigungen hängt stark von Art und Größe der betroffenen Habitate, ihrer Bedeutung für die Arten sowie den ausgelösten Veränderungen ab. Bei stark isolierten Populationen kann im schlimmsten Fall ein Aussterben der lokalen Population nicht ausgeschlossen werden. Dieses Szenario würde zu erheblichen Beeinträchtigungen des Schutzwertes Tiere führen.

Größere Beben durch erhöhte Seismizität

Es gibt viele Berichte über die Beobachtung von Reaktionen verschiedener Tierarten im Vorfeld eines Erdbebens. Dabei werden aggressives Verhalten, Fluchtreaktionen oder verstärkte Nervosität beschrieben. Kleine Tiere und aquatische Lebewesen reagieren nach verschiedenen Beobachtungen besonders empfindlich. Eine Hypothese für den Auslöser der Reaktionen sind elektrisch aufgeladene Teilchen in der Luft. Wissenschaftlich nachgewiesene Erkenntnisse zu

²¹⁵ Chadwick et al. (2006), S. 68.

Effekten vor einem Erdbeben gibt es aber nicht, die Berichte basieren auf zufälligen Beobachtungen.²¹⁶

Aber auch wenn im Vorfeld eines Erdbebens oder durch das Beben selbst gewisse kurzfristige Reaktionen bei Tieren ausgelöst werden, sind bei Beben in einer Stärke, wie sie bisher aufgetreten sind (Magnitude bis 4,5) keine erheblichen Beeinträchtigungen zu erwarten.

Beeinträchtigungen von Tieren sind nur bei sehr starken Beben, die über der bisher beobachteten Größenordnung liegen, denkbar. Sie entstünden als indirekte Beeinträchtigungen beispielsweise durch Flutwellen, Lawinen oder einstürzende Gebäude, durch die die Vegetation großflächig beeinträchtigt oder zerstört werden kann und die eine Gefährdungen der Gesundheit und des Lebens und damit mit erhebliche Beeinträchtigungen von Tieren zur Folge haben können. .

Aufstieg von salzigem Formationswasser

Aus tieferen Schichten aufsteigendes Formationswasser kann zu einem Aufstieg von Salzwasser in höhere Stockwerke und im schlimmsten Fall bis an die Oberfläche führen. Dadurch können terrestrische Ökosysteme wie Oberflächengewässer, Auen u.a. versalzen. In der Folge sind Beeinträchtigungen von Tieren nicht ausgeschlossen. Eine Veränderung der Vegetation stellt immer auch eine Beeinträchtigung für die dort angesiedelten Tierarten dar. Insbesondere sind stenotope und nicht mobile Arten durch Habitatverluste gefährdet. Bei nur kleinräumigen Veränderungen kann von einem Abwandern der Arten ausgegangen werden, so weit im erreichbaren Umfeld genügend Ausweichräume vorhanden sind.

Direkte Auswirkungen durch den Aufstieg von Salzwasser sind auf limnische Arten denkbar. Eine Versalzung von Seen kann beispielsweise zum Absterben der an Süßwasserverhältnisse angepassten Arten führen.

Die Spanne der möglichen Auswirkungen reicht von einer kleinräumigen, lokal begrenzten und ggf. auch nur temporären Veränderung der Vegetation, die ggf. zur Abwanderung einiger Tierarten führt, bis hin zu großflächigen Veränderungen ganzer Ökosysteme, wie z. B. Süßwasserseen.

Freisetzung von CO₂ durch Leckage aus dem Speicher oder aus Über Tageanlagen

Auswirkungsanalyse im terrestrischen Bereich:

Wichtige Standortfaktoren für Tiere sind u.a. Sauerstoff- und CO₂-Konzentration in der Luft. Eine Veränderung dieser Faktoren führt zu biologischem Stress, die Toleranz kann aber durchaus von Art zu Art unterschiedlich sein. Insekten zeigen eine deutlich höhere CO₂-Toleranz als Wirbeltiere. Eine Standardkonzentration von 40 % CO₂ wird angewandt, um Nahrungsmittel vor Insekten zu schützen. Bei dieser Konzentration werden Insekten entweder unschädlich oder sie sterben ab. Nach Kronimus et al. sind Reptilien möglicherweise resistenter gegenüber CO₂ als Säugetiere. Schildkröten können einen pH-Wert im Gehirn bis zu 6,4

²¹⁶ Bressan (2011); Gartner (2003).

tolerieren, was auf eine hohe CO₂-Resistenz hinweist²¹⁷. Unter den Wirbeltieren zeigen Bodenbewohner die höchste Toleranz gegenüber CO₂, da im Bodengas und somit in ihren Bauten häufig erhöhte CO₂-Konzentrationen vorkommen (ca. 2 % - 9 %). Bei Untersuchungen mit bodenbewohnenden Invertebraten wurden Verhaltensänderungen bei CO₂-Konzentrationen zwischen 2 % und 39 % im Bodengas festgestellt. Die Hälfte der Spezies zeigten Lähmungserscheinungen bei einer Konzentration von 30 %, der Rest, bis auf eine Spezies, bei 50 %. Die Hälfte der Organismen verstarb bei CO₂-Konzentrationen zwischen 11 % und 50 %²¹⁸. Bei Säugetieren sind die Wirkungen erhöhter CO₂-Konzentrationen in der Atemluft ähnlich wie beim Menschen. Tabelle 5 zeigt eine Zusammenstellung verschiedener Untersuchungsergebnisse zu den Effekten von CO₂ auf Tiere.

Tabelle 5: Effekte erhöhter CO₂-Konzentrationen auf Tiere²¹⁹

Organismus	CO ₂ -Konzentration	Zeitraum	Ergebnis
Schwein	68%	5 Minuten	Tod durch Ersticken
Ratte	6%	24 Stunden	Angeborene Herzfehler bei den Nachkommen
Unbekannt*	3%	Unbekannt	Erhöhter Blutdruck und Rückgang der Hörschärfe
Unbekannt*	5%	30 Minuten	Vergiftungsergebnisse
Unbekannt*	7%	Wenige Minuten	Ohnmacht
Hund	80%	1 Minute	Ausfall der Atmung

*Dokument enthält keine Angaben zur getesteten Art

Während die Auswirkungen erhöhter CO₂-Konzentrationen auf Säugetiere recht gut untersucht sind, bestehen noch große Wissenslücken hinsichtlich der Auswirkungen auf andere Organismengruppen (vor allem kleinerer Arten). Erhebliche Beeinträchtigungen können insbesondere auftreten, wenn es zu einer Anreicherung von CO₂ kommt. Dabei ist zwischen der Situation im Boden und an der Oberfläche zu unterscheiden.

An der Oberfläche besteht die Gefahr erhöhter CO₂-Konzentrationen, wenn sich das CO₂, welches z. B. aus Bohrlöchern entweicht, in Senken sammelt und sich bei Windstille nicht mit der Umgebungsluft vermischt. Darüber hinaus sind Anreicherungen in Seen möglich, die sich nicht regelmäßig durchmischen. Wenn sich zunächst größere Mengen CO₂ am Grund des Sees sammeln und dann schlagartig in einer großen Wolke an die Oberfläche gelangen, können die CO₂-Konzentrationen in der Umgebung kurzfristig so stark ansteigen, dass sehr viele Tiere erstickten. Darüber hinaus kann es zur plötzlichen Freisetzung größerer CO₂-Mengen durch Störfälle an den Überlageeinrichtungen kommen (durch Lecks an Tanks oder Leitungen, Zerstörung von Behältern usw.). Zur Minderung dieser Gefahren gibt es jedoch eine Reihe technischer Möglichkeiten.

²¹⁷ Kronimus et al. (2011), S. 142f.

²¹⁸ Kronimus et al. (2011), S. 143f.

²¹⁹ Iea Greenhouse Gas R&D Programme (2007), S. 78, übersetzt.

Im Boden ist die Gefahr einer Anreicherung größer als an der Oberfläche, da CO₂ schwerer ist als Sauerstoff und daher zunächst den vorhandenen Sauerstoff nach oben verdrängt. Außerdem hat die Vegetation Einfluss auf die Verteilung des CO₂ im Boden. In dicht durchwurzelten Böden wird das Gas länger zurückgehalten und breitet sich lateral aus, wohingegen es in vegetationsfreien und lockeren Böden schneller in die Atmosphäre entweicht²²⁰. Im Boden kommen außerdem weitere indirekte Auswirkungen einer CO₂-Anreicherung hinzu.

Kohlendioxid bildet in Wasser eine schwachsaure Lösung. Gelangt also CO₂ in gelöster Form in den Boden, dann kann dies zu sinkenden pH-Werten führen, sofern die Pufferkapazität des Bodens nicht ausreicht, um diesen Effekt auszugleichen. In der Folge kann es zur verstärkten Lösung und Freisetzung von Schwermetallen kommen. Durch diese bodenchemischen Veränderungen können Bodenlebewesen gefährdet werden²²¹.

Zusammenfassend sind Beeinträchtigungen des Schutzgutes Tiere im terrestrischen Bereich bei einer starken CO₂-Anreicherung möglich. Je nach der Größe und Wertigkeit der betroffenen Vorkommen stellt dies eine erhebliche Beeinträchtigung des Schutzgutes dar. Erhebliche Beeinträchtigungen sind insbesondere zu erwarten, wenn Habitate besonders schützenswerter, gefährdeter oder streng geschützter Arten z. B. in Gebieten mit internationaler oder gesamtstaatlicher Bedeutung (Natura 2000-Gebiet, NSG, NP, Kernzone von Biosphärenreservaten) betroffen sind.

Auswirkungsanalyse im marinen Bereich:

Durch lokal stark erhöhte CO₂-Konzentrationen im Wasser kann es zu einer Reduktion des pH-Wertes kommen. In der Folge entstehen vor allem Auswirkungen auf Organismen, die auf das Vorhandensein von CaCO₃ angewiesen sind. Viele marine Organismen haben ein Skelett oder eine Außenhaut auf der Basis von Calciumcarbonaten. Durch die Reaktion mit CO₂ im Wasser kann sich dieses auflösen. Davon können beispielsweise Korallen oder bestimmte Muschelarten betroffen sein. Kalkbildende Arten benötigen bei niedrigem pH-Wert generell mehr Energie, um Kalkskelette abzuscheiden. Die Sterberate von Muschellarven und juvenilen Muscheln steigt bei einem Absinken des pH-Wertes²²².

In einem Versuch des Plymouth Marine Laboratory wurde durch die Zugabe von CO₂ der pH-Wert im Meerwasser auf 7,3, 6,5 und 5,6 abgesenkt. Im Ergebnis wurden signifikante Veränderungen der Zusammensetzung und eine verringerte Artendiversität bei der Makrofauna und den Nematoden in zwei verschiedenen Sedimenttypen festgestellt²²³.

Bei den höheren Organismen (z. B. Fischen) kann es – entsprechend den Auswirkungen im terrestrischen Bereich – zu Hyperkapnie (erhöhter arterieller CO₂-Druck) und damit zu einer verringerten Sauerstoffaufnahme durch das Blut kommen. Außerdem sind Störungen der

²²⁰ Patil (2012), S. 40f.

²²¹ School of Public and Environmental Affairs (2010); Stange/Duijnisveld (2011), S. 51ff.

²²² Johnston/ Santillo (2003), S. 9; Umweltbundesamt (2008), S. 78.

²²³ Widdicombe et al. (2009), S. 59.

Atmung bis hin zur Ohnmacht, Störungen der Fortpflanzung und schlimmstenfalls der Tod zu erwarten²²⁴.

Johnston & Santillo²²⁵ beschreiben mögliche Folgen einer CO₂-Freisetzung im Ozean. An einer Austrittsstelle von geologisch gespeichertem CO₂ sind lokal ähnliche Auswirkungen denkbar: Eine direkte Folge des abgesenkten pH-Wertes kann eine Versauerung der Körperflüssigkeit mariner Organismen sein. Diese Organismen leben normalerweise in einer langfristig physikalisch und chemisch stabilen Umgebung und es ist anzunehmen, dass sie sich an plötzliche Veränderungen nicht anpassen können. Bei einer lokal begrenzten Austrittsstelle wären vor allem sessile Arten von den pH-Wert-Änderungen betroffen. Der US EPA (Environmental Protection Agency)-Qualitäts-Wert für den pH im Meerwasser liegt bei 6,5-8,5, aber er sollte nie um mehr als 0,2 schwanken. Plankton und benthische Wirbellose sind empfindlicher gegenüber pH-Wert-Änderungen als Fische.

Die Erheblichkeit möglicher Beeinträchtigungen im marinen Bereich hängt insbesondere von der Größe des durch die CO₂-Leckage beeinträchtigten Gebietes ab. Kleine und lokal begrenzte Veränderungen des pH-Wertes und der Zusammensetzung der Artengemeinschaft stellen im marinen Bereich noch keine schwerwiegende Beeinträchtigung dar, solange keine besonders schützenswerten oder gefährdeten Arten (z. B. Korallenriffe) betroffen sind. Da die fachgerechte Verfüllung von Bohrlöchern unter Offshore-Bedingungen noch schwieriger als an Land ist, muss mit einer höheren Anzahl und dichter Altbohrungen im marinen Bereich gerechnet werden²²⁶. Auch die Überwachung vorhandener Altbohrungen ist sicherlich schwieriger als im terrestrischen Bereich. Erhebliche Beeinträchtigungen können daher nicht ausgeschlossen werden.

Freisetzung von Begleitstoffen durch Leckage aus dem Speicher oder aus Über Tageanlagen

Mögliche Begleitstoffe wie H₂S, SO₂, NO_x, H₂SO₃, H₂SO₄ und HNO₃ weisen jeweils eine höhere Toxizität als CO₂ auf. Sie könnten gemeinsam mit dem Kohlendioxid freigesetzt werden und mögliche Schadwirkungen auf das Schutzgut Tiere noch verstärken. Auch der versauernde Effekt ist bei einigen Begleitstoffen wesentlich höher als bei CO₂ (z.B. NO_x, SO_x).

Insgesamt ist zu berücksichtigen, dass die toxischen Beimengungen im CO₂-Strom nur in geringen Konzentrationen zu erwarten sind. Bedenkliche Konzentrationen der Begleitstoffe und damit ggf. erhebliche Beeinträchtigungen von Tieren, sind nur bei sehr großen CO₂-Austritten zu erwarten²²⁷.

²²⁴ Iea Greenhouse Gas R&D Programme (2007), S. 71ff; Kronimus et al. (2011).

²²⁵ Johnston/ Santillo (2003), S. 9f.

²²⁶ Krupp (2011), S. 56.

²²⁷ Kronimus et al. (2011), S. 53 und 222.

3.2.5 Biologische Vielfalt

Definition

Das Schutzgut „biologische Vielfalt“ wird in den Begriffsbestimmungen des § 3 KSpG zwar unter Nr. 14 als Bestandteil des Begriffs „Umwelt“ aufgeführt. Das KSpG enthält jedoch keine eigenständige Begriffsbestimmung für das Schutzgut „biologische Vielfalt“. Auch der weitere Wortlaut und die Gesetzessystematik des KSpG lassen keine Rückschlüsse auf das Verständnis von diesem Schutzgut zu. Daher ist auf allgemeine Definitionen und das Begriffsverständnis in anderen Gesetzen zurückzugreifen (siehe zur Übertragbarkeit des Begriffsverständnisses aus anderen Gesetzen bzw. Rechtsbereichen und zur weiteren Begründung die Ausführungen unter 3.2.1.).

Die "biologische Vielfalt" oder auch "Biodiversität" ist ein relativ neues Schutzgut der Umweltplanung, das sich aus dem Übereinkommen über die biologische Vielfalt (Convention on Biological Diversity – CBD) ableitet²²⁸ und im nationalen Recht u.a. in den Zielsetzungen des BNatSchG oder im UVPG Berücksichtigung findet (siehe § 1 Abs. 1 Nr. 1 BNatSchG, § 1 Abs. 1 Satz 1 Nr. 1 UVPG).

Das Schutzgut „Biologische Vielfalt“ umfasst danach die Vielfalt an Ökosystemen, Lebensräumen, Lebensgemeinschaften, Populationen und Arten sowie die genetische Vielfalt innerhalb der Arten, deren Unversehrtheit und den Erhalt dieser Vielfalt.²²⁹ Dies bezieht sich sowohl auf wild lebende wie auch auf domestizierte Arten.²³⁰

Die dauerhafte Sicherung der biologischen Vielfalt gehört zu den Zielen des BNatSchG und wird danach u.a. als Grundlage für Leben und Gesundheit des Menschen auch in Verantwortung für die künftigen Generationen begriffen (§ 1 Abs. 1 Nr. 1 BNatSchG, § 1 Abs. 1 Satz 1 Nr. 1 UVPG). Dies entspricht den Zielsetzungen des Übereinkommens über die biologische Vielfalt.

Eine Konkretisierung dieser Zielsetzung bzw. die zur Biodiversität zu zählenden Komponenten lassen sich aus § 1 Abs. 2 BNatSchG ableiten. Danach sind

„[z]ur dauerhaften Sicherung der biologischen Vielfalt [...] entsprechend dem jeweiligen Gefährdungsgrad insbesondere

- 1. lebensfähige Populationen wild lebender Tiere und Pflanzen einschließlich ihrer Lebensstätten zu erhalten und der Austausch zwischen den Populationen sowie Wanderungen und Wiederbesiedelungen zu ermöglichen,*

²²⁸ Vgl. Stadler/Korn (2008; Jessel (2009).

²²⁹ Vgl. Art. 2 des Übereinkommens über die biologische Vielfalt und § 7 Abs. 1 Nr. 1 BNatSchG; Peters/Balla (2006), § 2 UVPG Rn. 13; Appold, in: Hoppe/Beckmann (2012), § 2 UVPG Rn. 27.; Gassner/Winkelbrandt/Bernotat (2010), S. 160.

²³⁰ Vgl. Marschall/Lipp/Schumacher (2008), S. 1 ff.; Stadler/Korn (2008), S. 1 ff.; Jessel (2009), S. 1 ff.

2. Gefährdungen von natürlich vorkommenden Ökosystemen, Biotopen und Arten entgegenzuwirken,
3. Lebensgemeinschaften und Biotope mit ihren strukturellen und geografischen Eigenheiten in einer repräsentativen Verteilung zu erhalten; bestimmte Landschaftsteile sollen der natürlichen Dynamik überlassen bleiben“.

Vor dem Hintergrund der Ausführungen unter 3.2 beziehen sich die nachfolgenden Darstellungen mit Bezug zum Schutzgut Biodiversität auf die obere Schicht der Erdkruste sowie auf die üblicherweise²³¹ betrachteten Artengruppen.

Allgemein anerkannte Leitlinien unter welchen Aspekten das Schutzgut „Biodiversität“ im Rahmen der Umweltprüfung zu betrachten ist, gibt es nicht.

*Lipp*²³² verweist auf ein umfassendes Konzept zur biologischen Vielfalt von *Noss*, das sich auf drei wesentliche Merkmale – die Komposition, die Struktur und die Funktion – stützt, die auf den drei hierarchischen Ebenen Gene, Arten und Lebensräume definiert und bestimmt werden können. Komposition beschreibt die Individualität und Vielfalt der Elemente innerhalb des zu betrachtenden Gebietes, unter Struktur wird die Anordnung und Verteilung der Elemente und ihre Beziehung gefasst und die Funktion umfasst Prozesse aller Art.

*Trautner*²³³ schlägt vor, die Biodiversität in der Umweltplanung anhand der Artenvielfalt im konkreten Bezug zu Naturraum und Lebensraum zu prüfen. Nach seiner Auffassung sollte der Prüfgegenstand "Artenvielfalt" im Rahmen der UVP als naturraum- und lebensraumtypische Artenvielfalt vor dem Hintergrund des jeweiligen lokalen Standortpotenzials interpretiert werden, wobei die vorkommenden Arten auch langfristig lebensfähige Elemente des Lebensraumes dem sie angehören, bilden können sollten. Da eine vollständige Erfassung aller Arten in einem Raum in der Planungspraxis nicht durchführbar ist, sollten nach *Trautner*²³⁴ repräsentative Artengruppen der jeweils betroffenen Lebensraumtypen herangezogen werden. Er erwartet, dass sich bei Berücksichtigung von etwa fünf Artengruppen durch die Hinzunahme weiterer Artengruppen im Rahmen der Betrachtung der Biodiversität – ähnlich wie beim Arten- und Biotopschutz – kaum noch Unterschiede ergeben.

Bei der Bewertung der Artenvielfalt müssen nach Auffassung von *Trautner*²³⁵ insbesondere bereits gefährdete Elemente der Biodiversität und solche Elemente, bei denen eine Gefährdung abzusehen ist, berücksichtigt werden. Entsprechend seien die bundes- und landesweiten Roten Listen zu berücksichtigen. Ein besonderes Augenmerk sei auf solche Arten oder Unterarten zu richten, für die unter biogeografischen Aspekten eine besondere Schutzverantwortung besteht.

²³¹ Siehe hierzu die Ausführungen unter 3.2.

²³² *Lipp* (2009), S 37.

²³³ *Trautner* (2003), S. 155-156.

²³⁴ *Trautner* (2003), S. 156.

²³⁵ *Trautner* (2003), S. 157-159.

Nach *Lipp*²³⁶ sind die wesentlichen Indikatoren, mit denen sich die Biodiversität bestimmen lässt, die Lebensräume, die Tier- und Pflanzenarten und die Prozesse, die zwischen ihnen ablaufen. Wenn entsprechende Daten verfügbar sind oder besondere Umstände vorliegen, sollten auch genetische Aspekte einbezogen werden. *Lipp* fordert zudem eine Regionalisierung bei der Bewertung der Biodiversität, da unterschiedliche Landschaften bereits aufgrund der naturräumlichen Verhältnisse, der historischen oder rezenten Nutzung und anderer Einflussfaktoren geprägt seien. Die Auswahl der Kriterien für die Bewertung der Biodiversität hängt von der Betrachtungsebene, aber auch von den verfügbaren Datengrundlagen ab.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass es zwar bisher keine allgemein anerkannte Methode zur Berücksichtigung der biologischen Vielfalt in der Umweltplanung gibt, aber dass erste methodische Ansätze bestehen. Für diese gilt:

- sie bauen auf Angaben zu Biotopen und Arten verschiedener Tierartengruppen des Untersuchungsraumes auf,
- sie berücksichtigen den biotoptypischen Artenreichtum, die Repräsentanz und Einzigartigkeit von Zönosen,
- sie berücksichtigen die Naturnähe und auf diese Weise den Ablauf weitgehend natürlicher Prozesse,
- sie berücksichtigen außerdem die Seltenheit und die Gefährdung auf Bundes-, Landes- oder sogar EU-Ebene,
- sie beziehen die besondere Schutzverantwortung unter biogeografischen Gesichtspunkten ein.

Diese Erkenntnisse werden den nachfolgenden Darstellungen zugrunde gelegt.

Mögliche Auswirkungen bei bestimmungsgemäßem Betrieb

Nachfolgend werden die Wirkfaktoren betrachtet, die voraussichtlich beim bestimmungsgemäßen Betrieb Auswirkungen auf das Schutzgut Biologische Vielfalt haben können. Die biologische Vielfalt kann sowohl im terrestrischen als auch im marinen Bereich durch die Auswirkungen betroffen sein. Die Art der Wirkungen des Vorhabens ist aber für die meisten Wirkfaktoren im terrestrischen und marinen Bereich vergleichbar, so dass keine getrennte Auswirkungsanalyse erforderlich ist. Auf Besonderheiten im marinen Bereich wird an den entsprechenden Stellen hingewiesen.

Flächeninanspruchnahme, Boden- bzw. Sedimentverluste

Die Flächeninanspruchnahme wirkt in einem lokal begrenzten Bereich und ist in den in den meisten Fällen nur temporär.

Im Sinne der Vermeidung sind nach Möglichkeit grundsätzlich nur Flächen mit eingeschränkter Bedeutung für Pflanzen und Tiere in Anspruch zu nehmen (der

²³⁶ *Lipp* (2009), S. 39.

Vermeidungsgrundsatz gilt auch außerhalb von Schutzgebieten). Vermeidbare Beeinträchtigungen sind zu unterlassen, ggf. sind weniger konfliktträchtige Alternativen zu suchen. Somit ist davon auszugehen, dass die Injektionsbohrung(en) und die Übertageeinrichtungen insbesondere so angeordnet werden, dass keine Gebiete mit internationaler oder gesamtstaatlicher Bedeutung für den Artenschutz in Anspruch genommen werden, sondern vielmehr ein Abstand dazu eingehalten wird. Zu diesen Gebieten sind Natura-2000-Gebiete, Nationalparke (NP), Nationale Naturmonumente, Naturschutzgebiete (NSG) und Kernzonen von Biosphärenreservaten zu zählen. Dadurch wird auch gewährleistet, dass besonders wichtige Flächen für den Biotopverbund und zur Erhaltung der Biodiversität freigehalten werden. Um darüber hinaus Auswirkungen auf die biologische Vielfalt zu vermeiden, sollte auch das Netz der Lebensraumkorridore²³⁷ bei der Standortsuche für die Übertageeinrichtungen berücksichtigt und möglichst nicht in Anspruch genommen werden.

Konflikte und erhebliche Beeinträchtigungen durch die dauerhaften Flächeninanspruchnahmen können somit weitgehend vermieden werden. Durch die temporären Flächeninanspruchnahmen in den Betriebsphasen Erkundung, Bau und Postinjektion sind ebenfalls keine erheblichen Beeinträchtigungen der biologischen Vielfalt zu erwarten.

Verbleibende Beeinträchtigungen können in den meisten Fällen in den Zulassungsverfahren voraussichtlich bereits im Rahmen der Prüfung der materiellen Voraussetzungen kompensiert werden; spätestens im Rahmen der Abwägung wird über den Umgang mit verbleibenden Beeinträchtigungen und das Schicksal der beantragten Zulassung entschieden.

Erschütterungen

Der Wirkfaktor ist nicht geeignet Beeinträchtigungen hervorzurufen, die sich auf Populationen oder die Artenvielfalt auswirken könnten.

Bei Durchführung angemessener Vermeidungs- und Minimierungsmaßnahmen sind keine erheblichen Beeinträchtigungen durch Erschütterungen, die bei einem bestimmungsgemäßen Betrieb entstehen, zu erwarten.

Akustische und optische Emissionen

Der Wirkfaktor kann Beeinträchtigungen von Tieren auslösen, die Teil der biologischen Vielfalt sind. Hinsichtlich dieses Schutzes ist zu beurteilen, ob durch den Wirkfaktor die naturraum- und lebensraumtypische Artenvielfalt, Populationen besonders seltener oder genetisch isolierter Arten erheblich beeinträchtigt werden können.

²³⁷ Im Bundesprogramm Wiedervernetzung vom 29.02.2012 ist erstmals festgelegt, dass das Netz der Lebensraumkorridore in Deutschland bei raumwirksamen Entscheidungen zu beachten ist. Wissenschaftliche Grundlagen hierfür sind insbesondere die seit 2009 vorliegenden Forschungsergebnisse des Bundesamtes für Naturschutz zu den Lebensraumkorridoren in Deutschland (u. a. Fuchs et al. (2010)). Es wird zwischen dem Lebensraumnetz von Trockenbiotopen, dem Lebensraumnetz von Feuchtbiotopen, dem Lebensraumnetz von wertvollen Waldbiotopen sowie dem Korridorsystem für Wald bewohnende größere Säugetiere unterschieden. Vgl. http://www.bfn.de/0306_zerschneidung.html (Stand: 26.06.2012).

Grundsätzlich können durch akustische und optische Emissionen Störungen und Vertreibungen von Tieren auftreten. Der Lärm kann darüber hinaus zur Maskierung von akustischen Signalen einiger Tierarten führen. Bei Umsetzung der bezüglich der Flächeninanspruchnahme formulierten Vermeidungsmaßnahmen, lassen sich erhebliche Beeinträchtigungen durch den Bau und Betrieb der Überageeinrichtung weitgehend vermeiden. Die Emissionen, die durch das Monitoring auch außerhalb der Überageeinrichtungen verursacht werden, sind temporärer Art. Daher sind lediglich Auswirkungen auf einzelne Individuen zu erwarten, eine dauerhafte Beeinträchtigung von Arten oder Populationen ist aber auszuschließen.

Bei Speicherprojekten im marinen Bereich ist durch die notwendigen Seismiken mit z.T. erheblichem Unterwasserschall zu rechnen. Marine Säuger und insbesondere Schweinswale sind hoch empfindlich gegenüber Unterwasserschall (vgl. Kap. 3.2.4 „Akustische und optische Emissionen“). Der Schweinswal ist in Deutschland stark gefährdet²³⁸ und im Anhang IV der FFH-Richtlinie gelistet. Sein Schutz ist folglich auch für den Erhalt der biologischen Vielfalt bedeutsam. Daher sollten zur Vermeidung erheblicher Beeinträchtigungen Auswirkungen auf Meeresgebiete, die für die Schweinswalpopulation essentiell sind (Nahrungs-, Fortpflanzungs- Aufzucht- und Wanderungsräume) vermieden werden.

Selbstverständlich ist im Rahmen des Zulassungsverfahrens auch für andere lärmempfindliche Arten zu prüfen, ob Beeinträchtigungen der Populationen möglich sind. Die konkreten Auswirkungen hängen allerdings von den Details des Vorhabens (Pegel, Frequenz und Dauer des Unterwasserschalls) und dem Schutzstatus der jeweiligen Art für das Schutzgut ab. Generell ist es im marinen Bereich schwierig beim Vorliegen von erheblichen Beeinträchtigungen adäquate Ausgleichsmaßnahmen durchzuführen, so dass die Vermeidung erheblicher Beeinträchtigungen besonders wichtig ist.

Stoffliche Emissionen

Nach dem gegenwärtigen Kenntnisstand ist nicht zu erwarten, dass stoffliche Emissionen ein Ausmaß erreichen, das zu erheblichen vorhabenbedingten Auswirkungen auf Biotope, Tier- oder Pflanzenarten führt. Erhebliche Beeinträchtigungen der biologischen Vielfalt können somit ausgeschlossen werden.

Sedimentverwirbelungen

Die Sedimentverwirbelungen sind nicht geeignet Auswirkungen auf Populationen oder die Artenvielfalt auszulösen.

Geringe Veränderung des Reliefs durch großflächige Landhebungen und -senkungen

Wie in den Kapiteln 3.2.3 „Geringe Veränderungen des Reliefs durch großflächige Landhebungen und -senkungen“ und 3.2.4 „Geringe Veränderung des Reliefs durch großflächige Landhebungen und -senkungen“ dargestellt, sind Landhebungen oder -senkungen in einem solchen Ausmaß, dass es zu Standortveränderungen kommt (z.B. durch Änderungen des Grundwasserstandes) im bestimmungsgemäßen Betrieb eher unwahrscheinlich aber nicht

²³⁸ Meinig/Boye/Hutterer (2009), S. 124.

gänzlich auszuschließen. Sollten sich großflächig die Standortbedingungen derart ändern, dass es zu negativen Veränderungen artenreicher oder für den Biotopverbund wichtiger Flächen kommt, sind erhebliche Beeinträchtigungen der biologischen Vielfalt möglich. Auch eine Veränderung von Standorten bzw. Habitaten endemischer Arten, bei denen im Einzelfall jedes Individuum für die Arterhaltung wichtig ist, würde eine erhebliche Beeinträchtigung darstellen.

Wie bereits in Kapitel 3.2.2 „Geringe Veränderungen des Reliefs durch großflächige Landhebungen und -senkungen“ erläutert, sind standort- und vorhabenspezifische Modellierungen und Gutachten erforderlich, um jeweils eine ortsspezifische Obergrenze der Landhebungen und -senkungen unter Berücksichtigung der Erfordernisse zum Schutz der verschiedenen Schutzgüter wie Kultur- und sonstige Sachgüter, Wasser und Vegetation zu ermitteln. Werden diese bei der Festlegung von Speichermengen und Einspeicherraten beachtet und in entsprechenden Nebenbestimmungen bei der Speicherzulassung geregelt, dann können für den bestimmungsgemäßen Betrieb erhebliche Auswirkungen auf die Biologische Vielfalt durch den Wirkfaktor Veränderung des Reliefs weitgehend ausgeschlossen werden.

Mikrobeben durch erhöhte Seismizität

Mikrobeben haben weder einen Einfluss auf Pflanzen noch auf die Gesundheit von Tieren oder den Erhalt von Populationen (vgl. Kap. 3.2.3 „Mikrobeben durch erhöhte Seismizität“ und 3.2.4 „Mikrobeben durch erhöhte Seismizität“). Daher können auch Auswirkungen auf die biologische Vielfalt ausgeschlossen werden.

Mögliche Auswirkungen des nicht bestimmungsgemäßen Betriebs

Nachfolgend werden die Wirkfaktoren betrachtet, die beim nicht bestimmungsgemäßen Betrieb Auswirkungen auf das Schutzgut Biologische Vielfalt haben können. Das Ausmaß der möglichen Auswirkungen hängt von der Art der Abweichung vom bestimmungsgemäßen Betrieb und der Intensität der damit verbundenen Wirkfaktoren ab. Entsprechend dem Vorgehen in Kap. 3.2.2.3 und 3.2.3.3 erfolgt eine getrennte Auswirkungsanalyse nur für die Freisetzung von CO₂, da sich hier Unterschiede bei den Auswirkungen deutlich differenzieren lassen.

Größere Veränderung des Reliefs durch stärkere Landhebungen und -senkungen

Durch Landhebungen bzw. Landsenkungen über das prognostizierte Maß hinaus, können, je nach lokalem Relief, die Grundwasserströmungen verändert oder auch der Wasserspiegel von Seen und das Verhalten von Fließgewässern beeinflusst werden²³⁹. Durch solche Veränderungen der Standortbedingungen werden Veränderungen der Vegetationszusammensetzung ausgelöst, die sich wiederum auf die ganze Biozönose auswirken. Hierdurch kann es zu erheblichen Beeinträchtigungen des Schutzgutes Biodiversität kommen.

²³⁹ Chadwick et al. (2006), S. 68.

Größere Beben durch erhöhte Seismizität

Wie aus den vorangegangenen Kapiteln zu den Schutzgütern Tiere und Pflanzen her-vorgeht, führen induzierte Beben in einer Stärke, wie sie bisher beobachtet wurden, nicht zu erheblichen Beeinträchtigungen von Pflanzen oder Tieren. Daher sind ebenfalls keine Beeinträchtigungen der biologischen Vielfalt zu erwarten. Beeinträchtigungen von Pflanzen und Tieren sind nur bei sehr starken Beben, die über der bisher beobachteten Größenordnung liegen, denkbar. Sie entstünden als indirekte Beeinträchtigungen beispielsweise durch Flutwellen, Lawinen oder einstürzende Gebäude, in deren Folge es auch zu Beeinträchtigung der biologischen Vielfalt käme.

Aufstieg von salzigem Formationswasser

Eine Versalzung des Grundwassers im Wurzelbereich von Pflanzen kann zum Absterben der Vegetation (vgl. Kap. 3.2.3 „Aufstieg von salzigem Formationswasser“) und damit auch zu Beeinträchtigungen der dort lebenden Tiere führen (vgl. Kap. 3.2.4 „Aufstieg von salzigem Formationswasser“). Im schlimmsten Fall können ganze Ökosysteme wie Seen oder Auen versalzen. Eine Beeinträchtigung der biologischen Vielfalt liegt vor, falls die Auswirkungen durch das verdrängte Salzwasser ganze Populationen oder die Artenvielfalt betreffen. Dies wäre in erster Linie denkbar, wenn Standorte oder Habitate von endemischen Arten betroffen wären oder die Auswirkungen große und schutzwürdige Bereiche betreffen würden.

Freisetzung von CO₂ durch Leckage aus dem Speicher oder aus Über Tageanlagen

Auswirkungsanalyse im terrestrischen Bereich:

Stark erhöhte CO₂-Konzentrationen im Boden oder an der Oberfläche können sich schädigend auf Pflanzen und Tiere auswirken. Obwohl das CO₂ selbst nicht giftig ist, verdrängt es den Sauerstoff, wodurch bei Pflanzen die Wurzelatmung gehemmt wird und Tiere ersticken können. Weitere Folgen einer CO₂-Anreicherung im Boden sind die Absenkung des pH-Wertes in Verbindung mit einer erhöhten Mobilisation von Schwermetallen (vgl. Kap. 3.2.3 „Freisetzung von CO₂ durch Leckage aus dem Speicher oder aus Über Tageanlagen“ und 3.2.4 „Freisetzung von CO₂ durch Leckage aus dem Speicher oder aus Über Tageanlagen“).

Das Schutzgut Biologische Vielfalt umfasst die Vielfalt an Ökosystemen, Lebensräumen, Lebensgemeinschaften, Populationen und Arten sowie die genetische Vielfalt innerhalb der Arten (s. Definition Kap. 3.2.5 „Definition“). Beeinträchtigungen des Schutzgutes sind folglich denkbar, wenn durch die CO₂-Freisetzung ganze Ökosysteme, Populationen oder Arten geschädigt werden.

Von natürlichen CO₂-Quellen ist bekannt, dass die Austritte an der Oberfläche häufig als geclusterte Schlote auftreten. Auf einem größeren Areal (1–100 km²) treten Stellen von wenigen Dezimetern bis Quadratmetern auf, an denen der Übergang von CO₂ in die Atmosphäre vorwiegend stattfindet²⁴⁰. Auch die Beobachtungen in der Laterna Caldera zeigen,

²⁴⁰ Stange/Duijnsveld (2011), S. 16.

dass signifikante Auswirkungen in einem begrenzten Radius (hier ca. 10 m) um die zentrale Austrittsstelle auftreten²⁴¹.

Bei punktförmigen Freisetzung im Rahmen eines Speichervorhabens werden nach den bisherigen Erkenntnissen ebenfalls nur lokal begrenzt erhöhte CO₂-Konzentrationen erwartet (vgl. Kap. 3.1.4 „Freisetzung von CO₂ durch Leckage aus dem Speicher oder aus Übertrageanlagen“). Bei Windstille und geneigtem Gelände ist es aber möglich, dass das gasförmige CO₂ dem Gefälle folgend bodennah abfließt (Schwergasabfluss) und sich schlimmstenfalls in einer Senke sammelt. In einem solchen Fall wären auch großflächige Auswirkungen denkbar, die die Biodiversität beeinträchtigen könnten. Ein ähnliches Szenario wäre die Anreicherung von CO₂ am Grund eines Sees und der dadurch mögliche plötzliche Austritt einer sehr großen Gaswolke.

Das CO₂ könnte beim Durchgang durch geologische Strukturen und Grundwasserleiter auch flächig verteilt werden, was Flächenquellen mit in der Regel geringerer Flussdichte erwarten lässt, die zudem räumlich heterogen sein können²⁴². Bei einem solchen Szenario könnten auch ganze Ökosysteme betroffen sein. Es kann jedoch nicht prognostiziert werden, welche Schäden zu erwarten sind, da keine Angaben über die zu erwartenden CO₂-Konzentrationen vorliegen.

Erhebliche Beeinträchtigungen der Biologischen Vielfalt durch die Freisetzung von Kohlendioxid im nicht bestimmungsgemäßen Betrieb sind nach derzeitigem Kenntnisstand nicht zu erwarten, können jedoch auch nicht ganz ausgeschlossen werden. Erhebliche Beeinträchtigungen sind insbesondere zu erwarten, wenn für das Schutzgut besonders wertvolle Bereiche, wie Schutzgebiete mit internationaler oder gesamtstaatlicher Bedeutung, betroffen sind und die Auswirkungen ganze Populationen oder die Artenvielfalt betreffen (z. B. wenn Standorte oder Habitate von endemischen Arten betroffen wären).

Auswirkungsanalyse im marinen Bereich:

Im marinen Bereich werden in erster Linie lokal begrenzte Auswirkungen durch einen CO₂-Austritt beschrieben, da sich im Meer schnell ein Verdünnungseffekt einstellt. Durch die versauernde Wirkung können marine Organismen geschädigt werden, wobei Arten, die auf das Vorhandensein von CaCO₃ angewiesen sind, besonders empfindlich reagieren (vgl. Kap. 3.2.4 „Freisetzung von CO₂ durch Leckage aus dem Speicher oder aus Übertrageanlagen“). Es ist insbesondere von Schädigungen sessiler oder wenig mobiler Arten auszugehen.

Darüber hinaus sind Auswirkungen auf das Phytoplankton denkbar, wodurch auch die weiteren Glieder der Nahrungskette in der Folge betroffen wären und die Biologische Vielfalt beeinträchtigt werden könnte. Da sich das Phytoplankton nur in der oberen, lichtdurchlässigen Wasserschicht aufhält, ist dessen Beeinflussung nur im Falle einer Leckage in flacheren Wasserbereichen zu erwarten. Phytoplankton weist eine weite Bandbreite an pH-Toleranzen auf. Küstennah lebendes Plankton ist aufgrund der natürlichen pH-Wert-Schwankungen meist ausgeprägt tolerant. Die pH-Wert-Veränderungen können aber das zeitliche Auftreten von

²⁴¹ Beaubien et al. (2008), S. 10-11.

²⁴² Vgl. Stange/Duijnisveld (2011), S. 10.

Algenblüten beeinflussen. Algen mit Kalkskelett werden von verringerten pH-Werten beeinträchtigt. Für Arten, die auf gelöstes CO₂ angewiesen sind, erweisen sich erhöhte CO₂-Konzentrationen als Vorteil. Eine CO₂-Leckage kann die phytoplanktonische Organismenvergesellschaftung verändern²⁴³.

Im Rahmen von Experimenten wurden bei erhöhten CO₂-Konzentrationen Veränderungen der Gesellschaften von Bakterien und Einzellern festgestellt, die sich auf die gesamte Nahrungskette auswirken können. Eine Studie zum Einfluss auf bakterielle Prozesse ergab, dass bei einer Reduktion des pH-Wertes von 8 auf 7 die Nitrifikationsprozesse um 50 % reduziert waren und bei einer Reduktion auf pH 6,5 um 90 %²⁴⁴.

Signifikante Auswirkungen auf die Biologische Vielfalt sind denkbar, wenn besonders seltene, gefährdete oder endemische Arten betroffen sind. Erhebliche Beeinträchtigungen der marinen Biodiversität können außerdem auftreten, wenn das Phytoplankton, welches für viele Tiere die Nahrungsgrundlage bildet, großflächig geschädigt wird.

Freisetzung von Begleitstoffen durch Leckage aus dem Speicher oder aus Übertrageanlagen

Mögliche Begleitstoffe wie H₂S, SO₂, NO_x, H₂SO₃, H₂SO₄ und HNO₃ weisen jeweils eine höhere Toxizität als CO₂ auf. Sie könnten gemeinsam mit dem Kohlendioxid freigesetzt werden und mögliche Schadwirkungen auf das Schutzgut Biologische Vielfalt noch verstärken. Auch der versauernde Effekt ist bei einigen Begleitstoffen wesentlich höher als bei CO₂ (z.B. NO_x, SO_x).

Da die toxischen Beimengungen im CO₂-Strom jedoch nur in geringen Konzentrationen zu erwarten sind, treten Auswirkungen voraussichtlich nur lokal begrenzt auf. Bedenkliche Konzentrationen der Begleitstoffe und damit ggf. lokale Beeinträchtigungen von Pflanzen oder Tieren, sind nur bei sehr großen CO₂-Austritten möglich²⁴⁵. Erhebliche Auswirkungen auf Populationen oder Arten und damit auf die Biologische Vielfalt sind nicht zu erwarten.

3.2.6 Landschaft

Definition

Das Schutzgut „Landschaft“ wird in den Begriffsbestimmungen des § 3 KSpG zwar unter Nr. 14 als Bestandteil des Begriffs „Umwelt“ aufgeführt. Das KSpG enthält jedoch keine eigenständige Begriffsbestimmung für das Schutzgut „Landschaft“. Auch der weitere Wortlaut und die Gesetzesystematik des KSpG lassen keine Rückschlüsse auf das Verständnis von diesem Schutzgut zu. Daher ist auf allgemeine Definitionen und das Begriffsverständnis in anderen Gesetzen zurückzugreifen (siehe zur Übertragbarkeit des Begriffsverständnisses aus anderen Gesetzen bzw. Rechtsbereichen und zur weiteren Begründung die Ausführungen unter 3.2.1.).

²⁴³ Kronimus et al. (2011), S. 116.

²⁴⁴ Johnston/Santillo (2003), S. 9.

²⁴⁵ Kronimus et al. (2011), S. 53 und 222.

Nach dem Begriffsverständnis im Naturschutz- und UVP-Recht ist die Landschaft ein durch bestimmte strukturelle und funktionelle Merkmale und eine charakteristische Nutzungsweise geprägter und als Einheit in dieser Merkmalsvielfalt abgrenzbarer Teilraum der Erdoberfläche,²⁴⁶ der durch seine geschichtliche Entwicklung, seine Struktur und seine Funktion gekennzeichnet ist und aus einem Gefüge verschiedener Ökotope und Ökosysteme besteht.²⁴⁷ Das Schutzwert „Landschaft“ umfasst das Landschaftsbild sowie den Bestandteil des Landschafts- und Naturhaushalts, der den Lebensraum für Tiere und Pflanzen bildet.²⁴⁸

Der Begriff des Landschaftsbildes ist nicht nur im visuellen Sinne zu verstehen.²⁴⁹ Er schließt zwar die ästhetischen Funktionen von Natur und Landschaft ein, umfasst aber auch die Erholungsfunktionen und die Wirkung von Natur und Landschaft auf alle Sinne.

Der Begriff des Landschaftshaushalts umfasst das Wirkungsgefüge zwischen den Landschaftsfaktoren Relief, Boden, Gewässer, Klima, Luft, Tier- und Pflanzenpopulationen sowie der menschlichen Gesellschaft und damit die Leistungs- und Funktionsfähigkeit des Naturhaushalts einschließlich der Regenerationsfähigkeit und nachhaltigen Nutzungsfähigkeit der Naturgüter.²⁵⁰ Die wesentlichen inhaltlichen Aspekte des Landschaftshaushalts werden daher bei der Behandlung der biotischen und abiotischen Schutzgüter mit abgedeckt.²⁵¹ Obwohl der im UVPG verwendete Begriff "Landschaft" deutlich über das Landschaftsbild hinausreicht, ist daher an dieser Stelle eine Beschränkung auf den Aspekt des Landschaftsbildes gerechtfertigt. Dabei umfasst das Landschaftsbild alle wesentlichen Elemente und Strukturen einer Landschaft, unabhängig davon, ob sie historisch oder aktuell, natürlich oder nutzungsbedingt entstanden sind.

Nach Gassner et al.²⁵² gibt es in der Umweltprüfung viele zum Teil auch grundsätzlich verschiedene methodische Ansätze zur Erfassung und Bewertung des Landschaftsbildes. Die dabei herangezogenen Parameter sind jedoch relativ einheitlich. Nachfolgend wird bei der Bewertung des Landschaftsbildes und des Landschaftserlebens entsprechend der Empfehlung von Jessel und Tobias²⁵³ auf die Begriffe Vielfalt, Eigenart und Schönheit Bezug genommen. Diese naturschutzrechtlich geprägten Begriffe (siehe u.a. § 1 Abs. 1 und 4 BNatSchG) weisen in Bezug auf das Landschaftsbild die folgenden inhaltlichen Merkmale auf:

²⁴⁶ Appold, in: Hoppe/Beckmann (2012), § 2 UVPG Rn. 37; Mengel, in: Frenz/ Müggenborg (2011), § 1 BNatSchG Rn. 13.

²⁴⁷ Mengel, in: Frenz/Müggenborg (2011), § 1 BNatSchG Rn. 13; Schumacher/Schumacher, in: Schumacher/Fischer-Hüftle (2011), § 1 BNatSchG Rn. 9.

²⁴⁸ Peters/Balla (2006), § 2 Rn. 18; Appold, in: Hoppe/Beckmann (2012), § 2 UVPG Rn. 37.

²⁴⁹ Appold, in: Hoppe/Beckmann (Hrsg.) (2012), § 2 UVPG Rn. 38.

²⁵⁰ Appold, in: Hoppe/Beckmann (Hrsg.) (2012), § 2 UVPG Rn. 38.

²⁵¹ Vgl. Gassner/Winkelbrandt/Bernotat (2010), S. 230.

²⁵² Gassner/Winkelbrandt/Bernotat (2010), S. 231.

²⁵³ Jessel/Tobias (2002), S. 216ff.

- Vielfalt umfasst, der Literatur zufolge, die landschafts- bzw. naturraumtypische Gestaltvielfalt, d.h. u.a.
 1. die verschiedenen auftretenden Nutzungsformen;
 2. lineare und punktuelle Strukturelemente;
 3. besonders erlebniswirksame Randstrukturen (z. B. Wald- und Gewässerränder);
 4. die kleinräumig wirksame Reliefvielfalt;
 5. unterschiedliche Blickbezüge und perspektivische Eindrücke;
 6. kulturell-anthropogene Elemente wie u.a. eingestreute Siedlungen, Gehöfte, Weiler u.a. Baustrukturen;
 7. zeitliche Vielfalt an unterschiedlichen Wahrnehmungseindrücken (Geräusche, Gerüche, Tastempfinden).²⁵⁴
- Eigenart bezeichnet den Charakter der Landschaft, d.h. die Summe des optisch-ästhetischen Eindrucks und der charakteristischen Nutzungsweise einer Landschaft.²⁵⁵ Sie umfasst u.a.:
 1. Gestaltungsformen, d.h. typische landschaftliche Anordnungsformen und Abfolgen;
 2. charakteristische Maßstäbe und Proportionen;
 3. standörtliche Differenzierung der Nutzung;
 4. Zeitrahmen, d. h. Vorhandensein über die Zeit hinweg gewachsener Strukturen;
 5. eine relative Konstanz und Stabilität der natürlichen Prozesse;
 6. Seltenheit.²⁵⁶
- Schönheit steht für:
 1. den wahrgenommenen und intuitiv als solchen empfundenen Gesamteindruck eines Landschaftsraumes;
 2. die darauf aufbauende Inwertsetzung der Begriffe Vielfalt und Eigenart.²⁵⁷

Diese Auffassung wird den nachfolgenden Betrachtungen zugrunde gelegt.

²⁵⁴ *Jessel/Tobias* (2002), S. 218; vgl. zudem *Schumacher/Schumacher*, in: Schumacher/Fischer-Hüftle (Hrsg.) (2011), § 1 BNatSchG Rn. 55.

²⁵⁵ *Schumacher/Schumacher*, in: Schumacher/Fischer-Hüftle (Hrsg.) (2011), § 1 BNatSchG Rn. 57.

²⁵⁶ *Jessel/Tobias* (2002), S. 218.

²⁵⁷ *Jessel/Tobias* (2002), S. 218; vgl. zudem *Schumacher/Schumacher*, in: Schumacher/Fischer-Hüftle (Hrsg.) (2011), § 1 BNatSchG Rn. 60 ff.

Unter Landschaftsbild im weiteren Sinne kann auch das Ortsbild im besiedelten Bereich gefasst werden, "[d]a Vielfalt, Eigenart und Schönheit sowie der Erholungswert von Natur und Landschaft nach § 1 BNatSchG auch im besiedelten Bereich zu schützen sind".²⁵⁸

Im Rahmen einer Umweltprüfung ist es sinnvoll, räumliche Einheiten (Landschafts- oder Landschaftsbildeinheiten) als Bezugsgröße für Erhebungen, Analysen und Bewertungen abzugrenzen. Exponierte, weiträumige und offene Einheiten weisen in der Regel eine besonders hohe Empfindlichkeit auf.²⁵⁹

Mögliche Auswirkungen bei bestimmungsgemäßem Betrieb

Nachfolgend werden die Wirkfaktoren betrachtet, die voraussichtlich beim bestimmungsgemäßen Betrieb Auswirkungen auf das Schutzgut Landschaft haben können.

Auswirkungen auf das Schutzgut Landschaft sind sowohl im terrestrischen, wie auch im marinen Bereich möglich. Zwar sind die Ausprägungen des landseitigen Landschaftsbildes vielfältiger, aber auch der marine Bereich hat seine besondere Eigenart und Schönheit. Prägend ist hier die starke Homogenität der Landschaft ohne Unterbrechung der Horizontlinie sowie die Offenheit und die Weite der Blickbeziehungen, die zu einer hohen Empfindlichkeit gegenüber der Errichtung von hohen, gut sichtbaren anthropogenen Fremdkörpern führt. Auf Unterschiede im terrestrischen und marinen Bereich wird an den entsprechenden Stellen hingewiesen. Um Wiederholungen zu vermeiden erfolgt jedoch keine durchgehend getrennte Auswirkungsanalyse.

Flächeninanspruchnahme, Boden- bzw. Sedimentverluste

Geht man davon aus, dass im Sinne der Vermeidung die Injektionsbohrung(en) und die Übertageeinrichtungen einschließlich der Logistikflächen so angeordnet werden,

- dass weder Flächen im Siedlungsbereich noch siedlungsnahe Flächen in Anspruch genommen werden (vgl. Kap. 3.2.2 „Flächeninanspruchnahme, Boden- bzw. Sedimentverluste“ und Kap. 3.2.8 „Flächeninanspruchnahme, Boden- bzw. Sedimentverluste“);
- dass die Anlagen nicht in Landschaftsräumen errichtet werden, die eine hohe Bedeutung für das Landschaftsbild haben, weil
 1. charakteristische Abfolgen und Gruppierungen von Bau- und Nutzungsformen bzw. -elementen vorherrschen, die sich über längere bzw. historische Zeiträume entwickelt haben und weitgehend an den Landschaftsraum gebunden sind,
 2. sie aufgrund ihrer Naturnähe als selten einzustufen sind,
 3. sie kultur- und naturhistorische Elemente von hohem Bekanntheitsgrad und Symbolgehalt aufweisen,

²⁵⁸ Gassner/Winkelbrandt/Bernotat (2010), S. 230

²⁵⁹ Gassner/Winkelbrandt/Bernotat (2010), S. 236 und 238

4. sie reliefbedingt Orientierungspunkte bilden und aufgrund der erhöhten Lage eine hohe Fernwirkung entfalten.
- dass die Beseitigung von landschaftsbildprägenden Elementen vermieden wird;
 - dass die Unterbrechung von Blickbeziehungen auf Leitstrukturen und Orientierungspunkte vermieden wird;
 - dass die Anlagen gestalterisch so optimiert und eingegrünt werden, dass ihre Wirkung als Fremdkörper in der Landschaft minimiert wird;

dann können Konflikte und erhebliche Beeinträchtigungen von Stadt- und Ortsbildern sowie der Landschaft weitgehend minimiert werden. Andernfalls sind erhebliche Auswirkungen auf das Schutzgut Landschaft möglich.

Problematisch könnten in der Überwachungsphase Messnetze sein, die sich in einem regelmäßigen Raster über größere Gebiete erstrecken und in den Bereich größerer Landschaftseinheiten mit naturraumtypischer Vielfalt, Eigenart und Schönheit und daher hoher Bedeutung für das Schutzgut Landschaft fallen. Ist es aufgrund der Ausdehnung der Landschaftseinheiten und des erforderlichen Rasters für das Monitoring nicht möglich, die Nutzung von Flächen in diesen Landschaften zu vermeiden, dann hängt es von Art und Dauer der Flächeninanspruchnahme ab, ob es zu Wirkungen kommt, die die Werte und Funktionen des Landschaftsbildes erheblich mindern. Gehen prägende Elemente verloren oder werden störende Elemente errichtet, sind erhebliche Beeinträchtigungen möglich. Nur wenn die Anwesenheit störender Elemente auf kurze Zeiträume beschränkt bleibt, sind die Beeinträchtigungen geringfügig.

Kurzzeitige Flächennutzungen und kleine Anlagen mit geringer Höhe und entsprechend eingeschränkter visueller Wirkung werden voraussichtlich in der Regel nicht zu erheblichen Beeinträchtigungen der Vielfalt, Eigenart und Schönheit der Landschaft führen. Insgesamt lassen sich die Auswirkungen auf das Schutzgut Landschaft durch den Wirkfaktor Flächeninanspruchnahme bei konsequenter Umsetzung entsprechender Optimierungs-, Vermeidungs- und Minimierungsmaßnahmen voraussichtlich einschränken aber nicht ganz vermeiden.

Verbleibende Beeinträchtigungen können in den meisten Fällen in den Zulassungsverfahren voraussichtlich bereits im Rahmen der Prüfung der materiellen Voraussetzungen kompensiert werden; spätestens im Rahmen der Abwägung wird über den Umgang mit verbleibenden Beeinträchtigungen und das Schicksal der beantragten Zulassung entschieden.

Erschütterungen

Es gibt keine Hinweise, dass vorhabenbedingte Erschütterungen zu erwarten sind, die so stark und andauernd sind, dass sie geeignet sind, das Landschaftserleben zu beeinträchtigen.

Akustische und optische Emissionen

Akustische und optische Emissionen sind grundsätzlich geeignet das Landschaftserleben zu beeinträchtigen. Werden jedoch die oben bezüglich der Flächeninanspruchnahme formulierten Vermeidungsprinzipien umgesetzt, lassen sich erhebliche Beeinträchtigungen durch akustische und optische Emissionen weitgehend vermeiden. Reichen die Abstände zu

den Landschaftseinheiten hoher Bedeutung nicht aus bzw. gehen die Emissionen von Untersuchungs- oder Monitoringmaßnahmen innerhalb dieser Landschaftseinheiten aus, sind zusätzlich Lärm- oder Sichtschutzmaßnahmen möglich, um dies zu gewährleisten.

Stoffliche Emissionen

Nach dem gegenwärtigen Kenntnisstand ist nicht zu erwarten, dass stoffliche Emissionen ein Ausmaß erreichen, dass zu erheblichen vorhabenbedingten Auswirkungen auf das Landschaftserleben führt.

Sedimentverwirbelungen

Sedimentverwirbelungen sind auf Vorhaben im marinen Bereich beschränkt. Sie lassen sich bei konsequenter Umsetzung entsprechender Optimierungs-, Vermeidungs- und Minimierungsmaßnahmen (vgl. Kap. 3.1.4 „Sedimentverwirbelungen“) einschränken.

Sedimentverlagerungen sind in dieser weiten und offenen Landschaft für den Menschen nur dann wahrnehmbar und somit für das Landschaftsbild von Bedeutung, wenn davon Flächen betroffen sind, die nicht dauerhaft von Wasser überdeckt sind, sondern bei Ebbe trockenfallen – also im Wattenmeer liegen. Das Watt ist von einer hohen natürlichen Dynamik und der ständigen Verlagerung von Platen und Prielen gekennzeichnet. Vorhabenbedingte Sedimentverlagerungen wären nur dann von den natürlichen unterscheidbar und als Beeinträchtigung wahrnehmbar, wenn sie ein Ausmaß erreichten, das sich deutlich von den natürlichen Umlagerungen unterscheidet. Das ist unter Berücksichtigung der Vermeidungsmaßnahmen nicht zu erwarten.

Geringe Veränderung des Reliefs durch großflächige Landhebungen und -senkungen

"Das Relief gehört zu den wenig oder kaum veränderbaren Landschaftsfaktoren, die einen hohen ordnenden Einfluss auf das wahrnehmbare Gesamtgefüge eines Raumes haben und damit in starkem Maße den Charakter und die Unverwechselbarkeit eines Landschaftsraumes prägen."²⁶⁰ Veränderungen des Reliefs sind daher grundsätzlich geeignet, die Landschaft erheblich zu verändern. Solange sie gering und großflächig gleichmäßig sind, werden sie jedoch voraussichtlich kaum wahrgenommen. Das gilt in besonderem Maße für den marinen Bereich, da das Relief hier vom Wasser überdeckt wird und für den Menschen nur im regelmäßig trockenfallenden Wattenmeer wahrnehmbar ist.

Zwar erwarten Großmann et al.²⁶¹ bei den bestimmungsgemäßen, großflächig gleichmäßigen Landhebungen und -senkungen nur geringe Auswirkungen auf Grundwasserstände und -ströme, schließen Änderungen aber auch nicht ganz aus. Auswirkungen auf landschaftsprägende Vegetationsbestände oder kulturhistorisch bedeutsame Landschaftsbestandteile, wie die in Kapitel 3.2.6 „Größere Veränderung des Reliefs durch stärkere Landhebungen und -senkungen“ für nicht bestimmungsgemäße größere

²⁶⁰ Jessel/Tobias (2002), S. 223.

²⁶¹ Großmann et al. (2011a), S. 31.

Landhebungen skizzierten, sind daher voraussichtlich nicht oder nur in Einzelfällen zu erwarten, können aber nicht grundsätzlich ausgeschlossen werden.

Wenn unter Vermeidungsgesichtspunkten standort- und vorhabenspezifische Modellierungen und Gutachten genutzt werden, um eine spezifische Obergrenze der Landhebungen und -senkungen unter Berücksichtigung für den Erhalt der typischen Vegetationsbestände festzulegen, lassen sich für den bestimmungsgemäßen Betrieb Auswirkungen auf die Landschaft weitgehend ausschließen.

Mikrobeben durch erhöhte Seismizität

Mikrobeben haben eine so geringe Magnitude, dass sie weder Auswirkungen auf das Landschaftsgefüge haben, noch vom Menschen spürbar sind. Sie sind daher nicht geeignet das Schutzgut Landschaft zu beeinträchtigen.

Mögliche Auswirkungen des nicht bestimmungsgemäßen Betriebs

Nachfolgend werden die Wirkfaktoren betrachtet, die beim nicht bestimmungsgemäßen Betrieb Auswirkungen auf das Schutzgut Landschaft haben können. Das Ausmaß der möglichen Auswirkungen hängt von der Art der Abweichung vom bestimmungsgemäßen Betrieb und der Intensität der damit verbundenen Wirkfaktoren ab.

Beeinträchtigungen des Landschaftsbildes durch die betrachteten Wirkfaktoren des nicht bestimmungsgemäßen Betriebs sind vor allem im terrestrischen Bereich zu erwarten. Auf eine getrennte Auswirkungsanalyse wird daher verzichtet. Im marinen Bereich könnten Veränderungen des Landschaftsbildes durch größere Veränderungen des Reliefs verursacht werden, sofern davon Flachwasserbereiche, also insbesondere die küstennahen Watten betroffen sind.

Größere Veränderung des Reliefs durch stärkere Landhebungen und -senkungen

Wie in Kapitel 3.2.5 „Geringe Veränderung des Reliefs durch großflächige Landhebungen und -senkungen“ schon angesprochen, können größere Reliefveränderungen die Landschaft verändern.

Größere Landhebungen sind aber nicht nur geeignet das Relief zu verändern sondern sind möglicherweise auch mit Auswirkungen auf Grundwasserstände und Vorflutverhältnisse verbunden, die wiederum zu Veränderungen der Landschaft führen. Sowohl steigende als auch fallende Grund- oder Oberflächenwasserspiegel könnten den Charakter eines Landschaftsraumes stark verändern. Bäume könnten sterben, Gewässer austrocknen, Feuchtbiotope und Röhrichte durch Wasserentzug verschwinden oder Flächen vernässen. Im Extremfall könnten Flächen durch die Unterbrechung der Vorflut und das Entstehen von größeren abflusslosen Senken von Überflutung bedroht sein. Dem müsste mit aufwendigen und kostenintensiven Maßnahmen wie der Einrichtung und dem Betrieb von Schöpfwerken begegnet werden. Das wäre dann vergleichbar mit den so genannten "Ewigkeitslasten" bzw. "Ewigkeitskosten" des Bergbaus (vgl. Kap. 3.2.2 „Größere Veränderung des Reliefs durch stärkere Landhebungen und -senkungen“).

Im schlimmsten Fall sind also durch große und durch ungleichmäßige Landhebungen infolge nicht bestimmungsgemäßer Betriebszustände erhebliche Beeinträchtigungen der Landschaft möglich bzw. aufwendige Gegenmaßnahmen erforderlich um dies zu verhindern.

Größere Beben durch stärkere Seismizität

Insgesamt finden sich unterschiedliche Angaben dazu, bei welcher Magnitude Schäden zu erwarten sind (vgl. Kap. 3.2.7 „Größere Beben durch erhöhte Seismizität“). Tatsächlich gibt es auch Beispiele für Beben mit einer verhältnismäßig geringen Magnitude von 5,8 bzw. 6,0 aber verheerenden Wirkungen.²⁶²

Bei Beben größerer Magnitude erreichen die Auswirkungen teilweise bis flächen-deckend katastrophale Ausmaße, nur wenige oder keine Gebäude bleiben stehen, im Boden reißen Spalten auf, Gas- und Wasserleitungen brechen in großen Mengen, an den Küsten sind vernichtende Flutwellen und im Gebirge Erdrutsche oder Lawinen möglich. Größere Flutwellen könnten sich auf das Relief des marinen und terrestrischen Bereichs der Küstenregion auswirken.

Sofern es bei nicht bestimmungsgemäßen Betriebszuständen nur zu Beben in der bisher beobachteten Größenordnung (bis maximal Magnitude 4,5) kommt, sind erhebliche Beeinträchtigungen der Landschaft voraussichtlich nicht zu erwarten. Nach vorliegendem Kenntnisstand sind aber auch Beben größerer Magnitude nicht auszuschließen. Sie könnten zu erheblichen Schäden an der über längere Zeit gewachsenen, womöglich kulturhistorisch bedeutsamen Bebauung führen und dadurch den Charakter einer Landschaft verändern.

Aufstieg von salzigem Formationswasser

Steigt salzhaltiges Formationswasser bis in den durchwurzelten Bereich auf, dann wirkt sich dies auf die Vegetation der betroffenen Flächen aus, da die meisten heimischen Pflanzen nicht oder nur wenig salztolerant sind.²⁶³ Bei andauernder Versalzung würde gegebenenfalls die vorhandene Vegetation absterben und durch salzertragende Pflanzen und Pflanzengemeinschaften ersetzt, wie sie im Bereich der Küstensalzwiesen oder Binnensalzstellen vorkommen (vgl. auch Kapitel 3.2.2 „Aufstieg von salzigem Formationswasser“).

Auf den betroffenen Flächen könnten Gehölze absterben, traditionelle Nutzungsformen ebenso wie die "normale" land- und forstwirtschaftliche Nutzung beeinträchtigt oder sogar unmöglich werden. Dies hätte sowohl Auswirkungen auf das Stadt- bzw. Ortsbild als auch auf die Vielfalt und Eigenart der Landschaft.

Freisetzung von CO₂ durch Leckage aus dem Speicher oder aus Über Tageanlagen

²⁶² Ein Beben der Magnitude 5,8 forderte 1960 in Agadir 14.000 und ein Beben der Magnitude 6,0 forderte 1964 in Skopje 1.600 Tote (vgl. <http://www.hlug.de/start/geologie/erdbeben/erdbebengefaehrdung/magnitude-und-intensitaet.html>).

²⁶³ Vgl. *Ellenberg et al.* (1991), S. 77–153.

Wie die Versalzung kann auch eine CO₂-Leckage traditionelle Nutzungsformen ebenso wie die "normale" land- und forstwirtschaftliche Nutzung beeinträchtigen oder sogar unmöglich machen. Dies hätte sowohl Auswirkungen auf das Stadt- bzw. Ortsbild als auch auf die Vielfalt und Eigenart der Landschaft.

Freisetzung von Begleitstoffen durch Leckage aus dem Speicher oder aus Übertageanlagen

Mögliche Begleitstoffe wie H₂S, SO₂, NO_x, H₂SO₃, H₂SO₄ und HNO₃ weisen jeweils eine höhere Toxizität als CO₂ auf. Sie könnten gemeinsam mit dem Kohlendioxid freigesetzt werden und mögliche Schadwirkungen auf die Landschaft (s. Kap. 3.2.6 „Freisetzung von CO₂ durch Leckage aus dem Speicher oder aus Übertageanlagen“) noch verstärken.

3.2.7 Kulturgüter

Definition

Das Schutzgut „Kulturgüter“ wird in den Begriffsbestimmungen des § 3 KSpG zwar unter Nr. 14 als Bestandteil des Begriffs „Umwelt“ aufgeführt. Das KSpG enthält jedoch keine eigenständige Begriffsbestimmung für das Schutzgut „Kulturgüter“. Auch der weitere Wortlaut und die Gesetzesystematik des KSpG lassen keine Rückschlüsse auf das Verständnis von diesem Schutzgut zu. Daher ist auf allgemeine Definitionen und das Begriffsverständnis in anderen Gesetzen zurückzugreifen (siehe zur Übertragbarkeit des Begriffsverständnisses aus anderen Gesetzen bzw. Rechtsbereichen und zur weiteren Begründung die Ausführungen unter 3.2.1.).

Nach dem Begriffsverständnis des Immissionsschutz- und UVP-Rechts umfasst das Schutzgut "Kulturgüter" Sachgüter von besonderer kultureller Bedeutung.²⁶⁴ Hierzu gehören verschiedene Denkmäler wie beispielsweise Bau- und Bodendenkmäler, aber auch kunsthistorisch oder archäologisch bedeutsame Gegenstände.²⁶⁵ Nach einer detaillierteren Definition sind Kulturgüter im Sinne des UVPG „raumwirksame Ausdrucksformen der Entwicklung von Land und Leuten, die für die Geschichte des Menschen von Bedeutung sind. Dies können Flächen und Objekte der Bereiche Denkmalschutz und Denkmalpflege, Naturschutz und Landschaftspflege sowie der Heimatpflege sein.“²⁶⁶

Somit fallen unter das Schutzgut "Kulturgüter" alle nach den Denkmalschutzgesetzen geschützten Kulturdenkmale und Denkmalbereiche. Kulturdenkmäler sind Gegenstände aus vergangener Zeit, die Zeugnisse, insbesondere des geistigen oder künstlerischen Schaffens, des handwerklichen oder technischen Wirkens oder historischer Ereignisse oder Entwicklungen, Spuren oder Überreste menschlichen Lebens oder kennzeichnende Merkmale der Städte und Gemeinden sind und an deren Erhaltung und Pflege oder wissenschaftlicher Erforschung und Dokumentation aus geschichtlichen, wissenschaftlichen, künstlerischen oder städtebaulichen

²⁶⁴ Peters/Balla (2006), § 2 UVPG Rn. 19.

²⁶⁵ Peters/Balla (2006), § 2 UVPG Rn. 19; Appold, in: Hoppe/Beckmann (Hrsg.) (2012), § 2 UVPG Rn. 40; Dietlein, in: Landmann/Rohmer (2011), § 1 BImSchG Rn. 13.

²⁶⁶ Röhrig/ Kühling (1996), S. 64.

Gründen ein öffentliches Interesse besteht.²⁶⁷ Dazu gehören auch entsprechende Garten-, Park- und Friedhofsanlagen²⁶⁸ sowie archäologische Denkmale, also Kulturdenkmale, die sich im Boden oder in einem Gewässer befinden oder befanden. Denkmalbereiche sind Mehrheiten von Sachen, die durch ihr Erscheinungsbild oder durch ihre Beziehung zueinander von entsprechender Bedeutung sind. Sie können auch aus Sachen bestehen, die einzeln nicht als Kulturdenkmale einzustufen sind.

Das Schutzgut Kulturgüter ist allerdings nicht auf die rechtlich geschützten Bau- und Bodendenkmale beschränkt sondern geht darüber hinaus. Auch schutzwürdige, (noch) nicht unter Schutz gestellte Objekte fallen darunter, ebenso kulturhistorisch bedeutsame Landschaftsbestandteile wie Naturdenkmale. Den nachfolgenden Betrachtungen werden entsprechend der Auffassung von *Jessel & Tobias*²⁶⁹ die im Folgenden aufgelisteten und für die UVP relevanten Kulturgüter zugrunde gelegt.

- Materielle, unmittelbar wahrnehmbare raumbezogene Elemente:
 1. Baudenkmale bzw. schutzwürdige Bauwerke und Ensembles einschließlich ihres Umfeldes;
 2. archäologische Bodendenkmale einschließlich ihres Umfeldes;
 3. Archivböden, also Böden mit Funktion als Archive der Kulturgeschichte;
 4. Denkmalbereiche, d. h. großräumige, landschaftlich bzw. kulturhistorisch zusammenhängende Bereiche;
 5. kulturhistorisch bedeutsame Landschaften, Landschaftsteile und Landschaftselemente;
 6. bedeutsame Stadt- und Ortsbilder, z. B. auch markante Ortssilhouetten;
 7. archäologische Verdachtsflächen.
- Immaterielle, geistige und/oder ideelle, mittelbar wahrnehmbare Komponenten:
 1. Sichtachsen, traditionelle Blick- und Wegebeziehungen;
 2. raumbezogene Traditionen und Brauchtümer;
 3. inhaltlich-thematische Zusammenhänge, z. B. eine Wallfahrtskirche mit den dorthin führenden Wegebeziehungen.

Diese Auffassung wird den nachfolgenden Betrachtungen zugrunde gelegt.

²⁶⁷ So z.B. die Definition in § 3 des Denkmalschutzgesetzes des Landes Rheinland-Pfalz (GVBl. 1978, 159). In anderen Landesdenkmalschutzgesetzen finden sich vergleichbare Definitionen.

²⁶⁸ So z.B. ausdrücklich § 3 Abs. 2 Niedersächsisches Denkmalschutzgesetz; vgl. zudem *Appold*, in: Hoppe/Beckmann (Hrsg.) (2012), § 2 UVPG Rn. 40.

²⁶⁹ *Jessel/Tobias* (2002), S. 239.

Mögliche Auswirkungen bei bestimmungsgemäßem Betrieb

Nachfolgend werden die Wirkfaktoren betrachtet, die voraussichtlich beim bestimmungsgemäßen Betrieb Auswirkungen auf Kulturgüter haben können.

Auswirkungen auf Kulturgüter sind sowohl im terrestrischen wie auch im marinen Bereich möglich. Insbesondere bekannte und unbekannte Bodendenkmale (Wracks, Siedlungsreste untergegangener Landteile) sind vor allem im küstennahen marinen Bereich vorhanden. Auf Unterschiede im terrestrischen und marinen Bereich wird an den entsprechenden Stellen hingewiesen. Um Wiederholungen zu vermeiden erfolgt jedoch keine durchgehend getrennte Auswirkungsanalyse.

Flächeninanspruchnahme, Boden- bzw. Sedimentverluste

Geht man davon aus, dass im Sinne der Vermeidung die Injektionsbohrung(en) und die Übertageeinrichtungen einschließlich der Logistikflächen so angeordnet werden,

- dass Flächen mit Objekten des Denkmalschutzes einschließlich der bekannten Bodendenkmale sowie Archivböden nicht in Anspruch genommen werden, sondern vielmehr ein Abstand dazu eingehalten wird und die Zugänglichkeit nicht eingeschränkt wird;
- dass archäologische Verdachtsflächen entweder vorher prospektiert oder aber nicht in Anspruch genommen werden;
- dass Flächen in kulturhistorisch bedeutsamen Landschaften oder Landschaftsteilen bzw. mit entsprechenden Landschaftselementen nicht in Anspruch genommen werden;
- dass Flächen in Orten und in der Nähe markanter Ortssilhouetten nicht in Anspruch genommen werden,
- dass Flächen, die zu traditionellen Blick- und Wegachsen gehören, nicht in Anspruch genommen werden;
- dass Flächen mit Bedeutung für Traditionen und Brauchtümer nicht in Anspruch genommen werden;

dann können Konflikte und erhebliche Beeinträchtigungen durch Flächeninanspruchnahmen vermieden werden. Werden entsprechende Vermeidungsmaßnahmen nicht umgesetzt, kann es zu erheblichen Beeinträchtigungen kommen.

Problematisch könnten in der Überwachungsphase Messnetze sein, die sich in einem regelmäßigen Raster über größere Gebiete erstrecken und in den Bereich größerer kulturhistorisch bedeutsamer Landschaften und Landschaftsteile fallen. Ist es aufgrund der Ausdehnung des Kulturguts und des erforderlichen Rasters für das Monitoring nicht möglich, die Nutzung von Flächen mit Bedeutung für das Kulturgut zu vermeiden, dann hängt es von Art und Dauer der Flächeninanspruchnahme ab, ob es zu Wirkungen kommt, die den Charakter und die Erlebbarkeit des betroffenen Kulturgutes erheblich beeinträchtigen. Gehen prägende Elemente verloren oder werden störende Elemente errichtet, kommt es zu Beeinträchtigungen. Nur wenn ihre Anwesenheit auf kurze Zeiträume beschränkt bleibt, sind störende Elemente eine geringfügige Beeinträchtigung.

Neben bekannten Bodendenkmalen gibt es auch bisher nicht entdeckte Bodendenkmale. Liegen sie außerhalb von archäologischen Verdachtsflächen können die oben skizzierten Maßnahmen wie Meidung der Flächen und Prospektion nicht greifen. Werden solche bisher unbekannten Bodendenkmale bei Erdarbeiten entdeckt, dann ist gegebenenfalls die Fundstätte entsprechend der Denkmalschutzgesetze unverzüglich der zuständigen Denkmalschutzbehörde zu melden und zunächst in unverändertem Zustand zu erhalten, soweit es ohne erhebliche Nachteile oder Aufwendung von Kosten geschehen kann. Auf diese Weise können Beeinträchtigungen minimiert werden.

Nicht ausgeschlossen werden kann hingegen eine unbeabsichtigte Zerstörung oder Beeinträchtigung von bisher unbekannten Bodendenkmälern durch Bohrungen oder durch Bodenverdichtung, etwa infolge des Befahrens der Fläche mit schweren Fahrzeugen.

Insgesamt lassen sich also Auswirkungen auf das Schatzgut Kulturgüter durch den Wirkfaktor Flächeninanspruchnahme bei konsequenter Umsetzung entsprechender Optimierungs-, Vermeidungs- und Minimierungsmaßnahmen weitgehend aber nicht vollständig einschränken.

Erschütterungen

Grundsätzlich können Erschütterungen sowohl zu Schäden an Objekten des Denkmalschutzes führen als auch ihre Erlebbarkeit bzw. die Erlebnisqualität einschränken. Bei denkmalgeschützten Gebäuden sind beispielsweise das Entstehen oder eine Vergrößerung von Rissen im Putz von Decken und Wänden sowie das Abreißen von Trenn- und Zwischenwänden von tragenden Wänden oder Decken möglich.²⁷⁰

Nach *Studer et al.*²⁷¹ sind Bauwerke zwar bezüglich Erschütterungen relativ unempfindlich, aber auch sie weisen darauf hin, dass trotzdem Schäden wie Risse im Verputz, der Bruch von Fensterscheiben oder Keramikplatten usw. auftreten können. Mit Schäden an der Tragstruktur ist aber nach ihrer Einschätzung nur bei sehr starken Erschütterungen zu rechnen. Letztlich hängen die Schäden einerseits von der Erschütterung (Intensität, Frequenzinhalt, Dauer etc.) und andererseits vom Gebäude selbst (Bautyp, Baumaterialien, Ausführungsqualität etc.) ab. "Bauwerke mit stärker schwingenden Bauteilen, mit Gipsverputz, Holzbalkendecken, Kachelböden etc. sowie Bauwerke, die schlecht unterhalten oder deren Bausubstanz schlecht ist, reagieren empfindlicher auf Erschütterungen als Bauwerke, die diese Eigenschaften nicht aufweisen."²⁷² Historische und geschützte Bauten werden daher in der Schweizer Richtlinie zur Beurteilung der Erschütterungseinwirkungen auf Bauwerke auch in die höchste Empfindlichkeitsklasse "erhöht empfindlich" eingestuft. Zu dieser Klasse gehören auch alte Bleikabel und alte Gussleitungen.²⁷³

²⁷⁰ Vgl. *Lai* (2000), S. 3.

²⁷¹ Vgl. *Studer/Laue/Koller* (2007), S. 154.

²⁷² Vgl. *Studer/Laue/Koller* (2007), S. 156.

²⁷³ Vgl. *Studer/Laue/Koller* (2007), S. 157.

Neben den bereits in Kapitel 3.1.4 „Erschütterungen“ angesprochenen Vermeidungsmaßnahmen (wie Optimierung von Verfahren und Maschinen sowie Einhaltung von ausreichendem Abstand) sind gegebenenfalls auch Maßnahmen zur Erschütterungsminderung auf Seiten der Kulturdenkmale möglich. Infrage kommt das Anbringen von Versteifungen oder Zusatzmassen, die die Schwingungseigenschaften verändern und gegebenenfalls resonanzbedingte Erschütterungen vermeiden oder mindern.²⁷⁴ Entsprechende Maßnahmen sind aber nicht nur aufwendig, sondern bei Kulturgütern ist auch die Frage zu klären, ob sie mit dem Schutzstatus vereinbar sind.

Voraussichtlich lassen sich erhebliche Auswirkungen auf Kulturgüter durch vorhaben-bedingte Erschütterungen weitgehend einschränken aber einzelne Schäden nicht gänzlich ausschließen. Strukturelle Schäden an denkmalgeschützten Bauwerken sind nicht zu erwarten. Auch Beeinträchtigungen von Bodendenkmalen sind durch vorhabenbedingte Erschütterungen nicht zu erwarten.

Akustische und optische Emissionen

Akustische und optische Emissionen sind grundsätzlich geeignet die Erlebbarkeit und die Erlebnisqualität von Kulturgütern herabzusetzen.²⁷⁵ Werden jedoch die oben bezüglich der Flächeninanspruchnahme formulierten Vermeidungsmaßnahmen umgesetzt, lassen sich auch erhebliche Beeinträchtigungen durch akustische und optische Emissionen vermeiden. Reichen die Abstände zu Kulturgütern allein nicht aus, sind zusätzlich Lärm- oder Sichtschutzmaßnahmen möglich, um die Vermeidung erheblicher Beeinträchtigungen von Kulturgütern zu gewährleisten.

Stoffliche Emissionen

Nach dem gegenwärtigen Kenntnisstand ist nicht zu erwarten, dass stoffliche Emissionen ein Ausmaß erreichen, das zu erheblichen vorhabenbedingten Auswirkungen auf Kulturgüter wie Garten- und Baudenkmale oder die für deren Erscheinungsbild bedeutsame Umgebung durch Veränderung der Vegetation oder Schädigung der Bausubstanz führt.

Sedimentverwirbelungen

Schiffsverkehr im Flachwasser oder die Errichtung von Strömungshindernissen können durch Sedimentverlagerungen dazu führen, dass archäologische Fundstätten freigespült werden und die Fundstücke etwa durch Sauerstoffzutritt beschädigt oder zerstört werden. Entsprechende Auswirkungen lassen sich bei bekannten Fundstätten durch Meidung der Flächen, Schutzmaßnahmen oder gegebenenfalls eine archäologische Sicherung vermeiden. Bei bisher unbekannten Fundstätten sind entsprechende Schädigungen jedoch nicht auszuschließen.

²⁷⁴ Vgl. *Lai* (2000), S. 18.

²⁷⁵ Vgl. beispielsweise *Jessel/Tobias* (2002), S. 242 oder *Scholle* (1996), S. 68.

Insgesamt lassen sich erhebliche Auswirkungen auf Kulturgüter durch diesen Wirkfaktor bei konsequenter Umsetzung entsprechender Optimierungs-, Vermeidungs- und Minimierungsmaßnahmen weitgehend ausschließen.

Geringe Veränderung des Reliefs durch großflächige Landhebungen und -senkungen

Geringe, langsam und großflächig gleichmäßig verlaufende Landhebungen und nachfolgende entsprechende Landsenkungen führen voraussichtlich nicht zu erheblichen Auswirkungen auf Kulturgüter, können aber ohne standortspezifische Gutachten auch nicht ausgeschlossen werden.

Zwar erwarten Großmann et al.²⁷⁶ bei den bestimmungsgemäßen, großflächig gleichmäßigen Landhebungen und -senkungen nur geringe Auswirkungen auf Grundwasserstände und -ströme, schließen Änderungen aber auch nicht ganz aus. Auswirkungen auf Bodendenkmale oder kulturhistorisch bedeutsame Landschaftsbestandteile, wie die in Kapitel 3.2.7 „Größere Veränderung des Reliefs durch stärkere Landhebungen und -senkungen“ für nicht bestimmungsgemäße größere Landhebungen skizzierten, sind daher voraussichtlich nicht oder nur in Einzelfällen zu erwarten, können aber nicht grundsätzlich ausgeschlossen werden.

Schäden an der Tragstruktur von denkmalgeschützten Gebäuden sind nicht zu erwarten, allerdings sind kleinere Schäden wie Risse im Verputz, der Bruch von Fensterscheiben oder Keramikplatten usw. nicht ausgeschlossen.

Wie bereits in Kapitel 3.2.2 „Geringe Veränderungen des Reliefs durch großflächige Landhebungen und -senkungen“ erläutert, sind standort- und vorhabenspezifische Modellierungen und Gutachten erforderlich, um jeweils eine ortsspezifische Obergrenze der Landhebungen und -senkungen unter Berücksichtigung der Erfordernisse zum Schutz der verschiedenen Schutzgüter wie Kultur- und sonstige Sachgüter, Wasser und Vegetation zu ermitteln. Werden diese bei der Festlegung von Speichermengen und Einspeicherraten beachtet, dann können für den bestimmungsgemäßen Betrieb erhebliche Auswirkungen auf Kulturgüter durch den Wirkfaktor Veränderung des Reliefs weitgehend ausgeschlossen werden.

Mikrobeben durch erhöhte Seismizität

Mikrobeben schränken weder die Erlebbarkeit noch die Erlebnisqualität von Kulturgütern ein. Erhebliche Auswirkungen auf das Schutzgut Kulturgüter durch Mikrobeben infolge einer induzierten erhöhten Seismizität sind also nicht zu erwarten.

Mögliche Auswirkungen des nicht bestimmungsgemäßen Betriebs

Nachfolgend werden die Wirkfaktoren betrachtet, die beim nicht bestimmungsgemäßen Betrieb Auswirkungen auf Kulturgüter haben können. Das Ausmaß der möglichen Auswirkungen hängt von der Art der Abweichung vom bestimmungsgemäßen Betrieb und der Intensität der damit verbundenen Wirkfaktoren ab.

²⁷⁶ Großmann et al. (2011a), S. 31.

Auch die Wirkfaktoren des nicht bestimmungsgemäßen Betriebs können sich sowohl im terrestrischen wie auch im marinen Bereich auf Kulturgüter auswirken. Eine getrennte Auswirkungsanalyse ist daher nicht erforderlich. Da es sich bei den Kulturgüter des marinen Bereichs überwiegend um Bodendenkmale handelt, sind hier vor allem Auswirkungen auf diese relevant.

Größere Veränderung des Reliefs durch stärkere Landhebungen und -senkungen

Landhebungen und Landsenkungen, die nicht gering sind und nicht langsam und großflächig gleichmäßig verlaufen, können zu Schäden an Kulturgütern führen.

Denkbar sind sowohl Hebungen und Senkungen größeren Ausmaßes als auch vertikale Relativbewegung. Aus dem Untertagebergbau ist bekannt, dass Bergsenkungen Gebäude und andere Sachwerte erheblich schädigen, ihre Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit beeinträchtigen können. Bergsenkungen verursachen Schieflagen und Deformationen, die durch Zerrungen und Pressungen zu Schäden an technischen Anlagen führen können.²⁷⁷ Entsprechende Wirkungen sind auch durch größere und ungleichmäßige Landhebungen zu erwarten. Abbildung 5 gibt einen Überblick über mögliche Schäden an Gebäuden und Außenanlagen. Sind Baudenkmale betroffen, dann sind erhebliche Auswirkungen auf das Schutzgut Kulturgüter möglich.

²⁷⁷ *Kronimus et al.* (2011), S. 128.

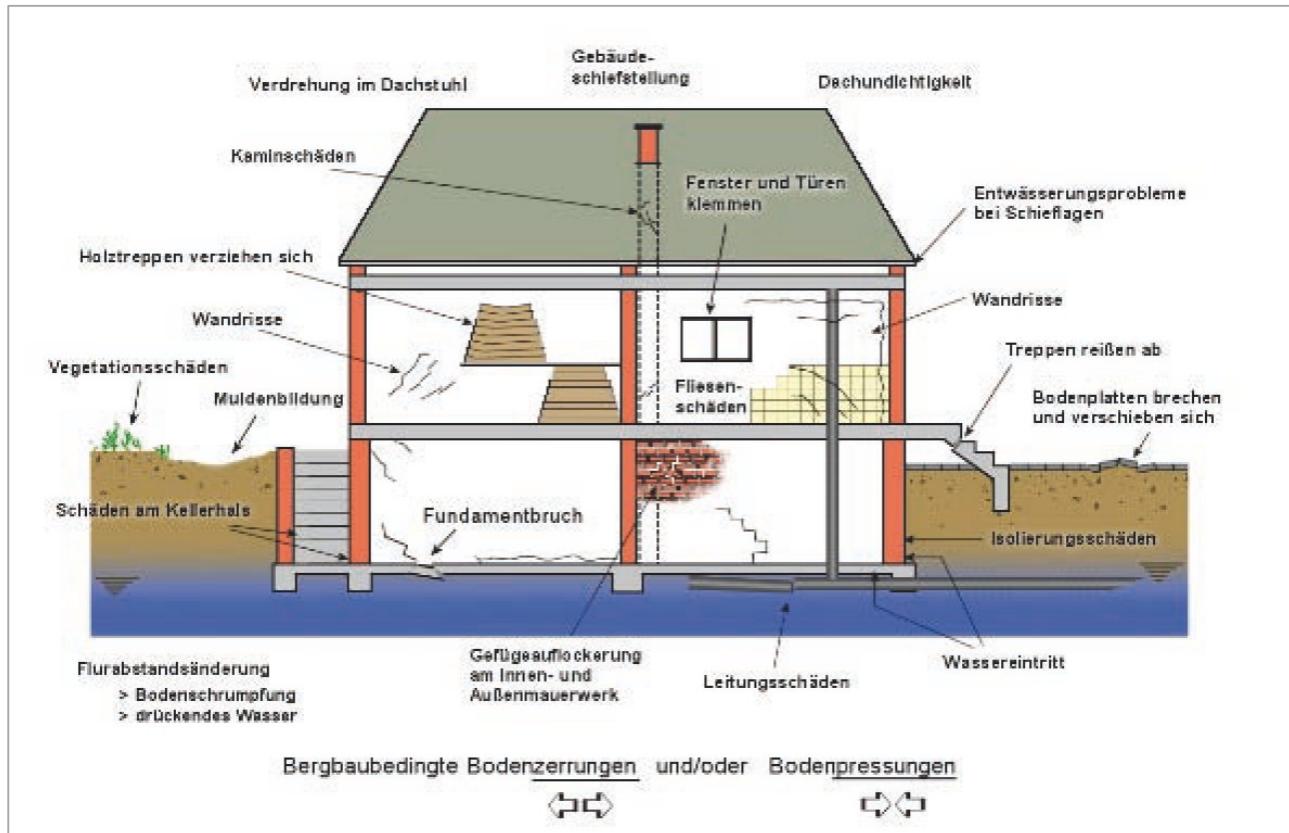


Abbildung 5: Übersicht über mögliche Schäden an Gebäuden und Außenanlagen wie sie durch bergbauliche Bodenbewegungen auftreten können²⁷⁸

Sind Landhebungen mit einem relativen Absinken des Grundwasserspiegels verbunden, dann kann dies bei Moorböden zu einer verstärkten Mineralisierung und entsprechenden Substanzerlusten führen. Das kann wiederum einerseits eine Beeinträchtigung von schutzwürdigen Archivböden zur Folge haben und andererseits zu Auswirkungen auf geschützte oder schutzwürdige Gebäude führen, wenn ihnen der Grund auf dem sie stehen entzogen wird oder zwischen Bodenoberfläche und aufgeständerter Gebäudebasis ein Hohlraum entsteht.

Darüber hinaus können größere Reliefveränderungen Böden empfindlicher gegen Erosion durch Niederschläge machen, und ein sinkender Grundwasserspiegel kann zu einer verstärkten Austrocknung der Böden und einer steigenden Empfindlichkeit gegenüber der Erosion durch Wind führen. Beides kann gegebenenfalls einerseits Archivböden beeinträchtigen und andererseits zur Folge haben, dass bisher im Boden geschützte Bodendenkmale freigelegt werden.

Darüber hinaus kann das relative Absinken des Grundwasserspiegels auch zu Auswirkungen auf Bodendenkmale führen, wenn empfindliche Funde dauerhaft über den Grundwasserspiegel gehoben werden. Insbesondere organische Bestandteile wie Kleidung, Pflanzenreste, Samen

²⁷⁸ *Ivbi* (2010), S. 2.

usw. vergehen, wenn sie aus dem wassergesättigten Bereich herausgehoben werden. In den nordwestdeutschen Marschgebieten könnte dies insbesondere im Bereich der Wurten und Warften von Bedeutung sein, die abgesehen von den niedrigen pH-Werten durch die hohen Wasserstände gute Konservierungsbedingungen bieten.²⁷⁹

Größere Reliefveränderungen könnten nicht nur erhebliche Auswirkungen auf Grundwasserstände sondern auch auf die Vorflutverhältnisse haben. Sowohl steigende als auch fallende Grund- oder Oberflächenwasserspiegel könnten Archivböden beeinträchtigen und den Charakter von Flächen stark verändern. Dies könnte dazu führen, dass das Umfeld von geschützten und schutzwürdigen Bauwerken oder markante Ortsränder sich verändern. Im Extremfall könnte es – ohne geeignete und aufwendige Gegenmaßnahmen – nicht nur zum Verlust von kulturhistorisch bedeutsamen Landschaftsteilen und -elementen führen, sondern auch den Charakter kulturhistorisch bedeutsamer Landschaften verändern. Traditionelle Wegebeziehungen könnten durch Vernässung oder Überstauung von Flächen unterbrochen werden, sofern nicht Gegenmaßnahmen ergriffen werden.

Größere Landhebungen und -senkungen können Kulturgüter also in vielfältiger Weise direkt und indirekt beeinträchtigen.

Größere Beben durch erhöhte Seismizität

Bei Beben größerer Magnitude, erreichen die Auswirkungen teilweise bis flächendeckend katastrophale Ausmaße, nur wenige oder keine Gebäude bleiben stehen, im Boden reißen Spalten auf, Gas- und Wasserleitungen brechen in großen Mengen, vernichtende Flutwellen sind möglich.

Insgesamt finden sich jedoch unterschiedliche Angaben dazu, bei welcher Magnitude Schäden zu erwarten sind. So berichten Kronimus et al.²⁸⁰ einerseits von einem Beben der Magnitude 3,4 durch Geothermiebohrungen in Basel (2006), das zu mehr als 2.000 Schadensmeldungen und einem Gesamtschaden in Höhe von mehreren Millionen Euro geführt hat. Andererseits erklären sie, dass erste Schäden an der Oberfläche erst bei Beben der Magnitude 6 auftreten.²⁸¹ Tatsächlich gibt es auch Beispiele für Beben mit einer verhältnismäßig geringen Magnitude von 5,8 bzw. 6,0 aber verheerenden Wirkungen.²⁸²

Sofern es bei nicht bestimmungsgemäßen Betriebszuständen nur zu Beben in der bisher beobachteten Größenordnung (also mit einer Magnitude bis zu 4,5) kommt, sind wahrscheinlich allenfalls geringfügige Schäden an Kulturdenkmälern zu erwarten. Nach vorliegendem Kenntnisstand sind aber auch Beben größerer Magnitude und Intensität nicht

²⁷⁹ Persönliche Mitteilung von Dr. Kegler, Archäologe bei der Ostfriesischen Landschaft, vom 21.05.2012.

²⁸⁰ *Kronimus et al. (2011)*, S. 113.

²⁸¹ *Kronimus et al. (2011)*, S. 123.

²⁸² Ein Beben der Magnitude 5,8 forderte 1960 in Agadir 14.000 und ein Beben der Magnitude 6,0 forderte 1964 in Skopje 1.600 Tote (vgl. <http://www.hlug.de/start/geologie/erdbeben/erdbebengefaehrdung/magnitude-und-intensitaet.html>, Stand: 26.06.2012).

auszuschließen. Sie könnten zu größeren Schäden führen, Baudenkmale einstürzen lassen oder im küstennahen Bereich durch Flutwellen, im Gebirge durch Erdrutsche oder Lawinen zerstören.

Auswirkungen auf Bodendenkmale, kulturhistorisch bedeutsame Landschaftselemente und -teile oder Landschaften sind bei Beben der bisher beobachteten Intensität nicht zu erwarten, bei Beben der Magnitude 7 oder stärker aber nicht auszuschließen.

Aufstieg von salzigem Formationswasser

Bei nicht bestimmungsgemäßen Betriebszuständen aus tieferen Schichten aufsteigendes Formationswasser kann Auswirkungen auf Kulturgüter haben.

Es ist zu erwarten, dass sich die Ionenzusammensetzung und die chemischen Eigenschaften (wie Reaktivität, Redoxpotenzial und pH-Wert) des aufsteigenden Formationswassers deutlich vom vorhandenen Grundwasser bzw. Bodenwasser unterscheiden. Werden diese Unterschiede nicht abgepuffert, dann verändert sich für betroffene Bodendenkmale das chemische Milieu. Das kann dazu führen, dass ihr Erhaltungszustand verändert wird. Steigt das Redoxpotenzial (nimmt also die Oxidationskraft des Bodens zu), dann kann das zur Zersetzung von organischen Bestandteilen (Kleidung, Leder, Pflanzenreste, Samen etc.) der im Boden befindlichen Funde führen. Ein sinkender pH-Wert führt dazu, dass kalkhaltige Bestandteile wie Knochen und Zähne angegriffen werden.

Auch im Boden befindliche Teile von denkmalgeschützten Bauwerken, wie Gründungen, Fundamente, Keller oder Leitungen könnten angegriffen werden, wenn das aufgestiegene Formationswasser in dieser Hinsicht reaktiver ist (also beispielsweise betonangreifender), als das vorher vorhandene Grund- oder Bodenwasser.

Darüber hinaus könnten Archivböden durch eine Versalzung geschädigt werden.

Steigt salzhaltiges Formationswasser bis in den durchwurzelten Bereich auf, dann wirkt sich dies auf die Vegetation der betroffenen Flächen aus (vgl. Kap. 3.2.2 „Aufstieg von salzigem Formationswasser“). Auf diese Weise könnte das Umfeld von geschützten oder schutzwürdigen Bauwerken ebenso verändert werden wie markante, beispielsweise durch Bäume geprägte Ortsränder. Kulturhistorisch bedeutsame Landschaftsbestandteile und -elemente könnten verloren gehen und im Extremfall bedeutsame Landschaften ihren Charakter nachhaltig verändern.

Freisetzung von CO₂ durch Leckage aus dem Speicher oder aus Übertragungsanlagen

CO₂-Leckagen können auf verschiedene Weise zur Beeinträchtigung von Kulturgütern führen.

Kohlendioxid bildet in Wasser eine schwachsaure Lösung. Gelangt also CO₂ in gelöster Form in den Boden, dann kann dies zu sinkenden pH-Werten führen, sofern die Pufferkapazität des Bodens nicht ausreicht, um diesen Effekt auszugleichen. Archivböden könnten dadurch beeinträchtigt werden. Ist der Boden nicht vorher bereits sauer, führt ein sinkender pH-Wert außerdem dazu, dass kalkhaltige Bestandteile von Bodendenkmälern, wie Knochen und Zähne, angegriffen und aufgelöst werden können.

Die schwachsaure Lösung von CO₂ in Wasser kann bei im Boden befindlichen Teilen von denkmalgeschützten und schutzwürdigen Objekten auch zur Korrosion bei Metallen und

Zement führen. Besonders Portland-basierte Zemente neigen zur Karbonisierung und infolge dessen zur Auslaugung und Zunahme der Porosität und Permeabilität.²⁸³

Denkbar ist auch, dass eine massive Freisetzung von gasförmigem CO₂ etwa bei einem Blowout (vorübergehend) zu einem saureren Niederschlag führt, der empfindliche denkmalgeschützte bzw. schutzwürdige Objekte angreift und deren Schädigung fördert.

Denkbar sind außerdem Auswirkungen der CO₂-Freisetzung auf die Vegetation wie beispielsweise das Absterben von Bäumen, die dazu führen, dass sich die Umgebung von Baudenkmälern oder schutzwürdigen Bauwerken und Ensembles verändert, dass sich markante, von Gehölzen geprägte Ortssilhouetten verändern, dass kulturhistorisch bedeutsame Landschaftsteile und -elemente verloren gehen oder im Extremfall sogar bedeutsame Landschaften verändert werden.

Freisetzung von Begleitstoffen durch Leckage aus dem Speicher oder aus Überageanlagen

Zu möglichen Auswirkungen Freisetzung von Begleitstoffen finden sich in der CCS-Literatur kaum Angaben. Schwefel- und Stickoxide, insbesondere H₂SO₄ und HNO₃ bilden jedoch in Wasser deutlich stärkere Säuren als CO₂, sind also geeignet die oben genannten Säurewirkungen der CO₂-Leckage auf Kulturgüter noch zu verstärken (vgl. Kap. 3.2.7 „Freisetzung von CO₂ durch Leckage aus dem Speicher oder aus Überageanlagen“). Auch Wirkungen auf für das Schutzgut bedeutsame Vegetationsbestände können verstärkt werden (vgl. Kap. 3.2.7 „Freisetzung von CO₂ durch Leckage aus dem Speicher oder aus Überageanlagen“). Oxidierte Stickstoff- und Schwefelverbindungen haben ein hohes Redoxpotenzial, sind also geeignet organisches Material von Bodendenkmälern durch Oxidation zu zersetzen. Die Freisetzung von Begleitstoffen kann also zur Beeinträchtigung von Kulturgütern führen bzw. beitragen.

3.2.8 Sonstige Sachgüter

Definition

Das Schutzgut „sonstige Sachgüter“ wird in den Begriffsbestimmungen des § 3 KSpG zwar unter Nr. 14 als Bestandteil des Begriffs „Umwelt“ aufgeführt. Das KSpG enthält jedoch keine eigenständige Begriffsbestimmung für das Schutzgut „sonstige Sachgüter“. Auch der weitere Wortlaut und die Gesetzesystematik des KSpG lassen keine Rückschlüsse auf das Verständnis von diesem Schutzgut zu. Daher ist auf allgemeine Definitionen und das Begriffsverständnis in anderen Gesetzen zurückzugreifen (siehe zur Übertragbarkeit des Begriffsverständnisses aus anderen Gesetzen bzw. Rechtsbereichen und zur weiteren Begründung die Ausführungen unter 3.2.1.).

Nach dem immissionsschutz- und UVP-rechtlichen Begriffsverständnis sind (sonstige) Sachgüter alle Sachen, d.h. alle körperlichen Gegenstände, unabhängig von ihrem Nutzen, ihrem

²⁸³ Vgl. *Kronimus et al.* (2011), S. 101.

Ursprung (natürlich oder künstlich geschaffen) und ihrem rechtlichen Charakter (öffentliche oder privatrechtlich, herrenlose Sachen).²⁸⁴

Diese Definition ist jedoch sehr weit, da damit alles räumlich Abgrenzbare ein Sachgut ist. Tatsächlich erfolgt der Umgang mit diesem Schutzgut in der Praxis sehr unterschiedlich, allgemein anerkannte Abgrenzungen und Methoden liegen nicht vor. Einen methodischen Vorschlag zum Umgang mit dem Schutzgut "sonstige Sachgüter" in der UVP macht Weiland²⁸⁵. Er versteht unter dem Begriff "Sachgüter" bauliche Anlagen jeder Art einschließlich der zugehörigen Nebenflächen und unterscheidet verschiedene "Sachguttypen", indem er Flächen zusammenfasst, die sich durch ähnliche bauliche Anlagen auszeichnen und dabei auch Flächen einbezieht, die zu diesen in einer engen funktionalen und nutzungsbezogenen Verbindung stehen. Insbesondere nennt er dabei folgende Sachguttypen:

- Bereiche mit Wohngebäuden eines bestimmten Typs einschließlich zugehöriger Gärten, Pkw-Stellplätze etc.;
- Bereiche mit öffentlichen, sozialen oder kulturellen Einrichtungen (Gebäude und Außenanlagen);
- Bereiche mit gewerblich oder industriell genutzten Gebäuden und Anlagen einschließlich Zuwegungen, Stell- und Lagerflächen etc.;
- Öffentliche Grünflächen, Anlagen für Freizeit und Erholung einschließlich des Wegenetzes und nicht baulicher Bestandteile;
- Anlagen der Ver- und Entsorgung;
- Hochwasserschutzeinrichtungen und
- Verkehrswege und -anlagen, Wegesysteme.

Dieser methodische Vorschlag wird den nachfolgenden Betrachtungen zugrunde gelegt. Nutzungen von Naturgütern bleiben bei dieser Methodik allerdings unberücksichtigt. Angesichts der ermittelten vorhabenbedingten Wirkfaktoren mit zum Teil großflächigen Wirkungen erscheint dies für die zu untersuchende CO₂-Speicherung im Untergrund zu eingeschränkt. In die Betrachtungen werden daher auch unbebaute, land- und forstwirtschaftlich genutzte oder ungenutzte Flächen als immobile Sachgüter einbezogen.

Mögliche Auswirkungen bei bestimmungsgemäßem Betrieb

Nachfolgend werden die Wirkfaktoren betrachtet, die voraussichtlich beim bestimmungsgemäßen Betrieb Auswirkungen auf sonstige Sachgüter haben können.

Auswirkungen auf sonstige Sachgüter sind sowohl im terrestrischen, wie auch im marinen Bereich möglich, jedoch sind im marinen Bereich die Sachgüter (wie Offshore-Installationen,

²⁸⁴ Peters/Balla (2006), § 2 UVPG Rn. 19; Appold, in: Hoppe/Beckmann (Hrsg.) (2012), § 2 UVPG Rn. 40; Jarass (2010), § 1 BImSchG Rn. 3; Dietlein, in: Landmann/Rohmer (2011), § 1 BImSchG Rn. 13.

²⁸⁵ Weiland (1995), S. 237.

Rohrleitungen, Seekabel, Seezeichen, Schiffs Routen und Fischereigründe) weniger zahlreich. Da die Parameter für die Bewertung des Schutz-gutes, die Indikatoren für deren Beeinträchtigung und die Art der Wirkungen des Vorhabens im terrestrischen und marinen Bereich vergleichbar sind, ist eine getrennte Auswirkungsanalyse nicht erforderlich.

Flächeninanspruchnahme, Boden- bzw. Sedimentverluste

Geht man davon aus, dass die Injektionsbohrung(en) und die Über Tageeinrichtungen einschließlich der Logistikflächen so angeordnet werden,

- dass Bereiche mit Wohngebäuden, Bereiche mit öffentlichen, sozialen und kulturellen Einrichtungen (Gebäude und Außenanlagen), Bereiche mit öffentlichen Grünflächen, Anlagen für Freizeit und Erholung sowie Bereiche mit gewerblich oder industriell genutzten Gebäuden und Anlagen jeweils einschließlich der Zuwegungen etc. nicht in Anspruch genommen werden, sondern vielmehr ein Abstand dazu eingehalten wird;
- dass Anlagen der Ver- und Entsorgung und Anlagen des Hochwasserschutzes sowie Verkehrswege und -anlagen nicht in Anspruch genommen werden, oder aber gegebenenfalls so angepasst werden, dass die volle Funktionsfähigkeit auch weiterhin gewährleistet wird;
- dass keine Flächen mit hohem natürlichen Ertragspotenzial in Anspruch genommen werden;

dann können Konflikte und erhebliche Beeinträchtigungen dieser Sachgüter durch diese anlagen-, bau- und rückbaubedingte Flächeninanspruchnahme vermieden werden.

Betroffen von der Flächeninanspruchnahme wären dann voraussichtlich unbebaute, land- und forstwirtschaftlich genutzte oder ungenutzte Flächen sowie Meeresbodenflächen.

Werden für das Monitoring Messnetze eingerichtet, die in einem regelmäßigen Raster über größere Gebiete verteilt werden, wird sich die untersuchungs- und monitoringbedingte Flächeninanspruchnahme vermutlich nicht auf land- und forstwirtschaftlich genutzte oder ungenutzte Flächen sowie Meeresflächen beschränken lassen. Konflikte lassen sich durch Optimierung der Messnetze und Maßnahmen zur Gewährleistung der Funktionsfähigkeit der betroffenen Sachgüter mindern.

Insgesamt sind Auswirkungen auf das Schutzgut sonstige Sachgüter nicht vollständig vermeidbar, insbesondere wenn man die Nutzung von Naturgütern und damit alle Flächen in die Betrachtung einbezieht. Ggf. sind Schadensersatzansprüche mit den Eigentümern zu regeln.

Erschütterungen

Die Antwort eines Gebäudes auf die eindringenden Erschütterungen ist von seiner Eigenfrequenzen und der seiner Bauteile abhängig. Auch die Übertragung innerhalb eines Gebäudes hängt stark von den Eigenschaften des Gebäudes ab. Bei einem massiven Mauerwerk

ist meist mit zunehmender Höhe über dem Boden eine Abnahme der Erschütterungen festzustellen.²⁸⁶

Grundsätzlich können Erschütterungen sowohl bei Bauwerken als auch bei anderen Sachgütern, wie z.B. Versorgungsanlagen oder Geräten zu Beeinträchtigungen führen. Bei Gebäuden sind beispielsweise das Entstehen oder eine Vergrößerung von Rissen im Putz von Decken und Wänden sowie das Abreißen von Trenn- und Zwischenwänden von tragenden Wänden oder Decken möglich.²⁸⁷ Nach *Studer et al.*²⁸⁸ sind Bauwerke zwar bezüglich Erschütterungen relativ unempfindlich, aber auch sie weisen darauf hin, dass trotzdem Schäden wie Risse im Verputz, der Bruch von Fensterscheiben oder Keramikplatten usw. auftreten können. Mit Schäden an der Tragstruktur ist aber nach ihrer Einschätzung nur bei sehr starken Erschütterungen zu rechnen. Letztlich hängen die Schäden einerseits von der Erschütterung (Intensität, Frequenzinhalt, Dauer etc.) und andererseits vom Gebäude selbst (Bautyp, Baumaterialien, Ausführungsqualität etc.) ab. "Bauwerke mit starker schwingenden Bauteilen, mit Gipsverputz, Holzbalkendecken, Kachelböden etc. sowie Bauwerke, die schlecht unterhalten werden oder deren Bausubstanz schlecht ist, reagieren empfindlicher auf Erschütterungen als Bauwerke, die diese Eigenschaften nicht aufweisen."²⁸⁹ Die Deutsche Norm Erschütterungen im Bauwesen Teil 3: Einwirkungen auf bauliche Anlagen (DIN4150-3, Februar 1999) gibt Anhaltswerte für die Schwinggeschwindigkeit zur Beurteilung der Wirkung von kurzzeitigen und von Dauererschütterungen. Dabei weist sie auch darauf hin, dass es Bauten gibt, die besonders empfindlich gegenüber Erschütterungen sind. Die Schweizer Richtlinie zur Beurteilung der Erschütterungseinwirkungen auf Gebäude (SN 640 312 a) klassifiziert Bauwerke bezüglich ihrer Empfindlichkeit gegen Erschütterungen (vgl. Tabelle 6). Vorausgesetzt, sie sind nach den allgemeinen Regeln der Baukunde gebaut und sachgerecht unterhalten, sind die meisten Hochbauten als normal empfindlich eingestuft, die meisten Tiefbauten als wenig empfindlich.²⁹⁰

Aber Bauwerke sind nicht die einzigen Sachgüter, die beeinträchtigt werden könnten. Stationäre Geräte wie z. B. Computer, Elektronenmikroskope, Waagen etc. können durch Erschütterungen beschädigt werden oder ihr einwandfreies Funktionieren kann verhindert werden. Ihre Empfindlichkeit ist sehr unterschiedlich. Besonders empfindlich sind beispielsweise Fertigungsanlagen für mikroelektronische Bauteile, Präzisionsmessgeräte und Analysegeräte in Forschungseinrichtungen oder für die Qualitätssicherung von Produkten. Im Gegensatz zu stationären sind transportable Geräte im Hinblick auf Beschädigung und Betrieb in der Regel unproblematisch.²⁹¹

²⁸⁶ Vgl. *Studer/Laue/Koller* (2007), S. 150.

²⁸⁷ Vgl. *Lai* (2000), S. 3.

²⁸⁸ Vgl. *Studer/Laue/Koller* (2007), S. 154.

²⁸⁹ Vgl. *Studer/Laue/Koller* (2007), S. 156.

²⁹⁰ Vgl. *Studer/Laue/Koller* (2007), S. 156–157.

²⁹¹ Vgl. *Studer/Laue/Koller* (2007), S. 163.

Tabelle 6: Erschütterungs-Empfindlichkeitsklassen der Schweizer Richtlinie zur Beurteilung von Erschütterungseinwirkungen auf Bauwerke (SN 640 312 a).²⁹²

Empfindlichkeits- klasse	Hochbau	Tiefbau
(1) sehr wenig empfindlich		<ul style="list-style-type: none"> - Brücken in Stahlbeton oder Stahl - Stützbauwerke aus Beton, Stahlbeton oder massivem Mauerwerk - Stollen, Tunnel, Kavernen, Schächte in Festgestein oder gut verfestigtem Locker-gestein - Kran- und Maschinen-fundamente - Offen verlegte Rohrleitungen
(2) wenig empfindlich	<ul style="list-style-type: none"> - Industrie- und Gewerbegebäuden, in Stahlbeton oder Stahlkonstruktion, in der Regel ohne Mörtelverputz - Silos, Türme, Hochkamine in Massivbauweise ohne Mörtel-verputz oder Stahlkonstruktion - Gittermasten <p>→ Voraussetzung: Die Bauwerke sind nach den allgemeinen Regeln der Baukunde gebaut und sind sachgerecht unterhalten</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Kavernen, Tunnel, Schächte, Rohrleitungen in Locker-gestein - Unterirdische Parkbauten - Werkleitungen (Gas, Wasser, Kanalisation, Kabel), im Boden verlegt - Trockenmauern
(3) normal empfindlich	<ul style="list-style-type: none"> - Wohnbauten mit Mauerwerk in Beton, Stahlbeton oder künstlichen Bausteinen - Bürogebäude, Schulhäuser, Spitäler, Kirchen mit Mauerwerk oder künstlichen Bausteinen mit Mörtel-verputz <p>→ Voraussetzung: Die Gebäude sind nach den allgemeinen Regeln der Baukunde gebaut und sind sach-gerecht unterhalten</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Quellfassungen - Reservoir - Gusseisenleitungen - Kavernen, Zwischendecken und Fahrbahndecken in Tunnels - Empfindliche Kabel
(4) erhöht empfindlich	<ul style="list-style-type: none"> - Häuser mit Gips- oder Hourdis-decken - Riegelbauten - Neuerstellte und frisch renovierte Bauten der Klasse (3) - Historische und geschützte Bauten 	<ul style="list-style-type: none"> - Alte Bleikabel - Alte Gussleitungen

²⁹² Studer/Laue/Koller (2007), S. 157.

Neben den bereits in Kapitel 3.1.4 „Erschütterungen“ angesprochenen Vermeidungsmaßnahmen (wie Optimierung von Verfahren und Maschinen sowie Einhaltung von ausreichendem Abstand) sind gegebenenfalls auch Maßnahmen zur Erschütterungsminderung auf Seiten der Sachgüter möglich. Infrage kommt bei Gebäuden das Anbringen von Versteifungen oder Zusatzmassen, die die Schwingungseigenschaften verändern und gegebenenfalls resonanzbedingte Erschütterungen vermeiden oder mindern.²⁹³ Entsprechende Maßnahmen sind jedoch recht aufwendig und kommen daher voraussichtlich nur im Einzelfall in Betracht.

Voraussichtlich lassen sich erhebliche Auswirkungen auf Sachgüter durch vorhabenbedingte Erschütterungen weitgehend einschränken aber einzelne Schäden nicht gänzlich ausschließen. Strukturelle Schäden an Bauwerken sind nicht zu erwarten.

Akustische und optische Emissionen

Akustische und optische Emissionen sind grundsätzlich geeignet die Funktionsfähigkeit bzw. Nutzbarkeit bestimmter Sachgüter herabzusetzen.²⁹⁴ Werden jedoch die oben bezüglich der Flächeninanspruchnahme formulierten Prinzipien umgesetzt, lassen sich auch erhebliche Beeinträchtigungen durch akustische und optische Emissionen vermeiden. Reichen die Abstände zu empfindlichen Sachgütern allein nicht aus, sind zusätzlich Lärm- oder Sichtschutzmaßnahmen möglich, um dies zu gewährleisten.

Stoffliche Emissionen

Nach dem gegenwärtigen Kenntnisstand ist nicht zu erwarten, dass stoffliche Emissionen ein Ausmaß erreichen, das zu erheblichen vorhabenbedingten Auswirkungen auf die sonstigen Sachgüter führt.

Sedimentverwirbelungen

Schiffsverkehr im Flachwasser oder Errichtung von Strömungshindernissen können durch Sedimentverlagerungen dazu führen, dass die Standfestigkeit von Seezeichen beeinträchtigt wird oder Schifffahrtsrinnen zusedimentieren.

Insgesamt lassen sich erhebliche Auswirkungen auf die Sachgüter durch diesen Wirkfaktor bei konsequenter Umsetzung entsprechender Optimierungs-, Vermeidungs- und Minimierungsmaßnahmen weitgehend ausschließen.

Geringe Veränderung des Reliefs durch großflächige Landhebungen und -senkungen

Geringe, langsam und großflächig gleichmäßig verlaufende Landhebungen und nachfolgende entsprechende Landsenkungen führen voraussichtlich nicht zu direkten erheblichen Auswirkungen auf Bauwerke und Infrastruktur. Schäden an der Tragstruktur von Bauwerken

²⁹³ Vgl. *Lai* (2000), S. 18.

²⁹⁴ Vgl. beispielsweise *Jessel/Tobias* (2002), S. 242 oder *Scholle* (1996), S. 68.

sind nicht zu erwarten. Kleinere Schäden wie Risse im Verputz, der Bruch von Fensterscheiben oder Keramikplatten etc. können aber nicht ausgeschlossen werden.

Großmann et al.²⁹⁵ erwarten für den bestimmungsgemäßen Betrieb nur geringe Auswirkungen auf Grundwasserstände und -ströme, schließen Änderungen aber auch nicht ganz aus. Bei land- und forstwirtschaftlich genutzten Flächen sind daher Veränderungen der Bedingungen für den Pflanzenwuchs nicht zu erwarten, im Einzelfall aber auch nicht auszuschließen.

Reliefveränderungen können Vorflutverhältnisse verändern, das gilt insbesondere für Gebiete mit einem geringen Gefälle der linearen Gewässer. Hier können schon geringe Veränderungen zu einer Umkehr der Fließrichtung führen, abflusslose Senken entstehen oder der Zufluss aus dem Oberlauf unterbunden werden. Auch bei geringen und großflächig gleichmäßig verlaufenden Landhebungen sind im Einzelfall entsprechende Wirkungen im Rand- und Übergangsbereich denkbar. Sie lassen sich nur durch standort- und vorhabenspezifische Modellierungen und Gutachten ermitteln und durch die Festlegung spezifischer Obergrenzen der Landhebungen und -senkungen vermeiden.

Mikrobeben durch erhöhte Seismizität

Mikrobeben haben eine so geringe Magnitude, dass sie weder für den Menschen spürbar sind noch zu Schäden an Gebäuden, Infrastruktur oder anderen Sachgütern führen. Sie schränken daher in der Regel auch die Funktionalität und Nutzbarkeit nicht ein.

Es gibt zwar Sachgüter, die gegenüber Erschütterungen aller Art besonders empfindlich sind, beispielsweise Fertigungsanlagen für mikroelektronische Bauteile, Präzisionsmessgeräte und Analysegeräte in Forschungseinrichtungen (vgl. Kap. 3.2.8 „Erschütterungen“), jedoch ist davon auszugehen, dass diese gegenüber den auch natürlicherweise auftretenden Mikrobeben geschützt sind.

Mögliche Auswirkungen des nicht bestimmungsgemäßen Betriebs

Nachfolgend werden die Wirkfaktoren betrachtet, die beim nicht bestimmungsgemäßen Betrieb Auswirkungen auf die sonstigen Sachgüter haben können. Das Ausmaß der möglichen Auswirkungen hängt von der Art der Abweichung vom bestimmungsgemäßen Betrieb und der Intensität der damit verbundenen Wirkfaktoren ab.

Auch die Wirkfaktoren des nicht bestimmungsgemäßen Betriebs können sich sowohl im terrestrischen wie auch im marinen Bereich auf sonstige Sachgüter auswirken. Eine getrennte Auswirkungsanalyse ist daher nicht erforderlich.

Größere Veränderung des Reliefs durch stärkere Landhebungen und -senkungen

Landhebungen und Landsenkungen, die nicht gering sind und nicht langsam und großflächig gleichmäßig verlaufen, können zu Schäden an Sachgütern führen.

²⁹⁵ Großmann et al. (2011a), S. 31.

Denkbar sind sowohl Hebungen und Senkungen größeren Ausmaßes als auch vertikale Relativbewegungen. Aus dem Untertagebergbau ist bekannt, dass Bergsenkungen Gebäude und andere Sachwerte erheblich schädigen, ihre Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit beeinträchtigen können. Bergsenkungen verursachen Schieflagen und Deformationen, die durch Zerrungen und Pressungen zu Schäden an technischen Anlagen führen können.²⁹⁶ Bei technischen Anlagen kann dies auch zum Bruch sicherheitsrelevanter Komponenten wie beispielsweise Rohrleitungen oder zu Rissen in Behältern führen.²⁹⁷ Entsprechende Wirkungen sind auch durch größere und ungleichmäßige Landhebungen zu erwarten. Abbildung 5) gibt einen Überblick über mögliche Schäden an (Wohn-)Gebäuden und Außenanlagen.

Größere Landhebungen und -senkungen führen voraussichtlich auch zu vermehrten Schäden und Beeinträchtigungen an der Verkehrsinfrastruktur und ziehen einen entsprechenden Reparaturbedarf nach sich.

Sind Landhebungen mit einem relativen Absinken des Grundwasserspiegels verbunden, dann kann dies ebenfalls zu Auswirkungen auf Sachgüter führen. Bei Moorböden führt der Wasserentzug zu einer verstärkten Mineralisierung und entsprechenden Substanzerlusten. Das kann einerseits Auswirkungen auf Gebäude haben, wenn ihnen der Grund auf dem sie stehen entzogen wird bzw. zwischen Bodenoberfläche und aufgeständerter Gebäudebasis ein Hohlraum entsteht. Andererseits kann die Bodendegeneration auch zu einer Minderung der Gebrauchstauglichkeit der betroffenen Flächen für Land- und Forstwirtschaft führen.

Darüber hinaus kann ein sinkender Grundwasserspiegel ganz allgemein zu einer verstärkten Austrocknung der betroffenen Böden und einer steigenden Empfindlichkeit gegenüber der Erosion durch Wind führen. Größere Reliefveränderungen können zu stärkeren Hangneigungen und damit einer Förderung der Erosion durch Niederschläge führen. Beides kann gegebenenfalls Auswirkungen auf die Nutzbarkeit der betroffenen Naturgüter führen.

Aus dem Untertagebergbau ist bekannt, dass Bergsenkungen nicht nur zu Schäden an Sachwerten wie Gebäuden oder Rohrleitungen führen, sondern auch die Charakteristik der Landschaft durch Einflüsse auf Grundwasserstände, fließende und stehende Gewässer verändern können.²⁹⁸ Größere Reliefveränderungen könnten also auch erhebliche Auswirkungen auf die Funktion von linearen Gewässern als Vorfluter oder für die Schifffahrt haben. Ihr Gefälle könnte sich verändern oder sogar umkehren. Durch landhebungsbedingte Barrieren könnten abflusslose Senken entstehen oder Bereiche vom Zufluss aus dem Oberlauf abgeschnitten werden. Neue Gewässer könnten entstehen, bestehende austrocknen. Im Extremfall sind Vernässungen oder Überflutungen denkbar, die entsprechende Gegenmaßnahmen, wie die Errichtung von Schöpfwerken und die dauerhafte Entwässerung von Gebieten durch Pumpen erforderlich machen würden, um die bisherigen Funktionen wie Wohnen, Gewerbe, Verkehr oder Land- und Forstwirtschaft weiter aufrechterhalten zu können.

²⁹⁶ Kronimus et al. (2011), S. 128.

²⁹⁷ Kronimus et al. (2011), S. 128.

²⁹⁸ Vgl. Kronimus et al. (2011), S. 128.

Ebenso könnten Ver- und Entsorgungsleitungen für Trink-, Brauch- und Abwasser von erheblichen Veränderungen ihres Gefälles betroffen sein. Durch Zerrungen und Pressungen könnten sie beschädigt werden und brechen oder reißen. Das gilt auch für andere Versorgungsnetze, beispielsweise für Leitungen der Stromversorgung, Telekommunikation, Gasversorgung oder für Rohstoffleitungen. Schäden an letzteren könnten nicht nur zu Ausfällen bei der entsprechenden Funktion und entsprechendem Reparatur- und Anpassungsbedarf, sondern darüber hinaus auch zu Bränden, Explosionen und Schadstoffeinträgen in die Umwelt führen.

Bei größeren Landhebungen sind also erhebliche Auswirkungen auf Sachgüter möglich, die wiederum auch mit Auswirkungen auf den Menschen verbunden sind – insbesondere mit Beeinträchtigungen der Wohn- und Wohnumfeldfunktionen.

Größere Beben durch erhöhte Seismizität

Bei Beben größerer Magnitude, erreichen die Auswirkungen teilweise bis flächen-deckend katastrophale Ausmaße, nur wenige oder keine Gebäude bleiben stehen, im Boden reißen Spalten auf, Gas- und Wasserleitungen brechen in großen Mengen, vernichtende Flutwellen sind möglich.

Insgesamt finden sich jedoch unterschiedliche Angaben dazu, bei welcher Magnitude Schäden zu erwarten sind. So berichten Kronimus et al.²⁹⁹ einerseits von einem Beben der Magnitude 3,4 durch Geothermiebohrungen in Basel (2006), das zu mehr als 2.000 Schadensmeldungen und einem Gesamtschaden in Höhe von mehreren Millionen Euro geführt hat. Andererseits erklären sie, dass erste Schäden an der Oberfläche erst bei Beben der Magnitude 6 auftreten.³⁰⁰ Tatsächlich gibt es auch Beispiele für Beben mit einer verhältnismäßig geringen Magnitude von 5,8 bzw. 6,0 aber verheerenden Wirkungen.³⁰¹

Sofern es bei nicht bestimmungsgemäßen Betriebszuständen nur zu Beben in der bisher beobachteten Größenordnung (mit Magnituden bis 4,5) kommt, sind wahrscheinlich nur geringe Schäden an Sachgütern zu erwarten. Nach vorliegendem Kenntnisstand sind aber auch Beben größerer Magnitude und Intensität nicht aus-zuschließen. Sie könnten zu größeren Schäden an den Sachgütern im betroffenen Gebiet führen, Gebäude und andere Bauwerke einstürzen lassen, Ver- und Entsorgungsleitungen und -netze beschädigen. Im küstennahen Bereich könnten die Wirkungen durch Flutwellen, im Gebirge durch Erdrutsche oder Lawinen verstärkt werden.

Aufstieg von salzigem Formationswasser

²⁹⁹ Kronimus et al. (2011), S. 113.

³⁰⁰ Kronimus et al. (2011), S. 123.

³⁰¹ Ein Beben der Magnitude 5,8 forderte 1960 in Agadir 14.000 und ein Beben der Magnitude 6,0 forderte 1964 in Skopje 1.600 Tote (vgl. <http://www.hlug.de/start/geologie/erdbeben/erdbebengefaehrdung/magnitude-und-intensitaet.html>), Stand: 26.06.2012.

Bei nicht bestimmungsgemäßen Betriebszuständen aus tieferen Schichten aufsteigendes Formationswasser kann Auswirkungen auf Sachgüter haben.

Es ist zu erwarten, dass sich die Ionenzusammensetzung und die chemischen Eigenschaften (wie Reaktivität, Redoxpotenzial und pH-Wert) des aufsteigenden Formationswassers deutlich vom vorhandenen Grundwasser bzw. Bodenwasser unterscheiden. Werden diese Unterschiede nicht durch den Untergrund/Boden abgepuffert, dann verändert sich das chemische Milieu. Im Boden befindliche Sachgüter wie Gründungen, Fundamente, Keller oder Leitungen könnten angegriffen werden, etwa wenn das aufsteigende Formationswasser betonangreifender³⁰² ist als das natürliche Grundwasser. Niedrige pH-Werte greifen insbesondere kalkhaltige Bestandteile von Sachgütern an und wirken korrodierend auf Eisenmetalle.

Gelangt salzhaltiges Formationswasser in durchwurzelte Bodenschichten, dann können die betroffenen Flächen durch die Versalzung für die Land- und Forstwirtschaft unbrauchbar werden. Saline Grundwasserleiter können auch Spuren- und Schwermetalle oder sogar natürlich vorkommende radioaktive Substanzen enthalten, die noch zum Effekt der hohen Salzkonzentrationen hinzukommen und diesen verstärken. Der Aufstieg von salzigem Formationswasser kann also auch die Nutzbarkeit von Naturgütern erheblich beeinträchtigen.

Freisetzung von CO₂ durch Leckage aus dem Speicher oder aus Über Tageanlagen

CO₂-Leckagen können auf verschiedene Weise zur Beeinträchtigung von Sachgütern führen.

Kohlendioxid bildet in Wasser eine schwachsaure Lösung. Gelangt also CO₂ in gelöster Form in den Boden, dann kann dies zu sinkenden pH-Werten führen, sofern die Pufferkapazität des Bodens nicht ausreicht, um diesen Effekt auszugleichen. Die schwachsaure Lösung von CO₂ in Wasser kann bei im Boden befindlichen Sachgütern zur Korrosion bei Metallen und Zement führen. Besonders Portland-basierte Zemente neigen zur Karbonisierung und infolge dessen zur Auslaugung und Zunahme der Porosität und Permeabilität.³⁰³

Denkbar ist auch, dass eine massive Freisetzung von gasförmigem CO₂ etwa bei einem Blowout (vorübergehend) zu einem saureren Niederschlag führt, der empfindliche Bauwerke angreift und deren Schädigung fördert. Dringt das CO₂ in nicht oder schlecht gelüftete Räume ein und kann sich dort anreichern, sind auch gefährliche Folgewirkungen für den Menschen möglich (vgl. Kap. 3.2.2 „Freisetzung von CO₂ durch Leckage aus dem Speicherkomplex oder aus Über Tageanlagen“).

Denkbar sind außerdem Auswirkungen der CO₂-Freisetzung auf die land- und forstwirtschaftliche Nutzbarkeit von Flächen. Die Funktion als Vegetationsstandort kann durch die Verdrängung des Sauerstoffs in der Bodenluft und durch Bodenversauerung beeinträchtigt werden. Beobachtungen von natürlichen Analoga zeigen, dass zwar im Bereich natürlicher

³⁰² Betonangreifend wird Wasser durch seine Inhaltsstoffe (Sulfate, Kohlensäure) und Eigenschaften (pH-Wert) die den Beton, zum Beispiel durch Auslaugung des Zements, auflockern oder zerstören (vgl.

http://www.geodz.com/deu/d/betonangreifendes_Wasser, Stand: 26.06.2012).

³⁰³ Vgl. *Kronimus et al.* (2011), S. 101.

Austrittsstellen beispielsweise eine Grünlandnutzung möglich ist, dass aber in Bereichen mit sehr hohem CO₂-Ausstrom keine Pflanzen mehr wachsen.³⁰⁴ Durch die Bodenversauerung werden in der Regel Schwermetalle mobilisiert, was dazu führen kann, dass Flächen für die landwirtschaftliche Nutzung unbrauchbar werden.³⁰⁵

Freisetzung von Begleitstoffen durch Leckage aus dem Speicher oder aus Übertageanlagen

Zu möglichen Auswirkungen der Freisetzung von Begleitstoffen finden sich in der CCS-Literatur kaum Angaben. Schwefel- und Stickoxide, insbesondere H₂SO₄ und HNO₃ bilden jedoch in Wasser deutlich stärkere Säuren als CO₂, sind also geeignet die oben genannten Säurewirkungen auf Sachgüter noch zu verstärken (vgl. Kap. 3.2.7 „Freisetzung von CO₂ durch Leckage aus dem Speicher oder aus Übertageanlagen“).

Kronimus et al. weisen außerdem darauf hin, dass die Verringerung des pH-Wertes im Boden in der Regel die Mobilisierung von Schwermetallen nach sich zieht. Letztlich können in der Folge landwirtschaftlich genutzte Flächen unbrauchbar werden.³⁰⁶

4 Bewertung möglicher Umweltauswirkungen im Rahmen der Potenzialbewertung nach § 5 KSpG

4.1 Rechtliche Grundlagen, Bewertungsmaßstab

Gemäß § 5 Abs. 3 KSpG erarbeitet das Umweltbundesamt für die vom BMWi und BMU nach § 5 Abs. 1 KSpG vorzunehmende Bewertung der Speicherpotenziale in Deutschland die Grundlagen, die für eine wirksame Umweltvorsorge erforderlich sind. Hierfür gibt die Vorschrift allerdings keine näheren rechtlichen Maßstäbe vor. Lediglich die Methodik wird beispielhaft genannt, indem darauf verwiesen wird, dass insbesondere für die Erarbeitung der Grundlagen eine Ermittlung und Abschätzung der mit der vorgesehenen dauerhaften Speicherung verbundenen Umweltauswirkungen erfolgen soll.

Insofern ist zunächst von der Zielsetzung des § 5 Abs. 3 KSpG auszugehen, eine „wirksame Umweltvorsorge“ bei der Bewertung der Speicherpotenziale nach § 5 Abs. 1 KSpG zu berücksichtigen.

Der Begriff der Umweltvorsorge ist im KSpG selbst nicht definiert. Die Gesetzessystematik des KSpG lässt zwar Rückschlüsse auf die Intensität der erforderlichen Umweltvorsorge zu,³⁰⁷ gibt aber keinen Aufschluss über das Verständnis des Begriffes an sich. Daher ist auf allgemeine Definitionen und das Begriffsverständnis in anderen Umweltgesetzen zurückzugreifen. Umweltvorsorge meint generell Vorsorge zugunsten der Umwelt, der Umweltgüter und ihrer Wechselwirkungen. Der Begriff findet sich auch in § 1 UVPG. Der Gesetzgeber schließt hierin

³⁰⁴ Vgl. beispielsweise *Beaubien et al.* (2008).

³⁰⁵ *Kronimus et al.* (2011), S. 113.

³⁰⁶ *Kronimus et al.* (2011), S. 113.

³⁰⁷ Siehe hierzu sogleich.

die Abwehr von Gefahren ein, ohne das Vorliegen einer Gefahr zwingend vorauszusetzen.³⁰⁸ Während die Gefahrenabwehr dem drohenden, also wahrscheinlichen Schadenseintritt begegnet, begegnet die (Gefahren-)Vorsorge dem Schadensrisiko, also dem theoretisch möglichen Schadenseintritt unterhalb der Gefahrenschwelle. Von der Umweltvorsorge erfasst werden insbesondere

- auch (zeitlich und räumlich) entfernte Gefahren;
- Fälle geringer Eintrittswahrscheinlichkeit bis hin zum bloßen Gefahrenverdacht bzw. zur bloßen Risikovorsorge;
- Umweltbelastungen, die für sich genommen ungefährlich, aber insgesamt schädlich und technisch vermeidbar sind.³⁰⁹

Es liegt nahe, dieses Begriffsverständnis des UVPG auf den im KSpG verwendeten Begriff der Umweltvorsorge zu übertragen. Da die Planfeststellung von Kohlendioxidspeichern der UVP-Pflicht unterliegt,³¹⁰ fänden ansonsten jedenfalls im Rahmen von § 13 KSpG zwei unterschiedliche Begriffe der Umweltvorsorge Anwendung, wofür keine Rechtfertigung erkennbar ist.

Der Begriff der *wirksamen* Umweltvorsorge wird ebenfalls in § 1 UVPG verwendet; sie entspricht der Zielsetzung der in diesem Gesetz geregelten Umweltprüfungen (Umweltverträglichkeitsprüfung und Strategische Umweltprüfung). Im Recht der UVP wird die Wirksamkeit des Vorsorgeinstruments der Umweltverträglichkeitsprüfung, also deren Effektivität, vor allem dadurch sichergestellt, dass das Ergebnis der UVP bei der Zulassungsentscheidung zu berücksichtigen ist.³¹¹ Die Effektivität der Umweltvorsorge ist auch bei der Grundlagenerarbeitung nach § 5 Abs. 3 KSpG zu gewährleisten. Insofern ist bei der Erarbeitung der Grundlagen für die Bewertung der Speicherpotenziale durch das Umweltbundesamt sicherzustellen, dass sich die ermittelten Umweltauswirkungen von Speicherstätten bei der Potenzialbewertung nach § 5 Abs. 1 KSpG auch tatsächlich niederschlagen können.

Im Übrigen richtet sich das Gebot der wirksamen Umweltvorsorge auch und vor allem an BMWi und BMU, die die eigentliche Bewertung der Speicherpotenziale vorzunehmen haben: Sie dürften eine unter Umweltvorsorgegesichtspunkten eindeutig negativ zu bewertende potentielle Speicherstätte trotz geologischer Eignung grundsätzlich nicht zu den geeigneten Speicherstätten im Sinne von § 5 Abs. 1 KSpG zählen, es sei denn, dies wäre aus Gründen der Verhältnismäßigkeit erforderlich. Denn die erforderliche Umweltvorsorge wird durch das Übermaßverbot beschränkt.³¹² Im Falle des KSpG ist der Maßstab für die erforderliche

³⁰⁸ Vgl. Appold, in: Hoppe/Beckmann (Hrsg.) (2012), § 1 Rn. 26; BT-Drs. 11/3919, S. 20.

³⁰⁹ Differenzierung nach Kloepfer (2004), § 4 Rn. 18.

³¹⁰ Ziffer 15.2 der Anlage 1 zum UVPG.

³¹¹ Vgl. Appold, in: Hoppe/Beckmann (Hrsg.) (2012), § 1 Rn. 27.

³¹² Vgl. Jarass (2010), § 5 Rn. 60 ff.

Umweltvorsorge allerdings besonders streng.³¹³ Zwar legt § 5 Abs. 3 KSpG diesbezüglich keine näheren Anforderungen fest. Es ergibt sich aber aus der Gesetzesystematik, dass die Umweltvorsorge im Hinblick auf die nach dem KSpG zulassungsfähigen CO₂-Speicher besonders weitreichend ist. Gemäß § 13 Abs. 1 Nr. 4 KSpG ist Zulassungsvoraussetzung für die Planfeststellung eines CO₂-Speichers, dass

„die erforderliche Vorsorge gegen Beeinträchtigungen von Mensch und Umwelt getroffen wird, insbesondere durch Verhinderung von erheblichen Unregelmäßigkeiten; die erforderliche Vorsorge für Kohlendioxidspeicher nach § 2 Absatz 2 bestimmt sich nach dem Stand von Wissenschaft und Technik“.

(Hervorhebung durch die Verfasser.)

Die Bezugnahme auf den „Stand von Wissenschaft und Technik“ geht über das Vorsorgemaß hinaus, das aus den meisten Umweltgesetzen bekannt ist. Während beispielsweise das Bundes-Immissionsschutzgesetz Vorsorge nach dem „Stand der Technik“ und damit nach dem Entwicklungsstand fortschrittlicher und praktisch geeigneter Verfahren fordert, muss nach dem „Stand der Wissenschaft und Technik“, der sich auch im Atomgesetz findet, Vorsorge getroffen werden, die nach den neuesten wissenschaftlichen Erkenntnissen für erforderlich gehalten wird, unabhängig davon, ob sie technisch zu verwirklichen ist oder nicht.³¹⁴

Insofern können und müssen aus Vorsorgegründen an die Zulassung von Kohlendioxidspeichern wesentlich strengere Anforderungen gestellt werden als beispielsweise an immissionsschutzrechtlich genehmigungsbedürftige Anlagen. Der Grundsatz der Verhältnismäßigkeit stellt insoweit im KSpG ein im Vergleich zum BImSchG weniger starkes Korrektiv dar. Sinnvollerweise werden an die umweltfachliche Bewertung von Speicherstätten nach § 5 KSpG keine geringeren Vorsorgeanforderungen gestellt als an die im Rahmen der Planfeststellung vorzunehmende Bewertung. Der strenge Vorsorgemaßstab des § 13 Abs. 1 Nr. 4 KSpG ist daher auf § 5 Abs. 3 und Abs. 1 KSpG grundsätzlich übertragbar.

Gleichwohl können auch bei einer strengen Umweltvorsorge gemessen am Stand von Wissenschaft und Technik auf der Ebene der Potenzialbewertung nicht sämtliche Umweltrisiken ausgeschlossen werden. Dies ergibt sich zum einen bereits aus dem Grundsatz der Verhältnismäßigkeit, wonach unerhebliche Risiken hinzunehmen sind.³¹⁵ Zum anderen ist zu berücksichtigen, dass dem Umweltbundesamt auf der den Zulassungsverfahren grundsätzlich vorgelagerten Ebene der Potenzialbewertung noch keine konkreten Daten über einzelne Speicherstätten und das (prognostizierte) Speicherverhalten zur Verfügung stehen. Hinzu kommen die unterschiedlichen Ebenen der Betrachtung, oder wenn man es kartografisch sehen will, die unterschiedlichen Maßstäbe: auf der Ebene der Potenzialbewertung die bundesweite Betrachtung, bei der Zulassung die parzellenscharfe

³¹³ Zugleich dürfte die Eingriffsintensität der Potenzialanalyse gering sein, da die Analyse nicht rechtlich bindend oder sonst präjudizierend ist.

³¹⁴ Jarass (2010), § 3 Rn. 95 mit Hinweis auf BVerfGE 49, 89, 136.

³¹⁵ Vgl. auch die Legaldefinition des „erheblichen Risikos“ in Art. 3 Nr. 18 CCS-RL.

lokale bis regionale Betrachtung. Daher kann es durchaus sein, dass eine Speicherstätte im Rahmen der Potenzialbewertung nach § 5 KSpG als aus Umweltsicht grundsätzlich geeignet bewertet wird und sich später im Zulassungsverfahren herausstellt, dass sich die Speicherstätte bei konkreter Bewertung der für die Zulassung vorzulegenden Untersuchungen aus Gründen der Umweltvorsorge als nicht zulassungsfähig erweist.

Das KSpG enthält keine eigenen Bewertungsmaßstäbe, wann die Schwelle des „erheblichen Risikos“ hinsichtlich einer potenziellen Speicherstätte überschritten wird und sie daher aus Gründen der Umweltvorsorge als ungeeignet zu charakterisieren ist. Allerdings gibt die CCS-RL Kriterien vor, wonach sich die Eignung einer geologischen Formation für die Nutzung als Speicherstätte bestimmt, was wiederum Rückschlüsse auf die Bewertungskriterien für die Auswirkungsabschätzung nach § 5 KSpG zulässt. Die europarechtliche Grundlage von § 5 KSpG ist Art. 4 Abs. 2 CCS-RL, wonach Mitgliedstaaten, die beabsichtigen, die geologische Speicherung von CO₂ in ihrem Hoheitsgebiet zuzulassen, verpflichtet sind, die Speicherkapazitäten, die auf Teilen oder auf der Gesamtheit ihres Hoheitsgebiets verfügbar sind, abzuschätzen. Hierfür können die Mitgliedstaaten auch die Exploration von Speicherstätten durch private Betreiber gemäß Art. 5 der CCS-RL gestatten. Der deutsche Gesetzentwurf sieht demgegenüber eine deutliche Trennung dieser beiden Ebenen vor: Auf der ersten Ebene erfolgt eine staatliche Analyse und Bewertung der Potenziale für die dauerhafte CO₂-Speicherung. Diese Potenzialbewertung ist rechtlich nicht bindend für folgende Zulassungsverfahren. Auf einer zweiten Ebene kann die Exploration von Speicherstätten durch private Betreiber zugelassen werden (qua Untersuchungsgenehmigung gemäß § 7 KSpG). Eine Einbeziehung der Ergebnisse privater Explorationen von Speicherstätten in die Potenzialbewertung nach § 5 KSpG ist jedenfalls nicht ausdrücklich vorgesehen; sie finden vielmehr Eingang in das staatliche Speicherregister nach § 6 KSpG.

Art. 4 Abs. 3 CCS-RL verlangt hinsichtlich der Bewertung der Eignung einer potenziellen Speicherstätte eine Charakterisierung und Bewertung des potenziellen Speicherkomplexes und der umliegenden Gebiete nach den Kriterien des Anhangs I der Richtlinie. Hierbei differenziert die Richtlinie weder danach, ob die Eignungsbewertung durch eine Behörde oder einen Privaten erfolgt, noch danach, ob sie auf der Grundlage nicht-invasiver Methoden (Datenauswertung etc.) oder aufgrund einer Exploration, d. h. durch Eingriffe in den Untergrund wie Bohrungen und gegebenenfalls die Durchführung von Injektionstests, erfolgt. In beiden Fällen sind die Kriterien des Anhangs I der Richtlinie zu berücksichtigen (Art. 4 Abs. 3 CCS-RL).

Anhang I der CCS-RL wurde durch Anlage 1 im deutschen Gesetzentwurf umgesetzt. Allerdings wird Anlage 1 zum KSpG nur durch die in § 7 geregelte Untersuchungsgenehmigung sowie über §§ 19 und 22 durch die Vorschriften über die Planfeststellung von Speichern in Bezug genommen. Die in § 5 KSpG vorgesehene behördliche Analyse und Bewertung der Speicherpotenziale verweist nicht ausdrücklich auf die Anlage 1. Nur einzelne Bestandteile des Anhangs I der CCS-RL wurden in das durch § 5 Abs. 2 KSpG der BGR auferlegte Arbeitsprogramm für die Erarbeitung der geologischen Grundlagen der Potenzialbewertung integriert. Dies betrifft insbesondere die geologische Charakterisierung der für die dauerhafte Speicherung geeigneten Gesteinsschichten sowie die Identifizierung möglicher Nutzungskonflikte. Das in § 5 Abs. 3 KSpG umrissene Arbeitsprogramm des

Umweltbundesamtes enthält hingegen weder eine Bezugnahme auf Anlage 1 noch Bestandteile des Anhangs 1 der CCS-RL.

Aufgrund der offenen Formulierung in Art. 4 Abs. 3 der CCS-RL, die hinsichtlich der Potenzialbewertung pauschal auf den Anhang I verweist, empfiehlt es sich aus europarechtlichen Gründen, die umweltbezogenen Kriterien des Anhangs I der CCS-RL bzw. der Anlage 1 zum KSpG bei der umweltbezogenen Potenzialbewertung nach § 5 Abs. 3 KSpG zumindest insoweit mit zu berücksichtigen, als die erforderlichen Datengrundlagen vorhanden sind. Dies betrifft insbesondere das in § 5 KSpG geregelte Arbeitspaket der BGR:

- die Abgrenzung der räumlichen Ausdehnung der für die dauerhafte Speicherung geeigneten Gesteinsschichten;
- die geologische Charakterisierung der geeigneten Gesteinsschichten einschließlich der Gesteinsschichten, die die geeigneten Gesteinsschichten umgeben;
- die Abschätzung der nutzbaren Volumina;
- die Charakterisierung der in den Gesteinsschichten vorhandenen Formations-wässer sowie deren potenzielle Migrationswege und die vorherrschenden Druckverhältnisse;
- die Abschätzung von Druckveränderungen durch die vorgesehene dauerhafte Speicherung in den Gesteinsschichten sowie die Identifizierung möglicher Nutzungskonflikte.

Anhang I der CCS-RL sieht für die Charakterisierung und Bewertung von potenziellen Kohlendioxidspeichern und potenziellen Speicherkomplexen ein dreistufiges Vorgehen vor:

1. Datenerhebung (Stufe 1)
2. Erstellung eines bzw. mehrerer dreidimensionalen/r statischen geologischen Erdmodells/e (Stufe 2)
3. Charakterisierung des dynamischen Speicherverhaltens und der Sensibilität sowie Risikobewertung (Stufe 3)

Dieses Drei-Stufen-Programm beinhaltet sowohl die geologischen Aspekte als auch zum Teil mögliche Umweltauswirkungen hinsichtlich der potenziellen Speicherstätten.

- Im Hinblick auf die Umweltauswirkungen wird auf Stufe 1 gefordert, folgende Merkmale der Umgebung des Speicherkomplexes zu dokumentieren:
 - a) den Speicherkomplex umgebende Ausbildungen, die durch die Speicherung von CO₂ in der Speicherstätte beeinträchtigt werden könnten;
 - b) Bevölkerungsverteilung in dem Gebiet über der Speicherstätte;
 - c) Nähe zu wertvollen natürlichen Ressourcen (einschließlich und insbesondere Natura-2000-Gebiete nach der Richtlinie 79/409/EWG des Rates vom 2. April 1979 über die Erhaltung der wildlebenden Vogelarten und der Richtlinie 92/43/EWG des Rates vom 21. Mai 1992 zur Erhaltung der natürlichen Lebensräume sowie der wildlebenden Tiere und Pflanzen, süßen Grundwassers und Kohlenwasserstoffe);
 - d) Tätigkeiten im Umfeld des Speicherkomplexes und mögliche Wechselwirkungen mit diesen Tätigkeiten (z. B. Exploration, Gewinnung und Speicherung von

Kohlenwasserstoffen, geothermische Nutzung von Aquiferen und Nutzung von Grundwasserreserven);

- e) Entfernung zu den potenziellen CO₂-Quelle(n) (einschließlich Schätzungen der Gesamtmasse CO₂, die potenziell unter wirtschaftlich vertretbaren Bedingungen für die Speicherung verfügbar ist), sowie die Verfügbarkeit an-gemessener Transportnetze.

Soweit Angaben der BGR zur räumlichen Ausdehnung des Speicherkomplexes sowie des Druckfeldes vorliegen, können die unter den Buchstaben h) bis j) genannten Umgebungsmerkmale bereits auf der Ebene der Potenzialbewertung dokumentiert werden und bei der Abschätzung der Umweltauswirkungen nach § 5 Abs. 3 KSpG Berücksichtigung finden. Buchstabe k) betrifft hingegen das Arbeitsprogramm der BGR (§ 5 Abs. 2 Nr. 7 KSpG); Buchstabe l) betrifft nicht die Auswirkungen der Speicherung sondern die des Transports.

- Die auf der Stufe 2 zu erstellenden statischen geologischen 3-D-Modelle dienen in erster Linie der geologischen Charakterisierung des Speicherkomplexes. Sie sollen neben der räumlichen und vertikalen Ausdehnung des Speicherkomplexes auch die hydraulisch verbundenen Gebiete und die Fluide erfassen.

Die Stufe 2 geht nicht über eine Darstellung des Ist-Zustandes des Speicherkomplexes hinaus. Sie ermöglicht auf Grundlage der in Stufe 1 gewonnenen Daten (Buchstaben a) bis g) zwar eine sehr differenzierte Betrachtung des Speicherkomplexes und bildet damit die Grundlage für die Prognose der Umweltauswirkungen, liefert aber für sich gesehen (ohne die anschließende Stufe 3) für die im Rahmen der Potenzialbewertung geforderte Auswirkungsabschätzung keine wesentlichen neuen Erkenntnisse.

- Die wesentliche Grundlage für die Bewertung der Umweltauswirkungen wird in der dritten Stufe geschaffen. Unter Verwendung der dreidimensionalen statischen Modelle, die in Stufe 2 erstellt wurden, erfolgt eine dynamische Modellierung, die mehrere Zeitschrittsimulationen der Injektion von CO₂ in die Speicherstätte erfasst. Mithilfe dieser Modellierung wird das dynamische Speicherverhalten charakterisiert. Sie bildet die Grundlage für die abschließende Risikobewertung.

Eine dynamische Modellierung konkreter Speicher wird allerdings erst auf der Stufe der Zulassung von Explorations- bzw. Speichervorhaben vorgenommen. Die Erstellung von dynamischen 3-D-Modellen für sämtliche potenzielle Speicherstätten in Deutschland bereits bei der Potenzialbewertung nach § 5 KSpG ist durch die BGR nicht leistbar. Die Stufe 3.1 ist daher für die Potenzialbewertung gemäß § 5 KSpG nicht von Belang. Sie kann auch bei der Grundlagenerarbeitung gemäß § 5 Abs. 3 KSpG durch das Umweltbundesamt außer Acht bleiben.

Zusammenfassend können für die Potenzialbewertung nach § 5 KSpG daher eine Dokumentation der Merkmale der Umgebung des Speicherkomplexes gemäß den Buchstaben h) bis j) der Stufe 1 der Charakterisierung von Speicherkomplexen, geregelt in Anhang I der CCS-RL, erstellt und für die Schutzgüter in Hinblick auf die Wirkfaktoren besonders sensible bzw. konfliktäre Bereiche identifiziert werden. Die einzubeziehenden Umgebungsmerkmale sind

- h) den Speicherkomplex umgebende Ausbildungen, die durch die Speicherung von CO₂ in der Speicherstätte beeinträchtigt werden könnten;
- i) Bevölkerungsverteilung in dem Gebiet über der Speicherstätte;
- j) Nähe zu wertvollen natürlichen Ressourcen;

Es kann damit eine abstrakte Ermittlung und Abschätzung der mit der dauerhaften CO₂-Speicherung verbundenen Umweltauswirkungen und -risiken auf der Grundlage generellen Speicherverhaltens vorgenommen werden. Voraussetzung für eine Einbeziehung der Umgebungsmerkmale h) bis j) der Stufe 1 ist, dass entsprechende Angaben der BGR zur räumlichen Ausdehnung des Speicherkomplexes sowie des Druckfeldes vorliegen.

4.2 Ansatz zur Bewertung der Auswirkungen

Von den Auswirkungen eines CO₂-Speichervorhabens sind beim bestimmungsgemäßen Betrieb in erster Linie die Flächen betroffen, die für die Errichtung der Übertageanlagen in Anspruch genommen werden. Hinzu kommen die daran an-grenzenden Bereiche, die vor allem durch die akustischen und optischen Emissionen der Anlagen und ihres Betriebes gestört und beeinträchtigt werden.

Wesentlich größer ist der Bereich, der im Rahmen der Erkundung und des Monitorings von regelmäßig wiederkehrenden oder möglicherweise auch dauerhaften Störungen und Beeinträchtigungen betroffen sein wird, da er voraussichtlich den Speicherkomplex und den deutlich darüber hinausreichenden Bereich des Druckfeldes überdecken wird.

Geht man davon aus, dass bei der Auswahl der Standorte und bei der Realisierung von Speichervorhaben alle Möglichkeiten zur Vermeidung und Minimierung von Beeinträchtigungen ausgeschöpft werden, dann lassen sich die Auswirkungen solcher Vorhaben auf Mensch und Umwelt im bestimmungsgemäßen Betrieb überwiegend auf ein im Allgemeinen akzeptiertes Maß beschränken (vgl. Kap. 3.2).

Es muss jedoch davon ausgegangen werden, dass es immer wieder auch zu nicht bestimmungsgemäßen Betriebszuständen kommen wird. Dabei kann es sich um Vorfälle, wie die Freisetzung einer begrenzten CO₂-Menge aus Übertageanlagen handeln, die mit bekannten und erprobten Techniken beherrscht werden können. In solchen Fällen lassen sich Auswirkungen möglicherweise im Wesentlichen auf das Betriebsgelände begrenzen.

Aber auch gravierendere Vorfälle wie die Freisetzung größerer CO₂-Mengen aus Oberflächeeinrichtungen, über das verträgliche Maß hinausgehende Landhebungen, induzierte Beben mit Schadwirkungen, die Versalzung von Grundwasser oder die schleichende Freisetzung von CO₂ und Begleitstoffen aus dem Speicher über Klüfte und Spalten können nach vorliegendem Kenntnisstand nicht ausgeschlossen werden. Zwar ist der Betreiber eines Speichers verpflichtet, bei nicht bestimmungsgemäßen Betriebszuständen wirksame Gegenmaßnahmen zu ergreifen, aber es kann nicht davon ausgegangen werden, dass erhebliche Wirkungen auf Mensch und Umwelt in allen Fällen tatsächlich vermieden oder wieder behoben werden können.

Das Schadensausmaß bestimmt sich aus der Intensität des Wirkfaktors und der Empfindlichkeit des Schutzgutes gegenüber diesem Wirkfaktor. In der Regel sind für die Ermittlung des

Schadensausmaßes standort- und vorhabenspezifische Prognosen hinsichtlich der zu erwartenden Intensität des Wirkfaktors (z. B. Immissionsprognosen) sowie der Empfindlichkeit des Schutzgutes (z. B. Vorkommen schadstoffempfindlicher Biotope) erforderlich. Ohne konkrete Kenntnis des Standortes bzw. des Vorhabens lässt sich somit die Beeinträchtigungsintensität kaum prognostizieren.

Da jedoch hinsichtlich der Art der möglichen Umweltauswirkungen auf Grundlage der bisherigen Forschungsarbeiten und Untersuchungen eine gute Datengrundlage vorhanden ist (vgl. Kap. 3), lassen sich hieraus grundlegende Aussagen in Bezug auf schutzgutspezifische konfliktäre Ausprägungen ableiten. D. h. hier bietet sich ein Ansatzpunkt, auch ohne genaue Kenntnis des Speichervorhabens Aussagen hinsichtlich der potenziellen Beeinträchtigungsintensität der Umweltschutzgüter zu gewinnen. So wird eine sehr hohe Empfindlichkeit i. d. R. unabhängig von der Intensität des Wirkfaktors eine hohe Beeinträchtigungsintensität zur Folge haben. Über die Definition von konfliktären Bereichen können somit Kriterien definiert werden, die den Schutzgütern in der Abwägung eine hohe Priorität zuweisen

Für die Potenzialbewertung werden für jedes Schutzgut in Bezug auf die Wirkfaktoren konfliktäre Bereiche definiert (vgl. Kap. 4.3). Bereiche, in denen das Konfliktpotenzial voraussichtlich besonders hoch ist, ergeben sich durch eine hohe Empfindlichkeit gegenüber den Wirkfaktoren und/oder einer hohen Wertigkeit für das jeweilige Schutzgut.

Ein vergleichbares Vorgehen wird auch in einer Studie des IEA Greenhouse Gas R&D Programme gewählt. Dort wird empfohlen, die folgenden Gebiete im Rahmen einer Strategischen Umweltprüfung als Speicher auszuschließen oder zumindest als risikoreich zu bewerten³¹⁶:

- Gebiete mit geschützten Arten oder hohem Schutzstatus;
- Gebiete mit Seen, die sich nur selten durchmischen oder sensitive Arten aufweisen;
- Gebiete mit wichtigen Grundwasservorkommen;
- Gebiete mit vielen alten oder unbekannten Bohrlöchern;
- dicht besiedelte Gebiete.

4.3 Bereiche der einzelnen Schutzgüter mit voraussichtlich hohem Konfliktpotenzial

4.3.1 Menschen und menschliche Gesundheit

Der menschliche Lebensbereich konzentriert sich auf den terrestrischen Bereich. Sensible und konfliktäre Bereiche für das Schutzgut Mensch liegen daher vorwiegend dort. Für die menschliche Gesundheit von besonderer Bedeutung und Empfindlichkeit sind dabei die Bereiche, in denen er sich überwiegend aufhält, also vor allem der Wohnbereich und das unmittelbare Wohnumfeld. Von essentieller Bedeutung für Menschen ist außerdem die Trinkwasserversorgung, zu deren Sicherung Trinkwasserschutzgebiete eingerichtet wurden.

³¹⁶ *Iea Greenhouse Gas R&D Programme* (2007).

Darüber hinaus sind aber auch Erholungseinrichtungen und Erholungsgebiete in der freien Landschaft für das menschliche Wohlbefinden von hoher Bedeutung. Eine erhebliche Beeinträchtigung solcher Gebiete, die zu einem Verlust oder einer deutlichen Minderung der Erholungsfunktion führen würde, hätte auch erhebliche Auswirkungen auf das Schutzgut Mensch.

Als gegenüber den möglichen Wirkungen eines CO₂-Speichervorhabens besonders sensible Bereiche sind daher in Bezug auf das Schutzgut Mensch folgende Bereiche einzustufen:

- Siedlungsbereiche
- Trinkwasserschutzgebiete
- Gebiete mit besonderer Bedeutung für die Erholung.

Die Siedlungsbereiche können im Wesentlichen über die entsprechenden Gebiete der Baunutzungsverordnung (BauNVO) erfasst werden.³¹⁷ Relevant sind alle Wohnbauflächen, alle gemischten Bauflächen und einige Sondergebiete.

Gebiete mit besonderer Bedeutung für die Erholung ergeben sich aus einigen Schutzgebietskategorien nach §§ 20 ff. BNatSchG. Das sind insbesondere, die Naturparke und Landschaftsschutzgebiete, die ausdrücklich auch wegen ihrer besonderen Bedeutung für die Erholung ausgewiesen werden, sowie Biosphärenreservate und Nationalparke, die u.a. dem Naturerlebnis dienen. Auch Erholungswälder, Heilquellenschutzgebiete, Heilbäder, Seebäder und Luftkurorte haben eine entsprechende Bedeutung für das Wohlbefinden des Menschen.³¹⁸ Darüber hinaus werden in der Raumordnung Gebiete mit besonderer Bedeutung für die Erholung als entsprechende Vorranggebiete ausgewiesen.

Insgesamt sind also folgende Gebiete als besonders empfindlich und konfliktär in Bezug auf das Schutzgut Mensch einzustufen:

- Wohnbauflächen nach BauNVO:
 1. reine Wohngebiete
 2. allgemeine Wohngebiete
 3. besondere Wohngebiete
 4. Kleinsiedlungsgebiete
- gemischte Bauflächen nach BauNVO:
 1. Dorfgebiete
 2. Mischgebiete
 3. Kerngebiete
- einige Sondergebiete nach BauNVO:

³¹⁷ Vgl. Gassner/Winkelbrandt/Bernotat (2010), S. 255.

³¹⁸ Vgl. Gassner/Winkelbrandt/Bernotat (2010), S. 263.

1. solche die der Erholung dienen
 2. Klinikgebiete
 3. Kurgebiete
 4. Gebiet für die Fremdenbeherbergung
- Trinkwasserschutzgebiete
 - Vorrangflächen für Erholung und Tourismus;
 - Schutzgebiete nach BNatSchG mit Erholungsfunktion:
 1. Naturparke
 2. Landschaftsschutzgebiete
 3. Biosphärenreservate
 4. Nationalparks
 - nach anderen Fachgesetzen ausgewiesene Schutzgebiete mit Erholungsfunktion:
 1. Erholungswälder
 2. Heilquellschutzgebiete
 3. Heilbäder, Seebäder und Luftkurorte

4.3.2 Pflanzen und Tiere

Die Empfindlichkeit von Pflanzen und Tieren gegenüber dem Wirkfaktor

Flächeninanspruchnahme ist besonders hoch, da ihnen hierdurch der Lebensraum entzogen wird. Darüber hinaus sind die Schutzgüter besonders empfindlich gegenüber großräumigen Standortveränderungen, wie sie beispielsweise durch starke Landhebungen und -senkungen oder eine großflächige Versalzung des Oberbodens ausgelöst werden.

Bei den Schutzgütern Pflanzen und Tiere ist das Konfliktpotenzial in Bereichen hoher Bedeutung bzw. Wertigkeit besonders hoch, das gilt sowohl für den terrestrischen als auch für den marinen Bereich. Ein maßgebliches Kriterium ist dabei die Seltenheit, denn eine Beeinträchtigung oder Zerstörung von besonders seltenen Pflanzen bzw. Tötung seltener Tierarten bzw. eine Zerstörung und Beeinträchtigung ihrer Habitate hat für die Schutzgüter eine besondere Relevanz. Weitere Bewertungskriterien für wertvolle Bereiche sind die Natürlichkeit, die Diversität/Artenausstattung, Repräsentanz, Maturität (Reife von Ökosystemen) und Flächengröße³¹⁹. Im Rahmen der Potenzialbewertung können diese Bewertungskriterien zwar nicht direkt angewendet werden, da entsprechende Informationen nicht flächendeckend vorliegen, sie spiegeln sich aber indirekt durch den Schutzstatus besonders wertvoller Bereiche wieder. Denn die für Pflanzen und Tiere besonders wertvollen Bereiche befinden sich überwiegend in Schutzgebieten (FFH-Gebiete, Vogelschutzgebiete, Naturschutzgebiete, Nationalparks) bzw. sind geschützte Objekte (geschützte Biotope, Naturdenkmäler).

³¹⁹ Jessel/Tobias (2002), S. 205.

Ein erhöhtes Konfliktpotenzial ist weiterhin bei einer Betroffenheit europarechtlich geschützter Tier- oder Pflanzenarten³²⁰ zu erwarten. Allerdings besteht im Falle der Erfüllung eines artenschutzrechtlichen Verbotstatbestandes die Möglichkeit einer Ausnahmeregelung.

Seen (als Biotop und Lebensraum von Pflanzen und Tieren), die sich nur selten durchmischen, weisen eine hohe Empfindlichkeit auf, da hier ein erhöhtes Risiko der CO₂-Anreicherung besteht.

Zusammenfassend sind folgende Gebiete als besonders empfindlich und konfliktär in Bezug auf die Schutzgüter Pflanzen und Tiere einzustufen:

- Natura 2000-Gebiete;
- Nationalparke; Nationale Naturmonumente;
- Naturschutzgebiete;
- Kernzonen von Biosphärenreservaten;
- Besonders geschützte Biotope;
- Naturdenkmäler, geschützte Landschaftsbestandteile.

Naturdenkmale, geschützte Landschaftsbestandteile und Biotope sind in der Regel sehr kleinflächig. Sie können daher voraussichtlich auf der Ebene der Potenzialbewertung nicht einzeln berücksichtigt werden. Grundsätzlich sind auch bedeutende Vorkommen von Rote Liste Arten oder europarechtlich geschützten Arten als besonders sensibel einzustufen, es wird aber davon ausgegangen, dass entsprechende Vorkommen bereits durch Schutzgebiete gesichert sind. Darüber hinaus wäre eine Berücksichtigung im Rahmen der Potenzialbewertung aufgrund der unzureichenden Datengrundlage wahrscheinlich nicht praktikabel.

4.3.3 Biologische Vielfalt

Der Begriff Biodiversität bezieht sich auf die Vielfalt von Arten und ihre genetische Ausstattung sowie die Diversität von Lebensgemeinschaften. Zum Erhalt der Biodiversität eignen sich insbesondere komplexe Landschaften mit vielfältigen Verzahnungen und Wechselwirkungen. Beispielhaft können alpine Ökosysteme, Watt- und Auenökosysteme, großflächige Feuchtgebietskomplexe, Hoch- und Niedermoore sowie Bruchwälder genannt werden³²¹. Aber auch marine Lebensräume nehmen einen hohen Stellenwert für den Erhalt der Biodiversität ein. Hot-Spots der Biodiversität befinden sich häufig im Bereich von Extremstandorten. Diese Gebiete werden in Deutschland immer seltener und stehen daher überwiegend bereits unter Schutz (Naturschutzgebiete, FFH-Gebiete, Vogelschutzgebiete, Nationalparke).

Eine weitere Notwendigkeit zur Sicherung der Biodiversität ist die Etablierung eines Biotopverbunds, da die Größe und relative Lage von „Habitatinseln“ für den langfristigen

³²⁰ Arten des Anhang IV der FFH-Richtlinie und europäische Vogelarten.

³²¹ Jessel/Tobias (2002), S. 203.

Fortbestand einzelner Arten bzw. Populationen von großer Bedeutung ist³²². Die Forderung nach der Umsetzung eines Biotopverbundsystems hat Eingang in das Bundesnaturschutzgesetz gefunden, wonach der Biotopverbund aus Kernflächen, Verbindungsflächen und Verbindungselementen besteht³²³. In verschiedenen Forschungsvorhaben des Bundesamtes für Naturschutz wurde das Konzept der Lebensraumnetze entwickelt, welches Flächen für einen länderübergreifenden Biotopverbund identifiziert. Die Ergebnisse wurden als „Netz der Lebensraumkorridore“ jüngst in das Bundesprogramm Wiedervernetzung aufgenommen³²⁴. Das Netz der Lebensraumkorridore sollte zum Schutz der biologischen Vielfalt erhalten und entwickelt werden.

Besonders empfindlich gegenüber jeglichen Beeinträchtigungen sind außerdem Vorkommen und Standorte von endemischen Arten. Es handelt sich dabei um Pflanzen- oder Tierarten, die nur in einem bestimmten Gebiet etabliert sind und für die das jeweilige Land oder Bundesland eine besondere Verantwortung trägt. Für den Erhalt der Arten sind häufig spezielle Schutz- und Überwachungsmaßnahmen notwendig. Da die Population meist sehr klein ist, können Beeinträchtigungen leicht schwerwiegende Folgen haben.

Zusammenfassend weisen die folgenden Bereiche ein besonders hohes Konfliktpotenzial für das Schutzgut Biologische Vielfalt auf:

- Natura 2000-Gebiete;
- Naturschutzgebiete;
- Nationalparke; Nationale Naturmonumente
- Kernzonen von Biosphärenreservaten;
- Netz der Lebensraumkorridore;
- Vorkommen oder Standorte von endemischen Arten.

Es ist davon auszugehen, dass Vorkommen endemischer Arten i.d.R. bereits über die Ausweisung von Schutzgebieten gesichert sind. Eine Berücksichtigung einzelner Vorkommen im Rahmen der Potenzialanalyse ist im Rahmen der Potenzialbewertung aufgrund der Kleinräumigkeit wahrscheinlich nicht praktikabel.

4.3.4 Landschaft

Wie schon in Kapitel 3.2.6 festgestellt, sind Auswirkungen auf das Schutzgut Landschaft sowohl im terrestrischen, wie auch im marinen Bereich möglich. Die Landschaft von Wattenmeer und Nordsee zeichnet sich dabei einerseits durch eine besondere Eigenart und Schönheit aus, die wenig vom Menschen beeinflusst wurde und weist andererseits durch ihre Weite und Offenheit eine hohe Empfindlichkeit auf. Die Landschaften des terrestrischen Bereichs sind vielfältiger

³²² Fuchs et al. (2010), S. 13.

³²³ BNatSchG §21.

³²⁴ Vgl. http://www.bfn.de/0306_zerschneidung.html; Fuchs et al. (2010).

und meist stärker durch die menschlichen Nutzungen geprägt. Von besonderer Bedeutung für das Schutzgut sind Landschaftsräume mit hoher und sehr hoher Eigenart. Sie sind gekennzeichnet durch:

- naturbetonte Bereiche und Elemente, die in Mitteleuropa selten geworden sind;
- kulturhistorisch wertvolle, visuell wirksame Landschaftselemente;
- charakteristische Bauformen;
- charakteristische Nutzungsformen und Nutzungsabfolgen, die sich in der Regel über längere historische Zeiträume entwickelt haben;
- kultur- und naturhistorische Elemente von hohem Bekanntheitsgrad und Symbolgehalt sowie hoher Fernwirkung;
- ihre Bindung an den Landschaftsraum.

Eine besonders hohe Empfindlichkeit gegenüber der Errichtung von Anlagen, wie den Übertageanlagen zur Injektion, die als Fremdkörper in der Landschaft wirken, haben:

- weite, offene und wenig gegliederte Landschaften, in denen störende Fremdkörper weithin sichtbar sind;
- reliefbedingt erhöht liegende Orientierungspunkte mit großer Fernwirkung.

Sensible Landschaftsräume mit hohem Konfliktpotenzial unterliegen häufig einem gesetzlichen Schutz "Praktisch alle Schutzgebiete nach §§ 20 ff. BNatSchG werden auch zum Schutz der Vielfalt, Eigenart und Schönheit von Landschaft bzw. Landschaftsbild ausgewiesen."³²⁵ Bei folgenden Gebieten ist daher von einem hohen Konfliktpotenzial für das Schutzgut Landschaft auszugehen.

- Naturschutzgebiete
- Nationalparke
- Nationale Naturmonumente
- Biosphärenreservate
- Landschaftsschutzgebiete
- Naturparke
- Naturdenkmale
- Geschützte Landschaftsbestandteile

Naturdenkmale und geschützte Landschaftsbestandteile sind in der Regel sehr kleinflächig. Sie können daher voraussichtlich auf der Ebene der Potenzialbewertung nicht einzeln berücksichtigt werden.

³²⁵ Gassner/Winkelbrandt/Bernotat (2010), S. 247.

4.3.5 Kulturgüter

Kulturgüter sind nicht flächendeckend ausgeprägt, sondern nur an bestimmten Punkten bzw. in bestimmten Bereichen vorhanden. Insofern haben alle

- denkmalgeschützten und schutzwürdigen Bauwerke und Objekte,
- Bodendenkmale und archäologischen Verdachtsflächen,
- Archivböden,
- kulturhistorisch bedeutsamen Landschaften, Landschaftsteile und Landschaftselemente sowie Stadt- und Ortsbilder

Bedeutung für dieses Schutzgut und sind empfindlich gegenüber den vorhaben-spezifischen Wirkfaktoren. Eine Differenzierung ist nur über den gesetzlichen Schutzstatus und eine internationale Anerkennung möglich. Auch wenn Kulturgüter häufig sehr kleinflächig ausgebildet sind, treten sie in bestimmten Gebieten gehäuft auf, so dass sich sowohl im terrestrischen wie auch im marinen Bereich größere Räume abgrenzen lassen, die aufgrund des gehäuften Auftretens von Kulturgütern eine besondere Bedeutung und Empfindlichkeit aufweisen.

Ein hohes Konfliktpotenzial für Kulturgüter besteht daher für:

- Weltkulturerbestätten;
- größere Komplexe/Ansammlungen von denkmalgeschützten Objekten;
- Bereiche mit gehäuftem Auftreten von Bodendenkmälern (insbesondere bei schlecht gepufferten Böden) bzw. Bereiche, in denen aufgrund der naturräumlichen Voraussetzungen vermehrt Bodendenkmale zu erwarten sind;
- Bereiche mit gehäuftem Auftreten von Archivböden;
- kulturhistorisch besonders bedeutsame Landschaften.

4.3.6 Sonstige Sachgüter

Im Gegensatz zu Kulturgütern, die nur an bestimmten Punkten bzw. in bestimmten Bereichen vorkommen, sind die sonstigen Sachgüter (nach der hier verwendeten Definition, die auch die Nutzung von Naturgütern einbezieht) im terrestrischen Bereich flächendeckend ausgebildet. Im marinen Bereich sind vom Menschen geschaffene Sachgüter (wie Offshore-Installationen, Seekabel oder Seezeichen) seltener als im terrestrischen. Aber auch dort kommt die Nutzbarkeit von Naturgütern (wie Schiffahrtswege, Fischereigründe) hinzu.

Dabei besteht sowohl eine Empfindlichkeit der sonstigen Sachgüter gegenüber mechanischen Wirkungen, wie sie beispielsweise aus Reliefveränderungen, Zerrungen und Pressungen infolge von Landhebung und -senkung resultieren, als auch eine gegenüber stofflichen Wirkungen, die die Gebrauchstauglichkeit insbesondere von Naturgütern durch Versalzung, Versauerung oder Schadstoffbelastung einschränken könnten.

Eine besondere Bedeutung wird im Allgemeinen sonstigen Sachgütern mit unmittelbaren Funktionen für das Gemeinwohl zugeordnet:

- Bereiche mit öffentlichen, sozialen oder kulturellen Einrichtungen;

- öffentliche Grünflächen sowie Anlagen für Freizeit und Erholung;
- Hochwasserschutzanlagen;
- Verkehrsanlagen und Wege;
- Ver- und Entsorgungsanlagen.

Bezüglich der Nutzung von Naturgütern haben Flächen mit einem hohen natürlichen Ertragspotenzial für Land- und Forstwirtschaft eine besondere Bedeutung. Neben den Funktionen für das Gemeinwohl zielen Ansätze zur Bewertung von sonstigen Sachgütern insbesondere auch auf die Wiederherstellungskosten ab.

Insgesamt ist daher vor allem bei folgenden Flächen von einer besonders hohen Empfindlichkeit und einem hohen Konfliktpotenzial für das Schutzgut sonstige Sachgüter auszugehen:

- Flächen mit Bebauung für Wohnen, Gewerbe und Industrie sowie öffentlichen, sozialen und kulturellen Einrichtungen, die im Wesentlichen über die entsprechenden Gebiete der Baunutzungsverordnung (BauNVO) erfasst werden können
 1. Wohnbauflächen
 2. Gemischte Bauflächen
 3. Gewerbliche Bauflächen
 4. Sonderbauflächen
- Hochwasserschutzanlagen, insbesondere an den Küsten und den großen Flüssen und Kanälen;
- Verkehrsanlagen und -wege mit zentralen Funktionen für die überregionale Erschließung;
- Ver- und Entsorgungsanlagen mit überregionaler Funktion;
- Flächen mit hohem natürlichen Ertragspotenzial für Land- und Forstwirtschaft.

4.3.7 Natürliche und anthropogene Strukturen, von denen eine besondere Gefährdung der Schutzgüter gegenüber den vorhabenspezifischen Wirkfaktoren ausgeht

Für die Langzeitsicherheit eines Kohlendioxidsspeichers sind vor allem die geologischen Gegebenheiten und anthropogene Veränderungen dieser, etwa durch vorhandene bzw. alte Bohrungen, von Bedeutung.

Bei nicht bestimmungsgemäßen Betriebszuständen können aber naturräumliche Gegebenheiten an der Oberfläche sowie anthropogene Strukturen und Anlagen für verschiedene Schutzgüter zu einer stärkeren Gefährdung führen. Zum einen kann dies auf einer Verstärkung der Wirkung der vorhabenspezifischen Wirkfaktoren beruhen. Zum anderen kann von ihrer Beschädigung oder Zerstörung eine Sekundärgefährdung ausgehen. Die stärkere Gefährdung besteht dabei in der Regel für mehrere Schutzgüter gleichzeitig.

Folgende naturräumliche Gegebenheiten oder anthropogene Strukturen führen im Fall einer CO₂-Leckage zu einem höheren Risiko insbesondere auch für Mensch, Flora, Fauna und die biologische Vielfalt:

- das Vorhandensein von vielen natürlichen reliefbedingten oder anthropogenen Bodensenken, in denen sich Kohlendioxid und Begleitstoffe akkumulieren können;
- eine schlechte Durchlüftung bzw. ungünstige Luft-Austauschbedingungen, die gegebenenfalls die Verteilung und Verdünnung des ausgetretenen Kohlendioxids und der Begleitstoffe vermindern und verzögern und auf diese Weise deren Akkumulation begünstigen;
- wenig durchmischte Seen, an deren Grund sich das ausgetretene Kohlendioxid und die Begleitstoffe akkumulieren und dann schlagartig in sehr großen Mengen an der Oberfläche austreten können (wie z. B. 1986 am Lake Nyos in Afrika (vgl. Kap. 3.1.4 „Freisetzung von CO₂ durch Leckage aus dem Speicher oder aus Übertageanlagen“ und Kronimus et al.³²⁶).

Ein hohes Konfliktpotenzial ergibt sich auch durch anthropogen geschaffene Sachgüter, von denen erheblicher Beschädigung ein hohes Risiko für Sekundärschäden ausgeht. Das sind insbesondere:

- Hochwasserschutzanlagen, deren Zerstörung oder erhebliche Beschädigung zu unter Umständen großräumigen Überschwemmungen führen könnten;
- größere Kanäle und ausgebauten Gewässer, deren Wasserspiegel über dem Niveau des angrenzenden Geländes liegt und deren Zerstörung oder erhebliche Beschädigung unter Umständen ebenfalls zu großräumigen Überschwemmungen führen könnten;
- industrielle oder gewerbliche Anlagen, die in größerem Umfang mit Gefahrstoffen umgehen, wie beispielsweise Atomkraftwerke, chemische Industrie und Anlagen, die der Verarbeitung oder Lagerung von fossilen Brennstoffen dienen;
- Rohrleitungen für entsprechende Gefahrstoffe, also für entsprechende Rohstoffe der chemischen Industrie und für Kohlenwasserstoffe.

4.4 Empfehlungen für die Potenzialbewertung im Sinne von § 5 Abs. 3 KSpG

Im vorangegangenen Kapitel 4.3 wurden für die betrachteten Schutzgüter Mensch, Pflanzen, Tiere, Biologische Vielfalt, Landschaft, Kultur- und sonstige Sachgüter die Bereiche/Flächen ermittelt, die nach gegenwärtigem Kenntnisstand eine besondere Empfindlichkeit und daher ein hohes Konfliktpotenzial in Bezug auf Kohlendioxid-Speichervorhaben aufweisen. Darüber hinaus wurden verschiedene Strukturen ermittelt, die zu einer stärkeren Gefährdung der Schutzgüter gegenüber den vorhabenspezifischen Wirkfaktoren führen können. Aus natur- und umweltschutzwichtiger Sicht sollten diese Bereiche aus Gründen der Umweltvorsorge bei der Ausweisung von potenziellen Speichern gemieden werden.

³²⁶ Vgl. Kronimus et al. (2011), S. 134 und 215.

Hier nicht berücksichtigt (weil nicht Gegenstand der Untersuchung) wurden entsprechende Bereiche für die Schutzgüter Boden, Wasser, Klima und Luft. Es ist aber davon auszugehen, dass auch für diese Schutzgüter Gebiete identifiziert werden können, die eine hohe Empfindlichkeit bzw. ein hohes Konfliktpotenzial in Bezug auf die Gefahren und Risiken einer Kohlendioxidspeicherung aufweisen. Beispiele sind Trinkwasserschutzgebiete, Quellschutzgebiete, Böden mit einem hohen natürlichen Ertragspotenzial, seltene Böden, Geotope oder Archivböden.

Da sich die Flächen mit besonderer Empfindlichkeit bzw. hohem Konfliktpotenzial für die verschiedenen Schutzgüter teils überschneiden aber auch teils ergänzen, könnte die Berücksichtigung all dieser Gebiete letztlich dazu führen, dass kaum noch potenzielle Speicherflächen verbleiben.

Dann ist es eine Frage der Gesamtabwägung und letztlich eine gesellschaftliche bzw. politische Entscheidung, ob das Risiko auf einem Teil der identifizierten Flächen akzeptiert werden soll. Bei dieser Abwägung und Entscheidung sind Punkte wie die folgenden zu berücksichtigen, die sich der Bewertung dieser Untersuchung entziehen:

- Wie verlässlich sind die Modelle und Prognosen für die Speicher und ihr Verhalten? Und wie verlässlich sind die zur Überwachung der Speicher verfügbaren Monitoring-Methoden? In den Studien zur "Sicherheit und Umweltverträglichkeit der CO₂-Speicherung – Speicherprozesse" wird wiederholt darauf hingewiesen, dass es diesbezüglich an Erfahrungen fehlt und es noch Forschungs- und Entwicklungsbedarf gibt.³²⁷
- Wie groß ist die Eintrittswahrscheinlichkeit von Gefahren des nicht bestimmungsgemäßen Betriebs, die zu erheblichen und möglicherweise großflächigen Beeinträchtigungen der Schutzgüter führen können? Die vorliegenden Studien machen dazu kaum oder nur sehr unbestimmte Angaben.
- Stehen hinreichende Maßnahmen und Technologien zur Verfügung, um Risiken des nicht bestimmungsgemäßen Betriebs frühzeitig zu erkennen und um Auswirkungen von nicht bestimmungsgemäßen Betriebszuständen zu unterbinden oder zu beheben? Die vorliegenden Studien machen insbesondere zu den Gegenmaßnahmen kaum Aussagen.
- Stehen die Risiken und Gefahren der CO₂-Speicherung für Mensch und Umwelt in einem angemessenen Verhältnis zu den Vorteilen dieser Übergangstechnologie für die Verminderung der Kohlendioxidemissionen?
- Gibt es Alternativen, die eine entsprechende Verminderung der Kohlendioxidemissionen mit geringeren Gefahren und Risiken für Mensch und Umwelt ermöglichen?

³²⁷ Siehe hierzu beispielsweise Großmann et al. (2011a), S. 52, 53, 55, 56, 57/58, 61, 62, 63 und 73 und Schilling/Krawczyk (2011), S. 8/9, 16, 17, 21, 22 und 29.

- Sollten Investitionen besser in Technologien erfolgen, die nicht nur eine vorübergehende Verminderung der CO₂-Emissionen ermöglichen, sondern zu einer langfristigen Lösung beitragen?
- Mit welchen Umweltwirkungen und Investitionen ist für den erforderlichen Netzausbau für den CO₂-Transport zu kalkulieren?
- Stehen Nutzen und ökonomische Vorteile der CO₂-Speicherung in der Gegenwart in einem angemessenen Verhältnis zu den ökologischen und ökonomischen Lasten und Risiken für kommende Generationen?

Die in Kapitel 4.3 ermittelten Bereiche/Flächen können genutzt werden, um im Fall einer Abwägung/Entscheidung zugunsten der CO₂-Speichertechnologie Flächen zu bestimmen, die nicht nur für ein sondern für mehrere Schutzgüter eine besondere Empfindlichkeit bzw. ein hohes Konfliktpotenzial in Bezug auf Kohlendioxid-Speichervorhaben aufweisen und daher gemieden werden sollen. Tabelle 7 stellt die empfindlichen Bereiche für die verschiedenen in dieser Untersuchung betrachteten Schutzgüter gegenüber. Jedoch sind zusätzlich die Schutzgüter Boden, Wasser, Klima und Luft sowie die in Kapitel 4.3.7 benannten Strukturen zu berücksichtigen, die zu einer besonderen Gefährdung der Schutzgüter gegenüber den vorhabenspezifischen Wirkfaktoren führen. Im Fall einer Abwägung/Entscheidung zugunsten der CO₂-Speichertechnologie sollten neben den im KSpG (Anlage1) ausdrücklich genannten Natura-2000-Gebieten und Trinkwasserschutzgebieten die für drei und mehr Schutzgüter besonders empfindlichen Nationalparke, Nationale Naturmonumente, Biosphärenreservate und Naturschutzgebiete für die Speicherung ausgeschlossen werden bzw. dürften sich nicht im Wirkbereich eines Speichers befinden. Entsprechend der besonderen Bedeutung des Menschen im KSpG sollten darüber hinaus auch die für die menschliche Gesundheit besonders bedeutenden Wohnbereiche (Wohnbauflächen, gemischte Bauflächen und bestimmte Sonderbauflächen) gemieden werden, zumal sie auch für das Schutzgut Sachgüter konfliktär sind.

Letztlich ist es möglich bei der Bewertung potentieller Speicher über die Anzahl der Schutzgüter, für die ein Bereich besonders empfindlich ist, die Belange der Umweltvorsorge unterschiedlich zu gewichten. Schließt man einen Bereich bereits aufgrund der besonderen Empfindlichkeit für ein oder zwei Schutzgüter aus, misst man der Umweltvorsorge ein größeres Gewicht bei, als wenn man dies erst bei einem hohen Konfliktpotenzial für vier oder mehr Schutzgüter tut.

Eine tabellarische Übersicht (wie in Tabelle 7, aber für alle Schutzgüter), könnte hierfür die Basis bilden. Darüber hinaus führt eine kartografische Überlagerung der verschiedenen empfindlichen Bereiche wahrscheinlich zur Identifizierung von Flächen, auf denen sich unterschiedliche konfliktäre Bereiche überschneiden, insbesondere wenn man dabei zusätzlich die in Kapitel 4.3.7 benannten Strukturen berücksichtigt, die zu einer besonderen Gefährdung führen können.

Tabelle 7: Bereiche mit hoher Empfindlichkeit und hohem Konfliktpotenzial

rot hinterlegt: Für drei und mehr Schutzgüter besonders hohes Konfliktpotenzial

Bereiche	Mensch	Pflanzen	Tiere	Biolo-gische Vielfalt	Landschaft	Kultur-güter	sonstige Sach-güter
Wohnbauflächen nach BauNVO: reine Wohngebiete, allgemeine Wohngebiete, besondere Wohngebiete, Kleinsiedlungsgebiete	X						X
gemischte Bauflächen nach BauNVO: Dorfgebiete, Mischgebiete, Kerngebiete)	X						X
einige Sonderbauflächen nach BauNVO: Sondergebiete, die der Erholung dienen und einige sonstige Sondergebiete wie Klinikgebiete, Kurgebiete, Gebiet für die Fremdenbeherbergung	X						X
übrige Sonderbauflächen nach BauNVO Sondergebiete für Einkaufszentren, Messen, Hochschulen, Häfen etc.							X
Gewerbliche Bauflächen nach BauNVO Gewerbegebiete, Industriegebiete							X
Trinkwasserschutzgebiete	X						
Naturparke	X				X		
Landschaftsschutzgebiete	X				X		
Kulturhistorisch bedeutsame Landschaften					X	X	
Naturschutzgebiete		X	X	X	X		
Biosphärenreservate	X	X	X	X	X		
Nationalparke	X	X	X	X	X		
Nationale Naturmonumente		X	X	X	X		
Natura 2000-Gebiete		X	X	X			
Netz der Lebensraumkorridore	X			X			
Vorrangflächen für Erholung und Tourismus	X						
Erholungswälder	X						
Heilquellschutzgebiete	X						
Heilbäder, Seebäder und Luftkurorte	X						
Weltkulturerbestätten						X	
Komplexe/Ansammlungen von denkmalgeschützten Objekten						X	

Biodiversität und Potenzialbewertung nach § 5 KSpG - Abschlussbericht

Bereiche	Mensch	Pflanzen	Tiere	Biolo-gische Vielfalt	Landschaft	Kultur-güter	sonstige Sach-güter
Bereiche mit gehäuften Auftreten von Bodendenkmalen						X	
Bereiche naturräumlicher Voraussetzungen für viele Bodendenkmale						X	
Bereiche mit gehäuftem Auftreten von Archivböden						X	
Landflächen mit hohem natürlichen Ertragspotenzial							X
Hochwasserschutzanlagen an Küsten, großen Flüssen und Kanälen							X
Verkehrsanlagen mit überregionaler Funktionen für die Erschließung							X
Ver- und Entsorgungsanlagen mit überregionalen Funktionen							X

5 Bewertung möglicher Umweltauswirkungen im Rahmen von Zulassungsverfahren

5.1 Rechtliche Grundlagen, verschiedene Zulassungsverfahren, Bewertungsmaßstäbe

Das KSpG sieht zwei Zulassungsverfahren vor: Die Untersuchungsgenehmigung für die Exploration von Speicherstätten nach §§ 7 ff. KSpG und die Planfeststellung für die Errichtung und den Betrieb von Kohlendioxidspeichern nach §§ 11 ff. KSpG. In beiden Zulassungsverfahren sind die Umweltauswirkungen der Vorhaben zu berücksichtigen. Vor den Zulassungsentscheidungen gemäß §§ 7 und 11 ff. KSpG hat die zuständige Behörde der BGR und dem UBA Gelegenheit zur Stellungnahme zu geben und die Empfehlungen dieser Stellungnahmen zu berücksichtigen. Abweichungen von den Empfehlungen sind durch die zuständige Behörde in der Entscheidung zu begründen (§ 39 Abs. 2 KSpG).

5.1.1 Untersuchungsgenehmigung gemäß § 7 KSpG

Gemäß § 7 Abs. 1 Nr. 6 KSpG ist im Interesse der Allgemeinheit und der Nachbarschaft zu gewährleisten, dass die betroffenen Umweltgüter geschützt und, soweit dies nicht möglich ist, ordnungsgemäß wiederhergestellt werden.

Als Voraussetzung für die Erlangung der Untersuchungsgenehmigung nach § 7 KSpG ist ein Untersuchungsprogramm vorzulegen, das den Anforderungen der Anlage 1 zum KSpG genügt. Danach ist ein dreistufiges Programm abzuarbeiten, das auch eine Charakterisierung des dynamischen Speicherverhaltens anhand einer Modellierung sowie eine Risikobewertung der Umweltrisiken der CO₂-Speicherung beinhaltet. Die Anforderungen der Anlage 1 zum KSpG entsprechen im Wesentlichen denen des Anhangs I der CCS-RL. Insofern wird auf die Ausführungen unter 4.1 verwiesen. Ergänzend ist auf die besonderen Anforderungen der Stufe 3 hinzuweisen, die in Anlage 1 zum KSpG aufgeführt sind:

Auf Stufe 3.1 wird das dynamische Speicherverhalten auf der Grundlage des auf der zweiten Stufe erstellten statischen geologischen Erdmodells charakterisiert. Die dynamische Modellierung soll gemäß Ziffer 3.1.2 der Anlage 1 zum KSpG unter anderem Erkenntnisse liefern über

- „g) das Risiko der Bildung von Rissen im Kohlendioxidspeicher und im Speicher-komplex, insbesondere in den abdichtenden Gesteinsschichten;*
- h) das Risiko des Eintritts von Kohlendioxid in die abdichtenden Deckgesteine;*
- i) das Risiko von Leckagen aus dem Kohlendioxidspeicher, beispielsweise durch unsachgemäß stillgelegte oder unsachgemäß abgedichtete Bohrlöcher;*
- j) die möglichen Kohlendioxidmigrationsraten;*
- k) Rissverschlusswahrscheinlichkeit und Rissverschlusgeschwindigkeit;*
- l) mögliche Veränderungen der chemischen Zusammensetzung der im Kohlendioxidspeicher enthaltenen Formationswässer und chemische Reaktionen, beispielsweise Änderung des pH-Werts oder Mineralisierung, sowie Einbeziehung der Veränderungen und Reaktionen in die reaktive Modellierung zur Folgenabschätzung insbesondere in Bezug auf die Sicherheit von Bohrlochverschlüssen;*

- m) Verdrängung der ursprünglich vorhandenen Formationsfluide;
- n) mögliche verstärkte seismische Aktivität und mögliche Hebungen der darüber liegenden geologischen Schichten und der Oberfläche.“

Auf der Stufe 3.3 ist eine Risikobewertung vorzunehmen. Diese umfasst

„1. eine Charakterisierung der Gefahren:

Die Gefahren werden charakterisiert, indem das Potenzial des Speicherkomplexes für Leckagen durch die vorstehend beschriebene dynamische Modellierung und die Charakterisierung der Sicherheit bestimmt wird. [...]

2. eine Bewertung der Gefährdung:

Die Gefährdung wird ausgehend von den Umweltmerkmalen sowie der Verteilung und den Aktivitäten der über dem Speicherkomplex lebenden Bevölkerung sowie vom möglichen Verhalten und Verbleib von Kohlendioxid, das über die nach Nummer 1 ermittelten potenziellen Leckagewege austritt, bewertet.

3. eine Folgenabschätzung:

Die Folgen werden ausgehend von der Sensibilität bestimmter Arten, Gemeinschaften oder Lebensräume im Zusammenhang mit den nach Nummer 1 ermittelten möglichen Leckagen abgeschätzt. Gegebenenfalls schließt dies die Folgen der Einwirkung höherer Kohlendioxatkonzentrationen auf die Biosphäre, einschließlich Böden, Meeressedimente und Meeresgewässer, mit ein, beispielsweise Sauerstoffmangel und erniedrigter pH-Wert des Wassers. Die Folgenabschätzung umfasst darüber hinaus eine Bewertung der Auswirkungen anderer Stoffe, die bei Leckagen aus dem Speicherkomplex austreten können (im Injektionsstrom enthaltene Verunreinigungen oder im Zuge der Kohlendioxidspeicherung entstandene neue Stoffe). Diese Auswirkungen werden im Hinblick auf verschiedene zeitliche und räumliche Größenordnungen und in Verbindung mit Leckagen von unterschiedlichem Umfang betrachtet.

4. eine Risikocharakterisierung:

Die Risikocharakterisierung besteht aus einer Bewertung der kurz- und langfristigen Sicherheit des Kohlendioxidspeichers, einschließlich einer Bewertung des Leckagerisikos unter den vorgeschlagenen Nutzungsbedingungen, und der schlimmsten möglichen Umwelt- und Gesundheitsfolgen. Die Risikocharakterisierung stützt sich auf eine Bewertung der Gefahren und der Gefährdung und auf eine Folgenabschätzung. Sie umfasst eine Bewertung der Unsicherheitsquellen, die während der einzelnen Stufen der Charakterisierung und Bewertung des Kohlendioxidspeichers ermittelt wurden, sowie – im Rahmen des Möglichen – eine Darstellung der Möglichkeiten zur Verringerung der Unsicherheit.“

Hinsichtlich der Bewertungsmaßstäbe für die Bewertung der Gefährdung und die Risikocharakterisierung ist auf die Ausführungen unter 4.1 zu verweisen. Mangels rechtlicher Umweltstandards für CO₂ ist auf außerrechtliche Bewertungsmaßstäbe, die nach fachlichen Erkenntnissen zu entwickeln sind, zurückzugreifen. Hinsichtlich einer möglichen Gefährdung des Grundwassers kann bis auf Weiteres auf die Bewertungsmaßstäbe des Wasserrechts (grundsätzliches Verschlechterungsverbot) rekuriert werden.

Wurde eine Untersuchungsgenehmigung erteilt und die Untersuchung einer potenziellen Speicherstätte durchgeführt, sind auf der Grundlage der durch die Untersuchung gewonnenen Erkenntnisse der potenzielle Kohlendioxidspeicher und der potenzielle Speicherkomplex vom Untersuchungsberechtigten nach Maßgabe der einschlägigen Kriterien der Anlage 1 zum KSpG und weiterer geeigneter Methoden zu überprüfen und auf ihre Eignung für eine langzeitsichere Speicherung hin zu charakterisieren und zu bewerten (§ 7 Abs. 3 Satz 1 KSpG).

5.1.2 Planfeststellung für Errichtung und Betrieb eines Kohlendioxidspeichers gemäß §§ 11 ff. KSpG

Der Plan für die Errichtung und den Betrieb eines Kohlendioxidspeichers darf gemäß § 13 Abs. 1 KSpG nur festgestellt werden, wenn u.a.

- „2. die Langzeitsicherheit des Kohlendioxidspeichers gewährleistet ist,*
- 3. Gefahren für Mensch und Umwelt im Übrigen nicht hervorgerufen werden können,*
- 4. die erforderliche Vorsorge gegen Beeinträchtigungen von Mensch und Umwelt getroffen wird, insbesondere durch Verhinderung von erheblichen Unregelmäßigkeiten; die erforderliche Vorsorge für Kohlendioxidspeicher nach § 2 Absatz 2 bestimmt sich nach dem Stand von Wissenschaft und Technik.“*

Das KSpG stellt damit strenge Anforderungen an die Zulassung von Kohlendioxid-speichern auf. Denn nach den in § 13 KSpG enthaltenen Voraussetzungen stehen Leckagen der Zulassung von Errichtung und Betrieb eines CO₂-Speichers entgegen. Bei einer Leckage-Rate von über 0% sind Errichtung und Betrieb eines Speichers nicht zulassungsfähig. Dies ergibt sich aus § 13 KSpG i.V.m. den Begriffsbestimmungen des § 3 KSpG sowie der Begründung zum Gesetzesentwurf: Nach § 13 Abs. 1 Nr. 2 KSpG – einer zentralen Zulassungsvoraussetzung³²⁸ – darf der Plan für die Errichtung und den Betrieb eines Kohlendioxidspeichers nur festgestellt werden, wenn u.a. die Langzeitsicherheit des Kohlendioxidspeichers gewährleistet ist, Gemäß § 3 Nr. 9 KSpG ist Langzeitsicherheit

„ein Zustand, der gewährleistet, dass das gespeicherte Kohlendioxid und die gespeicherten Nebenbestandteile des Kohlendioxidstroms unter Berücksichtigung der erforderlichen Vorsorge gegen Beeinträchtigungen von Mensch und Umwelt vollständig und auf unbegrenzte Zeit in dem Kohlendioxidspeicher zurückgehalten werden können.“.

(Hervorhebung durch Verfasser)

In der Begründung zum Gesetzentwurf wird nochmals hervorgehoben, dass hinreichende Gewissheit bestehen muss, dass das gespeicherte Kohlendioxid „vollständig und auf unbegrenzte Zeit in dem Kohlendioxidspeicher zurückgehalten wird“.³²⁹

Zudem muss nach § 13 Abs. 1 Nr. 4 KSpG die erforderliche Vorsorge gegen Beeinträchtigungen von Mensch und Umwelt getroffen werden, insbesondere durch Verhinderung von erheblichen

³²⁸ Bundesregierung (2011), Begründung zu § 13, S. 73.

³²⁹ Bundesregierung (2011), Begründung zu § 13, S. 73.

Unregelmäßigkeiten. Unter den Begriff der zu verhindernen „erheblichen Unregelmäßigkeiten“ fällt dabei nicht nur der Eintritt einer Leckage, sondern gemäß § 3 Nr. 2 KSpG bereits

„jede Unregelmäßigkeit bei den Injektions- oder Speichervorgängen oder in Bezug auf den Zustand des Speicherkomplexes als solchen, die mit einem Leckagerisiko oder einem Risiko für Mensch oder Umwelt behaftet ist.“

(Hervorhebung durch Verfasser)

Danach liegt eine erhebliche Unregelmäßigkeit – wie auch in der Begründung zum Gesetzesentwurf betont wird – bereits bei einem Leckagerisiko vor; eine tatsächlich eingetretene Leckage ist für das Vorliegen einer erheblichen Unregelmäßigkeit nicht erforderlich.³³⁰ Bereits das Leckagerisiko ist mit Blick auf die Zulassungsfähigkeit eines CO₂-Speichers gemäß § 13 Abs. 1 Nr. 4 KSpG zu verhindern. Der Verhinderung von erheblichen Unregelmäßigkeiten – und damit von Leckagerisiken – wird der Begründung zum Gesetzesentwurf zufolge eine besondere Bedeutung beigemessen.³³¹ Dies wird daran ersichtlich, dass sich der Maßstab für die entsprechende Vorsorge gemäß § 13 Abs. 1 Nr. 4 KSpG nicht allein nach dem Stand der Technik, sondern nach dem „*Stand von Wissenschaft und Technik*“ bestimmt.³³²

Des Weiteren muss der Planfeststellungsbeschluss gemäß § 13 Abs. 2 Nr. 5 KSpG Maßnahmen zur Verhütung von Leckagen und erheblichen Unregelmäßigkeiten festlegen.

Zwar enthält das KSpG auch Aussagen zu eingetretenen Leckagen. So werden Vorgaben hinsichtlich Maßnahmen, die bei Eintritt von Leckagen oder erheblichen Unregelmäßigkeiten zu treffen sind, getroffen. Nach § 23 Abs. 1 Nr. 2 hat der Betreiber Leckagen unverzüglich zu beseitigen. Auch gibt der KSpG vor, dass in dem – im Rahmen der Planfeststellung erforderlichen – Sicherheitsnachweis u.a. geeignete Maßnahmen zur Verhütung und Beseitigung von Leckagen und erheblichen Unregelmäßigkeiten zu beschreiben sind (§ 19). Diese Vorgaben haben jedoch keinen Einfluss auf das Ergebnis vorstehender Ausführungen, dass Leckagen der Zulassung von Errichtung und Betrieb eines CO₂-Speichers entgegenstehen, da auch für den Fall des nicht-bestimmungsgemäßen Betriebs und dessen möglicher Folgen Vorsorge zu treffen ist. Die Vorgaben zu Leckageprävention und -handling weisen im Gegenteil darauf hin, dass Leckagen kein genehmigungsfähiger Zustand sein können.

Im Rahmen des Planfeststellungsverfahrens nach §§ 11 ff. KSpG ist auch eine UVP durchzuführen.³³³ Die Anforderungen der UVP richten sich nach dem UVPG. Sie liefert die wesentlichen Erkenntnisse für die Zulassungsfähigkeit des Speichers aus Gründen der Gefahrenabwehr und der Umweltvorsorge.

³³⁰ Bundesregierung (2011), Begründung zu § 3, S. 62.

³³¹ Bundesregierung (2011), Begründung zu § 13, S. 73.

³³² Siehe zum Stand von Wissenschaft und Technik die Ausführungen unter 1.3.2 und 4.1.

³³³ Vgl. Ziffer 15.2 der Anlage 1 zum UVPG.

Wie vorstehende Ausführungen verdeutlichen, wird der Vorsorgegrundsatz bei der Planfeststellung nach §§ 11 ff. KSpG ausdrücklich hervorgehoben. So ist vom Vorhabenträger insbesondere gemäß § 13 Abs. 1 KSpG ein Sicherheitsnachweis zu erbringen, der gemäß § 19 KSpG auf Grundlage der Charakterisierung und Bewertung nach § 7 Abs. 3 Satz 1 KSpG zu erstellen ist. Hinsichtlich der Bewertungsmaßstäbe ist auf die Ausführungen unter 4.1 und 5.1.1 zu verweisen.

Die im Rahmen der UVP erstellte Umweltverträglichkeitsstudie und der Sicherheitsnachweis stellen die maßgeblichen Beurteilungsgrundlagen für die Stellungnahme des UBA nach § 39 Abs. 2 KSpG dar.

5.2 Übertragbarkeit von Bewertungsmethoden, Anwendungsregeln

Die Durchführung einer UVP ist für die Errichtung, den Betrieb und die Stilllegung von Kohlendioxidspeichern gesetzlich vorgeschrieben.³³⁴ Im Rahmen der UVP sind die unmittelbaren und mittelbaren Auswirkungen des Vorhabens auf die Schutzgüter zu ermitteln, zu beschreiben und zu bewerten. Die ermittelten Umweltauswirkungen sind vor dem Hintergrund der umwelt- und naturschutzfachlichen Zielvorgaben sowie der rechtlichen Normen fachlich zu bewerten. Die Bewertung erfolgt sowohl in Bezug auf die einzelnen Schutzgüter als auch medienübergreifend.

Bewertungsmethoden struktureller Art lassen sich generell zur Bearbeitung der einzelnen Schritte innerhalb der Umweltprüfung auf CO₂-Speicherprojekte übertragen. Hier wären beispielsweise Wirkungsketten-Darstellungen, mathematische Simulationsmodelle oder ökologische Risikoanalysen zu nennen. Details zu diesen methodisch-strukturellen Hilfsmitteln können der einschlägigen Fachliteratur entnommen werden.³³⁵ Die ökologische Risikoanalyse wird in der Praxis häufig als Methode für Bewertungsfragen im Rahmen von Umweltuntersuchungen eingesetzt. Zur Ermittlung der Schwere der Umweltauswirkungen wird die Intensität der negativen Auswirkung, die aus Empfindlichkeit und Wirkintensität resultiert, mit der Bedeutung des Schutzguts verschnitten.³³⁶ Diese grundsätzliche methodische Herangehensweise kann auch für eine Bewertung der Umweltauswirkungen im Rahmen eines Zulassungsverfahrens für CO₂-Speicher angewendet werden.

³³⁴ Ziffer 15.2 der Anlage 1 zum UVPG.

³³⁵ Z. B. *Gassner/Winkelbrandt/Bernotat* (2010), S. 51-62 *Haber/Schaller* (1991).

³³⁶ *Gassner/Winkelbrandt/Bernotat* (2010), S. 49-50.

1. Schritt der Aggregation zur Bestimmung der Beeinträchtigungsintensität

		Wirkintensität		
Empfindlichkeit	hoch	mittel	gering	
	hoch	3	3	2
mittel	3	2	1	
gering	2	1	1	
	Beeinträchtigungsintensität			

2. Schritt der Aggregation zur Bestimmung der Schwere der Beeinträchtigung

		Beeinträchtigungsintensität		
Schutzwürdigkeit/ Bedeutung	hoch	mittel	gering	
	hoch	3	3	2
mittel	3	2	1	
gering	2	1	1	
	Schwere der Beeinträchtigung (ökologisches Risiko)			

Abbildung 6: Zweistufige Verknüpfung zur Ermittlung der Schwere einer Beeinträchtigung³³⁷

Innerhalb der Bewertungsmethode sind eine Vielzahl von Bewertungskriterien zu berücksichtigen, die projektspezifisch durch Gewichtung und Aggregation zusammengeführt werden. Bei der Bewertung der Umweltauswirkungen sind als Bewertungskriterien grundsätzlich die existierenden fachrechtlichen Grenz- oder Schwellenwerte heranzuziehen. Darüber hinaus können aber auch weitere fachliche Kriterien zur Bewertung der Auswirkungen herangezogen werden, wobei sich die Bewertungsmethoden, bei fehlenden rechtlichen Vorgaben, aus dem Stand von Wissenschaft und Praxis ableiten. Durch die Bewertungsmethoden und -maßstäbe sollen die gesetzlichen Umweltanforderungen konkretisiert und operationalisiert werden.³³⁸

Da bestimmte Wirkfaktoren auch bei unterschiedlichen Vorhaben regelmäßig auftreten (z. B. Flächeninanspruchnahme, Lärm) haben sich hierfür inhaltliche Bewertungsmethoden in der Praxis etabliert, die zum Teil in der UVP für ein CO₂-Speichervorhaben verwendet werden können. Allerdings treten bei der CO₂-Speicherung neben den bereits bekannten Wirkfaktoren auch Auswirkungen auf, zu denen wenig bis keine Erfahrungen vorliegen (z. B. Landhebungen/Senkungen, Mikrobeben oder die Auswirkungen des nicht bestimmungsgemäßen Betriebs, vgl. Kap. 3.2). Im Folgenden werden exemplarisch vorhandene und übertragbaren Bewertungsmethoden für die verschiedenen Schutzgüter vorgestellt. Einen

³³⁷ Quelle: Gassner/Winkelbrandt/Bernotat (2010), S. 61.

³³⁸ Ebd., S. 50.

umfassenden Überblick zu Methoden und Standards in der UVP bietet die entsprechende Fachliteratur (z.B. *Gassner/Winkelbrandt/Bernotat* (2010), *Storm/Bunge* (2012), *Plachter et al.* (2002), *Fürst/Scholles* (2008)).

Zur Beurteilung der Erheblichkeit von Flächeninanspruchnahmen existieren in der Praxis verschiedene Bewertungsmethoden, z. B. Biotopwertverfahren zur Abarbeitung der Eingriffsregelung nach BNatSchG wie das „Städtetag-Modell“³³⁹. Dabei wird jedem Biotoptyp ein spezifischer Wert für die Leistungsfähigkeit des Naturhaushaltes und für das Landschaftsbild zugewiesen und dieser zu der Fläche in Beziehung gesetzt.³⁴⁰ Auswirkungen, die durch die Inanspruchnahme von Flächen durch die Oberlage-Einrichtung bei einem CO₂-Speicherprojekt entstehen, können mit Hilfe dieser Verfahren bewertet und – im Rahmen der Eingriffsregelung – bilanziert und kompensiert werden. Zur Bewertung der Erheblichkeit von Flächeninanspruchnahmen innerhalb von FFH-Gebieten kann der Fachkonventionsvorschlag von Lambrecht und Trautner herangezogen werden, in dem Kriterien definiert sind, die im Einzelfall eine unerhebliche Flächeninanspruchnahme kennzeichnen.³⁴¹

Für die Bewertung von lärmbedingten Beeinträchtigungen der Landschaft bzw. des Natur- und Landschaftserlebens und der landschaftsbezogenen Erholung, die in den verschiedenen Phasen der CO₂-Speicherung auftreten, können verschiedene Richtwerte aus untergesetzlichen Regelwerken und Fachpublikationen herangezogen werden. Beispielsweise sind hier die DIN 18005 oder die TA Lärm zu nennen, aus denen Tages- und Nachtwerte (in dB(A)) zum Schutz von Wohngebieten, Kurgebieten oder Feriengebieten entnommen werden können. Eine ausführliche Übersicht der Orientierungswerte bieten *Gassner/Winkelbrandt/Bernotat*³⁴². Bei der Beurteilung von gesundheitlichen Belastungen des Menschen durch Lärm kann zwischen direkten Wirkungen auf das Gehör (Hörschädigung) und indirekten Wirkungen auf den Körper oder die Psyche (Stresseinfluss, Störung von Schlaf und Entspannung, Störung von Lernen und Leistung usw.) unterschieden werden. Bezüglich des Hörempfindens gilt z. B. ein Lärmpegel von >70 dB(A) als laut, ab 80 dB(A) als sehr laut, bei 120 dB (A) liegt die Schmerzschwelle und ab 130 dB(A) droht ein Hörsturz.³⁴³

Hinsichtlich der Auswirkungen von Verkehrslärm auf störungsempfindliche Brutvögel wurde in einem Forschungsvorhaben ein Rankingmodell entwickelt, in dem kritische Schallpegel bzw. Effektdistanzen für 202 einheimische Brutvogelarten angegeben werden.³⁴⁴ Der Ansatz basiert auf einer Kombination der Prognose der verhaltensbiologischen Empfindlichkeit der Vogelarten gegenüber Verkehrslärm und einer Auswertung der Verteilungsmuster von Vögeln an Straßen unterschiedlicher Verkehrsstärke. Sofern naturschutzrelevante Vorkommen von

³³⁹ *Niedersächsischer Städtetag* (2008).

³⁴⁰ *Ebd.*, S. 14 u. 23.

³⁴¹ *Lambrecht/Trautner* (2007), S. 33ff.

³⁴² *Gassner/Winkelbrandt/Bernotat* (2010), S. 252-253.

³⁴³ *Ebd.*, S. 259-260.

³⁴⁴ *Garniel/Mierwald* (2010).

Vogelarten durch übertragbare Lärmemissionen betroffen sind, können die angegebenen Orientierungswerte zur Beurteilung der Schwere der Auswirkungen herangezogen werden.³⁴⁵

Nicht für alle Schutzgüter und Wirkfaktoren existieren allgemein gültige Standards zur Bewertung im Rahmen einer UVP. Grundsätzlich werden in solchen Fällen überwiegend verbal-argumentative Bewertungsansätze angewandt. Häufig kommen relative Bewertungen in Ordinalskalen von „sehr hoch“ bis „sehr gering“ zum Einsatz und die Bedeutung des Schutzzutes wird zweistufig in eine „allgemeine“ oder „besondere Bedeutung“ unterschieden.³⁴⁶ Insbesondere fehlen übertragbare inhaltliche Bewertungsmethoden oder Grenzwerte insbesondere für die Wirkfaktoren des nicht bestimmungsgemäßen Betriebs wie größere Landhebungen, Versalzungen des Bodens/Grundwassers oder Freisetzung von Kohlendioxid (vgl. Kap. 5.2). Für eine adäquate Bewertung dieser Auswirkungen auf die Schutzgüter sind insbesondere die Ergebnisse bereits laufender Forschungsvorhaben, wie das europäische RISKS-Projekt (Research into Impacts and Safety in CO₂ Storage), relevant. Dem Schutzzut Mensch sollte in einer UVP für ein CO₂-Speicherprojekt ein besonderes Gewicht eingeräumt werden, da insbesondere eine CO₂-Leckage ein hohes Gesundheitsrisiko birgt und der Mensch im KSPG besonders hervorgestellt wird. Vorhandene Wissenslücken, insbesondere im Bereich der Auswirkungen von CO₂-Leckagen, erschweren eine Bewertung im Rahmen der UVP. Darüber hinaus wäre eine Abwägung zwischen den Auswirkungen des globalen Klimawandels und den lokalen negativen Effekten eines Speicherprojektes sinnvoll, aber auch hier fehlt es an methodischen Vorgaben und Leitlinien für die Bewertung im Rahmen der UVP³⁴⁷.

In einer niederländischen Studie wurden die Prüfgegenstände der UVP konkretisiert.³⁴⁸ Die Autoren empfehlen, die Umweltauswirkungen für jede einzelne Projektphase zu betrachten. Ein besonderes Augenmerk sollte dabei auf den folgenden Punkten liegen:

- Gasförmige Emissionen und Immissionen (auch CO₂-Leckagen);
- Konkurrenz mit der Gasspeicherung sowie mit Erdwärme-Projekten;
- Beeinträchtigungen und mögliche Kontamination des Bodens (durch Schwermetalle oder CO₂)
- induzierte Seismizität;
- Risiken durch die Übertageeinrichtungen, Risiko einer CO₂-Leckage und mögliche Auswirkungen auf Menschen und Ökosysteme;
- mögliche Beeinträchtigung und Kontamination von Grund- und Oberflächenwasser

³⁴⁵ Gassner/Winkelbrandt/Bernotat (2010), S. 211-212.

³⁴⁶ Vgl. Gassner/Winkelbrandt/Bernotat (2010), S. 270.

³⁴⁷ Vgl. Iea Greenhouse Gas R&D Programme (2007), S. 94ff.

³⁴⁸ Koornneef/Faaij/Turkenburg (2006), S. 3-4.

In einer Studie des IEA Greenhouse Gas R&D Programme wurden verschiedene Regelwerke zur Durchführung von UVP verglichen und auf ihre Anwendbarkeit für CCS-Projekte geprüft. Da die vorhandenen Bewertungsmethoden im Rahmen von UVP für die neue CCS-Technologie nicht ausreichend sind, wird die Entwicklung internationaler Regelwerke für die Zulassung von Kohlendioxidspeichern empfohlen. Folgende Punkte sollten in internationalen Leitlinien aufgenommen werden³⁴⁹:

- Gesundheits- und Sicherheits-Aspekte;
- Risikoanalysen und Modelle für mögliche Austritte;
- Ausschlussmöglichkeiten von Projekten mit hohen Risiken;
- Einbeziehung einer vollständige Kohlenstoffbilanz;
- Spezifikation der zu behandelnden Umweltthemen und notwendigen Informationen;
- bindende Vorgaben für Monitoring, Management und Übergabe des Speichers an Behörden;
- Richtlinien für langfristiges Management;
- Berücksichtigung der Ergebnisse der geologischen Speicherbewertung.

Vorhandene Wissenslücken, beispielsweise im Bereich der Auswirkungen von CO₂-Leckagen, müssten der Studie folgend zunächst geschlossen werden, um eine effektive Bewertung durchführen zu können. Darüber hinaus empfehlen die Autoren, Leitlinien für die Abwägung zwischen den Auswirkungen des globalen Klimawandels und den lokalen negativen Effekten eines CCS-Projektes zu entwickeln³⁵⁰.

5.3 Leitlinien, Grenz-, Richt- oder Schwellenwerte

Die Auswirkungsabschätzung im Zusammenhang mit der CO₂-Speicherung weist die Schwierigkeit auf, dass – abgesehen von Regelungen zum Schutz des Klimas – so gut wie keine Umweltstandards und Grenzwerte in Bezug auf die schadstoffspezifischen Wirkfaktoren existieren. Insofern sind, wie bei der UVP im Falle des Fehlens von rechtlichen Bewertungsmaßstäben üblich, außerrechtliche Bewertungsmaßstäbe anzulegen. Die Bewertung der Umweltauswirkungen der CO₂-Speicherung kann nur anhand zu entwickelnder fachlicher Maßstäbe bezogen auf die einzelnen Schutzgüter erfolgen. Angesichts der Kopplung der Umweltvorsorge an den Stand von „Wissenschaft und Technik“ ist ein besonders strenger Maßstab anzulegen.

Hinsichtlich geeigneter Grenz- bzw. Beurteilungswerte ist allerdings zu bedenken, welche Funktion diese im Rahmen der Umweltbewertung einnehmen können und sollen. Letztendlich dient ein Beurteilungswert dazu, zu überprüfen, ob eine gewünschte Umweltqualität erreicht wird bzw. ob diese durch ein Vorhaben unzulässig beeinträchtigt wird.

³⁴⁹ IEA Greenhouse Gas R&D Programme (2007), S. 93f.

³⁵⁰ Iea Greenhouse Gas R&D Programme (2007), S. 94ff.

In Bezug auf stoffliche Kontaminationen ist als Grundvoraussetzung zur Beantwortung dieser Fragestellung zu klären,

- welchen Stoffmengen/Konzentrationen das Schutzgut ausgesetzt sein wird und
- bei welcher Stoffmenge/Konzentration erhebliche Schadwirkungen auftreten werden³⁵¹.

Hierzu werden in der Planungspraxis i. d. R. Prognosen erstellt, die eine Aussage darüber ermöglichen, welche Zusatzbelastung zu erwarten ist. Für die abschließende Bewertung wird dann die sich aus Vorbelastung und Zusatzbelastung ergebende Gesamtbelastung herangezogen.

Für die Potenzialbewertung werden solche Prognosen nicht erstellt. Grenzwerte werden daher vorwiegend im Zusammenhang mit Zulassungsverfahren und der nachfolgenden Überwachung zum Tragen kommen.

Im Zusammenhang mit der CO₂-Speicherung kann es – im nicht bestimmungsgemäßen Betrieb - zu Einträgen von CO₂ und seinen Begleitstoffen in Grund- und Oberflächengewässer, Boden und Luft kommen und über diese Transportwege zu Beeinträchtigungen der zu betrachtenden Schutzgüter.

Obwohl entsprechend dem KSpG keine Leckagen zulässig sind, beschäftigen sich verschiedene Forschungsvorhaben mit der Frage nach der Festlegung von Grenzwerten für CO₂ und andere Begleitstoffe. Wesentliches Merkmal bei der Festlegung der Grenzwerte muss neben der Schadwirkung auch die Dauer der erlaubten Exposition sowie die Entfernung zur Quelle, ab der der Grenzwert einzuhalten ist, sein.

Kronimus et al. empfehlen im Zusammenhang mit der CO₂-Speicherung für folgende Substanzen, die Festlegung von Grenzwerten³⁵²:

- Kohlendioxid (CO₂);
- Schwefelwasserstoff (H₂S);
- Kohlenmonoxid (CO);
- Methanol (CH₃OH);
- Stickoxide, stellvertretend: NO₂;
- SO₂ und SO₃;
- Schwermetalle, stellvertretend: Blei, Zink ;
- Organika, stellvertretend: BTEX bzw. Benzol;
- Salpetersäure (HNO₃);
- Schwefelsäure (H₂SO₄).

³⁵¹ Landesumweltamt Brandenburg (2008), S. 7.

³⁵² *Kronimus et al.* (2011), S. 222.

Speziell für aquatische Systeme werden Grenzwerte für weitere Parameter erforderlich, wie z.B. der pH-Wert oder Stoffe, die durch eine Versauerung mobilisiert werden und damit im Falle einer CO₂-Leckage relevant werden können. Hierzu zählen *Kronimus et al.* Aluminium, Benzol, Blei, Eisen, Zink, polzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe und Mangan³⁵³. Grundsätzlich sollten aber die Grenzwerte für alle nach WRRL geregelten Stoffe durch die CO₂-Speicherung nicht gefährdet werden.

Für die Festlegung einer Stoffkonzentration, ab der es zu einer Schadwirkung kommt, wäre es wünschenswert, dass lebensraumtypische bzw. artspezifische Wirkungswerte zur Verfügung ständen. Dieses ist jedoch nur ausnahmsweise der Fall. Gründe hierfür sind, dass die naturschutzrelevanten Arten in der Regel nicht zu den Standardorganismen ökotoxikologischer Stoffprüfungen gehören, wobei bei der Vielfalt der Arten nur langfristig durch systematische Untersuchungen (z. B. Freilandstudien) und Sammeln der Wirkungsdaten eine Verbesserung der Situation erreicht werden könnte³⁵⁴. Beurteilungswerte für den Menschen sind i.d.R. nicht auf Lebensraumtypen und Arten übertragbar, da sowohl die Empfindlichkeit als auch die Art der Beeinträchtigung in vielen Fällen eine andere ist. So spielen beispielsweise Depositionen für den Menschen meist keine Rolle, während sie für die Schutzgüter Boden, Pflanzen und Biotope sowie Biodiversität eine besondere Relevanz aufweisen. Aber auch für den Menschen liegen bisher nur unzureichende Kenntnisse zu verträglichen CO₂-Konzentrationen vor.

Es gibt laufende Forschungsvorhaben, in denen u. a. Fragen zur Wirkungsbewertung behandelt werden. Im europäischen RISKS-Projekt (Research into Impacts and Safety in CO₂ Storage) werden beispielsweise mögliche Umweltauswirkungen der geologischen CO₂-Speicherung untersucht. Dabei stehen marine und terrestrische Lebensräume im Fokus. Es werden Experimente sowie Feldbeobachtungen durchgeführt. Projektziele sind:

- Sicherheit von Speichern bewerten;
- Minimierungsmöglichkeiten aufzeigen;
- Monitoring-Strategien für den oberflächennahen Bereich entwickeln;
- Voraussetzungen für die Genehmigung von Speicher-Projekten definieren;
- Kommunikation der Sicherheit der CO₂-Speicherung verbessern;
- Leitlinien zur Ermittlung und Bewertung der Auswirkungen entwickeln.

Das Projekt hat eine Laufzeit von vier Jahren und begann 2010. Insgesamt wirken 24 Organisationen aus verschiedenen Nationen bei dem Forschungsvorhaben zusammen³⁵⁵.

Solange die laufenden Forschungen keine Ergebnisse zu lebensraum- und artspezifischen Beurteilungswerten liefern können, muss auf kompartimentspezifische Zielvorgaben und Qualitätsnormen zurückgegriffen werden. In vielen Fällen liefern diese indirekten Zielvorgaben

³⁵³ *Kronimus et al.* (2011), S. 226.

³⁵⁴ Vgl. *Landesumweltamt Brandenburg* (2008), S. 15.

³⁵⁵ Siehe www.risks-co2.eu, Stand: 26.06.2012.

bereits eine gute Grundlage für die Bewertung der Schadwirkung. Z. T. sind sie ökotoxikologisch basiert, indem ihre Ableitung unter Berücksichtigung des jeweils empfindlichsten geprüften Organismus des entsprechenden Kompartiments erfolgte³⁵⁶. In anderen Fällen liefern sie eine erste Worst Case-Abschätzung. Eine ausführliche Darstellung der vorliegenden Beurteilungswerte geben Kronimus et al.³⁵⁷. Verschiedene gesetzliche Regelungen, Verordnungen, und Leitlinien nennen Grenz- bzw. Beurteilungswerte für Schadwirkungen auf den Menschen und/oder auf Ökosysteme. Hierzu gehören die 39. BImSchV, die Bodenschutzverordnung, die Trink- und Grundwasserschutzverordnungen sowie die Umweltqualitätsnormen gemäß Wasserrahmenrichtlinie, aber auch die Critical Loads, die für Stickstoffdepositionen, Säureeinträge und verschiedene Schwermetalldepositionen entwickelt wurden.

Enge Wechselwirkungen bestehen zwischen dem Kompartiment Boden und dem Schutzgut Pflanzen und Biotope bzw. Biologische Vielfalt. Dementsprechend sollten Grenzwerte für das Schutzgut Boden auch die Wirkungen auf die Vegetation berücksichtigen. Kronimus et al. nennen in diesem Zusammenhang Vegetationsstress, der ein ökologischer Indikator für eine kritische Veränderung von Böden sein kann³⁵⁸. Allerdings sind die Mechanismen, die CO₂-induzierten Pflanzenstress auslösen, bislang nicht entschlüsselt. Als am wahrscheinlichsten wird die Verdrängung von Sauerstoff im Bodengas angesehen, wodurch die Wurzelatmung beeinträchtigt wird. Weitere Mechanismen könnten die Modifikation von pH-Wert und Redoxpotenzial oder der Mikrobengemeinschaft sein. Grundsätzlich sehen Kronimus et al. Vegetationsstress als ein geeignetes Kriterium an, um Grenzwerte für CO₂ im Bodengas festzulegen. Allerdings betonen sie auch, „dass aufgrund der großen Variabilität der Eigenschaften unterschiedlicher Bodentypen keine pauschalen Grenzwerte festgelegt werden können; diese können nur in Abhängigkeit von spezifischen Parametern, z. B. Bodentyp, Bodenbeschaffenheit und Flora formuliert werden“³⁵⁹.

Zu den oben angerissenen Schwierigkeiten bei der Festlegung von Grenzwerten kommt hinzu, dass sich die meisten schutzgutspezifischen Auswirkungen der CO₂-Speicherung nicht konkret quantifizieren lassen, wie dies bei der Angabe von Schadkonzentrationen möglich wäre. In diesen Fällen ist eine den standörtlichen Gegebenheiten angepasste verbal-argumentative Bewertung erforderlich, für die in vielen Fällen eigene Gutachten erstellt werden müssten. Dies betrifft z. B. die Bewertung von Auswirkungen von Veränderungen des Wasserhaushalts, die Bewertung von Auswirkungen durch eine Versalzung des Bodens und des Grundwassers oder die Bewertung von Auswirkungen durch eine veränderte Bodenchemie.

³⁵⁶ Landesumweltamt Brandenburg (2008), S. 15.

³⁵⁷ Kronimus et al. (2011), S. 222ff.

³⁵⁸ Kronimus et al. (2011), S. 230.

³⁵⁹ Kronimus et al. (2011), S. 231.

5.4 Anforderungen an die Verfahrensunterlagen

Gemäß § 13 Abs. 1 KSpG darf die Planfeststellung für ein CO₂-Speichervorhaben nur erteilt werden, wenn u. a.

- die Langzeitsicherheit des Kohledioxidspeichers gewährleistet ist, d. h. gemäß § 3 Punkt 9 KSpG gewährleistet ist, dass das gespeicherte Kohlendioxid und die gespeicherten Nebenbestandteile des Kohlendioxidstroms unter Berücksichtigung der erforderlichen Vorsorge gegen Beeinträchtigungen von Mensch und Umwelt vollständig und auf unbegrenzte Zeit in dem Kohlendioxidspeicher zurückgehalten werden können;
- Gefahren für Mensch und Umwelt im Übrigen nicht hervorgerufen werden können,
- die erforderliche Vorsorge gegen Beeinträchtigungen von Mensch und Umwelt getroffen wird, insbesondere durch Verhinderung von erheblichen Unregelmäßigkeiten.

Um den entsprechenden Nachweis zu führen, sind zahlreiche Unterlagen und Gutachten erforderlich. Einige Anforderungen bezüglich der beizubringenden Unterlagen ergeben sich bereits unmittelbar aus § 12 KSpG, u. a.:

- eine Beschreibung der Technologien;
- Angaben über die zu erwartende Druckentwicklung im Speicherkomplex, die Lösung und die Freisetzung von Stoffen und die Verdrängung von Formationswasser während und nach der Injektion;
- einen Sicherheitsnachweis nach § 19 KSpG, in dem auch geeignete Maßnahmen zur Verhütung und Beseitigung von Leckagen und erheblichen Unregelmäßigkeiten beschrieben sind;
- ein Überwachungskonzept nach § 20 KSpG;
- die nach dem Gesetz über die UVP erforderlichen Unterlagen.

Erste Vorschläge für Anforderungen und Vorschläge zur Erstellung von Leitfäden und Richtlinien für die CO₂-Speicherung wurden außerdem bereits bei der BGR erarbeitet.³⁶⁰ Eine Übersicht dazu gibt Abbildung 7. Überwiegend konzentrieren sich die Angaben zu den

³⁶⁰ Von Goerne/Weinlich/May (2010).

Anforderungen auf die formalen, technischen und Sicherheitsaspekte.

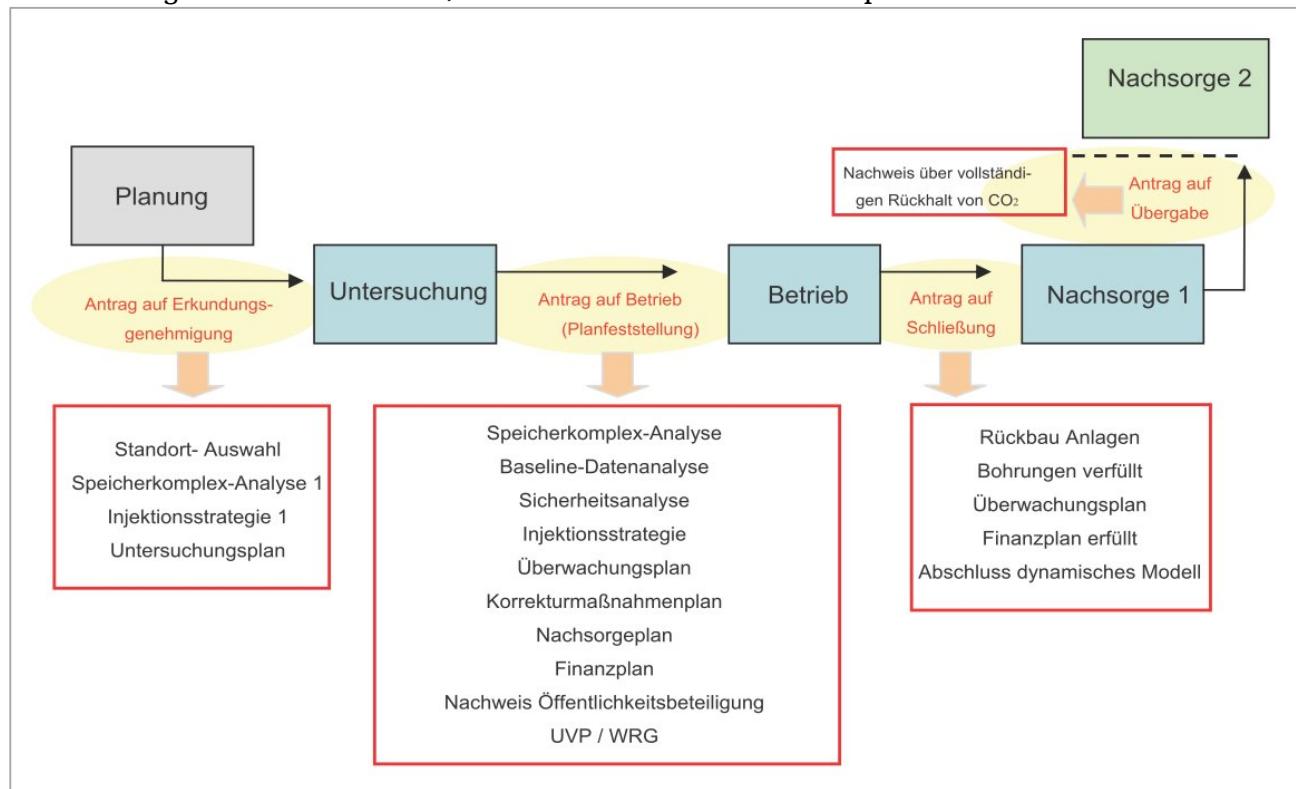


Abbildung 7: Phasen eines CO₂-Speichervorhabens, notwendige Anträge und Genehmigungen sowie (in rot gerahmte Blöcke) wesentliche Anforderungen für einzelne Anträge³⁶¹

In Kapitel 3.2 wurden die möglichen Auswirkungen von CO₂-Speichervorhaben auf die zu betrachtenden Schutzgüter abgeschätzt. Dabei ist deutlich geworden,

- dass eine belastbare Auswirkungsanalyse nur für konkrete Vorhaben auf der Basis detaillierter Informationen zum Vorhaben, zum Speicher, zu den geplanten Maßnahmen und zum gewählten Standort und seinem weiteren Umfeld möglich sind,
- dass neben den üblichen Auswirkungen von vergleichbaren Industrieanlagen und Erkundungsmaßnahmen auch spezifische Auswirkungen auftreten können, die unter Umständen erhebliche Auswirkungen auf Mensch und Umwelt haben.

Landhebungen und -senkungen bis in den Dezimeterbereich gehören gemäß Großmann et al.³⁶² zu den Wirkungen des bestimmungsgemäßen Betriebs. Wie in Kapitel 3.2 deutlich geworden ist, sind die Auswirkungen dieser Reliefveränderungen auf die verschiedenen Schutzgüter stark von Art und Ausmaß der Hebungen und Senkungen abhängig: anders als geringe, großflächig gleichmäßige Hebungen können geringe, größere und ungleichmäßige Hebungen erhebliche Effekte verursachen. Um die entsprechenden Auswirkungen einerseits

³⁶¹ Von Goerne/Weinlich/May (2010), S. 32.

³⁶² Großmann et al. (2011a), S. 26.

prognostizieren zu können und andererseits so gering wie möglich zu halten, ist es erforderlich, Gutachten vorzulegen

- über die aufgrund der geologischen Gegebenheiten und der geplanten Injektionsraten und der daraus resultierenden Druckfelder zu erwartenden Landhebungs- bzw. nachfolgenden -senkungsraten sowie der insgesamt zu erwartenden Reliefänderungen und die davon betroffenen Flächen;
- über vorhandene Störungssysteme, die bis an die Oberfläche reichen und Relativbewegungen verursachen können bzw. über den Ausschluss solcher Störungssysteme;
- über die Folgewirkungen der prognostizierten Landhebungen und -senkungen auf Grundwasserleiter, Grundwasserstände und -ströme;
- über die Folgewirkungen der prognostizierten Landhebungen und -senkungen auf Oberflächengewässer, Hochwassersicherheit, Wasserwirtschaft und Schiffbarkeit von Gewässern.
- über die Auswirkungen der prognostizierten Landhebungen und -senkungen auf Bauwerke und Infrastrukturanlagen.

Auf der Basis entsprechender Gutachten müssen maximal zulässige Landhebungs- und -senkungsraten sowie maximal zulässige Absolutbeträge festgelegt werden, um die Auswirkungen durch diesen Wirkfaktor auf ein verträgliches Maß zu begrenzen. Das Monitoring ist so auszulegen, dass es geeignet ist, die Einhaltung dieser Auflage zu kontrollieren.

Ein anderer vorhabenspezifischer Wirkfaktor ist die erhöhte Seismizität. Haben die induzierten Beben eine geringe Stärke, dann haben sie keine oder nur geringfügige Auswirkungen auf den Menschen und andere Schutzgüter. Erreichen sie eine große Magnitude, dann sind große Schäden und Gefahr für Leib und Leben nicht auszuschließen. Daher ist es notwendig, auch für diesen Wirkfaktor eine Obergrenze zu bestimmen, die nicht überschritten werden darf. Als Basis dafür sind Gutachten erforderlich,

- die Aussagen zur voraussichtlichen Seismizität machen, zu den zu erwartenden Magnituden und zur Häufigkeit von signifikanten Beben;
- die Aussagen machen, welche Wirkungen auf Kultur- und Sachgüter und welche Gefährdung für den Menschen von den induzierten Beben im Einflussbereich des Vorhabens ausgehen könnten.

Schilling & Krawczyk³⁶³ empfehlen, die Injektion bereits bei Auftreten von Beben einzustellen, die um eine Magnitude unter dem maximal verträglichen Wert liegen. Denn nach weltweiten Beobachtungen fallen nachfolgende Ereignisse maximal eine Magnitude höher aus, als vor der Beendigung der Verpressung beobachtet.

³⁶³ Schilling/Krawczyk (2011), S. 38.

Die durch die Injektion des CO₂ verursachte Druckerhöhung in der Formation induziert eine Bewegung des Formationswassers und kann zu einem Aufstieg von Salzwasser in höhere Schichten und schlimmstenfalls bis an die Oberfläche führen. Die Infiltration von salzigem Wasser ins Grundwasser oder an die Oberfläche kann Auswirkungen auf Pflanzen- und Tierlebensräume haben, die landwirtschaftliche Nutzung von Flächen unmöglich machen und Oberflächengewässer verunreinigen. Als Basis für die Bewertung möglicher Beeinträchtigungen der Schutzgüter sind Gutachten erforderlich,

- die auf Grundlage der geologischen Struktur des Speichergebiets Aussagen zu den Risiken eines Salzwasseraufstiegs über vorhandene oder künftig entstehende Wegsamkeiten machen;
- gegebenenfalls Angaben dazu machen, wo diese Gefahr besonders groß ist, damit dies im Rahmen des Monitorings berücksichtigt werden kann;
- die Aussagen zur Höhe möglicher Salzkonzentrationen im Grundwasser oder in Oberflächengewässern machen.

Bezüglich der Leckage von CO₂ und Begleitstoffen ist zwischen der Freisetzung aus Über Tageanlagen und bei Blowouts einerseits sowie der Leckage aus dem tiefen geologischen Speicher über Wegsamkeiten an die Oberfläche andererseits zu unterscheiden.

Der Nachweis, dass der geplante geologische Speicher keine Wegsamkeiten für das CO₂ und Nebenbestandteile sowie für verdrängtes Formationswasser aufweist, ist ein zentraler Bestandteil der Antragsunterlagen. Darüber hinaus sind Gutachten vorzulegen,

- die das Risiko für das Vorhandensein unentdeckter Wegsamkeiten sowie für das Entstehen von Wegsamkeiten durch zukünftige Ereignisse und Entwicklungen untersuchen;
- und gegebenenfalls Angaben dazu machen, wo diese Gefahr besonders groß ist, damit dies im Rahmen des Monitorings berücksichtigt werden kann.

Letztlich kann aber nicht vorausgesagt werden, wo wann wie viel CO₂ und Begleitstoffe im Fall eines nicht bestimmungsgemäßen Betriebszustandes aus dem geo-logischen Speicher an die Oberfläche gelangen. Um die Risiken, die aus einer schlechenden Akkumulation in Bodensenken und anderen nicht oder schlecht durchlüfteten Strukturen wie Höhlen, Gruben, Tunnels, Unterführungen oder Kellern resultieren, erkennen und bewerten zu können, müssen diese Strukturen im gesamten potenziell vom Vorhaben betroffenen Raum ermittelt und bewertet werden. Sie sind beim Monitoring zu berücksichtigen.

Mögliche CO₂-Freisetzungen aus Über Tageanlagen, etwa durch Ausblaserventile, gerissene Schlauchverbindungen oder Zerstörung von Lagerbehältern, sowie durch Blowouts an Injektionsbohrungen, sind hinsichtlich des Ortes und der voraussichtlichen Wirkung überschaubarer. Sie sind in Szenarien zu untersuchen, die die konkret geplanten Anlagen und Maßnahmen sowie die standörtlichen Gegebenheiten des Vorhabens berücksichtigen. Bezüglich der freigesetzten Mengen, der Ausbreitung am Boden und in der Luft sowie der Verdünnung durch Vermischung ist der Worst Case zu berücksichtigen. Anders als bei den

überschlägigen Untersuchungen von Großmann et al.³⁶⁴ sind dabei nicht nur 4,0 Vol.-% und 0,5 Vol.-% CO₂ als Beurteilungswerte³⁶⁵ heranzuziehen. Es ist auch darzustellen, in welcher räumlichen Entfernung die niedrigeren Beurteilungswerte (vgl. Tabelle 4 auf Seite 49) unterschritten werden bzw. keine Auswirkungen auf die CO₂-Konzentration in der Luft mehr zu erwarten sind. Darüber hinaus ist die zeitliche Entwicklung zu berücksichtigen, damit deutlich wird, wie schnell das CO₂ sich ausbreitet, und wie lang der Zeitraum ist, der benötigt wird, bis sich wieder eine normale Konzentration eingestellt hat. Nur auf der Basis entsprechender standortkonkreter Untersuchungen können angemessene Schutzabstände zu besiedelten Bereichen, empfindlichen Nutzungen und Ökosystemen festgelegt und bewertet werden.

An alten Bohrungen sind grundsätzlich sowohl schlechende Leckagen (vgl. Abbildung 3 auf Seite 34) als auch Blowouts denkbar. Insbesondere wenn Altbohrungen in Siedlungsnahe oder in der Nähe von Schutzgebieten liegen, geht von ihnen eine potenzielle Gefahr für den Menschen sowie für Pflanzen, Tiere und die biologische Vielfalt aus, die zu berücksichtigen ist. Alle relevanten Altbohrungen sind daher sorgfältig zu überprüfen und zu sichern. Dabei sind auch die Bohrungen einzubeziehen, die sich zwar während der Einspeicherung nicht im Einflussbereich des geologischen CO₂-Speichers befinden, aber im Laufe der Jahrhunderte durch die Migration des CO₂ erreicht werden könnten. Alle Altbohrungen sind in das Monitoring einzubeziehen.

Für die Ermittlung der voraussichtlichen Auswirkungen eines Speichervorhabens in den erforderlichen Umweltgutachten, wie Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP), Landschaftspflegerischer Begleitplan (LBP), FFH-Verträglichkeitsprüfung (FFH-VP), Spezielle Artenschutzprüfung (SAP) und gewässerökologisches Gutachten zur Verträglichkeit mit den Zielen der Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) und der Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie (MSRL), sind weitere Unterlagen und Gutachten erforderlich:

- Eine Ermittlung des vom Vorhaben betroffenen Raumes unter Berücksichtigung aller Maßnahmen einschließlich des Monitorings und der Reichweite vor-habenbedingter Wirkungen wie akustischer und optischer Emissionen und Erschütterungen, der langzeitlichen Ausbreitung des CO₂ im Speicher, des entstehenden Druckfeldes und der daraus resultierenden Seismizität, Landhebungen und -senkungen sowie denkbarer Wegsamkeiten für den Aufstieg von CO₂, Begleitstoffen und Formationswasser;
- Bestandsuntersuchungen zu den verschiedenen Schutzgütern und Ermittlung der jeweils wertvollen Bereiche im betroffenen Raum;
- Unterlagen/Gutachten zu den vom Vorhaben bzw. einzelnen Phasen und Maß-nahmen ausgehenden Schall- und Erschütterungsemissionen (inklusive Unterwasserschall), dabei sind auch die zeitlich befristeten und wiederkehrenden Monitoringmaßnahmen zu berücksichtigen, Dauer und zeitliche Abstände zu benennen.

³⁶⁴ Großmann et al. (2011b).

³⁶⁵ 4,0 Vol.-%: Konzentration in der Atemluft beim Ausatmen. IDLH-Wert (Immediately Dangerous to Life and Health), bei dem bei einer 30-minütigen Einwirkung die Wiederherstellung der Gesundheit ohne bleibende Folgen möglich ist. 0,5 Vol.-%: Wert für die maximale Arbeitsplatzkonzentration.

- Unterlagen zu Strömungsänderungen, Sedimentverlagerungen und Gewässertrübungen durch Offshore-Anlagen sowie Nachweise der langfristigen Stabilität und ausreichenden Sicherung der Anlagen z. B. gegen Auskolkungen oder bei Extremwetter.
- Unterlagen zu Bohrspülungen und anderen Chemikalien die vorhabenbedingt in die Umwelt gelangen werden bzw. können.

6 Diskussion

In den Kapiteln 4 und 5 wurden bereits einige Aspekte diskutiert, die bei der Bewertung der Auswirkungen einer Speicherung von CO₂ im tiefen geologischen Untergrund für die Potenzialbewertung und spätere Zulassungsverfahren relevant sind. Einer abschließenden Bewertung von Umweltauswirkungen stehen offene Fragen bezüglich der Eintrittswahrscheinlichkeiten und Risiken insbesondere für den nicht bestimmungsgemäßen Betrieb entgegen. Für die Bewertung im Rahmen der Zulassungsverfahren fehlt es an lebensraum- und artbezogenen Wirkungsschwellen sowie an Wirkungsschwellen in Bezug auf Beeinträchtigungen für den Menschen. Für die Planfeststellung eines CO₂-Speichervorhabens bedarf es einer Reihe von vorhabenspezifischen Untersuchungen und Gutachten, die über die bereits aus § 12 KSpG genannten Angaben hinausgehen. Diese reichen von auf das konkrete Vorhaben bezogenen Auswirkungsanalysen z. B. zu Landhebungen- und Senkungen, Aussagen zur voraussichtlichen Seismizität und den zu erwartenden Wirkungen auf Kultur- und Sachgüter oder zur Veränderung der Salzkonzentrationen im Grundwasser bis hin zu der Ermittlung aller relevanten Altbohrungen, die sich zwar während der Einspeicherung nicht im Einflussbereich des geologischen CO₂-Speichers befinden, aber im Laufe der Jahrhunderte durch die Migration des CO₂ erreicht werden könnten und die Wegsamkeiten für eine Freisetzung von CO₂ bilden könnten.

Für die Auswirkungen im bestimmungsgemäßen Betrieb konnte trotz fehlender konkreter Angaben zum Speichervorhaben zumindest eine vorläufige Bewertung der möglichen Auswirkungen vorgenommen werden. Im Ergebnis sind die meisten Beeinträchtigungen im Rahmen eines Zulassungsverfahrens durch entsprechende Auf-lagen, Vermeidungs- und Ausgleichsmaßnahmen regelbar. Größere Konflikte werden bei den Auswirkungen von Seeseismiken auf marine Säuger erwartet, da hier, entsprechend der gutachterlichen Erfahrung aus anderen Projekten im marinen Bereich, häufig Schwierigkeiten im Zulassungsverfahren auftreten.

Aufgrund der fehlenden Informationen zu Eintrittswahrscheinlichkeiten ist die Spanne möglicher Auswirkungen für den nicht bestimmungsgemäßen Betrieb sehr groß. Um dennoch Aussagen zum Risiko der Gefährdung der Umweltschutzgüter im Rahmen der Potenzialbewertung treffen zu können, wurden schutzgutspezifisch konfliktäre Bereiche identifiziert. Inwieweit ausgeschlossen werden kann, dass es in diesen Bereichen zu Beeinträchtigungen kommt, kann letztlich nur durch eine vorhabenspezifische Risikoanalyse geklärt werden. Eine Beeinträchtigung dieser Bereiche bzw. Ausprägungen sollte im Sinne der geltenden Rechtslage, der CCS-RL sowie entsprechend dem KSpG in jedem Fall vermieden werden.

Ein Ausschluss der genannten Bereiche als potenzieller Speicherkomplex wäre eine Möglichkeit, Beeinträchtigungen von vornehmlich auszuschließen. Durch eine solche

Vorgehensweise würden allerdings die potenziellen Möglichkeiten einer CO₂-Speicherung weitgehend eingeschränkt, wenn nicht sogar völlig verhindert. Der sogenannten CCS-Technologie wird jedoch vor dem Hintergrund des Klimawandels ein hoher Stellenwert zugewiesen. Sie „ist vor allem für energieintensive Industriezweige mit hohen prozessbedingten CO₂-Emissionen (z.B. Stahl, Kalk, Zement, Chemische Industrie, Raffinerien) sowie für fossil befeuerte Kraftwerke (Braun- und Steinkohle) langfristig von Bedeutung. Die Technologie wird im industriellen Maßstab bereits seit einigen Jahren in Norwegen und Algerien erprobt. Weitere Speicherprojekte sind in vielen Industrieländern in Vorbereitung“³⁶⁶. Dies gilt insbesondere auch unter Berücksichtigung einer fortschreitenden industriellen Entwicklung in den Schwellenländern. Bei der Potenzialanalyse sind daher auch im Rahmen einer Abwägung die globalen Folgen eines Klimawandels in die Bewertung mit einzubeziehen.

Wenn ein vollkommener Ausschluss der konfliktären Ausprägungen im Bereich des Speicherkomplexes nicht möglich ist, so sollten diese zumindest bei der Errichtung der Übertageanlagen, in deren Bereich auch im bestimmungsgemäßen Betrieb Auswirkungen nicht vollständig vermieden werden können, ausgespart werden.

Welches Risiko (als Kombination der Wahrscheinlichkeit des Schadenseintritts und des Schadensausmaßes) letztendlich tragbar ist und damit nicht als erhebliches Risiko im Sinne der CCS-Richtlinie anzunehmen ist, wird immer auch eine gesellschaftliche Entscheidung sein.

7 Zusammenfassung

Zur Umsetzung des im Dezember 2008 verabschiedeten Klimaschutzbündels der EU wurde im Jahr 2009 auf europäischer Ebene u.a. die so genannte CCS-Richtlinie (CCS-RL) erlassen. Die CCS-RL betrifft die großmaßstäbliche Speicherung von CO₂ und hat hierfür einen einheitlichen europäischen Rahmen geschaffen. Zur Umsetzung der CCS-RL ist am 24.8.2012 das Kohlendioxid-Speicherungsgesetz (KSpG) in Kraft getreten. Die CSS-RL sowie das KSpG zielen darauf ab, dass die CO₂-Speicherung umweltverträglich und unter Vermeidung von negativen Auswirkungen und Risiken für die Umwelt und die menschliche Gesundheit erfolgt.

In Umsetzung von Art. 4 Abs. 2 CCS-RL sieht § 5 KSpG eine Bewertung der in Deutschland vorhandenen Speicherpotenziale vor. Dem Umweltbundesamt obliegt gemäß § 5 Absatz 2 KSpG die Aufgabe, für die bundesweite Potenzialbewertung der unterirdischen Kohlendioxidspeicherung (CCS) die fachlichen Grundlagen für eine wirksame Umweltvorsorge zu erarbeiten.

Ziel dieses Gutachtens ist es, für die Potenzialbewertung handhabbare Bewertungsmaßstäbe und -methoden zu entwickeln, mit denen das Umweltbundesamt die Auswirkungen auf die Schutzgüter Tiere, Pflanzen, biologische Vielfalt, Landschaft, Kultur- und sonstige Sachgüter sowie Mensch bewerten kann. Darüber hinaus sollen Handreichungen, die für Stellungnahmen des Umweltbundesamtes vor Entscheidungen nach den §§ 7, 13, 17 und 37 KSpG anwendbar sind, geschaffen werden.

³⁶⁶ http://www.bgr.bund.de/DE/Themen/CO2Speicherung/co2-speicherung_node.html;jsessionid=09414D62479ABE91389F0A0AC5BA49B7.1_cid093, Stand: 26.06.2012.

Für die Bewertung der Umweltauswirkungen erfolgte eine Differenzierung der Wirkfaktoren in solche für den bestimmungsgemäßen und den nicht bestimmungsgemäßen Betrieb. Als bestimmungsgemäß wird der Betrieb dann angesehen, wenn das injizierte CO₂ in seiner Gesamtheit prognosegemäß in der Speicherstätte verbleibt und der Speicher sich prognosegemäß entwickelt. Wirkfaktoren des nicht bestimmungsgemäßen Betriebes ergeben sich als Folge unplanmäßiger Ereignisse, die nie vollständig ausgeschlossen werden können. Der nicht bestimmungsgemäße Betrieb entspricht nicht der Genehmigung.

Für die identifizierten Wirkfaktoren wird (soweit es aus der vorliegenden Literatur ableitbar ist) für jedes Schutzgut das mögliche Ausmaß der Beeinträchtigung beschrieben. Für die Auswirkungsabschätzung im Rahmen der Potenzialbewertung werden die Spanne der möglichen Konflikte aufgezeigt und in Bezug auf die Wirkfaktoren konfliktäre Bereiche bzw. Ausprägungen definiert. Hieraus werden Empfehlungen für die Potenzialbewertung abgeleitet. Für die Bewertung im Rahmen der Zulassungsverfahren werden bestehende Bewertungsverfahren der UVP hinsichtlich ihrer Übertragbarkeit auf die CO₂-Speicherung geprüft, vorhanden Leitlinien, Grenz-, Richt- und Schwellenwerte beleuchtet und eine Liste derjenigen Informationen zusammengestellt, die für die Bewertung im Rahmen eines Zulassungsverfahrens grundsätzlich notwendig sind.

Bei der Identifikation der Wirkfaktoren wurden die Untersuchungs- und Erkundungsphase, die Bauphase, die Injektionsphase und die Postinjektionsphase unterschieden. Bei der Ermittlung und Darstellung der Auswirkungen auf die Umweltschutzgüter wurde zwischen Auswirkungen des bestimmungsgemäßen und des nicht bestimmungsgemäßen Betriebs differenziert. Auf Grundlage der gesetzlichen Anforderungen wurde davon ausgegangen, dass alle Möglichkeiten zur Vermeidung und Minimierung von Beeinträchtigungen ausgeschöpft werden, insbesondere dass die Injektion so erfolgt, dass bei bestimmungsgemäßem Betrieb

- das injizierte CO₂ einschließlich möglicher Begleitstoffe in seiner Gesamtheit im Speicherkomplex verbleibt und keinesfalls die oberflächennahen Schutzgutformationen erreicht,
- keine nennenswerte Freisetzung von CO₂ aus den Über Tageeinrichtungen erfolgt,
- der Aufstieg von salzigem Formationswasser in höhere Schichten auf die unteren Transferpfadformationen beschränkt bleibt und nicht die oberflächennahen Schutzgutformationen betrifft,
- die möglicherweise auftretenden großflächigen Landhebungen (Injektionsphase) und nachfolgenden Landsenkungen (Postinjektionsphase) gering sind, langsam und großflächig gleichmäßig verlaufen,
- die möglicherweise induzierte Seismizität nur zu Mikrobeben führt.

Wirkfaktoren, deren Auswirkungen auf den tiefen geologischen Untergrund beschränkt sind, wurden entsprechend der Ausführungen unter 3.2 und der Definition der hier bearbeiteten oberflächennahen Schutzgüter nicht weiter berücksichtigt. Diese Wirkfaktoren sind die Anwesenheit von CO₂ und Begleitstoffen im Speicherkomplex sowie Druckänderungen im Speicherkomplex und seiner Umgebung. Für diejenigen Wirkfaktoren und Schutzgüter, für die eine Differenzierung zwischen terrestrischen und marinen Lebensräumen sinnvoll und erforderlich ist, wurde diese vorgenommen.

Betrachtete Wirkfaktoren des bestimmungsgemäßen Betriebes sind:

- Flächeninanspruchnahme, Boden- bzw. Sedimentverluste,
- Erschütterungen,
- akustische und optische Emissionen,
- stoffliche Emissionen,
- Sedimentverwirbelungen,
- Veränderung des Reliefs durch geringe, langsam und großflächig gleichmäßig verlaufende Landhebungen und -senkungen,
- Mikrobeben durch erhöhte Seismizität.

Betrachtete Wirkfaktoren des nicht bestimmungsgemäßen Betriebes sind:

- größere Veränderungen des Reliefs durch Landhebungen und -senkungen;
- größere Beben durch erhöhte Seismizität;
- Versalzungen durch Aufstieg von Formationswasser;
- Freisetzung von Kohlendioxid und Begleitstoffen durch Leckage aus dem Speicherkomplex oder aus Obertageanlagen

Längerfristige Flächeninanspruchnahmen entstehen durch die Injektionsbohrungen und die Übertageanlagen, sowie bei Untersuchung, Erkundung und Monitoring. Für Bau- und Rückbaulogistik besteht ein temporärer Flächenbedarf.

Erschütterungen sind in allen Phasen der CO₂-Speichervorhaben zu erwarten. Sie gehen von jeder Bautätigkeit, von Maschinen und industriellen Anlagen sowie von der Nutzung von Verkehrswegen aus. Sie entstehen in besonderem Maße bei seismischen Untersuchungen, beim Abteufen von Bohrungen, beim Rammen bzw. Einvibrieren von Standrohren, von Gründungspfählen und Spundwänden.

Optische Emissionen gehen in erster Linie von den Übertageanlagen aus. Dies betrifft die Einrichtungen sowie Bewegungen während der Bau- und Betriebsphasen. Sie treten vorwiegend im lokal begrenzten Bereich der Übertageanlage, aber während der Untersuchungs- und Monitoringphasen auch im gesamten Gebiet des Speicherkomplexes auf.

Während der Bau- und Betriebsphase kommt es zu üblichen, nicht herausragenden akustischen Emissionen. Die Erkundungs- und Monitoringphase kann mit Seismiken verbunden sein, die zeitlich befristet zu hohen Geräuschimissionen (insbesondere bei Seeseismiken) führen.

Stoffliche Emissionen entstehen aus dem Betrieb von Fahrzeugen, Maschinen, etc. Es ist aber nicht zu erwarten, dass diese Emissionen über das übliche Maß hinausreichen. Im marinen Bereich kann es im Zusammenhang mit Bohrungen zu Einträgen von Bohrspülung und Bohrklein kommen.

Sedimentverwirbelungen betreffen nur den aquatischen Bereich. Sie entstehen z. B. durch Schiffsverkehr und Baggermaßnahmen sowie durch Betriebsanlagen, die als Strömungshindernisse wirken.

Im bestimmungsgemäßen Betrieb können großflächige gleichmäßige Landhebungen bis in den Dezimeterbereich auftreten und liegen damit in der typischen Amplitude der Erdzeiten. Unter extrem ungünstigen, geomechanischen und hydrogeologische Bedingungen sind aber auch Hebungen und Senkungen größeren Ausmaßes möglich, die Einfluss auf Gebäude haben und Schäden verursachen. Auch eine Veränderung der hydraulischen Gradienten im Grundwasser kann nicht ausgeschlossen werden. In diesem Fall wäre der Betrieb nicht bestimmungsgemäß.

Bei der Verpressung von Flüssigkeiten in den Untergrund kann eine erhöhte Seismizität induziert werden. Eine solche Störungsaktivierung kann nicht nur Mikrobeben auslösen, die im Bereich des bestimmungsgemäßen Betriebes liegen und an der Oberfläche nicht gespürt werden, sondern auch Erdbeben erzeugen, die aufgrund ihrer Magnitude Schäden anrichten können und damit einem nicht bestimmungsgemäßen Betrieb zuzuordnen sind.

Die durch die Injektion des CO₂ verursachte Druckerhöhung in der Formation kann zu einem Aufstieg von salzigem Formationswasser führen. Ist die Formation zu den Rändern offen, können großräumige Strömungen der Formationsfluide induziert werden. Dabei kann Tiefenwasser durch die Deckschicht in den darüber liegenden salinen Grundwasserleiter gepresst werden, wo es sich aufgrund seiner höheren Salinität und Dichte im unteren Aquiferbereich einschichtet und wahrscheinlich nicht weiter aufsteigt. Formationswasser kann aber auch in höhere Deckschichten aufsteigen und das dort vorhandene Salzwasser verdrängen und ersetzen. Den oberflächennahen Grundwasserleiter erreicht auf diese Weise vermutlich nicht Tiefenwasser, sondern Salzwasser aus dem Grundwasserleiter unter dem oberflächennahen Grundwasserleiter. Somit ist eine Gefährdung des oberflächennahen Grundwassers durch Schwermetalle oder radioaktive Substanzen, die in tiefen salinen Grundwasserleitern enthalten sein können, unwahrscheinlich. Versalzungen des oberflächennahen Grundwassers im nicht bestimmungsgemäßen Betrieb sind aber nicht vollkommen auszuschließen. Aufgrund der weiträumigen Druckausbreitung ist der Aufstieg von Formationswasser auch über Wegsamkeiten möglich, die in größerer Entfernung zur Injektionsstelle liegen.

Bereits geringe Zuflüsse salinen Wassers können zu einer relevanten Versalzung eines Trinkwasseraquifers führen.

Eine Leckage von CO₂ aus dem Speicherkomplex ist grundsätzlich möglich. Das CO₂ kann beim Durchgang durch geologische Strukturen und Grundwasserleiter flächig verteilt werden, was Flächenquellen mit in der Regel geringerer Flussdichte erwarten lässt, die zudem räumlich heterogen sein kann. Denkbare Wegsamkeiten sind z. B. Lecks bei Übertageanlagen, geologische Störungen, Risse und Klüfte, aktive oder alte Bohrungen. Es kann aber auch durch Punktquellen z. B. entlang bestehender Bohrungen oder in Folge eines Blowouts an den Injektionsbohrungen oder an stillgelegten alten Bohrungen austreten.

Mit einer Freisetzung von CO₂ können in geringen Mengen auch Begleitstoffe emittieren. Zu nennen sind hier insbesondere H₂S, SO₂, NO_x, H₂SO₃, H₂SO₄ und HNO₃. Jede dieser Substanzen weist eine höhere Toxizität als CO₂ auf und ist daher auch mit entsprechenden Gefahren für Mensch, Natur und Umwelt verbunden. Schwefel- und Stickoxide bilden darüber hinaus in wässriger Lösung Säuren und verursachen dadurch die Verringerung der pH-Werte von Böden,

Grund- und Oberflächenwasser, was in der Regel wiederum die Mobilisierung von Schwermetallen nach sich zieht.

7.1 Mögliche Auswirkungen auf die Schutzgüter

Im bestimmungsgemäßen Betrieb lassen sich schutzgutspezifische Wirkfaktoren identifizieren, von denen erhebliche Beeinträchtigungen auf die Schutzgüter Mensch, Pflanzen und Tiere, Biologische Vielfalt, Landschaft, Kulturgüter oder sonstige Sachgüter ausgehen können. In vielen Fällen werden sich aber erhebliche Beeinträchtigungen durch geeignete Minimierungsmaßnahmen vermeiden lassen. Dahingegen sind im nicht bestimmungsgemäßen Betrieb erhebliche Beeinträchtigungen für alle Wirkfaktoren und für alle betrachteten Schutzgüter nicht aus-zuschließen. Daher wurden für die betrachteten Schutzgüter Flächen/Bereiche ermittelt, die eine besondere Empfindlichkeit bzw. ein hohes Konfliktpotenzial in Bezug auf Kohlendioxid-Speichervorhaben aufweisen und daher gemieden werden sollen.

7.1.1 Mensch und menschliche Gesundheit

Das Schutzgut „Mensch“ betrifft sowohl den einzelnen Menschen als auch eine Gruppe von Menschen. Der Schutz des Menschen hat Vorrang vor den weiteren Schutzgütern.

Das Schutzgut umfasst die Gesundheit und das Wohlbefinden des Menschen allgemein, seine Wohn- und Wohnumfeldfunktionen sowie die Erholungs- und Freizeitfunktion. Wirkfaktoren des bestimmungsgemäßen Betriebes, die zu erheblichen Beeinträchtigungen des Schutzgutes Mensch führen können sind Flächeninanspruchnahmen, Erschütterungen sowie akustische und optische Emissionen.

Der menschliche Lebensbereich konzentriert sich auf den terrestrischen Bereich. Sensible und konfliktäre Bereiche für das Schutzgut Mensch liegen daher vorwiegend dort. Für die menschliche Gesundheit von besonderer Bedeutung und Empfindlichkeit sind dabei die Bereiche, in denen er sich überwiegend aufhält, also vor allem der Wohnbereich und das unmittelbare Wohnumfeld. Von essentieller Bedeutung für Menschen ist außerdem die Trinkwasserversorgung, zu deren Sicherung Trinkwasserschutzgebiete eingerichtet wurden. Darüber hinaus sind aber auch Erholungseinrichtungen und Erholungsgebiete in der freien Landschaft für das menschliche Wohlbefinden von hoher Bedeutung. Eine erhebliche Beeinträchtigung solcher Gebiete, die zu einem Verlust oder einer deutlichen Minderung der Erholungsfunktion führen würde, hätte auch erhebliche Auswirkungen auf das Schutzgut Mensch.

Insgesamt sind die folgenden Gebiete als besonders empfindlich und konfliktär in Bezug auf das Schutzgut Mensch einzustufen:

- Wohnbauflächen nach BauNVO:
 1. reine Wohngebiete
 2. allgemeine Wohngebiete
 3. besondere Wohngebiete
 4. Kleinsiedlungsgebiete

- gemischte Bauflächen nach BauNVO:
 1. Dorfgebiete
 2. Mischgebiete
 3. Kerngebiete
- einige Sondergebiete nach BauNVO:
 1. solche die der Erholung dienen
 2. Klinikgebiete
 3. Kurgebiete
 4. Gebiet für die Fremdenbeherbergung
- Trinkwasserschutzgebiete
- Vorrangflächen für Erholung und Tourismus;
- Schutzgebiete nach BNatSchG mit Erholungsfunktion:
 1. Naturparke
 2. Landschaftsschutzgebiete
 3. Biosphärenreservate
 4. Nationalparks
- nach anderen Fachgesetzen ausgewiesene Schutzgebiete mit Erholungsfunktion:
 1. Erholungswälder
 2. Heilquellschutzgebiete
 3. Heilbäder, Seebäder und Luftkurorte

7.1.2 Pflanzen und Tiere

In der UVP stehen wild wachsende Pflanzenarten als Individuen und Populationen sowie in ihrem Vorkommen in Pflanzengesellschaften und Biotopen im Vordergrund der Betrachtung. Unter dem Schutzgut Pflanzen wurden daher sowohl einzelne Pflanzen als auch Pflanzengesellschaften und Biotope betrachtet. Die Tierwelt wird in der UVP in ihren Arten, in ihren Gemeinschaften und in ihren Lebensräumen erfasst. Dabei wird in der Praxis ein repräsentatives und entscheidungserhebliches Artenspektrum erfasst und bewertet.

Die Empfindlichkeit von Pflanzen und Tieren gegenüber dem Wirkfaktor Flächeninanspruchnahme ist besonders hoch, da ihnen hierdurch der Lebensraum entzogen wird. Für Tiere können auch Erschütterungen und akustische und optische Emissionen zu erheblichen Beeinträchtigungen führen. Stoffliche Emissionen und Sedimentverwirbelungen sind ggf. bei Speichervorhaben im marinen Bereich relevant. Insbesondere gegenüber großräumigen Standortveränderungen, wie sie beispielsweise durch starke Landhebungen und -senkungen oder eine großflächige Versalzung des Oberbodens ausgelöst werden, sind diese Schutzgüter besonders empfindlich.

Bei den Schutzgütern Pflanzen und Tiere ist das Konfliktpotenzial in Bereichen hoher Bedeutung bzw. Wertigkeit besonders hoch. Ein maßgebliches Kriterium ist dabei die Seltenheit, denn eine Beeinträchtigung oder Zerstörung von besonders seltenen Pflanzen bzw. Tötung seltener Tierarten bzw. eine Zerstörung und Beeinträchtigung ihrer Habitate hat für diese Schutzgüter eine besondere Relevanz. Die für Pflanzen und Tiere besonders wertvollen Bereiche befinden sich überwiegend in Schutzgebieten.

Folgende Gebiete sind als besonders empfindlich und konfliktär in Bezug auf die Schutzgüter Pflanzen und Tiere einzustufen und sollten bei der Potenzialbewertung berücksichtigt werden:

- Natura 2000-Gebiete;
- Nationalparke; Nationale Naturmonumente;
- Naturschutzgebiete;
- Kernzonen von Biosphärenreservaten;
- Besonders geschützte Biotope;
- Naturdenkmäler, geschützte Landschaftsbestandteile

Naturdenkmale, geschützte Landschaftsbestandteile und Biotope sind in der Regel sehr kleinflächig. Sie können daher voraussichtlich auf der Ebene der Potenzialbewertung nicht einzeln berücksichtigt werden.

7.1.3 Biologische Vielfalt

Der Begriff Biodiversität bezieht sich auf die Vielfalt von Arten und ihre genetische Ausstattung sowie die Diversität von Lebensgemeinschaften. Zum Erhalt der Biodiversität eignen sich insbesondere komplexe Landschaften mit vielfältigen Verzahnungen und Wechselwirkungen. Neben der Sicherung der Biodiversität in Schutzgebieten ist die Etablierung eines Biotopverbundes für den langfristigen Fortbestand einzelner Arten bzw. Populationen von großer Bedeutung. Zudem ist der Erhaltung endemischer Arten ein hoher Stellenwert einzuräumen.

In Bezug auf ihre Empfindlichkeit gegenüber den Wirkfaktoren der CO₂-Speicherungen gelten für die Biologische Vielfalt vergleichbare Kriterien wie für die Schutzgüter Pflanzen und Tiere.

Die folgenden Bereiche weisen ein besonders hohes Konfliktpotenzial für das Schutzgut Biologische Vielfalt auf:

- Natura 2000-Gebiete;
- Naturschutzgebiete;
- Nationalparke; Nationale Naturmonumente
- Kernzonen von Biosphärenreservaten;
- Netz der Lebensraumkorridore;
- Vorkommen oder Standorte von endemischen Arten;

Es ist davon auszugehen, dass Vorkommen endemischer Arten i.d.R. bereits über die Ausweisung von Schutzgebieten gesichert sind. Eine Berücksichtigung einzelner Vorkommen

ist im Rahmen der Potenzialbewertung aufgrund der Kleinräumigkeit wahrscheinlich nicht praktikabel.

7.1.4 Landschaft

Das Schutzgut „Landschaft“ umfasst das Landschaftsbild sowie den Bestandteil des Landschafts- und Naturhaushalts, der den Lebensraum für Tiere und Pflanzen bildet. Da die Aspekte des Naturhaushaltes bei der Bearbeitung der übrigen Schutzgüter mit erfasst werden, erfolgt an dieser Stelle eine Beschränkung auf den Aspekt des Landschaftsbildes. Das Landschaftsbild wird durch seine Eigenschaften Vielfalt, Eigenart und Schönheit geprägt.

Im bestimmungsgemäßen Betrieb können Flächeninanspruchnahmen sowie akustische und optische Emissionen zu erheblichen Beeinträchtigungen führen.

Bei folgenden Gebieten ist von einem hohen Konfliktpotenzial für das Schutzgut Landschaft auszugehen.

- Naturschutzgebiete
- Nationalparke
- Nationale Naturmonumente
- Biosphärenreservate
- Landschaftsschutzgebiete
- Naturparke
- Naturdenkmale
- Geschützte Landschaftsbestandteile

Naturdenkmale und geschützte Landschaftsbestandteile sind in der Regel sehr kleinflächig. Sie können daher voraussichtlich auf der Ebene der Potenzialbewertung nicht einzeln berücksichtigt werden.

7.1.5 Kulturgüter

Das Schutzgut Kulturgüter umfasst Sachgüter von besonderer kultureller Bedeutung. Hierunter fallen alle nach den Denkmalschutzgesetzen geschützte Kulturdenkmale und Denkmalbereiche sowie (noch) nicht unter Schutz gestellte Objekte, aber auch kulturhistorisch bedeutsame Landschaftsbestandteile, wie z. B. Naturdenkmale, Archivböden, bedeutsame Stadt- und Ortsbilder, Sichtachsen oder raumbezogene Brauchtümer.

Im bestimmungsgemäßen Betrieb können durch Flächeninanspruchnahmen, Erschütterungen, akustische und optischen Emissionen und Sedimentverwirbelungen (im marinen Bereich) erhebliche Beeinträchtigungen dieses Schutzgutes verursacht werden. Auch wenn Kulturgüter häufig sehr kleinflächig ausgebildet sind, treten sie in bestimmten Gebieten gehäuft auf, so dass sich sowohl im terrestrischen wie auch im marinen Bereich größere Räume abgrenzen lassen, die aufgrund des gehäuften Auftretens von Kulturgütern eine besondere Bedeutung und Empfindlichkeit aufweisen.

Ein hohes Konfliktpotenzial für Kulturgüter besteht für:

- Weltkulturerbestätten;
- größere Komplexe/Ansammlungen von denkmalgeschützten Objekten;
- Bereiche mit gehäuftem Auftreten von Bodendenkmalen (insbesondere bei schlecht gepufferten Böden) bzw. Bereiche, in denen aufgrund der naturräumlichen Voraussetzungen vermehrt Bodendenkmale zu erwarten sind;
- Bereiche mit gehäuftem Auftreten von Archivböden;
- kulturhistorisch besonders bedeutsame Landschaften.

7.1.6 Sonstige Sachgüter

Im Rahmen der UVP werden üblicherweise bauliche Anlagen jeder Art, einschließlich der zugehörigen Nebenflächen, Anlagen der Ver- und Entsorgung, Hochwasserschutzeinrichtungen sowie Verkehrswege und -anlagen unter dieses Schutzgut gefasst. Angesichts der ermittelten vorhabenbedingten Wirkfaktoren mit zum Teil großflächigen Wirkungen einer CO₂-Speicherung im Untergrund wurden in die Betrachtungen zusätzlich auch unbebaute, land- und forstwirtschaftlich genutzte oder ungenutzte Flächen als immobile Sachgüter einbezogen.

Im bestimmungsgemäßen Betrieb können von Flächeninanspruchnahmen, Erschütterungen, akustischen und optischen Emissionen sowie Sedimentverwirbelungen (im marinen Bereich) erhebliche Beeinträchtigungen dieses Schutzgutes ausgehen.

Bei folgenden Flächen ist von einer besonders hohen Empfindlichkeit und einem hohen Konfliktpotenzial für das Schutzgut sonstige Sachgüter auszugehen:

- Flächen mit Bebauung für Wohnen, Gewerbe und Industrie sowie öffentlichen, sozialen und kulturellen Einrichtungen, die im Wesentlichen über die entsprechenden Gebiete der Baunutzungsverordnung (BauNVO) erfasst werden können
 1. Wohnbauflächen
 2. Gemischte Bauflächen
 3. Gewerbliche Bauflächen
 4. Sonderbauflächen
- Hochwasserschutzanlagen, insbesondere an den Küsten und den großen Flüssen und Kanälen;
- Verkehrsanlagen und -wege mit zentralen Funktionen für die überregionale Erschließung;
- Ver- und Entsorgungsanlagen mit überregionaler Funktion;
- Flächen mit hohem natürlichem Ertragspotenzial für Land- und Forstwirtschaft.

7.1.7 Natürliche und anthropogene Strukturen, von denen eine besondere Gefährdung der Schutzgüter gegenüber den vorhabenspezifischen Wirkfaktoren ausgeht

Zusätzlich zu den o.a. schutzgutspezifischen konfliktären Bereichen wurden natürliche und anthropogene Strukturen, von denen bei nicht bestimmungsgemäßen Betriebszuständen eine besondere Gefährdung der Schutzgüter gegenüber den vorhabenspezifischen Wirkfaktoren

ausgeht identifiziert. Zum einen kann dies auf einer Verstärkung der Wirkung der vorhabenspezifischen Wirkfaktoren beruhen. Zum anderen kann von ihrer Beschädigung oder Zerstörung eine Sekundärgefährdung ausgehen. Die stärkere Gefährdung besteht dabei in der Regel für mehrere Schutzgüter gleichzeitig.

Folgende naturräumliche Gegebenheiten oder anthropogene Strukturen führen im Fall einer CO₂-Leckage zu einem höheren Risiko insbesondere auch für Mensch, Flora, Fauna und die biologische Vielfalt:

- das Vorhandensein von vielen natürlichen reliefbedingten oder anthropogenen Bodensenken, in denen sich Kohlendioxid und Begleitstoffe akkumulieren können;
- eine schlechte Durchlüftung bzw. ungünstige Luft-Austauschbedingungen, die gegebenenfalls die Verteilung und Verdünnung des ausgetretenen Kohlendioxids und der Begleitstoffe vermindern und verzögern und auf diese Weise deren Akkumulation begünstigen;
- wenig durchmischte Seen, an deren Grund sich das ausgetretene Kohlendioxid und die Begleitstoffe akkumulieren und dann schlagartig in sehr großen Mengen an der Oberfläche austreten können (wie z. B. 1986 am Lake Nyos in Afrika (vgl. Kap. 3.1.4 „Freisetzung von CO₂ durch Leckage aus dem Speicher oder aus Übertageanlagen“ und Kronimus et al.)³⁶⁷.

Ein hohes Konfliktpotenzial ergibt sich auch durch anthropogen geschaffene Sachgüter, von deren erheblicher Beschädigung ein hohes Risiko für Sekundärschäden ausgeht. Das sind insbesondere:

- Hochwasserschutzanlagen, deren Zerstörung oder erhebliche Beschädigung zu unter Umständen großräumigen Überschwemmungen führen könnten;
- größere Kanäle und ausgebauter Gewässer, deren Wasserspiegel über dem Niveau des angrenzenden Geländes liegt und deren Zerstörung oder erhebliche Beschädigung unter Umständen ebenfalls zu großräumigen Überschwemmungen führen könnten;
- industrielle oder gewerbliche Anlagen, die in größerem Umfang mit Gefahrstoffen umgehen, wie beispielsweise Atomkraftwerke, chemische Industrie und Anlagen, die der Verarbeitung oder Lagerung von fossilen Brennstoffen dienen;
- Rohrleitungen für entsprechende Gefahrstoffe, also für entsprechende Rohstoffe der chemischen Industrie und für Kohlenwasserstoffe.

7.2 Empfehlung für die Potenzialbewertung

Aus natur- und umweltschutzgutachterlicher Sicht sollten die für die Schutzgüter ermittelten, in Bezug auf Kohlendioxid-Speichervorhaben konfliktären Bereiche sowie Strukturen, die zu einer stärkeren Gefährdung der Schutzgüter gegenüber den vorhabenspezifischen

³⁶⁷ Vgl. Kronimus et al. (2011), S. 134 und 215.

Wirkfaktoren führen können, bei der Ausweisung von potenziellen Speichern gemieden werden.

Flächen mit besonderer Empfindlichkeit bzw. hohem Konfliktpotenzial für die verschiedenen Schutzgüter werden sich teils überschneiden, teils aber auch ergänzen. Daher könnte die Berücksichtigung all dieser Gebiete letztlich dazu führen, dass kaum noch potenzielle Speicherflächen verbleiben. Dies gilt umso mehr, als dass auch entsprechende Bereiche für die Schutzgüter Boden, Wasser, Klima und Luft, die nicht Gegenstand dieser Untersuchung waren, mit in die Betrachtung einbezogen werden müssen. Mit Hilfe einer kartografischen Überlagerung der verschiedenen empfindlichen Bereiche lassen sich wahrscheinlich Flächen identifizieren, auf denen sich unterschiedliche konfliktäre Bereiche überschneiden.

Es ist eine Frage der Gesamtabwägung und letztlich eine gesellschaftliche bzw. politische Entscheidung, ob das Risiko auf einem Teil der identifizierten Flächen akzeptiert werden soll.

Eine Möglichkeit die Belange der Umweltvorsorge zu gewichten wäre z.B. über die Anzahl der Schutzgüter, für die ein Bereich besonders empfindlich ist. Schließt man einen Bereich bereits aufgrund der besonderen Empfindlichkeit für ein oder zwei Schutzgüter aus, misst man der Umweltvorsorge ein größeres Gewicht bei, als wenn man dies erst bei einem hohen Konfliktpotenzial für vier oder mehr Schutzgüter tut.

7.3 Bewertung im Rahmen von Zulassungsverfahren

Für die Errichtung, den Betrieb und die Stilllegung von Kohlendioxidspeichern ist die Durchführung einer UVP gesetzlich vorgeschrieben.³⁶⁸

Grundsätzlich lassen sich die strukturellen Bewertungsmethoden, die üblicherweise bei Umweltprüfungen angewendet werden auch auf CO₂-Speicherprojekte übertragen. Allerdings treten bei der CO₂-Speicherung neben den bereits aus anderen Vorhaben bekannten Wirkfaktoren auch solche auf, zu denen wenig bis keine Erfahrungen vorliegen (z. B. Landhebungen/Senkungen, Mikrobeben oder die Auswirkungen des nicht bestimmungsgemäßen Betriebs).

Die Bewertung der Umweltauswirkungen der CO₂-Speicherung kann nur anhand zu entwickelnder fachlicher Maßstäbe bezogen auf die einzelnen Schutzgüter erfolgen. Angesichts der Kopplung der Umweltvorsorge an den Stand von „Wissenschaft und Technik“ ist ein besonders strenger Maßstab anzulegen. Für die Festlegung einer Stoffkonzentration, ab der es zu einer Schadwirkung kommt, wäre es z.B. wünschenswert, dass lebensraumtypische bzw. artspezifische oder auf den Menschen bezogen Wirkungswerte zur Verfügung ständen. Dieses ist jedoch nur ausnahmsweise der Fall. Gründe hierfür sind, dass die naturschutzrelevanten Arten in der Regel nicht zu den Standardorganismen ökotoxikologischer Stoffprüfungen gehören, wobei bei der Vielfalt der Arten nur langfristig durch systematische Untersuchungen (z. B. Freilandstudien) und Sammeln der Wirkungsdaten eine Verbesserung der Situation erreicht werden kann.

³⁶⁸ Ziffer 15.2 der Anlage 1 zum UVPG.

Bisher fehlen sowohl verbal-qualitative Bewertungsansätze als auch Grenz- und Richtwerte. Es muss abgewartet werden, inwiefern die laufenden Forschungsvorhaben Ergebnisse für eine adäquate Bewertung liefern.

Für die Anforderungen an die Verfahrensunterlagen ergibt sich, dass für die Erstellung der Umweltgutachten im Rahmen einer Genehmigung weitere Unterlagen und Fachgutachten erforderlich werden. Neben den erforderlichen Sicherheitsnachweisen und der Risikoanalyse gemäß Anlage 1 zum KSpG müssen einerseits konkrete Prognosen hinsichtlich des Ausmaßes der im bestimmungsgemäßen Betrieb zu erwartenden Wirkfaktoren erstellt werden (z. B. Obergrenzen von Landhebungen und Landsenkungen, Erhöhung der Seismizität). Andererseits müssen auf der Seite der Schutzgüter Bewertungsgrundlagen für die Bemessung der Beeinträchtigungsintensität zur Verfügung gestellt werden (z. B. Aussagen zur Veränderung des Wasserhaushaltes oder der Bodenchemie und damit verbundene Wirkungen, Angaben zur Veränderung des Salzgehaltes und zu salzempfindlichen Biozönosen).

7.4 Fazit

Einer abschließenden Bewertung der Umweltauswirkungen der CO₂-Speicherung stehen offene Fragen bezüglich der Eintrittswahrscheinlichkeiten und der Risiken insbesondere für den nicht bestimmungsgemäßen Betrieb entgegen. Darüber hinaus fehlt es an lebensraum- und artbezogenen Wirkungsschwellen sowie an Wirkungsschwellen in Bezug auf Beeinträchtigungen für den Menschen.

Für die Auswirkungen im bestimmungsgemäßen Betrieb konnte trotz fehlender konkreter Angaben zum Speichervorhaben zumindest eine vorläufige Bewertung der möglichen Auswirkungen vorgenommen werden. Im Ergebnis sind die meisten Beeinträchtigungen im Rahmen eines Zulassungsverfahrens durch entsprechende Auflagen, Vermeidungs- und Ausgleichsmaßnahmen regelbar. Größere Konflikte werden bei den Auswirkungen von Seeseismiken auf marine Säuger erwartet, da hier, entsprechend der gutachterlichen Erfahrung aus anderen Projekten im marinen Bereich, häufig Schwierigkeiten im Zulassungsverfahren auftreten.

Aufgrund der fehlenden Informationen zu Eintrittswahrscheinlichkeiten ist die Spanne möglicher Auswirkungen für den nicht bestimmungsgemäßen Betrieb sehr groß. Um dennoch Aussagen zum Risiko der Gefährdung der Umweltschutzgüter im Rahmen der Potenzialbewertung treffen zu können, wurden schutzgutspezifisch konfliktäre Bereiche identifiziert. Inwieweit ausgeschlossen werden kann, dass es in diesen Bereichen zu Beeinträchtigungen kommt, kann letztlich nur durch eine vorhabenspezifische Risikoanalyse geklärt werden. Eine Beeinträchtigung dieser Bereiche bzw. Ausprägungen sollte im Sinne der geltenden Rechtslage, der CCS-RL sowie entsprechend dem KSpG in jedem Fall vermieden werden.

Wenn ein vollkommener Ausschluss der konfliktären Ausprägungen im Bereich des Speicherkomplexes nicht möglich ist, so sollten diese zumindest bei der Errichtung der Übertageanlagen, in deren Bereich auch im bestimmungsgemäßen Betrieb Auswirkungen nicht vollständig vermieden werden können, ausgespart werden.

Welches Risiko (als Kombination der Wahrscheinlichkeit des Schadenseintritts und des Schadensausmaßes) letztendlich tragbar ist und damit nicht als erhebliches Risiko im Sinne der CCS-Richtlinie anzunehmen ist, wird immer auch eine gesellschaftliche Entscheidung sein.

8 Quellenverzeichnis

- Annuziatellis et al. (2007): Annuziatellis, A./ Beaubien, E./ Ciotoli, G./ Coltella, M./Lombardi, S., Total CO₂ flux from the Latera caldera and how flux rates affect transfer of other reactive gas species to the atmosphere: the results of highly detailed surveys on and across individual gas vents, Geophysical Research Abstracts 9, 07469: 2 Seiten.
- Annuziatellis et al. (2004): Annuziatellis, A./ Ciotoli, G./ Petinelli, E./ Beaubien, E./Lombardi, S., Geochemical and Geophysical Characterization of an Active CO₂ Gas vent near the Village of Latera, Central Italy, <http://uregina.ca/ghgt7/PDF/papers/poster/199.pdf>: 3 Seiten.
- Appold, in: Hoppe/Beckmann (Hrsg.) (2012): Appold, Wolfgang in: Hoppe, Werner/ Beckmann, Martin (Hrsg.), UVPG – Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung, 4. Aufl. 2012.
- Bauer/ Schäfer (2011): Bauer, Sebastian / Schäfer, Dirk, "Sicherheit und Umweltverträglichkeit der CO₂- Speicherung - Speicherprozesse", Sicherheit- und umweltrelevante Prozesse, Teilbericht Druckaufbau im Untergrund und Verdrängung des Formationswassers, GICON (Großmann Ingenieur Consult GmbH) im Auftrag des Umweltbundesamtes, FKZ 3708 49 112 2, 31.01.2011, 51 Seiten.
- Beaubien et al. (2008): Beaubien, S.E. / Ciotoli, G. / Coombs, P. / Dictor, M.C. / Kruger, M. / Lombardi, S. / Pearce, J.M. /West, J.M., The impact of a naturally occurring CO₂ gas vent on the shallow ecosystem and soil chemistry of a Mediterranean pasture (Latera, Italy), International Journal of Greenhouse Gas Control, 2 (3): 373-387.
- Belanger/Higgs (2004): Belanger, A.J. / Higgs, D.H., Hearing and the round goby: Understanding the auditory system of the round goby (Neogobius melanostomus), Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 117, 4 pp.
- Benson (2006): Benson, S.M., Carbon Dioxide Capture and Storage: Assessment of Risks from Storage of Carbon Dioxide in Deep Underground Geological Formations, LAWRENCE BERKELEY NATIONAL LABORATORY - EARTH SCIENCES DIVISION, 02.04.2006.
- BMU (2004): BMU, Vollzugshilfe zur Störfall-Verordnung vom März 2004, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherung (BMU), Berlin, März 2004, 81 Seiten.
- BMW/ BMU/ BMBF (2007): Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit / Bundesministerium für Bildung und Forschung, Entwicklungsstand und Perspektiven von CCS-Technologien in Deutschland, Gemeinsamer Bericht des BMWi, BMU und BMBF für die Bundesregierung, Stand: 19.09.2007, abrufbar unter <http://www.bmu.de/klimaschutz/downloads/doc/39998.php> (27.06.2012).
- Bormann (o. J.): Bormann, Peter, Was ist die Magnitude und was ist die Intensität eines Erdbebens?, GFZ Potsdam: http://bib.gfz-potsdam.de/pub/schule/magnitude_0209.pdf, 4 Seiten.
- Bressan (2011): Bressan, D., Can Animals Sense Earthquakes?, Scientific American, December, 2011.
- Bundesrat (2012): Bundesrat, Vermittlungsvorschlag zu CCS-Technologie, Pressemitteilung 96/2012, veröffentlicht am 27.06.2012, abrufbar unter http://www.bundesrat.de/cln_116/nn_8538/DE/presse/pm/2012/096-2012.html?__nnn=true (28.06.2012).

Bundesregierung (2011): Bundesregierung, Gesetz zur Demonstration und Anwendung von Technologien zur Abscheidung, zum Transport und zur dauerhaften Speicherung von Kohlendioxid, Gesetzentwurf, Bearbeitungsstand: 14.02.2011.

Chadwick et al. (2006): Chadwick, A./ Arts, R./ Bernstone, C./ May, F./ Thibeau, S./ Zweigel, P., Best Practice for the Storage of CO₂ in Saline Aquifers. Observations and guidelines from the SACS and CO₂STORE projects.

Dietlein, in: Landmann/ Rohmer (2011): Dietlein, Johannes, in: Landmann/ Rohmer, Umweltrecht – Kommentar, Band III, München, Stand: Juli 2011.

Ellenberg (1996): Ellenberg, H., Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen in ökologischer, dynamischer und historischer Sicht, Stuttgart.

Ellenberg et al. (1991): Ellenberg, H./ Weber, H./ Düll, R./ Wirth, V./ Werner, W./ Paulissen, D., Zeigerwerte von Pflanzen in Mitteleuropa, Verlag Erich Goltzee KG, Göttingen.

Fischer-Hüftle/ Czybulka, in: Schumacher/ Fischer-Hüftle Hüftle (Hrsg.) (2011): Fischer-Hüftle, Peter/ Czybulka, Detlef, in: Schumacher, Jochen/ Fischer-Hüftle, Peter (Hrsg.), Bundesnaturschutzgesetz – Kommentar, 2. Aufl., Stuttgart 2011.

Frenz (2005): Frenz, Walter, Bergbau und Gemeinschäden, UPR 1/2005: Seite 1-7.

Fuchs et al. (2010): Fuchs, Daniel/ Hänel, Kersten/ Lipski, Astrid/ Reich, Michael/ Finck, Peter/ Riecken, Uwe, Länderübergreifender Biotopverbund in Deutschland. Grundlagen und Fachkonzept. Naturschutz und Biologische Vielfalt Heft 96.

Fürst/Scholles (Hrsg.) (2008): Fürst, D./ Scholles, F., Handbuch Theorien und Methoden der Raum- und Umweltplanung, 3. Auflage, Dortmund.

Garniel/ Mierwald (2010): Garniel, A. / Mierwald, U., Arbeitshilfe Vögel und Straßenverkehr. Schlussbericht zum Forschungsprojekt FE 02.286/2007/LRB der Bundesanstalt für Straßenwesen: „Entwicklung eines Handlungsleitfadens für Vermeidung und Kompensation verkehrsbedingter Wirkungen auf die Avifauna“.

Gartner (2003): Gartner, B., Erdbeben: Sind Tiere die besseren Seismografen? P.M. Magazin, 6.

Gassner/Winkelbrandt/Bernotat (2010): Gassner, Erich / Winkelbrandt, Arnd / Bernotat, Dirk, UVP und strategische Umweltprüfung. Rechtliche und fachliche Anleitung für die Umweltprüfung, Heidelberg.

Großmann et al. (2011a): Großmann, Jochen/ Naue, Gert/ Schreck, Andreas/ Woiwode, Ralf/ Dahmke, Andreas/ Schäfer, Dirk/ Bauer, Sebastian/ Ebert, Markus/ Reinicke, Kurt M./ Schilling, Frank/Krawczyk, Charlotte, "Sicherheit und Umweltverträglichkeit der CO₂-Speicherung - Speicherprozesse", GICON (Großmann Ingenieure Consult GmbH) im Auftrag des Umweltbundesamtes (FKZ 3708 49 112 2), 31.01.2011, 74 Seiten.

Großmann et al. (2011b): Großmann, Jochen/ Naue, Gert/ Schreck, Andreas/ Woiwode, Ralf/ Schäfer, Dirk, "Sicherheit und Umweltverträglichkeit der CO₂-Speicherung - Speicherprozesse", Erkundungs- und Monitoringmethoden, Schutzgutbetrachtungen, Teilbericht CO₂-Freisetzung in die Atmosphäre und CO₂-Ausbreitung in der Luft, GICON (Großmann Ingenieur Consult GmbH) im Auftrag des Umweltbundesamtes, FKZ 3708 49 112 2, 31.01.2011, 45 Seiten.

Großmann/Woiwode /Dahmke (2011): Großmann, Jochen/ Woiwode, Ralf/Dahmke, Andreas, "Sicherheit und Umweltverträglichkeit der CO₂-Speicherung - Speicherprozesse", Schadensvorsorge und -beseitigung, Teilbericht Schutzwertbetrachtung, Risikomanagement, GICON (Großmann Ingenieur Consult GmbH) im Auftrag des Umweltbundesamtes, FKZ 3708 49 112 2, 31.01.2011, 50 Seiten.

Guais et al. (2011): Guais, Adelinie/ Brand, Gerard/ Jacquot, Laurence/ Karrer, Mélanie/ Dukan, Sam/ Grévillot, Georges/ Molina, Thierry Jo/ Bonte, Jacques/ Regnier, Mireille/Schwartz, Laurent, Toxicity of Carbon Dioxide: A Review, Chemical Research in Toxicology 24: 2061-2070.

Haber/Schaller (1991): Haber, W./ Schaller, J., Entwicklung von Methoden zur Beurteilung von Eingriffen nach §8 Bundesnaturschutzgesetz – Endbericht des FuE-Vorhabens 10109026 des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit

Iea Greenhouse Gas R&D Programme (2007): Iea Greenhouse Gas R&D Pro-gramme, Environmental Assessment for CO₂ Capture and Storage: Technical Study, IEA Greenhouse Gas R&D Programme, London, March.

Ipcc (2005): Ipcc, IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage, Prepared by Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Hrsg. B. Metz, O. Davidson, H. C. de Coninck, M. Loos und L. A . Meyer), Camb-ridge, 431 Seiten.

Ivbi (2010): Ivbi, Leitfaden zur Untersuchung, Bewertung und Sanierung von bergbaulich verursachten Schäden ("Bergschadenregulierungs-Leitfaden"), Verkürzte Download-Version, Hrsg.: Interessensverband bergbaugeschädigter Immobilienbesitzer e. V. (IVBI), Bearbeiter: Andreas Mollinga, Marl, Januar 2010, 21 Seiten.

Jarass (2010): Jarass, Hans D., BImSchG – Bundesimmissionsschutzgesetz – Kommentar, 8. Aufl., München 2010.

Jessel (2009): Jessel, Beate, Biodiversität und Klimawandel - Forschungsbedarfe im Rahmen nationaler Handlungsstrategien., Natur und Landschaft 84(1): 32-38.

Jessel/ Tobias (2002): Jessel, Beate / Tobias, Kai, Ökologisch orientierte Planung., Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart.

Johnston/ Santillo (2003): Johnston, P. / Santillo, D., Carbon Capture and Se-questration: Potential Environmental Impacts, Proceedings of IPCC Workshop on Carbon Dioxide Capture and Storage, Regina, Canada 18-21 November 2002, Greenpeace Research Laboratories, University of Exeter, Exeter.

Jossi et al. (2006): Jossi, M./ Fromin, N./ Tarnawski, S. / Kohler, F./ Gillet, F./ Aragno, M./Hamelin, J., How elevated pCO₂ modifies total and metabolically active bacterial communities in the rhizosphere of two perennial grasses grown under field conditions, FEMS Microbiol. Ecol. 55, 339–350.

Klastrup/Leonard/Skov (2007): Klastrup, M. / Leonhard, S.B. / Skov, H., EIA Report Fish. Rødsand 2 Offshore Wind Farm, DONG Energy, 2007.

Kloepfer (2004): Kloepfer, Michael, Umweltrecht, 3. Aufl., München 2004.

Kohls/Kahle (2009): Kohls, Malte/ Kahle, Christian, Klimafreundliche Kohlekraft dank CCS, ZUR 2009, 122.

- Koornneef/Faaij/Turkenburg (2006): Koornneef, J./Faaij, A./Turkenburg, W., Environmental Impact Assessment of Carbon Capture & Storage in the Netherlands, Department of Science, Technology and Society, Copernicus Institute for Sustainable Development and Innovation, Utrecht University, Utrecht.
- Kronimus et al. (2011): Kronimus, Alexander/ Wildenborg, Ton/ Nepveu, Manuel/ Wollenweber, Jens/ David, Petra/ Kuip, Muriel Van Der/ Schlüter, Ralph/Rübel, Hans-Joachim, Forschungsprojekt Sicherheit und Umweltverträglichkeit der CO₂-Speicherung - Risikoanalyse und systematische Risikominimierung (SUCOR), Förderkennzeichen 3708 49 112 1, Utrecht, Essen, 255 Seiten.
- Krupp (2011): Krupp, R., Risiken der Verpressung von Kohlendioxid unter der Nord-see, BUND, Berlin, August.
- Lai (2000): Lai, Hinweis zur Messung, Beurteilung und Verminderung von Erschütterungsimmisionen, Beschluss des Länderausschusses für Immissions-schutz vom 19.05.2000, 22 Seiten.
- Lambrecht/Trautner (2007).: Lambrecht, H. / Trautner, J., Fachinformationssystem und Fachkonventionen zur Bestimmung der Erheblichkeit im Rahmen der FFH-VP Im Auftrag des Bundesamtes für Naturschutz, Hannover, Filderstadt.
- Landesumweltamt Brandenburg (2008): Landesumweltamt Brandenburg, Vollzugshilfe zur Ermittlung erheblicher und irrelevanter Stoffeinträge in Natura 2000-Gebiete., Potsdam, Stand: November 2008, <http://www.mluv.brandenburg.de/cms/media.php/2338/vh2008e.pdf>.
- Lipp (2009): Lipp, Torsten, Berücksichtigung der biologischen Vielfalt in der raumbezogenen Umweltplanung. Ein Beitrag zur Methodendiskussion., Naturschutz und Landschaftsplanung 41(2): 36-40.
- Marschall/Lipp /Schumacher (2008): Marschall, Ilke/ Lipp, Torsten/Schumacher, Jochen, Die Biodiversitätskonvention und die Landschaft. Strategien und Instrumente zur Umsetzung der Biodiversitätskonvention "in situ". Natur und Recht 30: 327-333.
- Mathieson et al. (2011): Mathieson, Allan/ Midgely, Jon/ Wright, Iain/ Saoula, Mabil/Ringrose, Philip, In Salah CO₂ Storage JIP: CO₂ sequestration monitoring and verification technologies applied at Krechba, Algeria, Energy Procedia 4: 3596-3603.
- Meinig/Boye/Hutterer (2009).: Meinig, Holger/ Boye, Peter/Hutterer, Rainer, Rote Liste und Gesamtartenliste der Säugetiere (Mammalia) Deutschlands., Naturschutz und Biologische Vielfalt 70 (1): 115-153.
- Mengel, in: Frenz/ Müggenborg (Hrsg.) (2011): Mengel, Andreas in: Frenz, Walter/ Müggenborg, Hans-Jürgen (Hrsg.), BNatSchG – Bundesnaturschutzgesetz – Kommentar, Berlin 2011.
- Meßerschmidt/ Schuhmacher (2011): Meßerschmidt, Klaus/ Schuhmacher, Jochen, Bundesnaturschutzrecht, Kommentar, Band 1, Stand: Mai 2012.
- Müller-Borutta (o. J.): Müller-Borutta, Frank H., Erschütterungen durch Bau-maßnahmen - Einwirkungen auf Menschen in Gebäuden. Beurteilung nach DIN 4150 Teil 2 neu, Juni 1999, Maßnahmen und Abhilfe bei Problemen, Gesamtbeurteilung und Abschätzung der Auswirkungen mit praktischen Beispielen, Ing.-Büro Dr.-Ing. Müller-Borutta, Beratende Ingenieure BYIK, §26-BImSchG-Messstelle, http://www.imb-dynamik.de/pdf/publ/Erschuetterungen_durch_Baumassnahmen_-Einwirkungen_auf_Menschen_in_Gebaeuden.pdf, 10 Seiten.

- Nedwell et al. (2007): Nedwell, J.R. / Parvin, S.J. / Edwards, B. / Workman, R. / Brooker, A.G. / Kynoch, J.E., Measurement and interpretation of underwater noise during construction and operation of offshore windfarms in UK waters, Report for COWRIE, Newbury, UK
- Niedersächsischer Städtetag (2008): Niedersächsischer Städtetag, Arbeitshilfe zu Ermittlung von Ausgleichs- und Ersatzmaßnahmen in der Bauleitplanung, Hannover.
- Ospar (2006): Ospar, Case Reports for the Initial List of Threatened and/or Declining Species and Habitats in the OSPAR Maritime Area., OSPAR,
- Patil/Colls /Steven (2010): Patil, R. H/ Colls, J. J./Steven, M. D., Effects of CO₂ gas leaks from geological storage sites on agro-ecosystems, Energy 35 (12): 4587-4591.
- Patil (2012): Patil, R. H., Impacts of Carbon Dioxide Gas Leaks from Geological Storage Sites on Soil Ecology and Above-Ground Vegetation. In: Mahamane, A.: Diversity of Ecosystems, InTech.
- Peters/ Balla (2006): Peters, Hans-Joachim/ Balla, Stefan, Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung – Handkommentar, 3. Aufl., Baden-Baden 2006.
- Peters (2011): Peters, M., Chemical usage of CO₂. Präsentation auf der Fachtagung: 2nd International Workshop "CO₂: CCS and CCU in Germany, Norway, the Netherlands, Poland, and Scotland – Challenges and Chances". Düsseldorf.
- Plachter et al. (2002): Plachter, H./ Bernotat, D./ Müssner, R./ Riecken, U., Entwicklung und Festlegung von Methodenstandards im Naturschutz. Schriftenreihe für Landschaftspflege und Naturschutz, Heft 70, 566 S.
- Richardson et al. (1995): Richardson, W. J./ Greene, C. R./ Malme, C. R./Thompson, D. H., Marine mammals and noise, San Diego.
- Roberts/Wood /Haszeldine (2011): Roberts, Jennifer J./ Wood, Rachel A./Haszeldine, R. Stuart, Assessing the health risks of natural CO₂ seeps in Italy, PNAS Early Edition (www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1018590108): 4 Seiten und Zusatzinformationen.
- Röhrlig/ Kühling (1996): Röhrlig, Wolfram / Kühling, Dirk, Kulturgüter - "Stiefkinder" in der UVP. Ein Diskussionsbeitrag zu Gegenwart und Zukunft des Kulturgutschutzes in der UVP, UVP-Report 2/96: 62-66.
- Schäfer (2011): Schäfer, Dirk, "Sicherheit und Umweltverträglichkeit der CO₂-Speicherung - Speicherprozesse", Erkundungs- und Monitoringmethoden, Schutzgutbetrachtungen, Teilbericht Erkundung und Monitoring des Schutzgutes Grundwasser, GICON (Großmann Ingenieur Consult GmbH) im Auftrag des Umweltbundesamtes, FKZ 3708 49 112 2, 31.001.2011, 20 Seiten.
- Schilling/ Krawczyk (2011): Schilling, Frank / Krawczyk, Charlotte, "Sicherheit und Umweltverträglichkeit der CO₂-Speicherung - Speicherprozesse", Erkundungs- und Monitoringmethoden, Schutzgutbetrachtungen, Teilbericht Speichercharakterisierung: Erkundungsmöglichkeiten, Umfang und Monitoring, GICON (Großmann Ingenieur Consult GmbH) im Auftrag des Umweltbundesamtes (FKZ 3708 49 112 2), 30.01.2011, 71 Seiten.
- Scholle (1996): Scholle, Burghardt, Fachliche und rechtliche Integration des Kulturgüterschutzes, UVP-report 2/96: Seite 67-72.

School of Public and Environmental Affairs (2010): School of Public and Environmental Affairs, Carbon Capture and Storage. An Assessment.

Schumacher/Schumacher, in: Schumacher/Fischer-Hüftle (Hrsg.) (2011): Schumacher, Anke/ Schumacher, Jochen in: Schumacher, Jochen/ Fischer-Hüftle, Peter (Hrsg.), Bundesnaturschutzgesetz – Kommentar, 2. Aufl., Stuttgart 2011.

Stadler/ Korn (2008): Stadler, Jutta / Korn, Horst, Das Übereinkommen über die biologische Vielfalt. Auf dem Weg zur 9. Vertragsstaatenkonferenz in Deutschland., Natur und Landschaft 83(1): 2-6.

Stange/ Duijnisveld (2011): Stange, C. Florian / Duijnisveld, Wilhelmus H. M., Mediale Anforderungen des Bodenschutzes an die Speicherung von CO₂ bei CCS-Maßnahmen, UBA-Forschungsvorhaben 3709 72 204, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, 80 Seiten.

Storm/Bunge (Hrsg.) (2012): Storm, P.-C./ Bunge, T., Handbuch der Umweltverträglichkeitsprüfung, Bd. 1-4, Berlin.

Studer/Laue /Koller (2007): Studer, Jost A./ Laue, Jan/Koller, Martin G., Bo-dendynamik. Grundlangen, Kennziffern, Probleme und Lösungsansätze, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg.

Suga et al. (2005): Suga, T. / Akamatsu, T. / Sawada, K. / Hashimoto, H. / Kawabe, R. / Hiraishi, T. / Yamamoto, K., Audiogram measurements based on the auditory brainstem response for juvenile Japanese sand lances *Ammodytes personatus*. Fishery science. 2005, Vol. 71, 287-292.

Thomsen et al. (2006): Thomsen, F. / Lüdemann, K. / Kafemann, R. / Piper, W., Effects of offshore wind farm noise on marine mammals and fish. s.l. : biola, Hamburg, Germany on behalf of COWRIE Ltd., 2006, 59 pp.

Tougaard et al. (2006): Tougaard, J./ Carstensen, J./ Wisz, M.S./ Jespersen, M./ Teilmann, J./ Bech, N.I./Skov, H., Harbour Porpoises on Horns Reef - Effects of the Horns Reef Wind Farm, Final Report to Vattenfall A/S, Roskilde, 110 pp..

Trautner (2003): Trautner, Jürgen, Biodiversitätsaspekte in der UVP mit Schwerpunkt auf der Komponente "Artenvielfalt". UVP-report 17(3+4): 155-163.

Umweltbundesamt (2008): Umweltbundesamt, CO₂-Abscheidung und Speicherung im Meeresgrund - Meeresökologische und geologische Anforderungen für deren langfristige Sicherheit sowie Ausgestaltung des rechtlichen Rahmens. Forschungs-bericht 206 25 200, Dessau-Roßlau.

Von Goerne/Weinlich /May (2010): Von Goerne, G./ Weinlich, F.H./May, F., Anforderungen und Vorschläge zur Erstellung von Leitfäden und Richtlinien für eine dauerhafte und sichere Speicherung von CO₂, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe Hannover, Hannover, August.

Walker et al. (2005): Walker, D./ Mcgrady, M./ Mccluskie, A./ Madders, M./Mcleod, D.R.A., Resident Golden Eagle ranging behaviour before and after construction of a wind farm in Agryll, Scot. Birds 25: 24-40.

Weiland (1995): Weiland, Joachim, Sachgüter als Schutzgut in der UVP. Ein Ansatz zur Bewertung, UVP-Report 5/95: 236 - 239.

Widdicombe et al. (2009): Widdicombe, S./ Dashfield, S. L./ Mcneill, C. L./ Needham, H. R./ Beesley, A./ Mcevoy, A./ Oxnevad, S./ Clarke, K. R./Berge, J. A., Effects of CO₂ induced seawater acidification on infaunal diversity and sediment nutrient fluxes, Marine Ecology Progress Series 379: 59-75.

Wissenschaftlicher Beirat Der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (1998):

Wissenschaftlicher Beirat Der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen, Welt im Wandel:
Strategien zur Bewältigung globaler Umweltrisiken.

Wuppertal Institut Für Klima Umwelt Energie Gmbh (2010): Wuppertal Institut Für Klima Umwelt

Energie Gmbh, RECCS plus Regenerative Energien (RE) im Vergleich mit CO₂-Abtrennung und -
Ablagerung (CCS) Update und Erweiterung der RECCS-Studie, Wuppertal, April.