



25 Jahre erfolgreiche
Offshore CO₂-Speicherung
in Norwegen

Laut der Net-Zero-Roadmap der IEA sollen 2050 mehr als 7 Milliarden Tonnen CO₂ pro Jahr sicher gespeichert werden, um die Emissionsreduzierung in praktisch allen Teilen des globalen Energiesystems zu unterstützen. Mit bereits einem Vierteljahrhundert CO₂-Speicherbetrieb ist das Sleipner-Projekt ein globaler Vorreiter und ein Beispiel für Norwegens Führungsrolle bei CCS-Technologien.

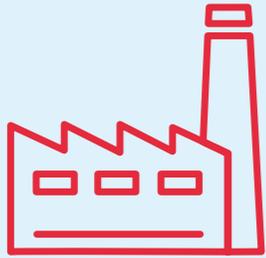
Dr. Fatih Birol, Executive Director Internationale Energieagentur (IEA)

Carbon Capture and Storage

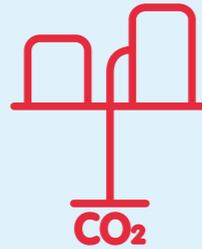
Um Klimaneutralität zu erreichen, wird nach Meinung vieler Wissenschaftler die Abscheidung und Speicherung von CO₂ eine wichtige Rolle spielen – dazu zählen unter anderem der Weltklimarat (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) und die Internationale Energieagentur (IEA). Innerhalb des IEA-Szenarios für nachhaltige Entwicklung macht CO₂-Speicherung beispielsweise 15 Prozent aller Emissionsminderungen bis 2070 aus.



CO₂-Speicherung kann insbesondere in drei Bereichen eingesetzt werden:



Dekarbonisierung der Industrie in Sektoren, in denen die CO₂-Emissionen prozessbedingt sind (z. B. Zementherstellung) oder in denen fossile Energieträger nicht ohne Weiteres durch erneuerbaren Strom ersetzt werden können (z. B. Eisen- und Stahlherstellung).



Bereitstellung von Negativemissionen durch Technologien wie Bioenergie mit CO₂-Abscheidung und -Speicherung (BECCS) und Direct Air Capture (DAC).



Zum frühzeitigen Hochfahren von kohlenstoffarmer Wasserstoffproduktion, um fossile Brennstoffe zu ersetzen.

Erfahrung mit CO₂-Speicherung weltweit und in Europa

- 1970er:** erste CCS-Anlagen in Betrieb (zur CO₂-optimierten Ölförderung)
- 1996:** erste dedizierte CO₂-Speicherung im Sleipner-Feld vor der Küste Norwegens, von Equinor betrieben
- 2008:** Start der zweiten großtechnischen CO₂-Speicherung in Europa im Snøhvit-Feld vor der Küste Norwegens, von Equinor betrieben
- 2020:** weltweit 26 kommerzielle CCS-Anlagen in Betrieb mit einer Gesamtkapazität von etwa 40 Millionen Tonnen pro Jahr (GCCSI, 2020)





Vorreiter in der Nordsee: 25 Jahre Sleipner

Die Nordsee ist ein wichtiges Gebiet für die potenzielle geologische CO₂-Speicherung in Europa. Ihr gesamtes Speicherpotenzial mit 160 Gt entspricht den derzeitigen industriellen CO₂-Emissionen Europas über 75 Jahre. Equinor hat 25 Jahre Erfahrung mit CO₂-Abscheidung und Offshore-Speicherung (Carbon Capture and Offshore Storage, CCOS) in der norwegischen Nordsee. Das Sleipner-Projekt westlich der norwegischen Küste war das erste Projekt zur unterirdischen CO₂-Speicherung in Europa und das erste CCOS-Projekt überhaupt. Sleipner wurde damit zum zeitweise größten CO₂-Speicherprojekt der Welt – mit einem einzigen

Bohrloch konnten bis zu 1 Million Tonnen CO₂ jährlich gespeichert werden. Bis Ende 2020 wurden insgesamt mehr als 19 Millionen Tonnen CO₂ – mehr als die jährlichen Emissionen von 10 Millionen PKW – erfolgreich gespeichert. Das Sleipner-Projekt ebnete den Weg für den Einsatz von CO₂-Speicherung im industriellen Maßstab.

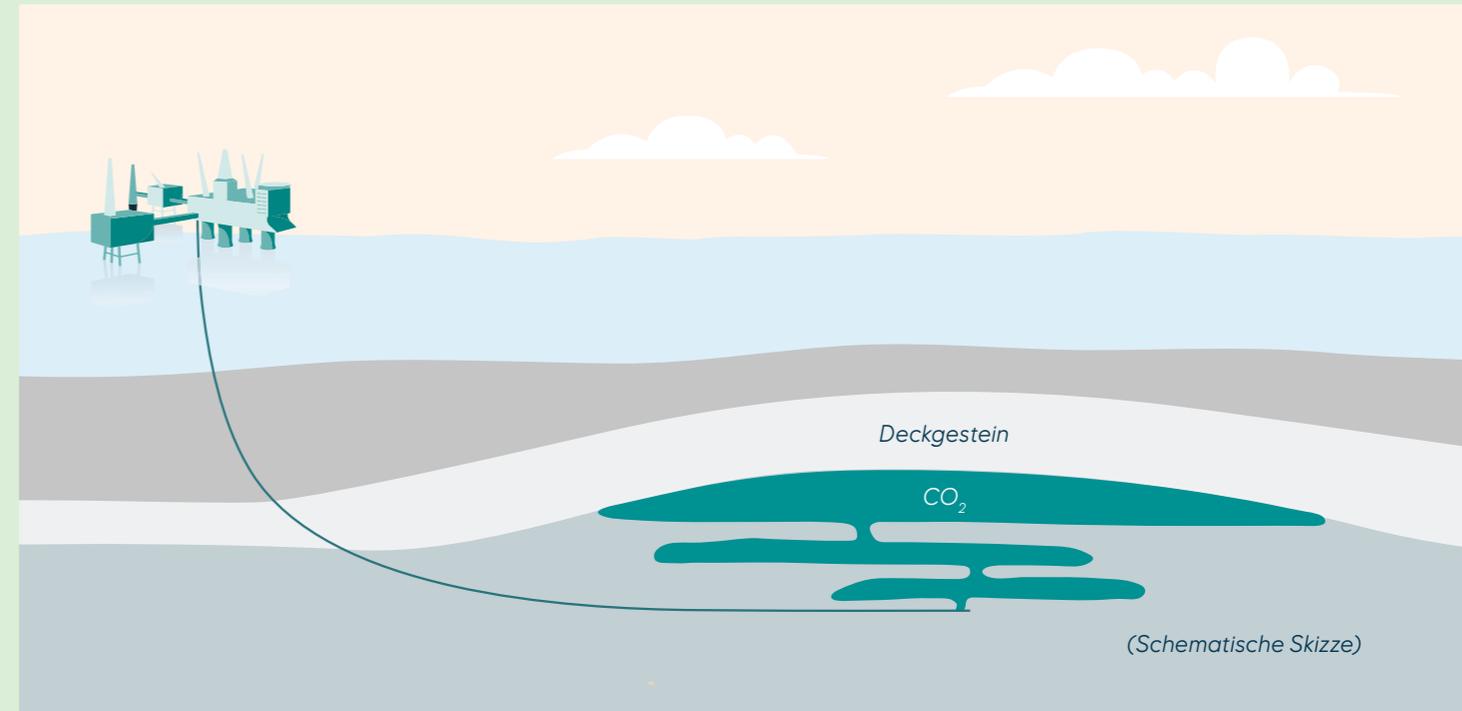
► Über den QR-Code geht's zum Video mit Erfahrungsbericht aus dem Sleipner-Projekt!



So funktioniert CCOS

CCOS ist die Abscheidung von CO₂ aus Gasgemischen wie chemischen Prozessströmen, Abgasen oder auch der Luft und dessen anschließende dauerhafte Speicherung. Das abgeschiedene CO₂ wird komprimiert und in den tiefen Untergrund offshore gepumpt, damit das Treibhausgas nicht in die Atmosphäre gelangt.

► Für eine Animation zur Energiewende und die CO₂-Speicherung den QR-Code scannen.



(Schematische Skizze)

Einen geeigneten Standort finden

Für die geologische CO₂-Speicherung müssen zwei Voraussetzungen erfüllt sein:
Es müssen erstens eine poröse und durchlässige Speichergesteinsformation und zweitens ein Deckgestein vorhanden sein, das erstere abdichtet.

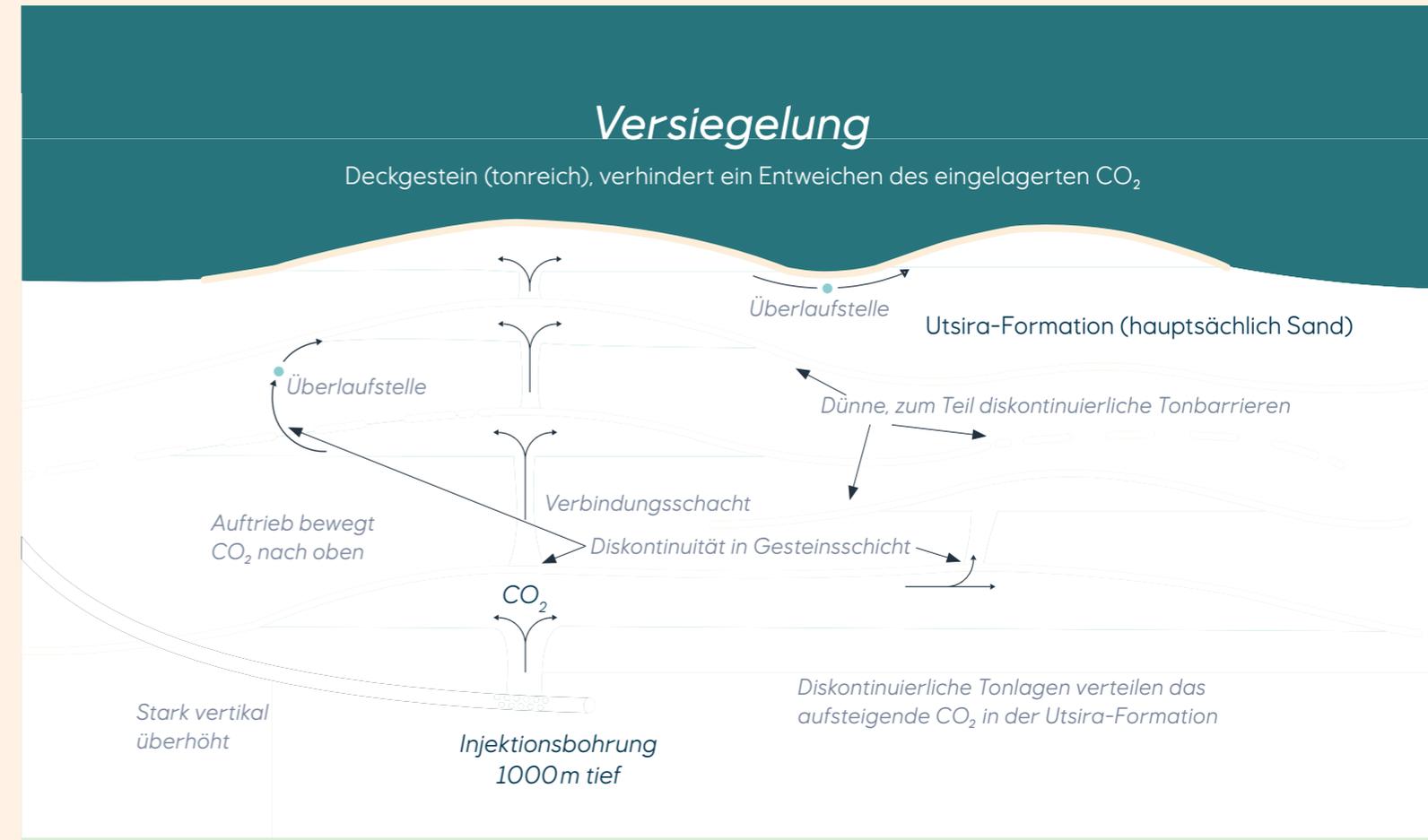
Bei der Gesteinsformation kann es sich entweder um erschöpfte Öl- und Gasfelder oder um salzwassergefüllte Gesteinsformationen handeln, sogenannte saline Aquifere. Diese Formation muss mit dem Deckgestein in der Regel eine nach oben geschlossene Struktur vergleichbar mit einem Helm oder -einer auf dem Kopf stehenden Schale bilden, die das CO₂ sicher einschließt.

Die Strukturen, in denen das CO₂ gespeichert wird, sind denen in Öl- und Gasfeldern sehr ähnlich, wo Kohlenwasserstoffe seit Millionen Jahren im Untergrund eingeschlossen sind.

Die Entscheidung, ob eine Speicherstätte geeignet ist, erfordert umfangreiches Fachwissen und die Entwicklung konzeptioneller und digitaler Modelle des Untergrundes auf der Grundlage von seismischen Daten und Bohrlochdaten.

Diese Untersuchungen werden in der EU-Richtlinie zur CO₂-Speicherung geregelt und die Speicherpläne durch die zuständigen staatlichen Behörden genehmigt.

CO₂-Speicherung



Monitoring

Nachdem das CO₂ in die Lagerstätte gepumpt wurde, wird es genau überwacht. Der Überwachungsvorgang wird ebenfalls durch die EU-Richtlinie reguliert, die entsprechenden Analysen werden den zuständigen Behörden übermittelt. Alle Speicherstätten werden zudem regelmäßig von Fachbehörden kontrolliert und inspiziert. Die Überwachung des Deckgesteins ist entscheidend, um eine erfolgreiche Speicherung zu gewährleisten und sofortige Abhilfemaßnahmen zu ermöglichen, falls sich ein Problem mit der Standortintegrität ergeben sollte. Das eingelagerte CO₂ wird wie folgt überwacht:

Konstantes Druck-Monitoring

Für jede Speicherstätte wird der maximal zulässige Druck festgelegt und konstant überwacht. Falls sich der Porendruck in einer Speicherstätte dem festgelegten Grenzwert nähert, würde die CO₂-Einspeisung reduziert oder gestoppt und die Speicherstrategie angepasst. Am Sleipner-Speicherstandort

gibt es keine Anzeichen für eine wesentliche Erhöhung des Porendrucks, obwohl inzwischen fast 20 Millionen Tonnen CO₂ injiziert wurden.

Regelmäßiges seismisches CO₂-Monitoring

Es wird aber nicht nur der Druck innerhalb des Speichers, sondern auch die Ausbreitung des CO₂ überwacht. CO₂ hat andere akustische

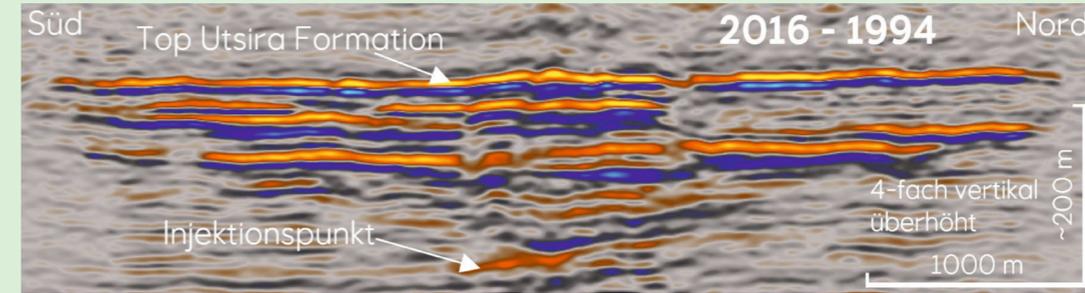
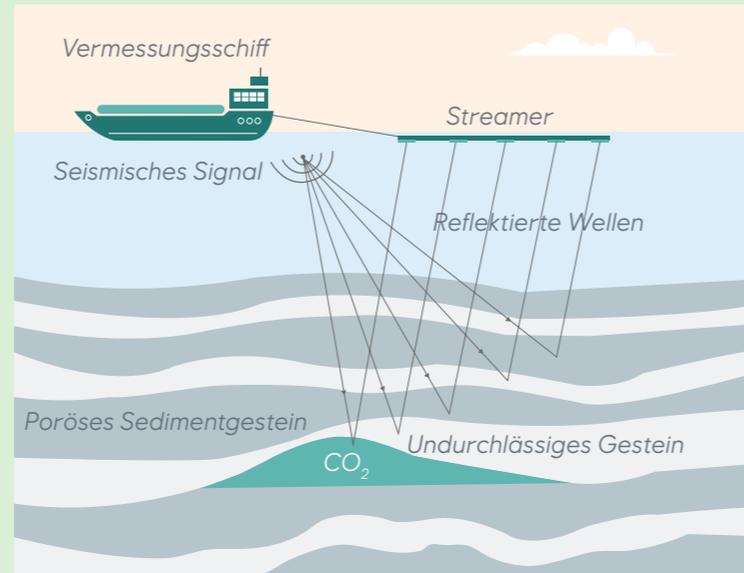


Abbildung bereitgestellt von den Sleipner Lizenzpartnern

Seismischer Schnitt durch das Sleipner-CO₂-Reservoir: seismische Zeitrafferdaten (Amplituden-Differenz) der Kampagnen von 2016 und 1994. Die intensiven Farben (besonders Gelb, Blau) zeigen die Gegenwart von CO₂, das sich unter dünnen Tonlagen und unter der dichten Überdeckung ansammelt.

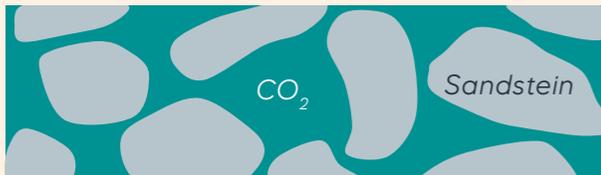
Eigenschaften als Wasser. Daher ändern sich die seismischen Eigenschaften eines Gesteins, in dessen Poren sich Wasser befindet, wenn ein Teil dieses Wassers durch CO₂ verdrängt wird. Anhand seismischer Überwachung – durch den Vergleich von Datensätzen von vor und während der Injektion (sogenannte seismische Zeitraffer-Messungen) kann die Verteilung von CO₂ in der Speicherstätte aufgezeigt werden. Mit diesem Verfahren können schon sehr kleine Anteile des injizierten CO₂, die im Falle eines Lecks die Lagerstätte verlassen würden identifiziert werden. Im Sleipner-Projekt wurde bei bisher 10 durchgeführten Untersuchungen in den letzten 25 Jahren kein solcher Austritt beobachtet.

Monitoring nach der aktiven Nutzung

Wenn die Speicherkapazität in einer bestimmten Lagerstätte erschöpft ist oder die Einspeisung beendet wird, wird der Standort mindestens 20 Jahre lang durch den Betreiber überwacht. Wenn danach alle Überwachungsdaten zeigen, dass das CO₂ vollständig und dauerhaft eingeschlossen bleibt, geht die Verantwortung für die Überwachung gemäß der EU-Richtlinie zur Kohlenstoffspeicherung an die Behörden über. Die Kosten für die weitere Überwachung werden vom Betreiber getragen.

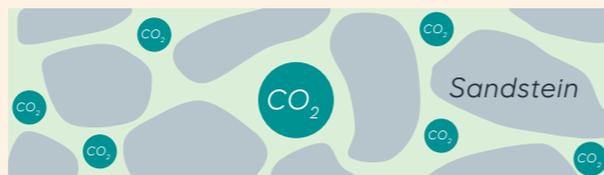
Zunehmende Sicherheit im Zeitverlauf

Neben der Abdichtung der Lagerstätte durch das Deckgestein tragen drei physikalische und chemische Prozesse zur Sicherheit bei, indem sie die Menge an frei beweglichem CO₂ allmählich reduzieren.



Poren, mit CO₂ gefüllt

1. Das injizierte CO₂ befindet sich in den Poren des Gesteins in der Speicherformation. Typischerweise werden etwa 20 bis 35 Prozent des injizierten CO₂ als mikroskopische Blasen in diesen Poren dauerhaft eingeschlossen.



Gelöstes CO₂

2. CO₂ löst sich in Wasser. Im Laufe der Zeit wird das injizierte CO₂ im Salzwasser der Lagerstätte langsam gelöst. Durch die größere Dichte sinkt dieses Wasser allmählich ab, das Risiko eines Austritts an der Oberfläche sinkt.



Neue Minerale gebildet

3. Ein Teil des gelösten CO₂ bildet Mineralien und wird durch diese „Versteinerung“ völlig unbeweglich.

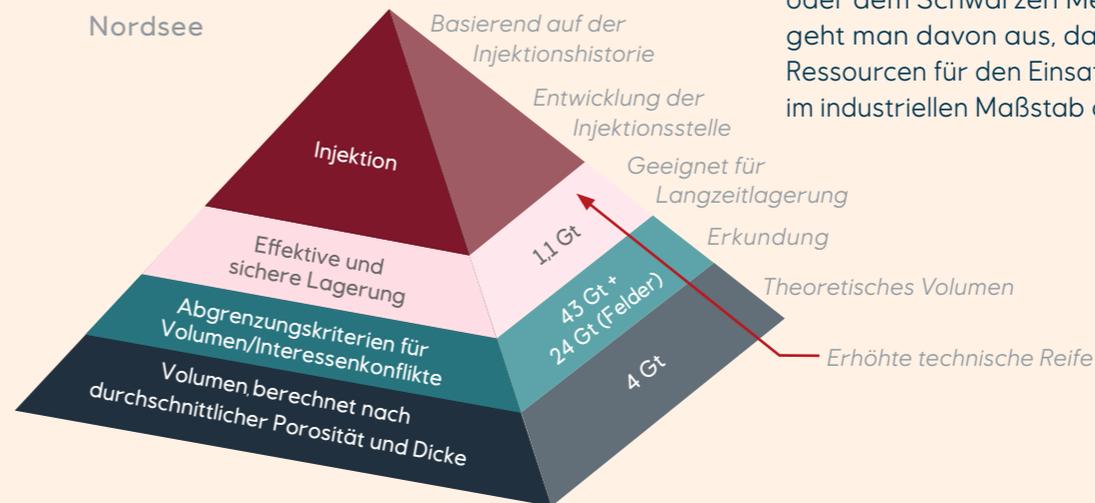


Im Zusammenspiel sorgen diese 3 Prozesse dafür, dass das CO₂ in der Speicherstätte mit der Zeit weniger beweglich ist und somit das Risiko für Leckagen sinkt.

Ausreichend Kapazitäten in der Nordsee

Die verantwortliche norwegische Behörde, das Öldirektorat, hat potenzielle Speicherformationen auf dem norwegischen Kontinentalschelf kartiert und bewertet. Die Behörde schätzt die gesamten Speicherressourcen allein im norwegischen Teil der Nordsee auf ca. 72 Gt CO₂ in dortigen salinen Aquiferen und in stillgelegten oder noch stillzulegenden Öl- und Gasfeldern. Unter der gesamten Nordsee wurde eine Speicherressource von ca.

160 Gt kartiert. Das entspricht den heutigen industriellen CO₂-Emissionen Europas über ca. 75 Jahre. Diese Speicherressourcen sind nicht im gleichen Maße für eine wirtschaftliche und technische CO₂-Speicherung geeignet, sodass voraussichtlich nicht alle genutzt werden. Da allerdings nur wenige Prozent der heutigen jährlichen CO₂-Emissionen in Europa per CCOS gespeichert werden sollen und zusätzliche Speicherressourcen in anderen Gebieten Europas (bspw. unter dem Mittelmeer oder dem Schwarzen Meer) vorhanden sind, geht man davon aus, dass die europäischen Ressourcen für den Einsatz von CO₂-Speicherung im industriellen Maßstab ausreichen.



Sleipner – ein Meilenstein für Wissensaustausch und Technologieentwicklung

Das Sleipner-Projekt ist von unschätzbarem Wert für den Fortschritt in der CCS-Forschung. Die hier gewonnenen empirischen Daten sind in andere Projekte rund um die Welt eingeflossen und wurden unter anderem bei der Entwicklung der EU-Richtlinie und -Verordnung zur CO₂-Speicherung genutzt. Das Projekt fungiert als Labor und Lernort, seine Daten wurden der

akademischen und industriellen Forschung auf der ganzen Welt zur Verfügung gestellt. Mit seiner Hilfe wurde die Modellierungs- und Überwachungstechnologie weiterentwickelt. Seit 2021 kann ein Sleipner-CCS-Datensatz kostenlos von co2datashare.org heruntergeladen werden.

► QR-Code scannen für animierte Daten.



Equinor, ehemals Statoil, teilte seine Erfahrungen aus Sleipner und Snøhvit offen mit dem GFZ und seinem CO₂-Pilotspeicherprojekt Ketzin. Das war ein unschätzbare Input für den technischen Erfolg unseres Projekts.

Dr. Cornelia Schmidt-Hattenberger,

Leiterin der Arbeitsgruppe Geologische Speicherung,
Helmholtz-Zentrum Potsdam – Deutsches GeoForschungsZentrum (GFZ)

Ausblick

Die Nutzung von CCOS im Sleipner-Feld ist ein Pionierprojekt und hat gezeigt, dass Offshore-CO₂-Speicherung sicher und im großen Maßstab möglich ist. Das Projekt hat bewiesen, dass CO₂-Speicherung ein tragfähiges Instrument zur Bekämpfung des Klimawandels sein kann.

Für Equinor ist die Technologie ein Lösungsbaustein für residuale industrielle Emissionen sowie ein integraler Bestandteil unserer kohlenstoffarmen Wasserstoffstrategie, um emissionsarmen blauen Wasserstoff bereitzustellen, beispielsweise für die Stahl- und Chemieindustrie. Gefördert durch den norwegischen Staat und in Zusammenarbeit mit unseren Partnern Shell und Total, entwickeln wir die erste frei zugängliche Infrastruktur für CO₂-Transport und -Speicherung für industrielle Emittenten in ganz Europa: Das Northern-Lights-Projekt soll bereits 2024 in Betrieb gehen.



► Für eine Animation den QR-Code scannen.

