

EINFÜHRUNG

Die geologische Lagerung von Kohlendioxid (CO₂) bedeutet einen wirklichen Fortschritt bei dem weltweiten Versuch, die Emissionen von Treibhausgas (GHG) wesentlich zu senken. Das gilt vor allem für großflächige Emissionsquellen, so zum Beispiel Kraftwerke, Zementanlagen und Stahlmühlen. Das Auffangen und Lagern (CCS) ist kein Allheilmittel. Es ist aber ein greifbares Mittel, um mit den großen Gasmengen mit bereits zur Verfügung stehenden Technologien fertig zu werden und sie zu verbessern.

CCS ist eine Überbrückungstechnologie beim Übergang in eine alternative Zukunft im Energiebereich. Der Optimismus im Bezug auf ihren Erfolg basiert auf der Branchenerfahrung. Aber auch Befürworter bestätigen, dass es einige Fragen gibt, die angegangen werden müssen, ehe eine weit verbreitete Anwendung erfolgen kann. Die Schlüsselfragen werden weiter unten besprochen und im restlichen Dokument näher darauf eingegangen.

Typischerweise wird das Auffangen und Lagern von CCS oder CO₂ als integrierter Vorgang zur Abspaltung von Gas in Industrieanlagen, Transport zu den Lagerstätten und das Einleiten unter die Erdoberfläche definiert. Die US-Regierungsbehörden verwenden anstatt des Wortes "Lagerung" das Wort "Abspaltung". Die Bedeutung ist jedoch die gleiche. Die Abkürzung für alle, einschließlich vieler internationaler Organisationen ist CCS. Wird CO₂ gelagert oder abgespalten, so wird es in poröse Steine, tief unter der Erdoberfläche (in Tiefen von typischerweise mehr als 1.000 Metern) eingeleitet. Um einen sicheren Betrieb zu gewährleisten, werden sorgfältig Protokolle über den Betrieb erstellt. Ist das CO₂ erst einmal sicher in den Erdboden eingeleitet, dann bleibt es erwartungsgemäß für einen geologischen Zeitraum dort.

Das Dokument greift auf eine Vielfalt an praktischer Erfahrung in der Öl- und Gasindustrie zurück und enthält die Schlüsselaspekte und technologischen Innovationen, die bei der geologischen Lagerung von CO₂ eingesetzt werden. Es werden viele Projektbeispiele beschrieben, die in Größe und Umfang mit großen CCS vergleichbar sind. Das Dokument ist keine umfassende Übersicht über die geologische Lagerung oder die bestmögliche Praxis in der Branche. Aber in seinen vier Kapiteln werden häufig diskutierte Bereiche abgehandelt, die für den Kenntnisstand in der Branche wahrscheinlich von besonderem Wert sind.

In Kapitel 1 werden die grundlegenden Fragen untersucht:

- Nach welchen Kriterien wird die Lagerstätte ausgewählt?
- Welche Kriterien sind am wichtigsten, und welche Daten werden für die objektive Beurteilung der Eignung der vorgeschlagenen Lagerstätte erhoben?
- Was macht einige Lagerstätten aufgrund des geologischen Kontextes, Kenntnisstandes und Verfügbarkeit der Daten zu einer von Natur aus besseren Wahl als andere?
- Welche Prozesse machen sie zu einer geologischen Lagerstätte?

Im zweiten Kapitel wird der Schwerpunkt auf die Schächte und das mögliche Ausströmen von CO₂ aus den vorhandenen Schächten und Wasserschichten oder das Ausströmen aus einer Oberfläche aufgrund von offenen Leitungen oder Verschlechterung des Betons gelegt. Es werden Fragen bezüglich der Integrität der Schächte, Beton und der guten Bautechniken für Schächte, die CO₂ ausgesetzt sind, sowie die Ergebnisse der neuesten Feld- und Laborstudien erörtert.

In der Analyse wird unterstellt, dass gebührende Sorgfalt gekoppelt mit für den Schacht geeigneten Tests und geeignete Wissenschaft dieses potenzielle Problem lösbar macht. Einige Standorte können jedoch aufgrund der geforderten Sanierung zur Bewältigung des Schachtproblems wirtschaftlich nicht wünschenswert sein.

Im dritten Kapitel werden die Kontroll- und Prüftechniken untersucht. Effektive Kontrolle erfolgt hauptsächlich durch das Erheben von Daten und das Einrichten von Systemen, um die Position von CO₂ unter der Erde beispielhaft darzustellen. Aufgrund der Konstruktion geht es bei der Kontrolle um Schlüsselfragen zu möglichen Schwierigkeiten. Sie liefert die grundlegenden Leistungsdaten für das Projekt. Ein gutes Kontrollprogramm dient der Vermeidung potenzieller Probleme, da entgegengesetzt zu bereits aufgetretenen Problemen.

Die sich aus dem Betrieb und der eventuellen Stilllegung einer Lagerstätte ergebenden Fragen werden in Kapitel 4 behandelt. Einige Regulierungsbehörden haben Erfahrung mit der Stilllegung von Öl- und Gas-Lagerstätten. Aufgrund dieser Praktiken können praktische Bestimmungen für eine realistische Sicherstellung eines sicheren und effektiven Prozesses aufgestellt werden. Zusätzlich wird die maximale Lagerkapazität der vorgegebenen Systeme untersucht und was dies für die Einleitungsmengen und den Druck bedeutet.

Der CCS-Vorgang ist ähnlich dem beim Gas, wenn es in umgekehrter Richtung strömt. Es ist darauf hinzuweisen, dass CO₂ feuerungefährlich, ungiftig und ungefährlich ist, ausgenommen in hohen Konzentrationen. Für das Leben hängt die gesamte Biosphäre vom CO₂ ab. In der Atmosphäre despergiert es sehr schnell. Die Herausforderung bei der Bewältigung von Gas wie CO₂, das tief unter der Erdoberfläche gelagert wird, gab es noch niemals zuvor, und es gibt darüber noch keine Erfahrung. Ein erfolgreiches CCS-Programm hängt letztendlich von der Aufstellung von Standards und den Erwartungen ab, um den Betreibern, Regierungen und der Öffentlichkeit einen Rahmen zu geben und zu gewährleisten, dass kein Schaden für das Leben, Wasser und die Umwelt entsteht.

CCS ist ein effizienter Weg, um mit den Emissionen aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe fertig zu werden. Eventuell kann CCS in Kraftwerke implementiert werden, die mit Abfall aus Biomasse betrieben werden. Die Lagerung von bei der Verbrennung von Biomasse entstehendem CO₂ führt zu einer noch stärkeren Reduzierung der CO₂-Belastung der Atmosphäre als die Verbrennung von erneuerbaren Brennstoffen. Dieses Szenario bietet die Aussicht darauf, Energie zu erzeugen und gleichzeitig CO₂ aus der Luft zu ziehen - keine Utopie, nur Fortschritt.

Große, kommerziell angelegte CCS-Projekte sind heute selten, weil die Geschäftsgrundlagen fehlen. In den meisten Rechtssystemen ist es noch nicht legal, CCS auszuführen, ausgenommen verbesserter Öl-Rückgewinnungsverfahren (EOR). Noch wichtiger, es gibt keine Mechanismen, um die durch CCS geringer werdenden CO₂-Emissionen zu Geld zu machen. Für ein Unternehmen, das Rohstoffe (so zum Beispiel Elektrizität, Energie, Öl, Gas, raffinierte Erzeugnisse, Beton oder Stahl) verkauft, macht der Umstieg auf CCS auf unilateraler Basis keinen Sinn. Dies wird sich so lange nicht ändern, bis die Lagerung von CO₂ einen kommerziellen Wert besitzt.

Glücklicherweise beginnt man in einigen Rechtssystem weltweit einen gesetzlichen und behördlichen Rahmen aufzustellen, um CCS durch Nachträge zu den bereits vorhandenen Bestimmungen sowie das Aufstellen neuer Bestimmungen möglich zu machen. In der Industrie gibt es bereits eine Technologie, Fertigkeiten und Möglichkeiten, industrielle CCS-Projekte auszuführen, und der kommerzielle Grund, eine Technologie einzusetzen, lässt sich wahrscheinlich verwirklichen.

Die an CCS-Beteiligten benötigen:

- Zugang zu qualitativ hochwertigen Lagern und eindeutige Rechte, dieses Lager nutzen zu dürfen.
- Ein gesetzlicher Rahmen und ein Zulassungsverfahren, um die Erlaubnis zur Einleitung zu gewährleisten.
- Geldinstitute, die bereit sind, eine normale Finanzierung anzubieten.
- Klare Erwartungen für einen eventuellen gesetzmäßigen Projektabschluss.
- Management der langfristigen Zuständigkeit für das gelagerte CO₂ (Verwaltung).
- Erwartung einer angemessenen Rendite.

Individuelle CCS-Projekte bestehen wahrscheinlich aus vier verschiedenen Phasen mit regulatorischen Übergängen:

- *Auswahl des Standortes und Entwicklung* (ungefähr 5-10 Jahre): Der Standort wird auf der Grundlage einer geologischen Beurteilung, kaufmännischer Faktoren und regulatorischer Erwartungen ausgewählt. Der Platz für die Einrichtungen wird festgelegt und die primäre Lagerstätte unter der Erdoberfläche wird gekauft oder vom Eigentümer (eine juristische Person oder Regierung) geleast. Eine Erlaubnis zur Lagerung wird gegeben, die Infrastruktur aufgebaut (z.B. Schächte, Fließlinien, Kompressoren) und die Betriebskapazität geprüft.
- *Betrieb*(über Jahrzehnte): Der gesamte Zeitraum der Gaseinleitung, plus einige Jahre zusätzlicher Kontrolle, wie technisch angebracht.
- *Stilllegung* (über Jahre): Diese Phase beginnt, wenn bei der ausreichenden Kontrolle angezeigt wird, dass das eingeleitete CO₂ gut gehandhabt wird und keine Probleme auftreten. Die Regulierungsbehörden können entscheiden, dass die Beobachtungsschächte oder Anlage für sehr lange Zeit bestehen bleiben. Die meisten Schächte werden zugeschüttet und die Infrastruktur entfernt. Die Lagerstätte wird dann als normal angesehen.
- *Nach der Stilllegung*: Die erwartete Leistung des CO₂ im Behälter wird festgelegt. Der Betreiber wird nicht mehr weiter mit einbezogen.

Es gibt Risiken. Damit CCS erfolgreich eingesetzt werden kann, muss das Risiko objektiv und die Verantwortung sowohl von den Betreibern als auch von den Regulierungsbehörden eingeschätzt werden. Möglicherweise werden die erkannten Risiken fälschlicherweise überreguliert und die tatsächlichen, jedoch unterkannten Gefahren nicht erkannt. Das Recht auf einen Regulierungsmix hilft, damit CCS Erfolg hat. Es ist wichtig, dass technisch berücksichtigt wird, dass das mit dem eingeleiteten CO₂ verbundene "Risiko" nicht dauerhaft besteht. Die Wahrscheinlichkeit eines unerwarteten Zwischenfalls steigt mit der eingeleiteten Menge und der Oberflächendruck steigt. Das erfordert eine strenge Kontrolle während des Betriebs. Wird die Einleitung gestoppt, weil der Druck im Gleichgewicht ist und der natürliche Aufnahmemechanismus wirkt, wird das eingeleitete CO₂ allmählich unbeweglich.

Für Betreiber und Regulierungsbehörden ist der effektivste Weg zur Minimierung unvorhergesehener Folgen, mit der sorgfältigen Auswahl der Lager zu beginnen. Die Faktoren, die ein Lager zu einem guten und sicheren Ort für die Einleitung und Lagerung von CO₂ machen, werden in Kapitel 1 über die Auswahl der Lager erläutert. Dann muss die gängige Praxis eingesetzt werden, um das Lager zu bauen, vor allem beim Bau neuer Schächte, bei der Beurteilung und/ oder Sanierung bereits vorhandener Schächte, der technischen Grundlage, die in Kapitel 2 erläutert wird. Die Kontrolle des Projektes, einschließlich sowohl der Operationslinie als auch der Abmessungen für den Betrieb sind in der Betriebsphase der Schlüssel, um die Leistung zu optimieren und potenzielle Probleme frühzeitig zu erkennen; wie in Kapitel 3 erörtert. Schließlich beinhaltet ein erfolgreiches Projekt eine intelligente Konstruktion, strenge Kontrollen des Betriebes und robustes Planning, einschließlich Betreiber und Regulierungsbehörde, um einen sauberen Übergang zur Stilllegung und die Phasen nach der Stilllegung zu ermöglichen, wie in Kapitel 4 erläutert.

KAPITEL EINS: Standortcharakterisierung

Die Oberflächencharakterisierung ist ein grundlegender Schritt zur Feststellung potenzieller geologischer Schichten zur Lagerung von CO₂. Es beginnt mit der fundierten Geowissenschaft unter Einsatz von Routine und völlig gesicherten Techniken bei der Beurteilung der Daten. Während bei der Charakterisierung des Untergrunds aufgrund innewohnender natürlicher Veränderlichkeit ein gewisser Grad an Unsicherheit unvermeidlich ist, ist es wichtig, dass bei der geologischen Lagerung drei Elemente technisch machbar sind. Das potenzielle Lager muss ausreichend Porenvolumen besitzen, um das eingeleitete Material zu lagern ('Kapazität'); die Erdformationscharakteristika müssen fast eine Einleitbarkeit durch ein Bohrloch ermöglichen ('Einleitbarkeit'). Eine darüberliegende Versiegelungsschicht muss die Einschließung geeigneter Flüssigkeiten gewährleisten ('Einschließung'). In diesem Text bezieht sich "Flüssigkeiten" in einer Vielzahl chemischer Vorgänge auf CO₂, einschließlich der superkritischen (dichten) Phase, Gasphase und in Salzen aufgelöstes CO₂.

Die Kapazität wird über fünf Parameter festgelegt, nämlich die Dicke der Gesteinsformation, die Umgebung des Lagers, die Porosität des Steines und die CO_2 -Dichte (die sogar in jedem einzelnen Reservoir variieren kann) und die Lager-Effizienz (ein Faktor, der den Bruch des Porenvolumens widerspiegelt, das mit CO_2 aufgefüllt werden kann plus die Kapazität der vorhandenen Gesteinsformation und Flüssigkeiten mit CO_2 in der Lösung oder chemische Verbindungen. Ein Schlüsselparameter ist die Porosität.

Der Einpressindex wird über die Permeabilität der Gesteinsformation und die Konstruktion des Einleitungsschachtes festgelegt. Idealerweise erfordert die Lagerung von CO_2 in der Nähe des Bohrloches eine hohe Permeabilität, damit das CO_2 schnell in die Pore gelangen kann. In dem Maße wie der Einleitungsvorgang weiter fortschreitet, können die geo-chemischen Reaktionen zwischen CO_2 an der Erdoberfläche, den Gesteinen und den Flüssigkeiten in den Gesteinsschichten die Einleitbarkeit günstig oder ungünstig beeinflussen. Die Einschließung erfordert eine bestimmte Form und eine entsprechende Versiegelung. Die Versiegelungen sind für den Fluss verschiedene Barrieren, was bedeutet, dass die Gesteinsschicht eine Mindestpermeabilität oder -kapazität besitzt, um einen Fluss zu ermöglichen, und in den Schichten keine Fehler im Zusammenhalt oder Brüche vorliegen, die ein Durchsickern großer Mengen verhindern. Die Versiegelungen können vertikal oder lateral sein. In einigen Fällen bietet eine einzige Versiegelung eine große Einschließung, in anderen Fällen erhalten multiple Schichten als Gesamtversiegelung den Vorzug. Die effektive Qualität der Versiegelung der Gesteinsschichten kann quantifiziert und anhand vorliegender Labordaten kalibriert werden. Wichtig ist die Kontinuität der Versiegelung. Man benötigt eine ausreichende Versiegelung des Gebietes, damit das Gesamtvolumen eingeleitet werden kann. Es sollte eine angemessene Dicke besitzen, damit ein möglicher Bruch aufgrund einander entgegengesetzter geo-mechanischer Wirkungen, die unter bestimmten speziellen Umständen eintreten können, verhindert wird. Die verbleibende Sättigung kann als ein leistungsfähiger Einschließungs-Mechanismus für CO_2 dienen.

Es gibt einige artmäßige Modi für die CO_2 -Lagerung. Diese beinhaltet die Lagerung in:

- 1- leeren Öl- und Gas-Reservoiren, die einige der sofort zur Verfügung stehenden geeigneten Lagerlösungen bieten;
- 2- tiefe Salz-Gesteinsformationen, die die Region stärker abdecken und sehr viel üblicher sind. Sie bieten in der Nähe der Orte der CO_2 -Emissionen die einzigen Möglichkeiten;
- 3- Zusammenlegung mit Projekten (EOR) für die verbesserte Öl-Rückgewinnung in der Öl- und Gasindustrie;
- 4- Kohlebett-Formationen

Die Hauptvorteile bei der Lagerung in der Nachbarschaft der Ölproduktion und von Gasfeldern liegen in der Laufzeit der ursprünglichen Datenbank, die für die Öl- und Gasbetriebe aufgebaut wurde und der angemessenen Sicherheit der nachgewiesenen Einschließung.

Das Verstehen der Mechanismen, durch die CO_2 eingeschlossen wird, ist ein wichtiger Aspekt für die Charakterisierung der Lagerstätte. Physikalische und geo-chemische Faktoren bestimmen die Effektivität der Mechanismus für die Einschließung. Aspekte hinsichtlich des Einzugsgebietes einschließlich dessen regionaler Strukturen, dessen Geschichte und dessen Druckverhalten ist wichtig, da jede Gesteinsschicht unveränderlich Teil eines größeren Systems sein wird, aufgrund dessen man den Fluss im gesamten Einzugsgebiet und die Mechanismus für die Lagerung verstehen muss. Die Ermittlung der Richtung und des Anteils des natürlichen Flusses der Flüssigkeit in der unmittelbaren Umgebung ist wesentlich. Die physikalischen Einschließungsmechanismen, die die Geometrie der strukturellen und stratigrafischen Einschließungen umfassen, sind aufgrund der Einschätzung des Routine-Reservoirs bei der Förderung von Öl und Gas gut verständlich. Das in den Poren der Gesteinsformationen eingeschlossene CO_2 kann auch als Einschließung und demzufolge als ein wichtiger Lagermechanismus dienen. Die geo-chemische

Einschließung, in der CO₂ mit natürlichen Flüssigkeiten und Materialien tief unter der Erdoberfläche reagiert (so zum Beispiel in Salz-Gesteinsformationen), kann auch zu einer permanenten CO₂-Lagerung tief unter der Erdoberfläche führen.

Es gibt drei artmäßige Arbeitsphasen, die dem Untergrund für Öl- und Gasförderung und der Herstellung gemeinsam sind und auf die Lagerung von CO₂-Lagerung angewandt werden können. Die erste Phase bei der Auswahl des Standortes umfasst regionale Überprüfungsstudien, um die möglichen Gebiete für die Einleitung und Lagerung von CO₂ festzulegen. Das Ziel unter Berücksichtigung der Analyse, der Modellerstellung und der Risikoanalyse besteht in der Festlegung eines oder mehrerer Standorte für eine detaillierte Standortbeurteilung. Die zweite Phase, die Standortbeurteilung, umfasst detaillierte Studien des Untergrundes, um die Machbarkeit der Einleitung und Lagerung zu zeigen. Dieses Stadium umfasst typischerweise die Einschätzung für die Bohrung (wenn nicht bereits geeignete Schächte existieren) und die Erhebung von Detaildaten, grundlegende Tests, um die Planung für die zukünftige Kontrolle und die detaillierte Risikoanalyse zu unterstützen. Die Entwicklungsphase, die dritte Phase, umfasst typischerweise die weitere Verfeinerung des Entwicklungsplans und das Verständnis der genaueren Details der Ziel-Gesteinsformationen, so zum Beispiel ihre petro-physikalischen Eigenschaften oder Einleitungskapazitäten.

Wie aus dem Kontext der geologischen Beurteilung und der Ölfeldentwicklung hervorgeht, besteht ein gewisser Grad an Risiko und Unsicherheit. Dies gilt es bei der Entscheidungsfindung bei der Auswahl und Beurteilung der Lagerstätte für CO₂ zu berücksichtigen.

Viele bei der Charakterisierung von Öl- und Gas-Reservoirs eingesetzte Praktiken können bei der Beurteilung von CO₂ Lagern (so zum Beispiel die Verwendung seismischer Daten, stratigrafische Karten und Fazies-Analysen zur Erstellung eines geologischen 3D-Modells) eingesetzt werden. Da viele Geowissenschaftler auf bereits vorhandenes Wissen und Praktiken zurückgreifen, betrachten sie die Aufgabe zur Feststellung qualitativ hochwertiger CO₂-Lager als Routine. Um objektiv zu sein, die Auswahlkriterien für ein extrem solides Lager ist keine große Herausforderung. Viele davon sind einfach leere Kohlenwasserstoff-Felder. Bei der Auswahl der Lager besteht jedoch ein enormer wirtschaftlicher Druck, wenn die Vorteile aufgrund des Öl- und Gasbetriebes nicht sehr groß und wo die geologischen Fakten zur Effektivität der Lagerung nicht klar erkenntlich sind. Dies erfordert größere Sorgfalt, die Gewinnung neuer Daten. Hierbei profitiert man von den Erkenntnissen aus früheren Pilot- und Vorzeigeprojekten.

In der Öl- und Gasindustrie findet man sehr viele Innovationen und Anpassung unter Einhaltung hoher Standards. Um die Probleme zu lösen, sind die Praktiken sehr ausgeklügelt. Investitionen in die Lager führen auch zu Investitionen in die Verbesserung der Kriterien für die Standortauswahl und der Kontrolltechniken. Einige Schlüssel-Tools für die Modellerstellung werden für CO₂- und Lageranwendungen aktualisiert, so dass sie für diesen Zweck effektiver und effizienter sind. So ist zum Beispiel die Abstimmung der Physik der CO₂-Bewegung *in situ* nicht vollständig als Physik des typischen Öl- und Gasverhaltens, vor allem bei großen Reservoirs mit der Multi-Phasen-Flüssigkeit, definiert; obwohl es ausgeklügelte mathematische Modelle zur Beschreibung des mit CO₂ verbundenen Phänomens gibt. Über tief unter dem Boden liegende Salz-Gesteinsformation, mit denen man sich derzeit in einer Studie beschäftigt, liegen derzeit auch sehr wenig Daten vor, weil sie für die Öl- und Gasproduktion nicht von Interesse waren. Andere in der Branche zur Verfügung stehenden Standard-Tools profitieren von den spezifischen Upgrades für CO₂ und der erweiterten Kalibrierung, vor allem von Tools für umfangreiche Analysen der Einschließung.

KAPITEL ZWEI: Schachtbau und Integrität

Alle an CCS-Projekten Beteiligten stimmen wahrscheinlich zu, dass es wichtig ist, das Risikopotenzial des Ausströmens von CO₂ aus den Schächten zu beurteilen. Dies gilt sowohl für neue als auch bereits existierende Schächte. Das Vermeiden des Ausströmens ist ein standardmäßiger Teil bei Öl- und Gasbetrieb und ein Hauptziel bei der Konstruktion sowohl von Einleitungs- als auch Produktionsschächten. Man unternimmt ernste Anstrengungen zur Prüfung der physikalischen und mechanischen Integrität der Schächte. Techniken zur Vorbeugung, Feststellung und Beseitigung des

Ausströmen gehören zu den Standardpraktiken. Die Öl- und Gasindustrie besitzen jahrzehntelange Erfahrung im Bau und Betrieb von Schächten zur Einleitung und Herstellung von CO₂ und CO₂ - Mischungen mit Öl, Wasser und Naturgas.

Man besitzt große Erfahrung mit dem CO₂ -spezifischen Bau von Schächten bei auf CO₂ basierenden EOR-Projekten [1], von denen das erste in den Siebzigern startete, und auch bei der Produktion von Naturgas mit hohem CO₂ -Gehalt. Bei dieser Tätigkeit sammelte man grundlegende praktische Erfahrung und erstellte die entsprechenden Analysen. Klar konstruierte Schächte für eine Umgebung, die CO₂ ausgesetzt ist, erfordern das Verstehen der Bedingungen für die Betriebsdauer des Schachtes, dessen Stilllegung, den physikalischen Merkmalen des Schachtes selbst (so zum Beispiel die Auswahl der Konstruktionsmaterialien und Praktiken, um die Integrität der internen und externen Versiegelung zu gewährleisten) sowie die geologischen und chemischen Charakteristika, so zum Beispiel Druck, Temperatur und Herstellung/ Chemie bei der Einleitung, wenn der Schacht in Betrieb ist.

Während einige Labortests gezeigt haben, dass einige Betonarten, die beim Schachtbau gemeinsam verwendet werden, unter simulierten Laborbedingungen von CO₂ angegriffen werden können, zeigt ein größerer Teil der Laborarbeit, Feldanwendungen, Leistungsverlauf und Studien, dass der normale Zement mit einer guten Mischung, Testergebnissen und Betonierungspraktiken bei CCS-Anwendungen in Ölfeldern wirksam ist. Die Erfahrung zeigt auch, dass eine effektive Betonierung im Bohrloch-Annulus für die Sicherstellung der Integrität des Schachtes ebenso wichtig, wenn nicht noch wichtiger ist. In einer neuen Studie über das CO₂ Auffang-Projekt, in welcher die Barriere-Bedingungen eines Bohrlochs, das CO₂ ausgesetzt ist, fand man heraus, dass Portland-Zement und Kohlestahl eine effektivere Barriere für CO₂ bieten und die Betonierung wesentlich widerstandsfähiger gegen die CO₂-Bewegung entlang der Barriere ist als die Wahl des Betons selbst.

Vor dem Bau von Schächten sollten der Bedarf für Bohrung, Vervollständigungen, Betrieb und die Schließung in "Konstruktionsgrundlage" und einem Entwicklungsplan festgehalten werden. Dies deckt ein breites Spektrum an Betrachtungsweisen ab, einschließlich der erwarteten Dauer jeder Phase des Schachtlebens (über die Standortwahl, den Betrieb, die Stilllegung und nach der Stilllegung); die Daten für die Einleitung (Menge, Volumen und Zusammensetzung) zusammen mit den entsprechenden Charakteristika für das Reservoir; Anzahl und Art der erforderlichen Schächte; die erforderliche Art der Fertigstellung des Schachtes; eine Korrosions- und Kontrollprogramm und Plan; Sicherheitssystem; Anforderungen an Service und Wartung; und Einrichtungen für die Leistungskontrolle, zur Wartung der Einleitungsvorrichtungen sowie Verbesserungen.

Es ist klar, dass große Mengen an CO₂ für eine Einleitung zur Bewältigung der GHG-Emissionen eine große Anzahl neu auszugrabender Schächte erfordern. Dies unterstreicht die Notwendigkeit eines guten Verständnisses der Schachtdaten und der besten Praktiken bei der Standortwahl und Entwicklung. Glücklicherweise verbessern die neuesten Fortschritte in der Schacht-Technologie, so zum Beispiel das horizontale Bohren, massives hydraulisches Brechen sowie multi-laterale Schächte das Potenzial für eine individuelle Schacht-Einleitung und senkt die Zahl von Schächten, die für die Einleitung einer CO₂-Menge im Vergleich zu traditionellen Bohrtechniken erforderlich sind und die früheren CO₂ EOR -Projekten gemein sind.

Vorhandene Schächte können für die geologische Lagerung von CO₂ verwendet werden sind eine Gelegenheit für den Einsatz der zur Verfügung stehenden Infrastruktur. Die Frage, ob ein vorhandener Schacht verwendet wird, erfordert eine Prüfung der ursprünglichen Konstruktion und die Untersuchung des Verlaufs ihrer Nutzung (einschließlich des Verlaufs ihrer Zuschüttung und Stilllegung, wo ausschlaggebend). Grundlegende Informationen über den Schacht und auch über die ausschlaggebenden Reservoir-Bedingungen (so zum Beispiel Druck, Temperatur, Flüssigkeit/ Gassättigung, Chemie des Wassers) sind ebenso notwendig. Die erneute Nutzung vorhandener Infrastruktur zu einem anderen Zweck als für die ursprüngliche Konstruktion vorgesehen führt zu Einschränkungen des Betriebes. Es sind Einschränkungen im Vergleich zu neu gebauten Anlagen. Aber in den meisten Fällen ist ein Schacht für die Einleitung von CO₂ für EOR identisch mit dem für die Lagerung von CO₂ an der gleichen Stelle gebauten. Im Allgemeinen kann jeder Schacht mit einer soliden Konstruktion, Ausführung und geeigneten Berücksichtigung der CO₂ -Anforderungen für den CO₂ -Gebrauch umgebaut werden.

Neue Schächte bieten die Gelegenheit, ein neues Barriersystem zu planen, das speziell auf CO₂ und die Bedingungen abgestimmt sind. Das kann oder kann nicht bei der Entscheidung ausschlaggebend sein. Faktoren, so zum Beispiel die Barrierequalität für die Lebensdauer des Schachtes, der Zustand des Reservoirs und die speziellen Anforderungen an die Lagerung von CO₂ sollten bei der Planung mit berücksichtigt werden. Die grundlegenden Anforderungen an die Planung neuer Schächte – eine Grundlage für die Konstruktion, ein Lagerplan, einen Entwicklungsplan sowie grundlegende Kontrollen sind die gleichen wie die für vorhandene Schächte.

KAPITEL ZWEI: Kontrolle

Geo-Wissenschaftler glauben, dass die Untergrund-Kontrolle ein Vorgang zur Erhebung von sofort verwendbaren Daten ist. Dieser Vorgang ist Teil der wissenschaftlichen Beurteilung zum Test des effektiven Verständnisses komplexer Verhältnisse unter der Erdoberfläche, der Erwartungen für diesen Standort sowie die Bewegung von Flüssigkeiten und Gas mit der Zeit. Die Kontrolle ist Schlüsselindikator für die Leistung zur sicheren Lagerung. Es ist jedoch falsch zu glauben, dass die Kontrolle selbst ein Garant für Sicherheit ist. Die Kontrolle ist wie ein Tachometer im Auto. Er trägt zur Sicherheit bei. Aber andere Faktoren sind wichtiger, so zum Beispiel die Konstruktion des Autos selbst, die Straßenverhältnisse und die Fahrweise. Die UN IPCC schlägt vor, dass der in einer angemessen ausgewählten und betriebenen Anlage zurückgehaltene CO₂-Anteil über einen Zeitraum von 1000 Jahren wahrscheinlich 99% überschreitet. Der Schlüssel für eine sichere Lagerung ist die angemessen ausgewählte und betriebene Anlage. Die effektive Kontrolle ist für den gesamten Prozess grundlegend. Sie können Tools und Techniken zur direkten Kontrolle einsetzen, um die CO₂-Konzentrationen zu messen, und zwar in der Nähe der Bohrlöcher im Untergrund oder durch Oberflächenmessungen. Der größte Teil der Kontrollen erfolgt jedoch durch indirekte Messmethoden, so zum Beispiel Untersuchungen der Seismik, der Schwerkraft oder des Elektromagnetismus. Für die Ausführung der Kontrollen gibt es bereits eine Reihe von Tools. Sie müssen sorgfältig ausgewählt werden, um sicherzustellen, dass für die Aufgabe die richtigen ausgewählt wurden, und zwar unter Berücksichtigung der besonderen Bedingungen vor Ort. In den meisten Fällen werden komplexe 3-D-Computer-Modelle erstellt. Sie dienen als Stellvertreter bei der Visualisierung und der Quantifizierung der Untergrundumgebung. Die Informationen aus der Kontrolle helfen bei der Verfeinerung und Verbesserung dieser Modelle.

3-D -Seismik-Bilder werden in der Öl- und Gasindustrie extensiv eingesetzt, um die Geometrien und Verteilungen der Steinvolumina im Bezug auf Druck und Flüssigkeitsarten zu beschreiben. Es handelt sich hierbei um ein extrem ausgeklügeltes und leistungsstarkes Tool. Es wurde über die Einführung einer Zeitraster-Technologie ('4-D' Seismik-Bilder) weiter verfeinert. Auch wenn Seismik-Imaging Einschränkungen unterliegt, so zum Beispiel den technischen Herausforderungen für qualitativ hochwertige Seismik-Bilder durch Salzschieben oder die finanziellen Herausforderungen und Probleme beim Zugang zur Geländenutzung zur Erstellung von Seismik-Imaging. In einigen Fällen liefert die Technik keine relevanten Daten. Die Messungen der Schwerkraft, die für eine theoretische Vertikale Gesteinsschicht Veränderungen in der Dichte offenlegen, sind ein weiteres indirektes Messtool, das wahrscheinlich an Lagerstätten für CO₂ eingesetzt wird. Auf Satelliten basierende Anwendungen werden ebenfalls eingesetzt, um Veränderungen in der Bodenbewertung festzustellen - mit Ihnen kann man Veränderungen in den vertikalen Bewertungen von bereits einem Millimeter feststellen - Erheben oder Absacken des Bodens, der den Veränderungen im Untergrund zuzuschreiben ist.

Diese Techniken werden nun bei kommerziellen Projekten und dem Betrieb von Öl- oder Gasanlagen in verschiedenen Teilen der Welt eingesetzt. Bei der In-Salah-Partnerschaft zum Beispiel kam die Technik der Satelliten-Kontrolle in hervorragender Form zum Einsatz, um die CO₂-Emission in die Wüste von Algerien [2] zu überwachen. Das CO₂-Lager von Sleipner hat den Wert der 4-D -Seismik und Schwerkraft zur Kontrolle der CO₂-Bewegung [3] gezeigt. Umfassendes 3-D- und 4-D-Seismik-Imaging wurde im Vakuum-Feld im Permianischen Becken von Neu Mexiko [4] und im Kuparuk-Feld am Nord-Abhang von Alaska eingesetzt. Die Kontrolle der Schwerkraft, die 3-D und 4-D-Seismik-Technologien wurden im

Feld von Prudhoe Bay in Alaska [5] eingesetzt und haben bei der Sanierung des Feldes für viele Jahre geholfen. Ein breites Spektrum von Technologien wurde im Pinedale-Feld in Wyoming eingesetzt, um das Verständnis der Verteilung und Konzentration von Naturgas im Feld und wie sich dies im Laufe der Zeit verändert, zu fördern. Am Peace River in Kanada wurden Programme zur Kontrolle der Seismik, Mikro-Seismik und Neigung über einen Zeitraum von Jahren gestartet, um das Verständnis für das dynamische Verhalten des Reservoirs zu verbessern.

Für welche Art der Kontrolle Sie sich auch entscheiden, es ist wichtig, eine grundlegende, gute Prüfung durchzuführen, ehe mit der Einleitung begonnen wird, und das Auflösungspotenzial der Technik sowie die Auswirkungen auf die spezielle Lagerstätte zu verstehen.

KAPITEL VIER: Entwicklung, Betrieb und Stilllegung

Ähnlich der Charakterisierung, Schachtbau und Kontrolle hat die Öl- und Gasindustrie eine sehr große Erfahrung im Bereich Management, Betrieb und Stilllegung von Feldern sowie unterirdischen Anlagen. Es fand eine Beurteilung des Lebenszyklus im Bereich Feldbetrieb statt. Für sie wurden so weitestgehend die Prinzipien eines effektiven Managements im Bereich Gesundheit, Sicherheit angenommen und Umweltprobleme erstellt. Viele internationale Organisationen haben Leitfäden, beste Praktiken, Rahmen für die Zertifizierung sowie Regulierungsvorschläge für den Lebenszyklus der CO₂-Lager ausgearbeitet.

Öl- und Gasbetrieb werden seit Jahren über das Konzept einer "Feedback-Schleife", in der Betriebs- und Kontrolldaten über ständige Verbesserungen bei den Erd- und Dynamik-Modellen, die für dieses Model charakteristisch sind, informiert. Dies treibt im Gegenzug die Antwort beim Betrieb voran. Das Feedback ist also ein Schlüsselkonzept bei der auf Leistung basierenden Stilllegung, so dass mit einer Stilllegung und den Phasen nach der Stilllegung eines Lagerprojektes schon zu Beginn eines stark charakterisierten und gut verstandenen Systems begonnen werden kann .

Die Entwicklung von CO₂-Lagerfeldern verläuft in vielen Bereichen parallel zur der Entwicklung von Öl- und Gasfeldern. Diese große Erfahrung ist der Schlüssel zu Erfolg. Die Wiedererschließung der CO₂-Lager profitiert von der Erfahrung der Öl- und Gasindustrie bei der Wiedererschließung von Feldern, die bereits für die Überflutung und EOR-Projekte sind. Die Lektionen einer in Phasen aufgeteilten Erschließung und das "Lernen durch Erschließung" sollte bei der Planung für das CCS- Einsatz und die Aufstellung von Bestimmungen berücksichtigt werden. Wie bei den Öl- und Gasfeldern liegt die optimale Erschließung von CO₂-Lagerstätten im starken Interesse des Betreibers, ob spezifisch oder nicht. Es existieren klar definierte Bestimmungen.

Die Feldplanung und Erschließung beinhaltet die Verwendung von Erde und dynamischen Modellen, die bei der Bewertung der Lagerstätte aufgestellt worden sind. Auf diese Art und Weise wird die Zahl der Schächte, die Art, die Einleitungsstrategien und die Betriebsparameter (vor allem der Druck) festgelegt. Erweiterte Schachtkonstruktionen, so zum Beispiel horizontale und multilaterale Schächte können für die CO₂-Lagerung eingesetzt werden, um die individuellen Schachtsätze zu verbessern, die Druckauswirkungen in der Nähe des Bohrlochs mindern und die Verteilung des CO₂ zu kontrollieren. Die Charakteristika des Reservoirs wirken sich auf die Anzahl der Schächte und Dichte aus und beeinflussen auch die Einleitungsstrategie. Die Betriebsparameter, so zum Beispiel die Menge der Anzahl der Schächte und der Druck, liefern sehr gute Informationen über die Schachtkonstruktion und die Infrastruktur. Der wichtigste Parameter für die CO₂-Lagerung ist der maximale Einleitungsdruck in das Bohrloch. Das Ziel ist die Maximierung der Einleitungsmenge ohne Beeinträchtigung der Integrität des Behältersystems.

Projektkonstruktionen dieser Art können sich auf Arbeit und den Praktiken in der Öl- und Gasindustrie stützen. Dynamische Reservoir-Modelle können zur Entwicklung geologischer Szenarien eingesetzt werden. Dadurch wird eine optimale Konstruktion möglich. Dies fördert im Gegenzug die Erstellung eines kostengünstigen Kontrollplanes.

Aufgrund der Kontrolle der Schachtintegrität können Zement-Beurteilungen eingesetzt werden, um die Integrität der Armierung des Schachtes im ringförmigen Raum zwischen Gehäuse und Gesteinsformation zu bewerten. Tools zur Schall- und Ultraschallbewertungen können ebenfalls eingesetzt werden. Die durch sie erhaltenen Informationen sind eine wichtige Datenquelle zusätzlich zu den Bohrberichten, Bohrflüssigkeitsberichten, Informationen zum offenen Bohrloch sowie Informationen zum Beton.

Bestimmte Faktoren, so zum Beispiel das Vorhandensein und die Konzentration von Sauerstoff, CO₂ und Wasserstoff-Sulfide (H₂S) sowie die vorweggenommene Lebensdauer und Betrieb der Ausstattung sind zu berücksichtigen, wenn Sie die Materialien auswählen, die beim Bau des Schachtes verwendet werden sollen. Die Industrie hat große Erfahrung im Bereich Materialauswahl beim Bau von Schächten, die CO₂ ausgesetzt sind, einschließlich der Planung von CO₂ Lager-Projekten, so zum Beispiel das Gorgon Gas Projekt in Australien. Bei ihm wurde zum Beispiel die Menge H₂S -Gehalt im CO₂ Gasstrom und dessen Auswirkungen auf die Auswahl des Stahls, einschließlich rostfreiem Stahl und die Kapazität nicht-metallischer Versiegelungen in dieser extremen Umgebung berücksichtigt. Das Feld Rangely Weber in Colorado ist ein Beispiel dafür, wo Schächte aus den Vierziger-Jahren untersucht worden sind und wurden erfolgreich für die Lagerung von CO₂ eingesetzt.

In der Phase des Schachtbetriebes können für die Kontrolle der Schachtintegrität verschiedene Techniken eingesetzt werden. Die Tests zur mechanischen Integrität können eingesetzt werden, um sicher zu stellen, dass die Versiegelung in Takt ist. Druck/ Temperatur, Lärm, Wärmeverlust und die Beurteilung des Betons können ebenfalls eingesetzt werden. Gegebenenfalls können Sanierungs- und Reparaturarbeiten ausgeführt werden. Je nachdem müssen Schächte vollständig stillgelegt werden.

Die Kontrollinitiativen bleiben ein wichtiger Bestandteil der Betriebsphase. Die Überwachung versucht nicht bloß sicherzustellen, dass der Schacht wie beabsichtigt funktioniert, innerhalb seiner Konstruktionsparameter bei einem akzeptablen Risiko während seines Lebenszyklus betrieben und gewartet wird, sondern dass er auch bei CO₂ -Lagerung in einer Form betrieben wird, die die Risiken einer unkontrollierten CO₂ -Emission verringern. Ein umfassendes Kontrollprogramm beinhaltet die Festlegung von maximalen und minimalen Druckgrenzen für alle Annuli und Anwendungen eine Vielzahl von Techniken für Diagnostests. Dies würde umfassen: die Analyse von Annulus-Flüssigkeit oder Gas, oder die Benutzung einer Vielfalt von Aufzeichnungen, einschließlich über die Feststellung von Lecks, Videos, Ultraschall, Temperatur, Leitungsinspektion, Rohrinspektion und Tastzirkel. Die Ausstattung sollte bei Entfernung aus dem Schacht ebenfalls überprüft werden. Alle Daten zur Kontrolle und Inspektion sollten verwaltet werden, so dass auf die für die Integrität relevanten Daten Zugriff besteht und diese zur Unterstützung bei der Entscheidungsfindung verwendet werden können.

Die Betriebsphase eines CO₂ -Lagers ist keine statische Zeit, aber eine, in der eine ständige Kontrolle, ein ständiges Lernen und gegebenenfalls Handeln stattfindet. Durch den Betrieb wird ein Lernprozess über den Untergrund in Gang gesetzt. Er liefert wertvolle Ergebnisse und Kontrolldaten. Die Mitarbeiter im Bereich Engineering, Geo-Technik und Betrieb arbeiten bei der Kontrolle und dem Management der alltäglichen Leistung zusammen. Die Mitarbeiter im Bereich Produktion und Reservoir-Engineering untersuchen in ähnlicher Form die Betriebsdaten zur Interpretation der Leistung von Schacht und Reservoir und bewerten die Bewegung der CO₂-Wolke. Aktionen während des Betriebes umfassen Korrosion, Wartungsprogramme, die Wartung des Schachtes, Veränderungen bei der Einleitungsstrategie sowie die regelmäßige Aktualisierung und Verbesserung des geologischen Modells des Projektes. Das Management der Dokumentation, in der wichtige Probleme aufgezeichnet und mögliche Risiken und Antworten für deren Bewältigung skizziert werden, ist eine gute Praxis und bietet eine solide Informationsgrundlage bei einer eventuellen Stilllegung.

Die Stilllegung eines CO₂ -Lagers kann auf der Erfahrung in der Öl- und Gasindustrie mit der Stilllegung leerer Felder beruhen. Die Anforderungen an diese Phase werden ebenfalls in einer Bestimmung festgelegt. Es ist angebracht, dass der Projektbetreiber die Verantwortung für die CO₂ -Wolke

für den Zeitraum ab Ende der Einleitung übernimmt. Die Dauer dieser Verantwortung hängt von Größe, Typ und Risikoprofil des Projektes auf der Grundlage bereits bekannter Informationen über das Verhalten von CO₂ im Untergrund ab. Am Ende der Einleitung ist es mithilfe eines gut kalibrierten Modells des Untergrundes und der CO₂-Wolke wahrscheinlich, dass solide Vorhersagen über die langfristige Position des CO₂ für viele Jahre gemacht werden können. Die Restrisiken, so zum Beispiel Fehler im Untergrundbereich des Behälters können quantifiziert und ein Modell erstellt werden. Insgesamt ist die Erwartung im Bereich Technik ein Behälter für die langfristige Nutzung, der als Modell dienen und veranschaulicht werden kann, ohne dass langfristige Aktionen und Eingriffe zu erwarten sind. Der Schutz der Öffentlichkeit und der Umwelt hat Priorität. Er kann durch die Anerkennung der Begrenzung der Verantwortung des Projektbetreibers auf einen für private und öffentliche Großprojekte üblicherweise angemessenen Zeitraum erreicht werden. Durch die Festlegung dieses Gleichgewichtes können viele Rahmen berücksichtigt werden, in denen die langfristige Verwaltungsprobleme berücksichtigt werden.

Während der Stilllegungsphase liegt der Schwerpunkt auf dem Behälter für langfristige Lagerung und der Isolierung der Einleitung mit natürlichen und konstruierten Systemen. Die mögliche Zerstörung von Materialien aufgrund langfristiger CO₂-Einwirkung wird berücksichtigt. Diese Einwirkung hat eine Auswirkung für die bei der Stilllegung eingesetzten Materialien. Die Leistung des Materials hat Auswirkungen auf den Behälter für langfristige Lagerung. Sie wird durch die Auswahl des Materials abgemildert.

In der Phase nach der Stilllegung ist keine weitere Aktion erforderlich, wenn der Standort die Leistung gemäß der vernünftigen Erwartungen an die Stabilität in früheren Phasen erbringt. Ist die Stabilität geringer als erwartet, dann sollte die Kontrolle und Sanierung gegebenenfalls so lange fortgesetzt werden, bis die Stabilität erreicht ist.

Quellen

Diese Arbeit ist das Produkt vieler persönlicher Beiträge von Vertretern der Beteiligten am CO₂-Auffang-Projekt. Dazu gehören BP, Chevron, ConocoPhillips, Eni, Petrobras, Shell, StatoilHydro und Suncor. Die Unterstützung durch das Management dieser Gesellschaften war wesentlich für den Erfolg der Arbeit und wir bedanken uns dafür. Die Schlüsselbeiträge für diese spezielle Arbeit zusätzlich zum namentlich genannten Verfasser dieser Arbeit kommen von (in alphabetischer Reihenfolge nach Gesellschaft): von BP- Charles Christopher, Walter Crow, Kevin Dodds, Brian Williams, Iain Wright; von Chevron--Craig Gardner, Scott Imbus; from ConocoPhillips – H. G. (Gary) Limb, Randy McKnight, Scott Rennie, von Eni – Mario Marchionna; von Petrobras- Rodolfo Dino; von Shell— Heath Nevels, Alessandra Simone, Charlie Williams, von StatoilHydro – Philp Ringrose und von Suncor-- Alan Young. Von Nigel Jenvey, früher Shell, kamen schon früher Beiträge. Technische Beschreibung und Unterstützung beim Manuskript Derek Smith.

Literaturangaben

1. J.P.Meyer, Summary of carbon dioxide enhanced oil recovery (CO₂EOR) injection well technology, American Petroleum Institute (2007) 54p.
2. A. Mathieson, I. Wright, D. Roberts & P. Ringrose. Satellite Imaging to Monitor CO₂ Movement at Krechba, Algeria. Paper (307) GHGT-9; (2008)
3. R.A. Chadwick, D. Noy, R. Arts, O. Eiken, Quantification issues from the latest time-lapse seismic data at the Sleipner CO₂ injection operation, GHGT-9, (2008)
4. Daniel J. Talley, Thomas L. Davis, Robert D. Benson, and Steven L. Roche, Dynamic reservoir characterization of Vacuum Field, *The Leading Edge*; v. 17; no. 10; (1998) p. 1396-1402;.

5. J.L. Brady, J.L Hare, J.F Ferguson, J.E., Seibert,, F.J. Klopping, T. Chen,, and T Niebauer, T., Results of the world's first 4D microgravity surveillance of a waterflood-Prudhoe Bay, Alaska: SPE Annual Technical Conference & Exhibition , San Antonio, September (2006), Expanded Abstracts, SPE 101762.