

Hvad betyder geologisk lagring af CO₂ egentlig?

Ansvarlig anvendelse
af fossile
brændstoffer

Fjernelse
af den vigtigste
drivhusgas

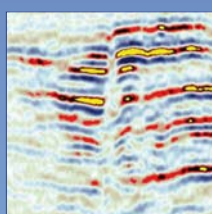
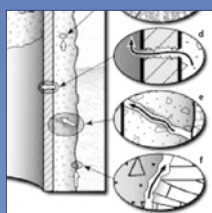
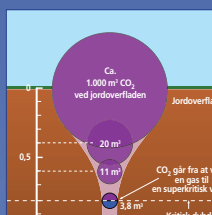
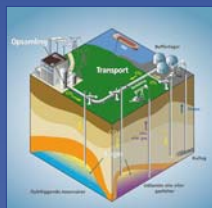
Kulstof føres
ned i jorden igen

Vi får den nødvendige
tid til udvikling af
klimavenlige energikilder



CO₂GeoNet European Network of Excellence

Indholdsfortegnelse



Klimaændringer og nødvendigheden af at lagre CO ₂ i undergrunden	4
---	---

1. Hvor og hvor meget CO ₂ kan lagres i undergrunden?	6
--	---

2. Hvordan kan vi transportere og pumpe store mængder CO ₂ ned i undergrunden?	8
---	---

3. Hvad sker der med CO ₂ , når det først er pumpet ned i et reservoir*?	10
---	----

4. Kan CO ₂ lække fra undergrunden, og hvad vil konsekvenserne i så fald være?	12
---	----

5. Hvordan kan vi overvåge CO ₂ lageret over og under jordoverfladen?	14
--	----

6. Hvilke sikkerhedskriterier skal indføres og opfyldes?	16
--	----

Ordliste	18
----------------	----

Hvad kan CO ₂ GeoNet gøre for dig?	19
---	----

* Ord markeret med en stjerne forklares i ordlisten bagerst i hæftet.

Dette hæfte er udarbejdet med hjælp fra følgende bidragydere:

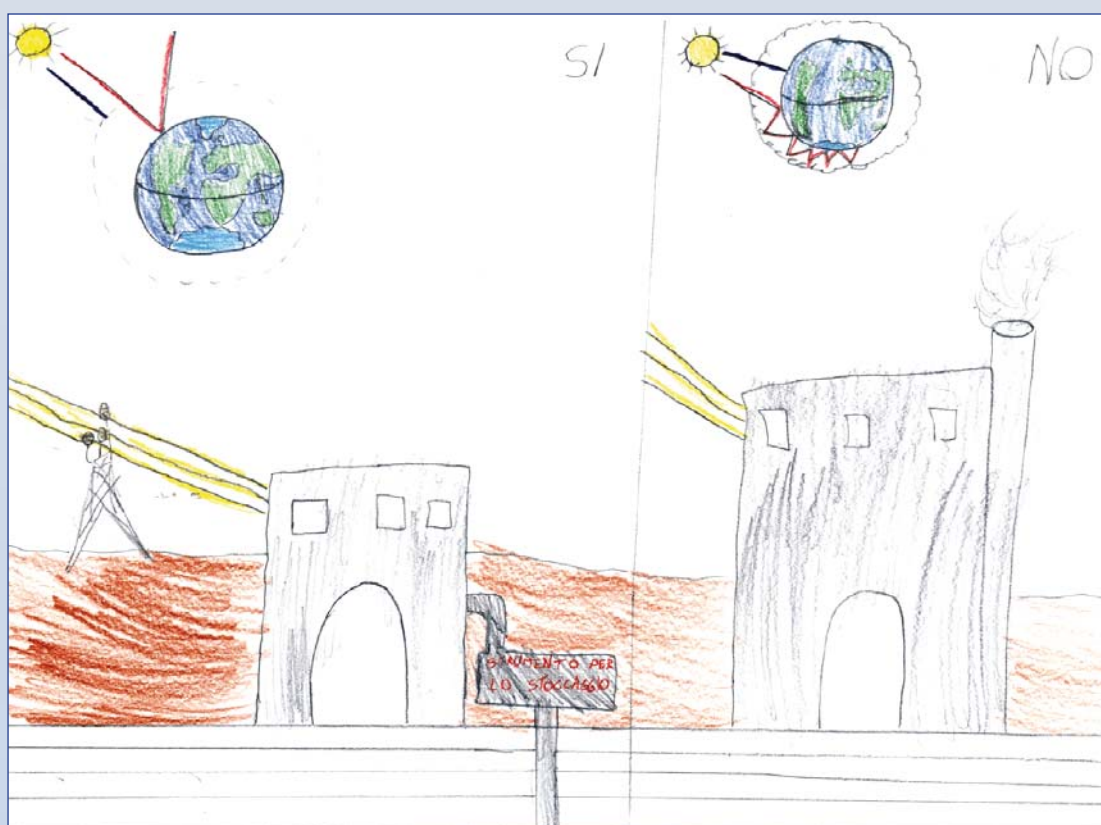
Rob Arts, Stanley Beaubien, Tjirk Benedictus, Ole Bennike, Jørgen Broen, Isabelle Czernichowski-Lauriol, Hubert Fabriol, Marie Gastine, Peter Gravesen, Ozgur Gundogan, Peter N. Johannessen, Gary Kirby, Salvatore Lombardi, Franz May, Jonathan Pearce, Sergio Persoglia, Gijs Remmelts, Nick Riley, Niels Schovsbo, Mehran Sohrabi, Rowena Stead, Samuela Vercelli, Olga Vizika-Kavvadias.

En vision for fremtiden

Ikke flere rygende skorstene

En rørledning transporterer CO₂ og fører den ned i jorden

Det er godt for Kloden



© Sapienza URS

Massimo (10 år), Rom, Italien

**Geologisk lagring af CO₂ giver god mening
for vores børn**

Klimaændringer og nødvendigheden af at lagre CO₂ i undergrunden

Figur 1
Den globale udledning af CO₂, som følge af menneskelige aktiviteter, er 30 milliarder tons (mia. tons) pr. år, svarende til 8,1 mia. tons kulstof. Heraf kommer 6,5 mia. tons fra afbrænding af fossile brændstoffer og 1,6 mia. tons fra afskovning og landbrug.

Vi mennesker udleder overskydende CO₂ til atmosfæren

Det er nu almindeligt anerkendt, at menneskelige aktiviteter forstyrrer kulstofkredsløbet på vores planet. Før den industrielle revolution og ca. 10.000 år tilbage i tiden, var CO₂-koncentrationen lav i atmosfæren (ca. 280 ppm, dvs 0,028 %), fordi der var en fint balanceret udveksling af kulstof mellem geosfæren, biosfæren, havet og atmosfæren. I løbet af de sidste 250 år har vores omfattende afbrænding af fossile brændstoffer

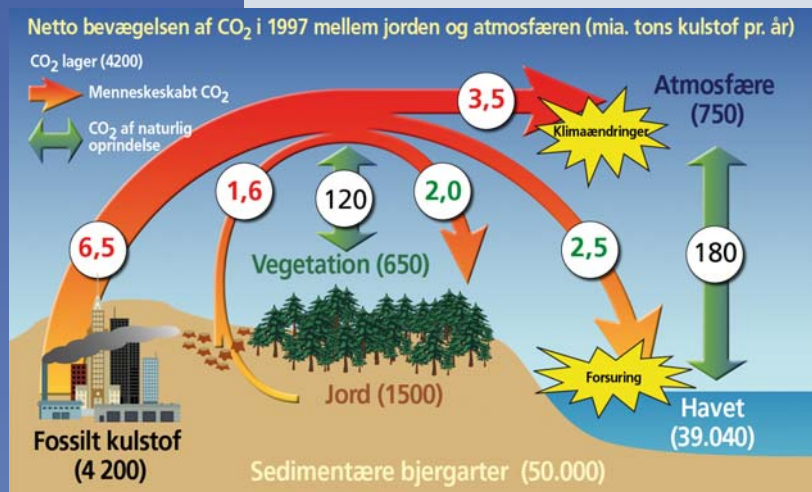
(kul, olie og gas) til elektricitet, opvarmning, industriel produktion og transport dag for dag øget mængden af CO₂, der udledes til atmosfæren (**fig. 1**). Omkring halvdelen af den menneskeskabte CO₂ bliver optaget af planter eller opløst i havet. I havet fører det til en forsuring, der kan medføre skader for plante- og dyrelivet. Resten akkumuleres i atmosfæren, hvor CO₂ bidrager til klimaforandringer, eftersom CO₂ er en drivhusgas, der fastholder en del af solens varme, så jordoverfladen opvarmes. Der er brug for omgående og drastiske foranstaltninger for at forhindre den nuværende koncentration af CO₂ i atmosfæren på 387 ppm i at stige over det kritiske niveau på 450 ppm i løbet af de kommende årtier. Koncentrationen er allerede steget 38% i forhold til niveauet før industrialiseringen. Eksperten verden over er enige i, at det ikke er muligt at undgå de mest alvorlige konsekvenser, hvis dette niveau overstiges.

Kulstof føres tilbage i jorden

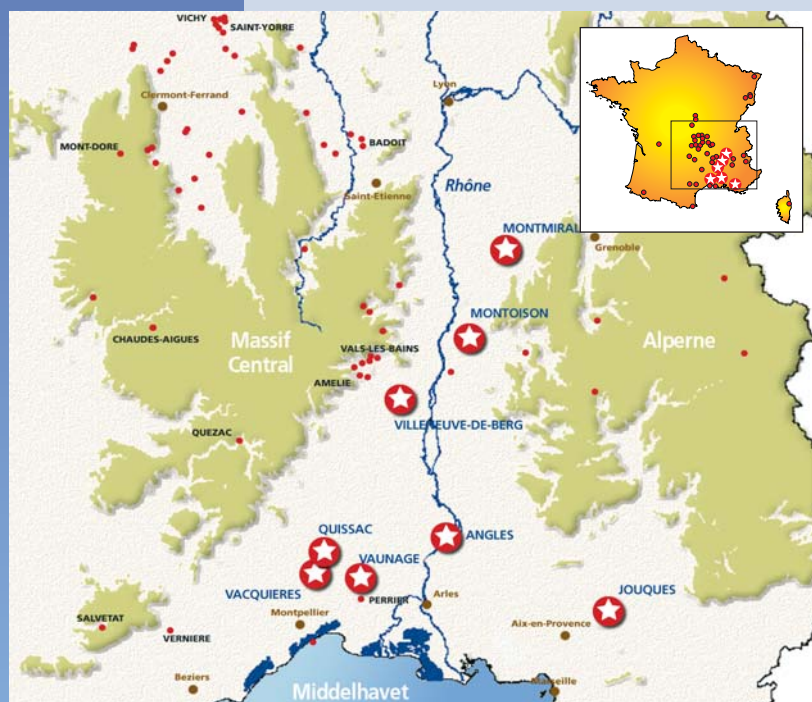
Vores samfund har været stærkt afhængig af fossile brændstoffer siden begyndelsen af den industrielle revolution i 1750'erne, så det er ikke overraskende, at omdannelsen til et samfund baseret på klimavenlige energikilder tager tid og koster penge. Vi har derfor brug for en kortsigtet løsning, der kan være med til at mindske vores afhængighed af fossile brændstoffer ved at anvende dem på en måde, så de ikke forurener. På den måde kan vi få den nødvendige tid til at udvikle teknologier og infrastrukturer til en fremtid med vedvarende energi. En mulighed er at skabe et lukket kredsløb i energi-produktionssystemet, så kulstof oprindeligt udvundet fra jorden i form af gas, olie og kul returneres i form af CO₂. Interessant nok er lagring af CO₂ i undergrunden ikke opfundet af os mennesker, men er et udbredt og helt naturligt fænomen i form af CO₂-reservoir, der har eksisteret i tusinder eller millioner af år. Et eksempel herpå fra det sydøstlige Frankrig er en række på otte naturlige CO₂-reservoir, der blev opdaget under olieefterforskning i 1960'erne (**fig. 2**). Disse og mange andre naturlige CO₂ lagre verden over beviser, at geologiske formationer (bjergarter) kan lagre CO₂ på en effektiv og sikker vis i ekstremt lange tidsperioder.

CO₂-opsamling og -lagring: en lovende vej til at nedbringe CO₂-udledning

I rækken af foranstaltninger, der omgående kan implementeres for at reducere klimaforandringerne og forsuringen af havet, spiller CO₂-opsamling og -lagring (CCS* (Carbon Capture Storage)) en afgørende rolle, fordi teknologien kan bidrage med 33% af den



Figur 2
Frankrigs CO₂ provins.



© BRGM im@gé

© BRGM im@gé

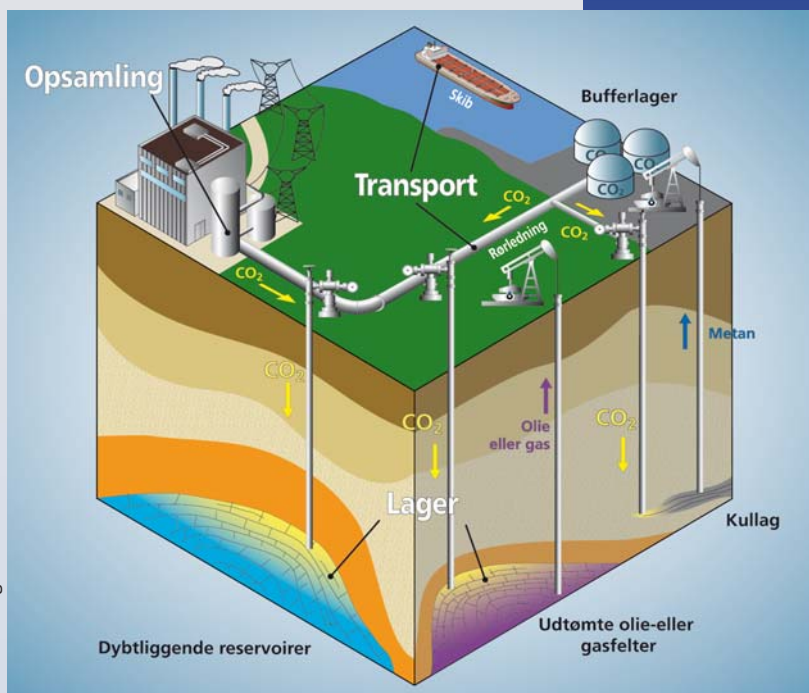
påkrævede reduktion af CO₂ inden år 2050. CCS går ud på at opsamle CO₂ på kul- eller gasfyrede kraftværker samt på industrianlæg (stål- og cementfabrikker, raffinaderier osv.) og at transportere den via rørledning eller med skib til et lagringssted, hvor den pumpes via en boring* ned i en egnet geologisk formation (bjergart) i undergrunden med henblik på langvarig lagring (**fig. 3**). Fortsat anvendelse af fossile brændstoffer er uundgåeligt på kort sigt set i lyset af den voksende verdensbefolkning, det stigende energibehov i udviklingslandene og den nuværende mangel på effektive, alternative 'rene' energikilder. Vi mennesker kan med CCS fortsætte ad en miljøvenlig vej, mens der samtidig bygges bro til en verdensøkonomi baseret på bæredygtig energiproduktion.

Blomstrende udvikling i CCS over hele verden

Omfattende forskningsprogrammer inden for CCS er gennemført i Europa, USA, Canada, Australien og Japan siden 1990'erne. Der er allerede høstet stor viden i verdens første demonstrationsprojekter, hvor man i stor målestok har pumpet CO₂ dybt ned i undergrunden i adskillige år. Det drejer sig om Sleipner-feltet i Norge (ca. 1 mio. tons pr. år siden 1996) (**fig. 4**), Weyburn i Canada (ca. 1,8 mio. tons pr. år siden 2000) og In Salah i Algeriet (ca. 1 mio. tons pr. år siden 2004). Det internationale samarbejde om forskning i CO₂-lagring på disse og andre steder er fremmet af IEA-GHG* og CSLF* og har været særdeles vigtig for at øge vores forståelse og udvikle et verdensomspændende videnskabeligt samfund, der fokuserer på dette spørgsmål. IPCC* (International Panel on Climate Change = FN's Klimapanel) har i 2005 offentliggjort en rapport om CO₂-opsamling og -lagring, som beskriver den eksisterende viden samt de hindringer, der skal fjernes for at bane vejen for at få udbredt anvendelse af teknologien. Rapporten er et fremragende eksempel på internationalt samarbejde. Solid teknisk ekspertise findes således allerede, og verden bevæger sig nu ind i demonstrationsfasen. Ud over den tekniske udvikling er man i gang med at fastlægge love og regler på området samt de økonomiske og politiske rammer samtidig med, at samfundets opfattelse og opbakning vurderes. I Europa er målet inden 2015 at have iværksat 12 projekter, som skal bane vejen for udbredt kommerciel anvendelse af CCS teknologien i 2020. I januar 2008 introducerede Europakommissionen en plan om klimainsats og vedvarende energi, der omfatter et forslag til et direktiv om geologisk lagring af CO₂ og andre foranstaltninger til fremme af udvikling og sikker anvendelse af CCS.

Vigtige spørgsmål om geologisk lagring af CO₂

CO₂GeoNet Network of Excellence blev etableret indenfor Europakommissionens regi som en gruppe af forskningsinstitutioner, der skulle sikre, at Europa

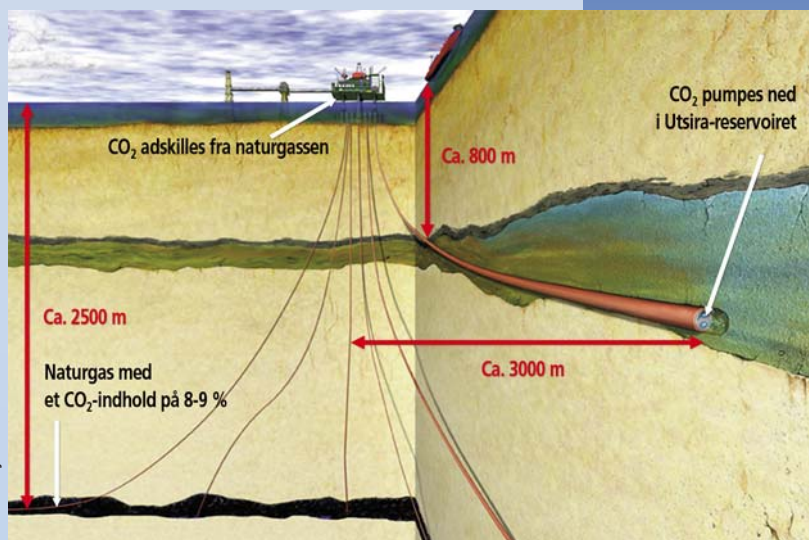


© BRGM im@gé

fastholdt sin position som en af de førende aktører i den omfattende internationale forskning. Et af CO₂GeoNets mål er at formidle klare, videnskabelige oplysninger om de tekniske aspekter ved geologisk lagring af CO₂. CO₂GeoNets forskere har udarbejdet generelle svar til en række ofte stillede spørgsmål for at tilskynde til en dialog om de afgørende aspekter ved denne helt nødvendige teknologi. De følgende sider forklarer, hvordan geologisk lagring af CO₂ kan gennemføres, under hvilke forhold det er muligt, og hvad kriterierne er for sikker og effektiv implementering.

Figur 4

Et lodret snit gennem Sleipner-feltet i Norge. Naturgassen, der udvindes på en dybde af 2500 m, indeholder flere procent CO₂, der skal fjernes for at opfylde de kommercielle standarder. I stedet for at blive udledt til atmosfæren pumpes den opsamlede CO₂ ned i det sandede Utsira-reservoir på en dybde af ca. 1000 m.

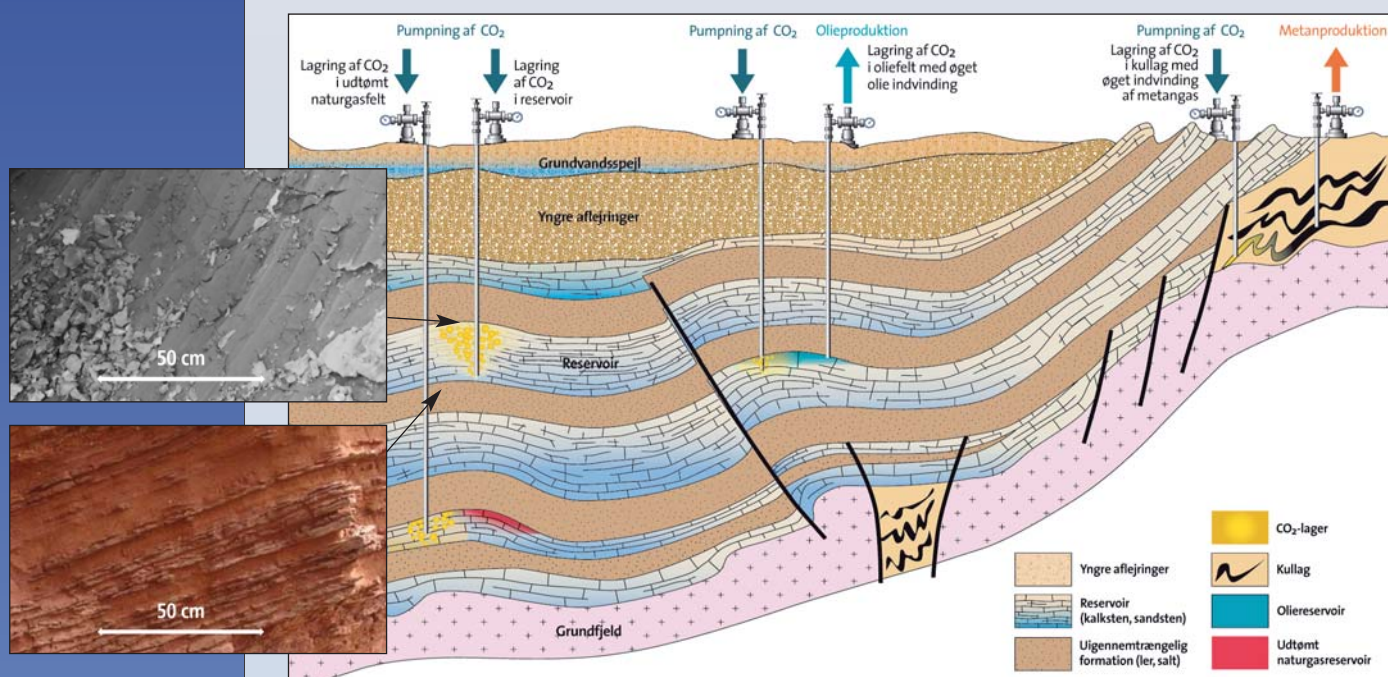


© StatoilHydro

Figur 3
På kraftværker opsamles CO₂ ved at adskille den fra andre luftarter. Dernæst komprimeres den og transporteres via en rørledning eller med skib til det geologiske lagringssted: dybtliggende reservoirer indeholdende saltvand*, udtømte olie- og gasfelter eller kullag som ikke kan brydes.

Hvor og hvor meget CO₂ kan lagres i undergrunden?

CO₂ kan ikke bare pumpes ned i undergrunden hvor som helst. Man må først finde et reservoir i egnede geologiske formationer (bjergarter). Der findes mulige reservoirer til geologisk lagring af CO₂ over hele verden med tilstrækkelig kapacitet til at yde et betydeligt bidrag til at mindske de menneskeskabte klimaændringer.



Figur 1
CO₂ pumpes ned i dybtliggende geologiske lag bestående af porøse og gennemtrængelige aflejringer (f.eks. sandsten som vises i det nederste indsatte foto), hvorover der ligger et uigennemtrængeligt lag (f.eks. lersten som vises i det øverste indsatte foto), der forhindrer CO₂ i at stige op til jordoverfladen. De primære lagringsmuligheder er:

1. Udtømte olie-/gasreservoirer med eventuel forøget udvinding af olie eller naturgas
2. Reservoirer med saltvand, der er uegnet som drikkevandsmagasin
3. Dybtliggende kullag, der lokalt kan anvendes til øget indvinding af metangas.

CO₂ kan primært lagres i tre typer reservoirer (**Fig. 1**):

1. Udtømte naturgasfelter og olieletter – som er velkendte på grund af tidligere efterforskning og udnyttelse af gas og olie – kan umiddelbart anvendes til lagring.
2. Saltvandsreservoirer har et stort lagringspotentiale, men er endnu ikke så kendte.
3. Kullag er en fremtidig mulighed, når problemet med at pumpe store mængder CO₂ ind i kul med lav gennemtrængelighed* er løst.

Reservoirerne

Når CO₂ pumpes ned i et egnet geologisk reservoir i undergrunden, samles den i porerne mellem bjergartens korn og i sprækker. CO₂ fortrænger og erstatter derved de tilstedeværende luftarter (gas), vand eller olie. Egnede geologiske formationer til geologisk lagring af CO₂ skal have høj porøsitet* og gennemtrængelighed. Sådanne geologiske formationer er aflejret som sedimenter i den geologiske fortid og findes normalt i såkaldte sedimentbassiner. I sådanne bassiner findes disse gennemtrængelige formationer side om side med ikke-gennemtrængelige lag, der kan fungere som tætte segl* (forseglinger). Sediment-

bassiner indeholder ofte olie- og gas-reservoirer og naturlige CO₂-reservoirer. Da disse forekomster af olie, gas og endda ren CO₂ har været i undergrunden i millioner af år, viser det, at undergrunden virkelig evner at holde på disse væsker og luftarter (gas) i lange perioder.

Undergrunden afbildes ofte som en stærkt forenklet, ensartet, lagkagelignende struktur i illustrationer, der viser mulige lagringssteder for CO₂. I virkeligheden består undergrunden af uligt fordelte og lokalt forkastede geologiske formationer (geologiske lag), reservoirer og segl, der danner komplekse, uensartede strukturer. Indgående viden om det enkelte sted og geovidenskabelig erfaring er nødvendig for at kunne vurdere egnetheden af de undergrundsstrukturer, der foreslås til langvarig lagring af CO₂.

Mulige reservoirer for CO₂-lagring skal opfylde en række kriterier, hvoraf de vigtigste er:

- tilstrækkelig porøsitet, gennemtrængelighed og lagringskapacitet;
- tilstedeværelse af overliggende uigennemtrængelige lag – det såkaldte segl (f.eks. ler, lersten, mergel eller salt), der forhindrer CO₂ i at bevæge sig opad til jordoverfladen;
- tilstedeværelse af 'fælder' som f.eks. et

kuppelformet segl, der styrer, hvordan CO₂ kan bevæge sig i lageret;

- en placering på mere end 800 meters dybde, hvor tryk og temperaturer er tilstrækkeligt høje til at lagre CO₂ i komprimeret væskeform, så der kan lagres store mængder;
- ingen tilstedeværelse af drikkevand – CO₂ skal ikke pumpes ned i vand, der er egnet som drikkevand eller på anden måde kan anvendes af mennesker.

Hvor i Europa findes der lagringssteder?

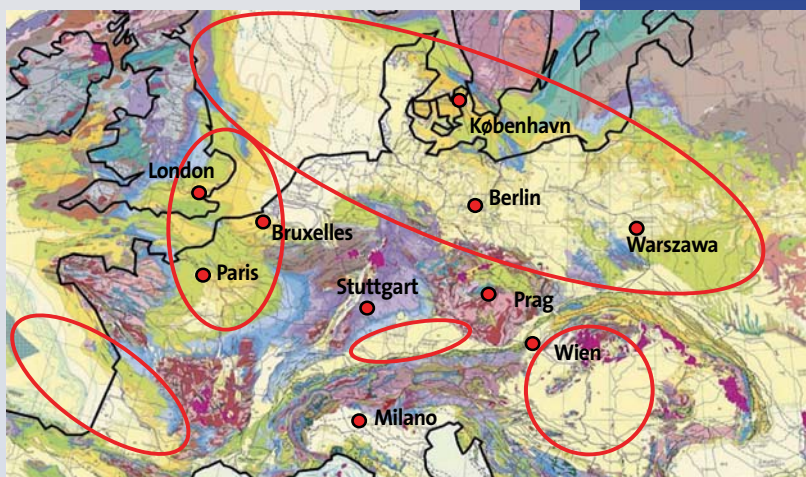
Sedimentbassiner er udbredte i Europa – f.eks. i Nordsøen eller på land omkring bjergkæderne (fig. 2). Mange formationer i sedimentbassinerne opfylder kriterierne for geologisk lagring og er i øjeblikket ved at blive kortlagt og beskrevet. Andre dele af Europa, som f.eks. store dele af Skandinavien består af gammel jordskorpe med bjergarter, der ikke er velegnede til lagring af CO₂.

F.eks. er det muligt at lagre CO₂ i det sydlige Permbassin, der strækker sig fra England til Polen (markeret ved den største ellipse på figur 2). Sedimenterne er påvirket af processer, der har efterladt porer fyldt med saltvand, olie eller naturgas. Lerlagene mellem den porøse sandsten er sammenpressede til lag med lav gennemtrængelighed, som forhindrer væsken i at bevæge sig opad. Mange sandstensformationer findes på dybder af 1-4 km, hvor trykket er tilstrækkeligt højt til at lagre CO₂ i komprimeret form. Saltindholdet i vandet i formationerne stiger i dette dybdeinterval fra ca. 100 g/l til 400 g/l, hvilket med andre ord vil sige, at vandet er langt mere salt end havvand (35 g/l). Bevægelser i bassinet har resulteret i plastisk deformation af saltlag, hvilket har skabt hundredvis af kuppelformede strukturer, der har fanget naturgassen. Det er disse strukturer, der undersøges som eventuelle lagringssteder for CO₂ og med henblik på pilotprojekter.

Lagringskapacitet

Politikere, myndigheder og lageroperatører har brug for viden om lagringskapaciteten for CO₂. Vurderinger af lagringskapacitet er normalt meget skønsmæssige og udarbejdet på grundlag af det rumlige omfang af mulige egnede formationer. Det er muligt at vurdere kapaciteten på forskellige skalaer, fra f.eks. en generel national målestok, der giver løse estimater, til en mere præcis vurdering for de enkelte bassiner og reservoirer, der giver bedre beregninger og tager højde for den faktiske geologiske strukturs uensartethed og kompleksitet.

Volumenkapacitet: Den generelle nationale lagringskapacitet er normalt baseret på beregninger af formationernes porevolumen. Teoretisk set er det muligt at beregne en given formations lagringskapacitet ved at gange dens areal med dens tykkelse, gennemsnitlige porøsitet og gennemsnitlige tæthed af CO₂ ved reservoirdybde. Imidlertid kan kun en lille del anvendes til lagring – normalt anslået til 1-3 % –



eftersom porerne allerede er fyldt med vand. Denne procentsats for lagringskapacitet anvendes dernæst til at vurdere volumenkapacitet.

Realistisk kapacitet: Det er muligt at udarbejde mere realistiske vurderinger af kapaciteten for et enkelt lagringssted ved hjælp af detaljerede undersøgelser. Reservoirtykkelsen er ikke konstant, og reservoirs egenskaber kan variere over meget korte afstande. Viden om strukturs størrelse, form og geologiske egenskaber gør det muligt at reducere usikkerheden i beregningerne af kapacitet. På grundlag af disse oplysninger kan man anvende computersimuleringer til at forudsige, hvorledes CO₂ vil bevæge sig, når den pumpes ned i reservoiret og til at vurdere den realistiske lagringskapacitet.

Bæredygtig kapacitet: Kapacitet er ikke kun et spørgsmål om geologi. Socioøkonomiske faktorer spiller ligeledes en rolle for, hvorvidt et egnet sted vil blive anvendt. For eksempel bestemmes flytningen af CO₂ fra kilden til lagringsstedet af transportomkostningerne. Kapaciteten afhænger også af renheden af CO₂, fordi tilstedeværelsen af andre luftarter reducerer den plads i reservoiret, der kan bruges til CO₂. Endelig vil politiske forhold og befolkningens accept være udslagsgivende for, om en eksisterende kapacitet rent faktisk vil blive udnyttet.

Vi ved faktisk, at der er betydelig kapacitet til lagring af CO₂ i Europa, selv om der er usikkerhed forbundet med reservoirernes kompleksitet og uensartethed samt om de socioøkonomiske faktorer. EU-projektet GESTCO* anslået lagringskapaciteten i kul- og gasfelter i og omkring Nordsøen til at være 37 mia. tons, hvilket vil gøre det muligt for store industrier i denne region at pumpe CO₂ ned i undergrunden i adskillige årtier. Opdatering og yderligere kortlægning af lagringskapaciteten i Europa er et spørgsmål om løbende forskning i de enkelte medlemslande og gennem EU Geocapacity*-projektet i Europa generelt.

Figur 2
Geologisk kort over Europa med lokaliserings af de vigtigste sedimentbassiner (røde ellipser), hvor der findes egnede reservoirer til lagring af CO₂ (baseret på det geologiske kort over Europa i forholdet 1:5.000.000).



Hvordan kan vi transportere og pumpe store mængder CO₂ ned i undergrunden?

Efter opsamling på kraftværker eller fabrikker komprimeres, transporteres og pumpes CO₂ ned i et underjordisk reservoir ved hjælp af en eller flere borer. Der er behov for at optimere hele processen for at skabe plads til mange millioner tons CO₂ hvert år.

Komprimering

CO₂ gassen komprimeres til væskeform, hvorved den fylder væsentligt mindre.

Når CO₂ er skilt fra røggassen på kraftværket eller fabrikken, affugtes og sammenpresses den stærkt koncentreret CO₂, så transport og lagring bliver mere effektiv (**fig. 1**). Affugtning er nødvendig for at undgå, at der dannes rust i udstyr, og at der dannes hydrater under det høje tryk (hydrater er krystaller, der ligner iskrystaller) som ellers kan tilstoppe udstyret.

Komprimeringen og affugtningen sker i en proces, der løber over flere trin: gentagen komprimering, nedkøling og udskillelse af vand. Både tryk, temperatur og vandindhold skal tilpasses transportformen og trykforholdene i lageret. Gennemstrømningshastighed, opsuignings- og udløbstryk, gassens varmekapacitet og kompressorens effektivitet er vigtige faktorer i forbindelse med planlægningen af kompressionsanlæg. Kompressionsteknologien findes allerede og bruges inden for mange områder i industrien.

Transport

CO₂ kan transporteres enten med skib eller gennem en rørledning.

Transport af CO₂ med skib bruges i dag kun, når der er tale om meget små mængder (10.000-15.000 m³) til industriel brug, men det kunne blive en attraktiv mulighed

i fremtiden for CCS-projekter*, hvis en kystnær CO₂ kilde ligger langt fra et egnet reservoir. Skibe, der bruges til transport af flydende gas (LPG (Liquefied petroleum gas)), er egnede til transport af CO₂. Især skibe med mulighed for nedkøling under tryk er egnede til transport af flydende CO₂. De mest moderne LPG-fartøjer kan laste op til 200.000 m³ og transportere 230.000 tons CO₂. Med transport ad søvejen får man imidlertid ikke en konstant tilførsel, og det er nødvendigt med faciliteter ved havnene til lagring og omladning.

I dag bruges rørledninger til transport af de store mængder CO₂, som olieselskaberne benytter i forbindelse med såkaldt øget olieindvinding* (EOR (Enhanced Oil Recovery)), og på verdensplan findes der ca. 3000 km rørledninger til transport af CO₂, de fleste i USA. Metoden er billigere end transport ad søvejen og muliggør en kontinuerlig tilførsel af CO₂ fra opsamlings- til lagringssted. Eksisterende CO₂-rørledninger er alle under højt tryk, hvor superkritisk* CO₂ opfører sig som en gas, men har tæthed som en væske. Hvor store mængder, der kan transporteres gennem en rørledning, afhænger af tre vigtige faktorer: rørledningens diameter, trykket i længderetningen og – følgelig – tykkelsen af rørledningens vægge.

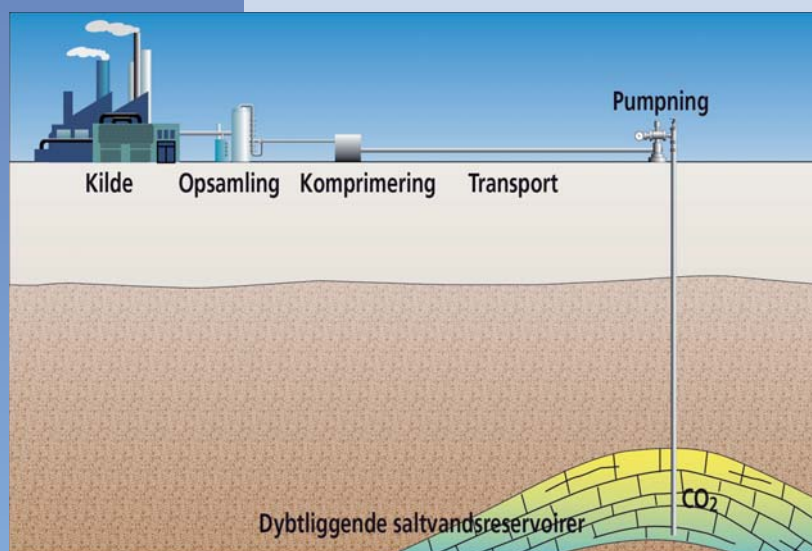
Nedpumpning

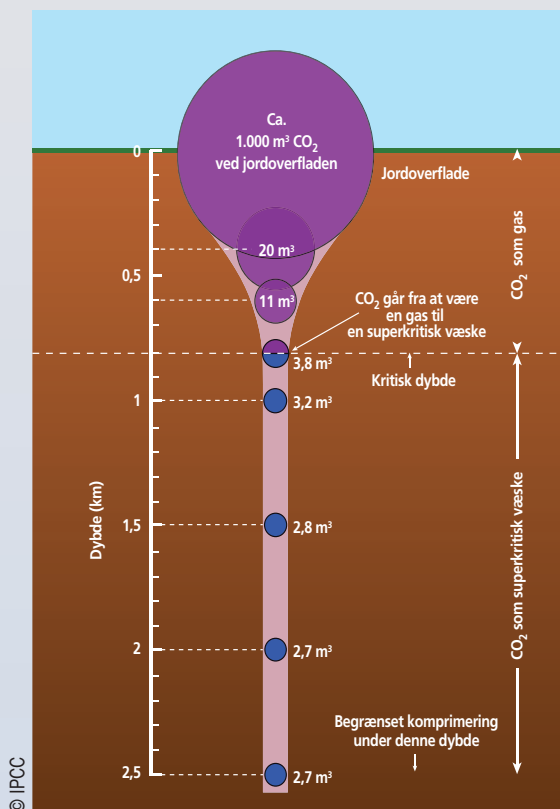
Når CO₂ ankommer til lageret, pumpes den under tryk ned i reservoiret (**fig. 2**).

Pumpestrykket skal være tilstrækkeligt højt i forhold til trykket i reservoiret for at presse væsken væk fra det sted, hvor den pumpes ind. Antallet af pumpeboringer afhænger af mængden af CO₂, der skal lagres, pumpehastigheden (mængden af CO₂, der pumpes ned pr. time), reservoirs gennemtrængelighed og tykkelse, det maksimale pumpestryk og hvilken type boring, der er tale om. Da hovedformålet er langtidsopbevaring af CO₂, er lagerets hydrauliske beskaffenhed af afgørende betydning. Høj pumpehastighed vil øge trykket, der hvor væsken pumpes ind – særligt på steder med lav gennemtrængelighed. Trykket bør normalt ikke være højere end trykket i områdets sprækker, da reservoiret eller det overliggende lag så kan blive beskadiget. Geomekaniske analyser og modeller bruges til at definere det maksimalt tilladte tryk, så man undgår at ødelægge lageret.

Kemiske processer kan påvirke den hastighed, som CO₂ kan pumpes ned i lageret med. Afhængig af hvilken type,

Figur 1
Stadier i geologisk lagring af CO₂. Sikker og langsigtet lagring af CO₂ kræver en hel række processer som f.eks. opsamling, komprimering, transport og nedpumpning.





Figur 2
Når CO₂ pumpes ned i undergrunden bliver den til en koncentreret superkritisk* væske i ca. 0,8 km's dybde. Rumfanget reduceres betragteligt fra 1.000 m³ ved jordoverfladen til 2,7 m³ i to kilometers dybde. Det er bl.a. det, der gør det attraktivt at lagre CO₂ i undergrunden.

der er tale om, sammensætningen af væsker og forholdene i reservoiret (som f.eks. temperatur, tryk, porerumfang og koncentration) kan der ske en opløsning og udfældelse af mineraler tæt ved boringen. Dette kan øge eller reducere den mængde CO₂, der kan pumpes ind pr. time. Så snart CO₂ pumpes ind, opløses en del i det saltholdige vand i reservoiret, og pH*-værdien falder en smule. Det modvirkes dog i nogen grad af kalk (CaCO₃) i reservoiret. Kalk er det første, der opløses, fordi det meget nemt reagerer med CO₂-holdigt vand, og processen begynder, så snart væsken pumpes ind. Processen kan øge reservoirets porøsitet og egnethed (injektivitet*). Når kalken er opløst, kan den imidlertid igen udfældes og sammenkittet sedimentkornene omkring boringen. Høj gennemstrømningshastighed kan medføre, at gennemtrængeligheden forøges omkring boringen, og derved bevirke, at området, hvor stofferne udfældes, rykkes længere væk fra boringen.

Udtørring er et andet fænomen, der kan skyldes nedpumpning af CO₂. Efter forsuringsprocessen opløses det vand, der stadig findes omkring injektionsboringen i den tørre gas, der pumpes ned, så koncentrationen af kemiske stoffer i saltvandet* øges. Mineraler (f.eks. salte) kan derefter udfældes, hvorved gennemtrængeligheden omkring boringen reduceres.

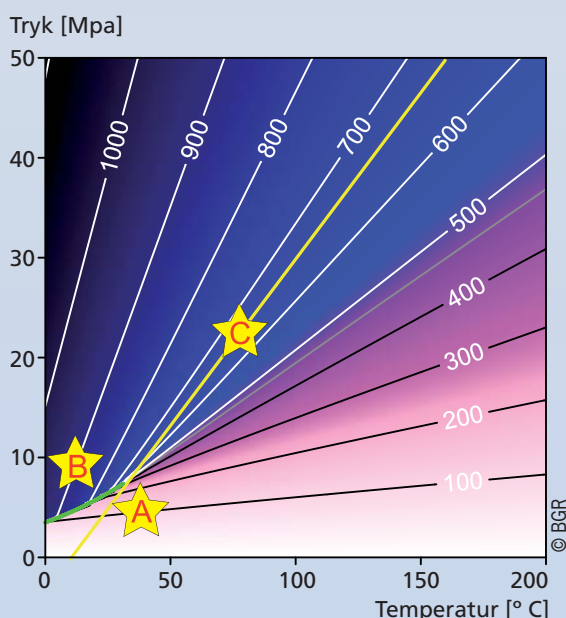
Problemerne i forbindelse med nedpumpning af CO₂ skyldes en række interaktive, komplekse processer i

nærheden af boringen, men de hænger også nøje sammen med tid og afstanden til boringen. Der anvendes numeriske simuleringer for at vurdere påvirkningerne. Den hastighed, som væsken pumpes ind med, bør nøje justeres for at modvirke de processer, der begrænser muligheden for at injicere CO₂.

Sammensætningen af CO₂

Sammensætningen og renheden af CO₂ afhænger af opsamlingsprocessen og har væsentlig indflydelse på alle de efterfølgende led i et CO₂-lagringsprojekt. Tilstedeværelsen af blot få procent vand, svovlbrente (H₂S), svovl- og nitrogenoxid (SO_x, NO_x), kvælstof (N₂) og ilt (O₂) vil påvirke de fysiske og kemiske egenskaber af CO₂ og dermed dens opførsel og påvirkning af omgivelserne. Tilstedeværelse af urenhederne bør derfor indgå i planlægningen af komprimerings-, transport- og injektionsfaserne samt ved justering af driftsforhold og -udstyr.

Det kan konkluderes, at transport og injektion af store mængder CO₂ allerede er mulig. Men hvis opbevaring af CO₂ i undergrunden skal blive mere udbredt, skal de enkelte faser skræddersys til det enkelte projekt. De vigtigste parametre er de fysiske og kemiske egenskaber af CO₂-strømmen (**fig. 3**) samt dens hastighed, opstrømsforhold og reservoirforhold.



Figur 3
Tætheden af ren CO₂ (kg/m³) i forhold til temperatur og tryk. Den gule linje angiver en typisk temperatur- og trykgradient i et sedimentbassin. Ved dybder på mere end 800 m (~8 MPa (Mega Pascal)) er forholdene i reservoiret med til at øge tætheden af CO₂ gassen (blå skygge). Den grønne kurve markerer CO₂'s overgang fra gas til væske fase. A, B og C angiver typiske tryk- og temperaturforhold ved henholdsvis opsamling, transport og lagring af CO₂.

Hvad sker der med CO₂, når det først er pumpet ned i et reservoir?

Når CO₂ pumpes ned i et underjordisk reservoir, vil det stige opad og udfylde porerummene under seglet. Med tiden vil noget af det oplagrede CO₂ blive opløst og senere blive omdannet til mineraler. Disse processer har forskellig tidsmæssig varighed og er et trin på vejen til en permanent opbevaring af CO₂.

Forseglingsprocesser

Når CO₂ pumpes ned i et reservoir, vil det udfylde porerummet i reservoiret, som i mange tilfælde allerede er fyldt med saltvand. Når CO₂ pumpes ind, vil følgende mekanismer aktiveres. Den første regnes som det vigtigste element, som forhindrer CO₂ i at trænge op til overfladen. De andre 3 elementer øger med tiden lagerets effektivitet og sikkerhed.

1. Akkumulering under seglet (strukturel forsegling)

Eftersom komprimeret CO₂ er lettere end vand, begynder det at stige opad. Opstigningen stopper, når CO₂ rammer et lag, der er uigennemtrængeligt, det såkaldte segl. Et segl består normalt enten af ler eller salt og fungerer som en forsegling, der forhindrer CO₂ i at stige højere op. CO₂ akkumuleres derfor lige under seglet. **Fig. 1** viser, hvordan CO₂ stiger opad gennem en bjergets porerum (vist med blå) til det når seglet.

2. Fastholdelse i små porer

Denne form for forsegling opstår, når porerummene i reservoirer er så små, at CO₂ ikke længere kan trænge opad, selv om det er lettere end det omgivende vand. Processen sker primært, når CO₂ bevæger sig, og vil typisk fastholde et par procent af den nedpumpede CO₂, afhængig af reservoirs geologiske egenskaber.

3. Opløsning

En lille del af det nedpumpede CO₂ bliver opløst i det saltvand, der allerede findes i reservoirs porerum. Som følge af opløsningen bliver det vand, der indeholder det opløste CO₂, tungere end vandet uden CO₂ og vil derfor sive ned til bunden af lageret. Opløsningshastigheden afhænger af kontakten mellem CO₂ og saltvand. Mængden af CO₂, der kan opløses, begrænses af, at vand kun kan optage en vis mængde CO₂. Men eftersom det nedpumpede CO₂ bevæger sig opad og vandet med opløst CO₂ nedad, er der en konstant udveksling af saltvand og CO₂, hvilket betyder, at mere CO₂ kan opløses. Processen går relativt langsomt, fordi den sker inde i de snævre porerum i bjergarten. Foreløbige beregninger i Sleipner-projektet viser, at ca. 15% af CO₂'en er opløst 10 år efter nedpumpningen.

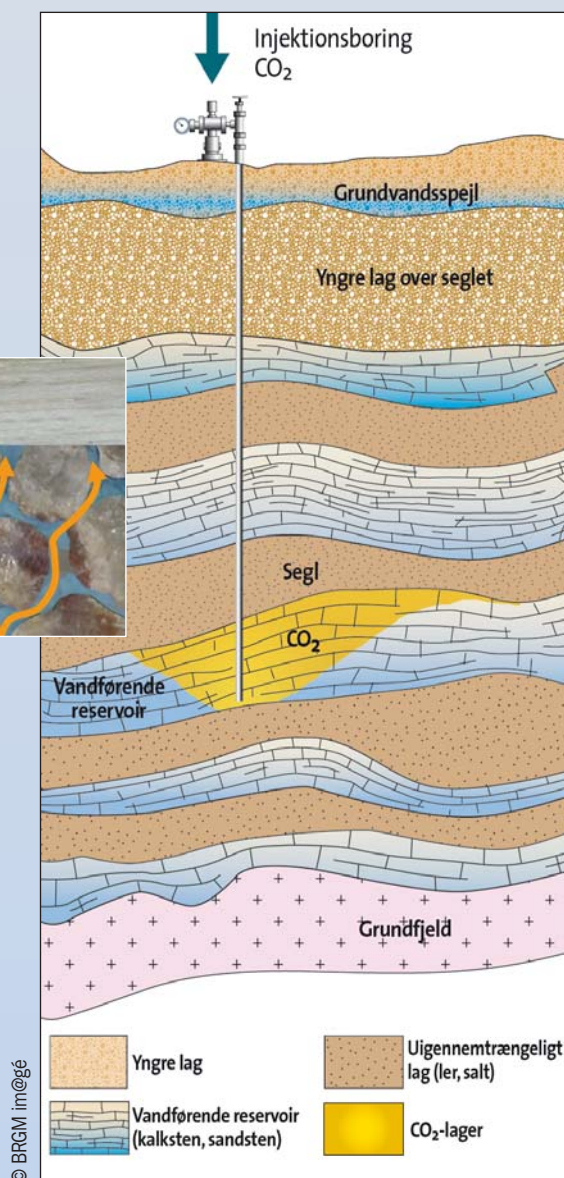
4. Mineralisering

Specielt i samspil med saltvandet i lageret kan CO₂ reagere med mineralerne i reservoiret. Nogle mineraler bliver opløst, mens andre udfældes. Det afhænger af pH-værdien og de mineraler, der findes i bjergarten (**fig. 2**). Beregninger fra Sleipner peger på, at kun en relativt lille del af det injicerede CO₂ vil blive mineraliseret, og at det tager meget lang tid. Efter 10.000 år vil kun 5% af det injicerede CO₂ være

Mikroskopisk skala



Figur 1
Den injicerede CO₂, der er lettere end vand, stiger opad og stoppes af det overliggende og uigennemtrængelige segl.





Figur 2
Komprimeret CO₂ stiger opad (lyseblå bobler), opløses og reagerer med sedimentkomene, hvilket fører til at kalk udfældes på kornene (hvidt).

mineraliseret, mens 95% vil være opløst. Der vil ikke være noget CO₂ i komprimeret form tilbage.

Hvor vigtige disse mekanismer er i forhold til hinanden, afhænger af det enkelte lager. I et kuppelformet reservoir vil CO₂ hovedsagelig forblive i komprimeret tilstand selv i meget lang tid, mens det meste CO₂ i et fladt reservoir som Sleipner vil blive opløst eller mineraliseret.

Figur 3 viser, hvordan fordelingen af CO₂ i de forskellige forseglingsmekanismer vil udvikle sig i Sleipner-feltet.

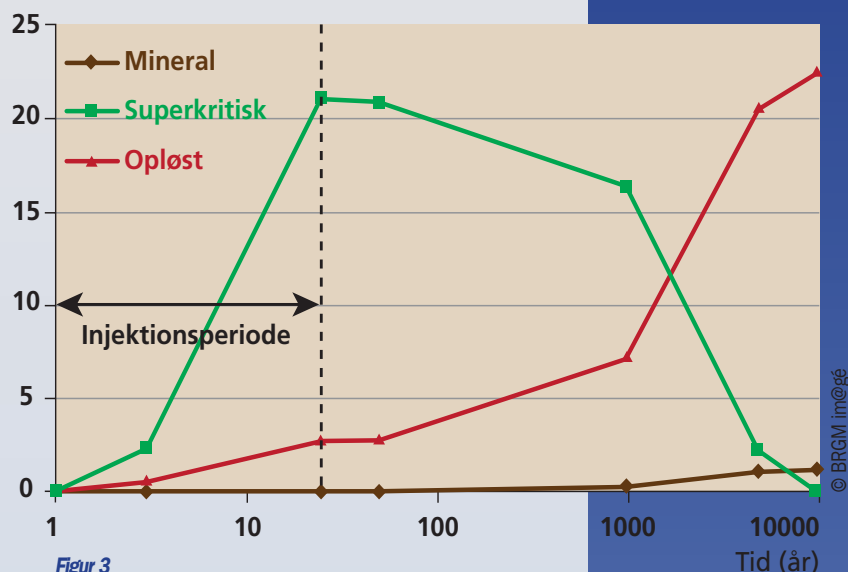
Hvor ved vi det fra?

Vores viden om disse processer stammer fra fire primære kilder:

- **Laboratoriemålinger** – Der kan udføres små-skala eksperimenter med mineralisering, bevægelse og opløsning på bjergarter, der giver en forståelse af processerne på kort sigt og i lille skala.
- **Numerisk simulering** – Der er udviklet computerprogrammer, som kan forudsige, hvordan CO₂ vil opføre sig over længere tid (**fig. 4**). Eksperimenter i laboratorier bruges som grundlag for numerisk simulering.
- **Studier af naturlige CO₂-lagre**, hvor CO₂ (normalt resultatet af vulkansk aktivitet) har været forsejlet under jorden i lang tid, ofte flere millioner år. Sådanne lagre kaldes også 'naturlige analogier*'. Vi kan fra dem få oplysninger om, hvordan gasarter opfører sig, og om langtidseffekten ved at lagre CO₂ i undergrunden.
- **Overvågning af igangværende demonstrationsprojekter om geologisk CO₂-lagring**, som f.eks. Sleipner (offshore Norge), Weyburn (Canada), In Salah (Algeriet) og K12-B (offshore Holland). Resultaterne af de kortvarige simuleringer kan sammenholdes med "rigtige" felt data, så modellerne kan finpudses.

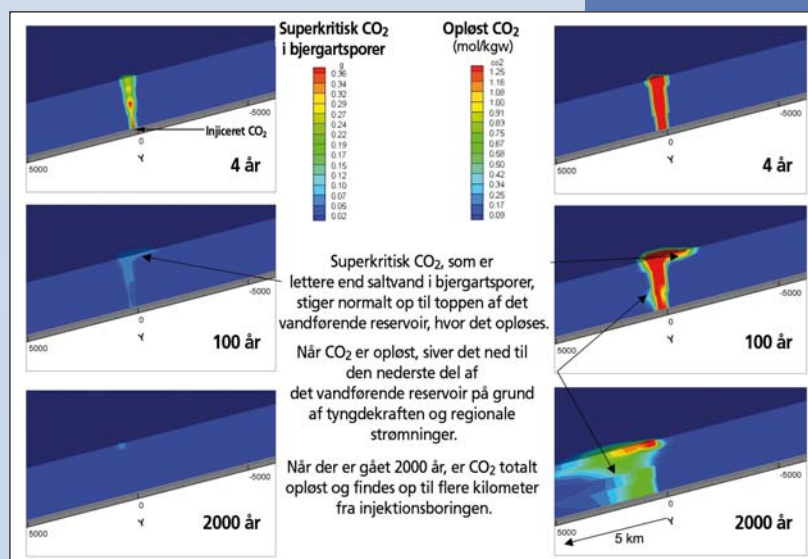
Vi kan kun få sikker viden om alle de processer, der pågår ca. 1000 m under vores fødder, ved hele tiden at krydsreferere og krydstjekke disse fire informationskilder. Afslutningsvis kan det siges, at vi ved, at et CO₂-lager

Tilbageholdt CO₂, millioner tons



Figur 3
Simuleret udvikling af CO₂ i Sleipner området. CO₂ kan tilbageholdes som en superkritisk væske ved proces 1 og 2 (se tekst), i opløst form ved proces 3 eller som kalk-mineraler ved proces 4.

normalt bliver mere sikkert med tiden. Det vigtigste er at finde et reservoir dækket af et egnet segl, som kan forsegle CO₂ (strukturel forsegling). Opløsnings-, mineraliserings- og fastholdelses-processer medvirker alt sammen til at forhindre, at CO₂ stiger op til jordoverfladen.



Figur 4
Tidimensional model, der viser, hvordan CO₂ har bevæget sig i et vandførende lag, når 150.000 tons er blevet injiceret i Dogger grundvandsreservoiret* i Frankrig over en periode på 4 år. Her vises superkritisk CO₂ (til venstre) og CO₂ opløst i saltvand (til højre) henholdsvis 4, 100 og 2000 år efter, at nedpumpningen begyndte. Simuleringerne er baseret på data fra undergrunden og fra forsøg.

Kan CO₂ lække fra reservoiret, og hvad kan konsekvenserne i så fald være?

På baggrund af undersøgelser af naturlige CO₂-lagre regner man ikke med, at nøje udvalgte reservoirer vil lække CO₂ i nævneværdig grad. Naturlige gasreservoirer giver os en forståelse af, hvordan gas forsegles eller lækkes. Gasholdige reservoirer, der lækker, kan samtidig give os en forståelse af, hvad et lækkende CO₂-holdigt reservoir kan betyde.

Lækagemuligheder

Lækager kan enten være menneskeskabte (f.eks. pga. utætte dybe borer) eller naturlige (f.eks. sprækker eller forkastninger).

Både aktive og lukkede borer kan lække, fordi de for det første udgør en direkte forbindelse mellem overfladen og reservoiret, og for det andet fordi de er fremstillet af menneskeskabte materialer, der nedbrydes over lang tid (**fig.1**). Et yderligere problem kan opstå, hvis der ikke er brugt samme metode til at udføre borerne. Nyere borer er generelt mere sikre end gamle. Risikoen for udsivning gennem borer er dog formentlig lille, og man kan overvåge både nye og gamle borer effektivt ved hjælp af følsomme geokemiske og geofysiske metoder. Endvidere findes der allerede i olieindustrien teknologier, der kan afhjælpe hvis problemerne opstår.

Udsivning fra naturlige forkastninger og sprækker, der eventuelt findes i seglet eller det overliggende dæklag*, er mere kompliceret, fordi det omfatter uregelmæssige, flade områder med forskellig gennemtrængelighed. En god videnskabelig og teknisk forståelse af både

lækkende og ikke-lækkende naturlige lagre kan være en hjælp til at udvikle projekter for CO₂-lagring, der har de samme karakteristika som naturligt forekommende reservoirer og som har fastholdt CO₂ og metangas i tusinder eller millioner af år.

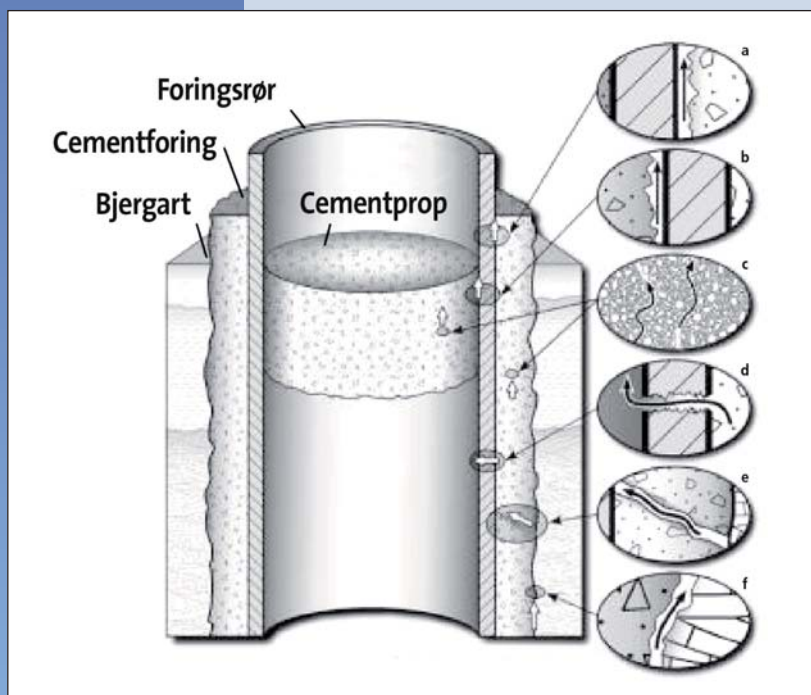
Hvad kan vi lære af naturlige analogier?

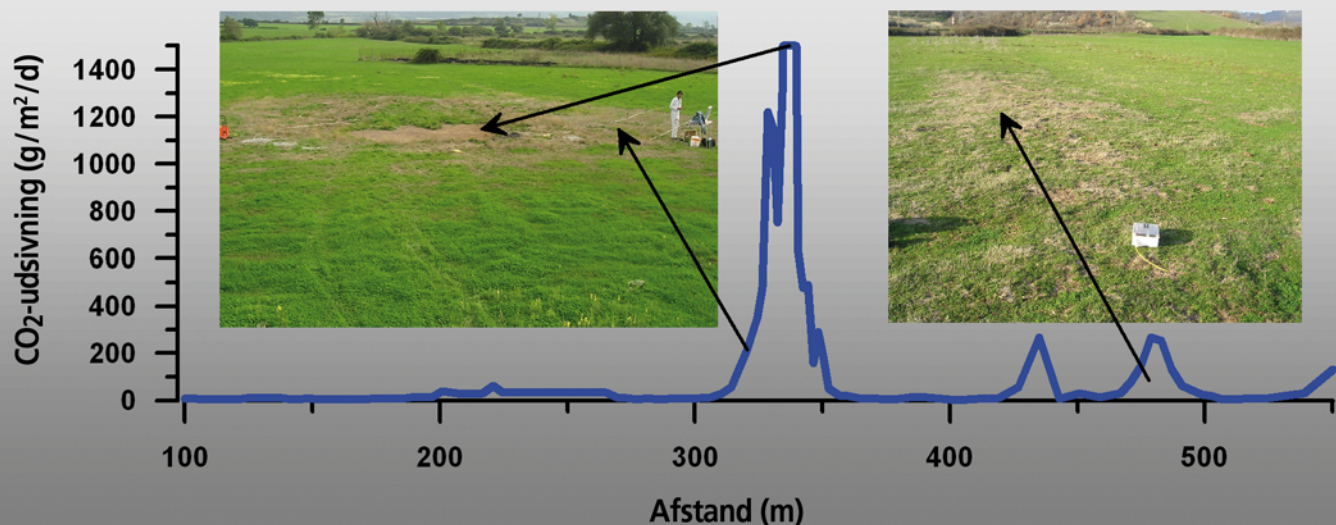
Naturlige systemer, som kan tjene som analogier, er uvurderlige, når vi skal forstå, hvordan gasarter bevæger sig dybt nede i jorden, og forstå den naturlige udveksling af gasser mellem jorden og atmosfæren. De vigtigste resultater fra undersøgelser af en lang række lækkende og ikke-lækkende naturgasreservoirer er:

- under gunstige geologiske forhold kan naturgas holdes fanget i millioner af år;
- isolerede gasreservoirer findes endog i de mest ufordelagtige geologiske områder (vulkanområder);
- hvis store mængder gas skal flytte sig, kan det kun ske ved advektionsprocesser (dvs. strømning styret af tryk), fordi spredning ved diffusionsprocesser går meget langsomt;
- hvis der skal opstå advektions transport, så skal trykket i reservoiret ligge tæt ved det litostatisk* tryk. Derved holdes forkastninger og sprækker åbne eller nye transportveje skal dannes ad mekanisk vej;
- områder, hvor naturligt dannede luftarter (gas) siver op til jordoverfladen, findes næsten udelukkende i områder med meget opsprækkede vulkanske bjergarter og urolige seismiske områder, hvor gassen samles langs aktive eller nyligt aktive forkastninger;
- det er sjældent, at store mængder gas lækker, og det sker stort set kun i gennem-forkastede vulkanske og geotermale områder, hvor CO₂ løbende dannes ved naturlige processer;
- unormale store forekomster af gas ved jordoverfladen er normalt begrænset til små lokale områder, der har en begrænset effekt på miljøet tæt ved jordoverfladen.

Med andre ord skal en række specielle betingelser være opfyldte, før en udsivning kan ske. Det er derfor meget usandsynligt, at et nøje udvalgt geologisk lager til CO₂ vil lække. Selv om risikoen for en lækage er lille, skal man forstå processer og mulige konsekvenser til bunds for at kunne vælge og udnytte de mest sikre geologiske lagre til CO₂.

Figur 1
Mulige CO₂ lækager i forbindelse med en boring: Udsivning gennem nedbrudt materiale (c, d, e) eller ved sammenføjninger (a, b, f).





Påvirkning af mennesker

Vi indånder hele tiden CO_2 . CO_2 er kun farligt for helbredet ved meget høje koncentrationer, f.eks. vil værdier i nærheden af 50.000 ppm (5 %) give hovedpine, svimmelhed og kvalme. Større mængder af CO_2 kan være dødelig, hvis man er udsat for dem i lang tid. Man kan dø på grund af iltmangel, når koncentrationen af ilt i luften bliver mindre end 16 %. Men hvis CO_2 lækker i et åbent, fladt område, bliver det hurtigt opblandet i luften, selv når det ikke blæser ret meget. Den sundhedsmæssige risiko for mennesker ligger derfor ved lækager i indelukkede områder eller ved lavninger i terrænet, hvor koncentrationen kan stige, da CO_2 er tungere end luft, og derved har en tendens til at samle sig ved jordoverfladen. Erfaringer fra områder, hvor der sker en naturlig afgasning, kan anvendes til at forebygge og styre risici. Faktisk bor mange mennesker i områder, hvor der daglig siver luftarter ud. I Ciampino tæt ved Rom i Italien ligger der f. eks. huse i kun 30 meters afstand fra en aktiv gas lækage, hvor CO_2 kommer fra vulkansk aktivitet. Her er koncentrationen af CO_2 i jorden steget til 90%, og ca. 7 tons CO_2 frigives dagligt til atmosfæren. Den lokale befolkning undgår farerne ved at følge simple forholdsregler som f.eks. ikke at sove i kældre og lufte godt ud i husene.

Påvirkning af miljøet

Påvirkning af miljøet afhænger af, om lageret ligger til havs eller på land.

I det marine økosystem vil udsivende CO_2 på havbunden primært betyde, at pH-værdien på stedet sænkes. Det har følgevirkninger for især bundlevende dyr, der ikke kan flytte sig. Men følgevirkningerne har dog begrænset udstrækning, og økosystemet vil hurtigt rette sig igen, når udsivningen ophører.

I økosystemer på land kan påvirkningen opsummeres i følgende hovedpunkter:

- **plantevækst** – Selv om CO_2 -koncentrationer i jordens porerum på op til 20-30% faktisk kan gavne planter og øge vækstraterne for visse arter, så kan værdier over denne grænse være giftige for nogle planter. Påvirkningen er dog lokaliseret til selve udsivningsstedet, og planterne er sunde og kraftige blot et par meter derfra (**fig. 2**).
- **grundvandskvaliteten** – Den kemiske sammensætning af grundvand kan ændres, hvis der tilføres CO_2 , fordi vandet bliver mere syreholdigt. Det sure vand kan opløse mineraler i det vandførende lag. Men selv om der lækkes CO_2 ind i et drikkevandsreservoir, vil virkningen være geografisk meget begrænset. Forskere er i gang med at undersøge, hvordan man kan gøre virkningen målbar. Mange grundvandsreservoirer i Europa er faktisk beriget med naturligt CO_2 , og vandet fra dem tappes på flasker og sælges som mineralvand med brus.
- **bjergartens styrke** – Når grundvandet bliver mere syreholdigt, kan det opløse noget af bjergarten, mindske dens styrke og jordfaldshuller kan dannes. Men denne type påvirkning ses kun ved meget specielle geologiske og hydrogeologiske forhold (aktive vulkanområder, vandførende lag med stor gennemstrømning, områder med kalksten) og er ikke særlig sandsynlig i de geologiske reservoirer, vi vil anvende til at lagre CO_2 i.

Afslutningsvis kan det siges, at eftersom virkningen af en hypotetisk CO_2 -lækage afhænger af beliggenheden, vil detaljeret viden om de underliggende geologiske og strukturelle betingelser gøre det muligt at udpege de mulige gasudslivningssteder. Det er også muligt at vælge steder med den mindste sandsynlighed for CO_2 -lækage, samt at forudsige, hvordan CO_2 vil opføre sig, og dermed vurdere og forhindre voldsomme påvirkninger af mennesker og af økosystemet.

Figur 2
 CO_2 -lækages påvirkning af planter ved stor (til venstre) og mindre udsivning (til højre). Påvirkningen er begrænset til det område, hvor CO_2 siver ud.

Hvordan kan vi overvåge CO₂-lageret under jorden og på jordoverfladen?

Alle CO₂-lagringssteder skal af driftsmæssige, sikkerhedsmæssige, miljømæssige, samfundsmæssige og økonomiske årsager overvåges. Der skal udarbejdes en strategi, der nøjagtig definerer, hvad der skal overvåges og hvordan.

Hvorfor skal lagrene overvåges?

Overvågning af CO₂-lagrene er af afgørende betydning for at sikre, at det primære mål med geologisk lagring af CO₂ nås, nemlig at isolere menneskeskabt CO₂ fra atmosfæren i en lang periode. Der er en lang række årsager til, hvorfor lagrene skal overvåges, bl.a.:

- **Driftsmæssige:** for at styre og optimere injektionsprocessen.
- **Sikkerheds- og miljømæssige:** for at mindske eller forebygge påvirkninger af mennesker, dyreliv og økosystemer i nærheden af et lager og for at afbøde globale klimaændringer.
- **Samfundsmæssige:** for at give offentligheden oplysninger om sikkerheden i CO₂ lagringen for derved at øge den samfundsmæssige accept af CCS-teknologien.
- **Økonomiske:** for at opbygge markedets tillid til CCS-teknologien og for at kunne bekræfte, at det oplagrede CO₂ stadig findes i lageret og kan medregnes som ikke udledt i de kommende faser af EU's Emissions-handelsordning, ETS (Emission trading scheme).

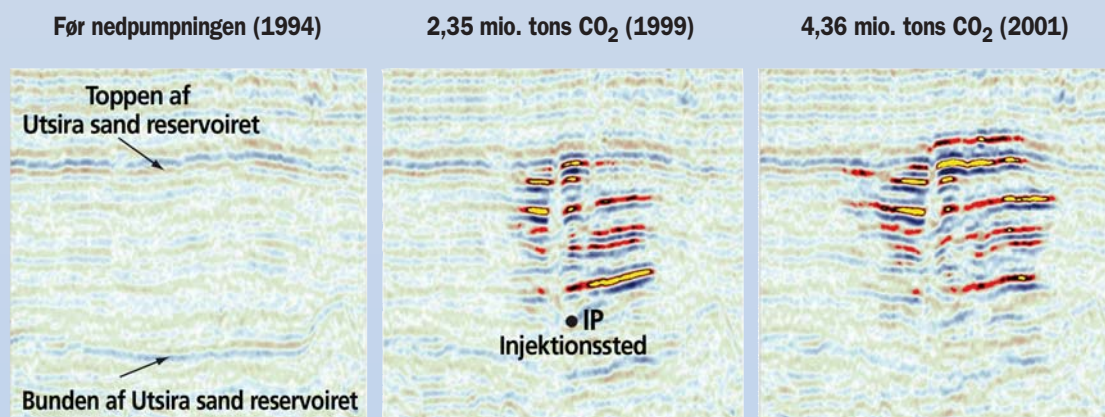
Overvågning af miljøets tilstand før CO₂ nedpumpning (kaldet "baseline" undersøgelser) og efterfølgende af lagerets ydeevne er et af de centrale krav i EU's forslag til direktiv om geologisk lagring af kuldioxid, der blev offentliggjort d. 23. januar 2008. Operatørselskabet skal kunne bevise, at lageret fungerer i overensstemmelse med reglerne, og at det vil blive ved med at gøre det i mange år. Overvågning er et vigtigt aspekt, der vil formindske usikkerheden forbundet med lagrenes opførsel, og den bør derfor udføres i nøje sammenhæng med sikkerhedsarbejdet.

Hvad er formålet med overvågningen?

Overvågning kan fokusere på forskellige mål og processer i forskellige dele af lagerområdet, f.eks.:

- Overvågning af den injicerede CO₂ – her følges CO₂, mens den bevæger sig væk fra injektionsstedet. På denne måde samler man vigtige data til at justere modeller, der kan forudsige den fremtidige spredning af CO₂ i området. Der findes mange afprøvede teknikker til at overvåge CO₂. Der anvendes især gentagne seismiske undersøgelser; en metode som med held er blevet brugt i forbindelse med demonstrations- og pilotprojekter (fig. 1).
- Seglets beskaffenhed skal vurderes. Dette er vigtigt for at sikre, at CO₂ forbliver i reservoiret og for at kunne advare tidligt, hvis CO₂ mod forventning skulle bevæge sig opad gennem seglet. Det er specielt vigtigt i injektionsfasen, hvor trykket i reservoiret øges kortvarigt.
- Boringens beskaffenhed. Dette er et vigtigt aspekt, fordi dybe borer potentielt udgør en direkte vej for CO₂ transport op til overfladen. Injektionsboringer, observationsboringer og udtjente borer skal nøje overvåges i injektionsfasen og senere for at forhindre, at CO₂ begynder at slippe ud. Overvågningen skal også sikre, at alle borer er effektivt forsegledede, når de ikke længere er i brug. Eksisterende geofysiske og geokemiske overvågningssystemer, som er standard inden for olie- og gasindustrien, kan installeres i eller over borehuller for at sikre tidlig varsling og øge sikkerheden.
- Lækage til de geologiske dæklag over seglet. I lagerområder, hvor overliggende lag har egenskaber, der ligner seglets, kan de overliggende lag være vigtige for

Figur 1
Seismiske profiler til overvågning af CO₂'s udtredelse i Sleipner-pilotprojektet for nedpumpningen (som begyndte i 1996) og efter injektionen (henholdsvis 3 og 5 år senere).



at nedbringe risikoen for, at CO₂ siver ud i havet eller atmosfæren. Hvis overvågningen i reservoiret eller ved seglet viser, at CO₂ siver gennem seglet, vil det også være nødvendigt at overvåge de overliggende dæklag. Mange af de teknikker, der bruges til overvågning, af reservoiret og seglet, kan også bruges til at overvåge de overliggende lag.

- Overfladelækage og atmosfærisk sporing og måling. For at sikre at nedpumpet CO₂ ikke stiger op til overfladen, kan der anvendes en række geokemiske og biokemiske teknikker samt fjernmålings teknikker (remote sensing) til at finde lækager, vurdere og overvåge CO₂-fordelingen i jorden og dens spredningen i atmosfæren eller havmiljøet (fig. 2).
- Oplagret mængde CO₂ til regulerings- og beskatningsformål. Selv om den nedpumpe mængde CO₂ nemt kan måles ved injektionsstedet, er det teknisk meget vanskeligt at måle, hvor meget CO₂ der findes i reservoiret. Hvis CO₂ lækker til lag nær overfladen, skal mængden af udsivende CO₂ kunne opgøres, så det kan regnes med i de nationale mængder af drivhusgasser og i de fremtidige kvoteordninger.
- Bevægelser i undergrunden og mikroseismisk* aktivitet. Det øgede tryk i lageret, der opstår ved nedpumpning af CO₂, kan i visse tilfælde øge muligheden for mikroseismisk aktivitet og små bevægelser i undergrunden. Der findes mikroseismisk overvågningsudstyr og udstyr, der kan anvendes til overvågning fra fly eller satellitter, som er i stand til at måle selv meget små forstyrrelser i undergrunden.

Hvordan udføres overvågning?

Der er allerede blevet afprøvet mange typer overvågningsudstyr i eksisterende demonstrations- og forskningsprojekter. Disse omfatter metoder, der direkte overvåger CO₂ mængden, og metoder, der måler påvirkningen af CO₂ på bjergarter, porevæsker og miljø. Direkte målinger omfatter analyser af porevæsker fra dybe borer eller analyser af CO₂-koncentrationer i jord og atmosfære. Indirekte metoder omfatter geofysiske

undersøgelser og overvågning af trykændringer i borer eller af pH-ændringer i grundvandet.

CO₂-lagre skal overvåges, uanset om de ligger under havoverfladen eller under landoverfladen. Den bedste overvågningsmetode vælges ud fra stedets tekniske og geologiske egenskaber og overvågningsens formål. Der findes allerede en lang række overvågningsmetoder (fig. 3), og mange af dem er gennemtestede i olie- og gasindustrien. Disse metoder er ved at blive tilpasset, så de kan bruges i CO₂ sammenhænge. Der forskes i at optimere eksisterende metoder eller udvikle nye teknikker med henblik på at forbedre data kvalitet, nedbringe omkostninger, automatisere driften og påvise effektiviteten.

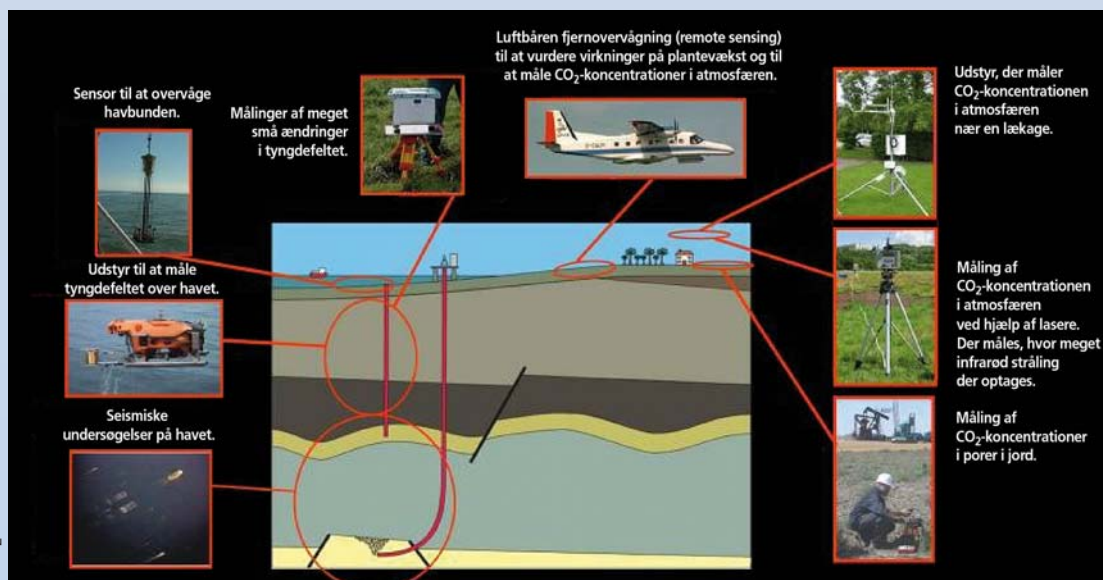
Strategi for overvågning

Når en overvågningsstrategi skal udfærdiges, skal der træffes en række beslutninger, som afhænger af geologiske og ingeniørmæssige forhold på det enkelte område, f.eks. form og dybde af reservoiret, forventet spredning af CO₂, mulige lækager, de overliggende lags geologi, injektionsperiode og injektionshastighed samt overfladetopografi, befolkningstæthed, infrastruktur og økosystemer. Når der er truffet beslutning om de bedste måleteknikker og målesteder, skal der udføres baselineundersøgelser (startundersøgelser) før nedpumpningen starter, så man har et sammenligningsgrundlag for alle fremtidige målinger. Endelig skal alle overvågningsprogrammer være fleksible, så de kan udvikles i takt med udviklingen i lagringsprojektet. En overvågningsstrategi, der omfatter alle disse aspekter og samtidig er omkostningsbevidst, vil udgøre en vigtig brik i risikoanalyse og efterprøvning af stedets sikkerhed og effektivitet. Afslutningsvis skal det nævnes, at overvågning af CO₂-lagre allerede er mulig med de mange metoder, der findes på markedet eller som er under udvikling. Der forskes ikke kun i at udvikle nye værktøjer (især til brug på havbunden), men også i at forbedre overvågningen og nedbringe omkostninger.



© CO₂GeoNet

Figur 2
Overvågningsbøje med solpaneler, der leverer energi, flydere og udstyr, som tager gasprøver ved havbunden.



Figur 3
Et lille udvalg af de metoder, der kan bruges til at overvåge forskellige dele af et CO₂-lager.

Hvilke sikkerhedskriterier skal indføres og opfyldes?

For at gøre lagrene sikre og effektive skal myndighederne indføre regler for konstruktion og drift af lagre, og operatørerne skal overholde disse regler.

Selv om geologisk lagring af CO₂ i dag er bredt accepteret som en realistisk mulighed i bestræbelserne på at afbøde klimaændringer, skal der fastlægges sikkerhedskriterier for menneskers helbred og for det lokale miljø, inden der kan anlægges industrimæssige anlæg i stort omfang. Disse kriterier kan defineres som de krav, myndighederne kan stille til operatørerne for at sikre, at der kun sker ubetydelige påvirkninger af sundhedsmæssige, sikkerhedsmæssige og miljømæssige (herunder grundvandsressourcer) forhold på kort, mellemlang og lang sigt.

Et afgørende aspekt ved geologisk lagring af CO₂ er, at lageret skal være permanent, og derfor må lagringssteder ikke lække. Men 'hvad nu hvis' scenariet betyder, at risikoen skal vurderes og operatørerne skal overholde foranstaltninger, der forhindrer lækage eller unormale hændelser på stedet. I følge IPCC skal nedpumpet CO₂ forblive i lageret i mindst 1000 år. I løbet af dette tidsrum vil koncentrationen af CO₂ i atmosfæren været blevet stabiliseret eller reduceret gennem naturlig udveksling med havandet. Det vil minimere effekten af en evt. udsivning af CO₂ på stigningen i overfladetemperaturen som følge af drivhus gas effekten til den tid. Men lokale påvirkninger skal vurderes over en tidsskala, der går fra dage til mange tusinde år.

Der er flere vigtige trin i et CO₂-lagers levetid (**fig. 1**). Sikkerhedsforanstaltninger vil igennem hele forløbet omfatte:

- omhyggeligt valg og beskrivelse af lagringsstedet;
- sikkerhedsvurdering;
- korrekt drift;

der, der ikke blev fjernet under opsamlingsprocessen. Dette er vigtigt for at undgå et negativt samspil mellem boringen, reservoiret, seglet og – i tilfælde af lækage – det overliggende grundvand.

Sikkerhedskriterier for driftsforløbet

Der skal føres bevis for sikkerheden, før driften igangsættes.

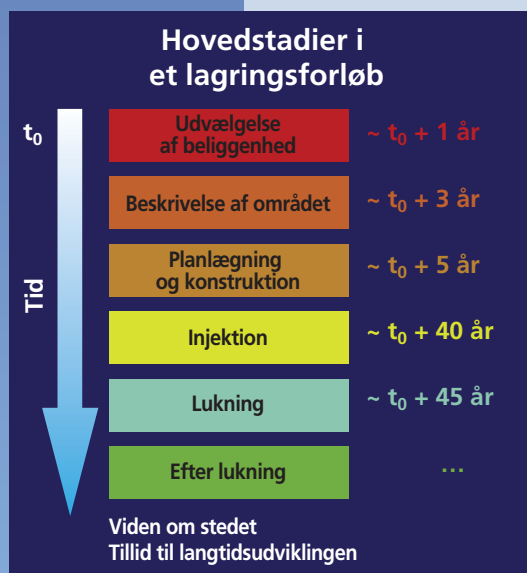
Med hensyn til udvælgelse af lagringsstedet skal følgende hovedkomponenter undersøges:

- lageret og seglet;
- de overliggende dæklag og specielt de uigennemtrængelige lag, der kan fungere som sekundær forsegling;
- tilstedeværelsen af forkastninger eller boringer, der kan forårsage lækageveje til jordoverfladen;
- drikkevandsreservoirer;
- menneskelig og miljømæssige forhold på jordoverfladen.

Olje- og gas eftersøgningsmetoder anvendes til at vurdere geologi og geometri på lagerstedet. Viden om væskers bevægelsesmønstre sammenholdt med kemisk og geokemisk modellering af det oplagrede CO₂ gør det muligt at forudsige langtidseffekten. Man kan også forudsige, hvordan det lagrede CO₂ vil opføre sig, og definere, hvad der skal til for at opnå en effektiv injektion. På denne baggrund vil en detaljeret forståelse af lagersteder gøre det muligt at definere et 'normalt' lager, dvs. et sted, der egner sig til lagring, og hvor vi er sikre på, at det oplagrede CO₂ bliver i reservoiret.

Risikovurderingen kan derefter klarlægge mindre sandsynlige scenarier for lagerets udvikling i fremtiden, herunder forekomster af uventede hændelser. Det er især vigtigt at kortlægge mulige potentielle lækageveje, og risikoen for, at mennesker bliver udsat for CO₂ og de følgevirkninger, det medfører (**fig. 2**). Hvert enkelt lækagescenario skal analyseres af eksperter, og numerisk modellering skal anvendes, hvor det er muligt, for at vurdere sandsynligheden for, at hændelsen opstår og hvor alvorligt det kan blive. CO₂'ens udbredelse i lageret skal f.eks. kortlægges omhyggeligt for at finde eventuelle forbindelser med eventuelle forkastningszoner. Risikovurderinger skal også tage højde for mindre plausible scenarier i de lokale forhold samt de usikkerheder, der er hermed. En vurdering af den potentielle påvirkning af CO₂ på mennesker og miljø skal gennemføres ved hjælp af VVM-redegørelser (VVM = Vurdering af Virkning på Miljøet), hvilket er den normale praksis, når der skal udstedes tilladelser til en industrivirksomhed. I en VVM-analyse vurderes lageret i

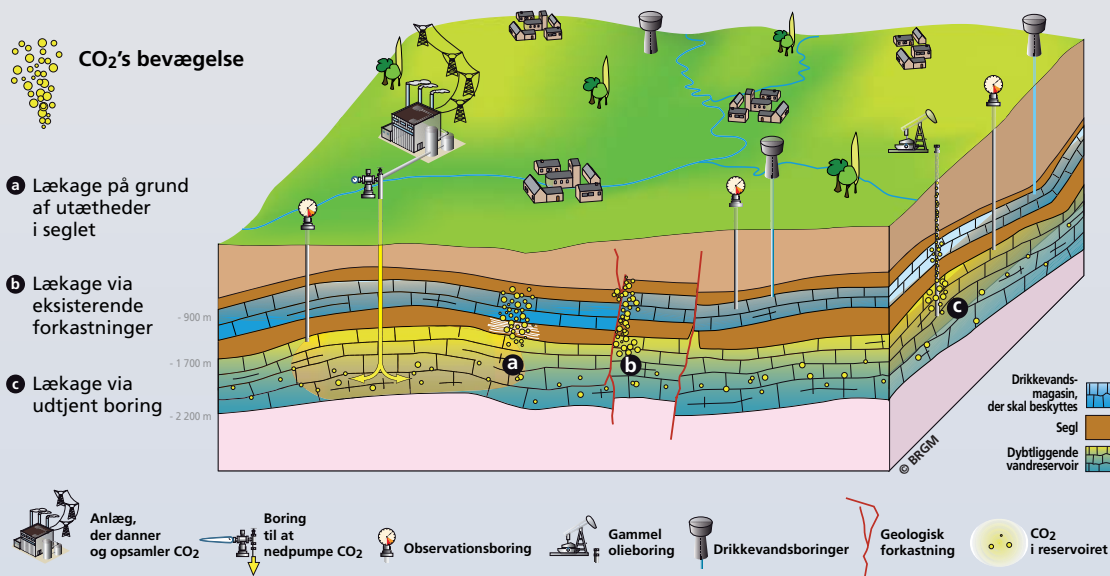
Figur 1
De forskellige stadier i et lagringsforløb.



- en passende overvågningsplan;
- en passende afværgeplan.

Hovedformålene med foranstaltningerne er at:

- sikre, at det lagrede CO₂ forbliver i reservoiret;
- vedligeholde boringer;
- opretholde reservoirets fysiske egenskaber (herunder porøsitet, gennemtrængelighed og egnethed til injektion) samt seglets uigennemtrængelighed;
- vurdere CO₂-strømmens sammensætning med speciel vægt på urenheder,



Figur 2
Eksempler på mulige lækager.

både normal og lækende scenarier, så man kan vurdere alle risici i forbindelse med lagringen.

Overvågningsprogrammet – på både kort og langt sigt – bør opstilles på baggrund af risikovurderingen og omfatte de kritiske aspekter, der er defineret i hvert scenario. Hovedformålet er at holde øje med spredningen af CO₂, kontrollere tilstanden af borer og seglet, spore eventuelle CO₂-lækager, vurdere grundvandskvaliteten og sikre, at CO₂ ikke lækker til overfladen. En plan for, hvordan man afværger og nedbringer mængden af CO₂, er den sidste del af sikkerhedsvurderingen. Den skal beskrive den afhjælpning, der skal iværksættes, hvis der opstår en lækage eller en unormal hændelse. Den skal også beskrive, hvordan seglets tilstand overvåges, og hvad der skal gøres, hvis der sker fejl på borer under og efter injektionen, og hvordan man løser problemet med store udsivninger. Eksisterende og velprøvede metoder omfatter de standardløsninger, som olie- og gasindustrien bruger, som f.eks. reparation af boring, faldende pumpetryk, helt eller delvis oppumpning af luftarten, oppumpning af vand for at sænke trykket, fjernelse af gasansamlinger i overliggende lag, osv.

Sikkerhedskriterier under driftsfasen og efter nedlukning af anlægget

De primære sikkerhedsforhold er forbundet med driften. Når injektionen er færdig, vil trykstigningen som følge af injektionen aftage igen og dermed gøre stedet mere sikkert.

Tilliden til, at det er sikkert at injicere og lagre CO₂, bygger på industrivirksomhedernes erfaring. CO₂ er et forholdsvis almindeligt produkt, der bruges i mange industrisektorer, så der er ingen nye problemer forbundet med at håndtere stoffet. Konstruktion og styring af driften skal hovedsageligt baseres på viden fra olie- og gasindustrien, specielt naturgaslagring og øget olieindvinding (også kaldet EOR (Enhanced Oil Recovery)). Hovedpunkterne der skal styres under driftsfasen er:

- injektionstryk og gennemstrømningshastighed. Trykket skal holdes så lavt, at der ikke opstår sprækker i seglet;

- den injicerede mængde. Det skal undgås at overskride den mængde, der er defineret i modellen;
- den kemisk sammensætning af den injicerede CO₂;
- opretholdelse af pumpeboringer og andre borer tilstand, hvor disse findes inden for eller i umiddelbar nærhed af CO₂-lageret;
- udbredelse af CO₂-en og sporing af eventuelle lækager;
- jordens stabilitet.

Under injektionen skal spredningen af den injicerede CO₂ løbende sammenholdes med de forudsigelser, der er redegjort for, så vores viden om lagerets udvikling løbende opdateres. Hvis der opdages unormale hændelser, skal overvågningsprogrammet ajourføres og forbedringer iværksættes, hvis det er nødvendigt. Hvis der er mistanke om en lækage, skal passende overvågningsudstyr anvendes på det område af lageret, der går fra reservoir til op til overfladen. Derved kan man spore opstigende CO₂ og også negative påvirkninger, der kan skade drikkevandsreservoir, miljøet og i sidste ende mennesker. Når injektionen er overstået, begynder nedlukningsfasen: borerne skal lukkes korrekt, og modellerne og overvågningsprogrammet skal ajourføres og om nødvendigt skal der foretages korrektioner for at nedbringe risici. Når man regner med, at risikoen er tilstrækkelig lav, kan ansvaret for lageret overgå til de nationale myndigheder, og overvågningen kan ophøre eller fortsætte på lavt niveau.

Det foreslåede EU direktiv fastlægger en lovmæssig ramme, der skal sikre, at opsamling og lagring af CO₂ bliver en mulighed for at mindske klimaændringer på en sikker og ansvarlig måde.

Afslutningsvis skal det nævnes, at sikkerhedskriterier er vigtige, hvis lagring af CO₂ skal blive en succes. Kriterierne skal tilpasses til de individuelle lagre. Kriterierne er specielt vigtige, hvis offentligheden skal acceptere lagringen, og de er af afgørende betydning for udstedelse af tilladelser, idet myndighederne skal fastlægge, hvor detaljerede sikkerhedskravene skal være.

Ordliste

Analogi: "naturlig analogi", naturligt forekommende CO₂-reservoir. Der findes både lækkende og ikke-lækkende reservoirer, og ved at undersøge dem kan vi få ny viden om, hvad der på lang sigt sker med CO₂ i dybtliggende geologiske systemer.

Boring (eller borehul): et hul, der er dannet som følge af boring, specielt et dybt hul med en lille diameter, som f.eks. en olieboring.

Dæklag: de geologiske lag mellem reservoirs segl og jordoverfladen (eller havbunden).

CCS: (Carbon Capture and Storage) CO₂-opsamling og -lagring.

CSLF: Carbon Sequestration Leadership Forum. Et internationalt forum til bekæmpelse af klimaforandringer med fokus på udvikling af innovative, billige teknologier til udskillelse og opsamling af CO₂, transport og langsigtet sikker opbevaring.

EU Geocapacity: et igangværende europæisk forskningsprojekt, der skal vurdere den samlede europæiske geologiske lagringskapacitet for menneskeskabt CO₂-udledning.

Gennemtrængelighed: en porøs bjergarts gennemstrømmelighed; et udtryk for hvor let en væske kan strømme gennem bjergarten under en given trykforskel. Kaldes også permeabilitet.

GESTCO: et afsluttet europæisk forskningsprojekt, der har vurderet de geologiske lagringsmuligheder for CO₂ i otte lande (Norge, Danmark, England, Belgien, Holland, Tyskland, Frankrig og Grækenland).

Grundvandsreservoir: gennemtrængelig (permeabel) jord eller bjergart, der indeholder vand. De grundvandsreservoirer, der findes tæt på jordoverfladen, indeholder vand, der bruges som drikkevand. De dybereliggende lag er fyldt med saltholdigt vand, der er uegnet som drikkevand. Disse kaldes også saltvandsreservoirer eller saline akviferer.

IEA-GHG: International Energy Agency – Greenhouse Gas R&D. Et internationalt samarbejde, der har til formål at vurdere teknikker til at reducere udledningen af drivhusgasser, udbrede resultatet af disse vurderinger og fastsætte mål for forskning, udvikling og demonstration samt støtte det nødvendige arbejde i den forbindelse.

Injektivitet: et udtryk for, hvor let det er at pumpe en væske (som CO₂) ned i undergrunden. Defineres som injektionshastigheden divideret med trykforskellen mellem

det sted, hvor væsken pumpes ned ved boringens bund, og undergrunden.

IPCC (International Panel on Climate Change): FN's Klimapanel. Organisation stiftet i 1988 af WMO (Verdens Meteorologi Organisation under FN) og UNEP (FN's Miljøprogram) for at vurdere hvilke videnskabelige, teknologiske og samfundsøkonomiske oplysninger, der er relevante for at forstå klimaforandringer, den mulige effekt samt muligheder for tilpasning og reduktion. IPCC og Al Gore delte Nobels fredspris i 2007.

Litostatisk tryk: det tryk, der under jordoverfladen udøves på bjergarter fra overliggende bjergarter. Det litostatisk tryk øges med dybden.

Mikroseismisk aktivitet: små rystelser eller vibrationer i jordskorpen, der ikke skyldes jordskælv, men kan skyldes en række naturlige og menneskeskabte forhold.

pH: en opløsnings surhedsgrad, hvor værdien pH 7 er neutral.

Porøsitet: den procentdel af en bjergarts rumfang, der ikke udgøres af mineraler. Disse hulrum kaldes porer og kan fyldes med væsker eller luftart. I dybtliggende porer er der ofte tale om saltholdigt vand, men det kan også være olie eller naturgas, som metan, eller naturligt forekommende CO₂.

Reservoir: en geologisk formation med en bjergart, der er tilstrækkelig porøs og gennemtrængelig til at være egnet til lagring af CO₂. De mest almindelige reservoirer består af sandsten eller kalksten.

Saltvand: meget saltholdigt vand, dvs. vand med et højt indhold af opløste salte.

Segl: uigennemtrængeligt geologisk formation (bjergart), der fungerer som barriere for væsker og luftarter og fungerer som forsegling, når den ligger over et reservoir.

Superkritisk: tilstanden af en væske ved en temperatur og et tryk over kritiske niveauer (31,03°C og 7,38 MPa for CO₂). Sådanne væskers egenskaber varierer fra mere gasagtige ved et lavt tryk til mere væskeagtige ved et højt tryk.

Øget olieindvinding (EOR: Enhanced Oil Recovery): en teknik, der øger udvindingsgraden af olie gennem injektion af væsker (som vand og CO₂), der får olien til lettere at flyde opad i reservoiret.

Yderligere oplysninger:

FN's Klimapanel (IPCC) rapport om CCS:

http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srccs/srccs_wholereport.pdf

Europakommissionens hjemmeside om CCS:

<http://ec.europa.eu/environment/climat/ccs/>

EU-direktivet:

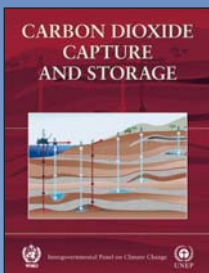
http://ec.europa.eu/environment/climat/ccs/eccp1_en.htm

Handel med CO₂ kvoter:

<http://ec.europa.eu/environment/climat/emission.htm>

IEA GHG overvågningsværktøjer:

http://www.co2captureandstorage.info/co2tool_v2.1beta/introduction.html



Hvad kan CO₂GeoNet gøre for dig?

CO₂GeoNet er et europæisk 'network of excellence', der har til formål at kommunikere uvildig og videnskabeligt baseret information om sikkerhed og fordele ved at lagre CO₂ i undergrunden. Netværket består af mere end 150 forskere ved 13 offentlige forskningsinstitutioner, der alle er internationalt anerkendte inden for forskning i geologisk lagring af CO₂. Netværket sponseres af Europakommissionen under EU's 6. rammeprogram.

Følgende institutioner deltager i samarbejdet:

BGR , BGS , BRGM , GEUS , Heriot Watt University , IFP , Imperial College , NIVA , OGS , IRIS , SINTEF , TNO , Sapienza universitet i Rom .

Netværkets arbejde

De forskere, der deltager i netværket, samarbejder løbende for at øge vores viden om geologisk lagring af CO₂ og de værktøjer, der er nødvendige for at gøre det sikkert. De deltager i en række højt prioriterede forskningsprojekter inden for alle aspekter af geologisk lagring: reservoiret, seglet, mulige lækageveje for CO₂ til jordoverfladen, mulige påvirkninger af mennesker og lokale økosystemer i tilfælde af lækage, offentligt engagement og kommunikation.

CO₂GeoNets styrke ligger i evnen til at skabe tværfaglige grupper af meget erfarne specialister, der giver netværket et øget kendskab til alle aspekter i forbindelse med geologisk lagring og til, hvordan de hænger sammen i et større og mere komplekst system.

I tillæg til forskningen kan CO₂GeoNet også:

- tilbyde uddannelse og videnopbygning til de forskere og ingeniører, der skal arbejde med lagring af CO₂;
- yde videnskabelig rådgivning og revidering af projektforslag (f.eks. geoteknisk kvalitet, miljøbeskyttelse, risikostyring, planlægning og lovgivningsmæssige spørgsmål);
- kommunikere uafhængig, uvildig information baseret på netværkets forskningsresultater;
- indgå i en dialog med interessenter og hjælpe med at sætte fokus på deres spørgsmål og behov.

For at styrke offentlighedens kendskab til geologisk lagring af CO₂ som et muligt redskab i reduktion af klimaændringer har CO₂GeoNet arbejdet med det grundlæggende spørgsmål "Hvad er geologisk lagring af CO₂ egentlig?". Et panel af fremtrædende forskere fra CO₂GeoNet har forberedt kompetente svar på seks relevante spørgsmål ud fra mere end 10 års europæisk



forskning og erfaring med demonstrationsprojekter på verdensplan. Målet er at kommunikere klar og uvildig videnskabelig information til et bredt publikum og at inspirere til dialog om vigtige spørgsmål vedrørende de tekniske aspekter i forbindelse med geologisk lagring af CO₂.

Netværkets arbejde, der opsummeres i dette hæfte, blev præsenteret på netværkets første Uddannelses- og Dialog-workshop i Paris den 3. oktober 2007. Blandt deltagerne var interessenter, repræsentanter fra industrien, ingeniører og videnskabsfolk, politikere, journalister, NGO'er, sociologer, lærere og studerende. I alt 170 mennesker fra 21 forskellige lande deltog i workshoppen, hvor de fik lejlighed til at udveksle synspunkter og få mere at vide om geologisk lagring af CO₂.

Hvis man ønsker yderligere oplysninger eller ønsker at høre mere om muligheden for et lignende kursus i geologisk lagring, bedes man rette henvendelse til CO₂GeoNets sekretariat pr. e-mail til info@co2geonet.com eller besøge hjemmesiden www.co2geonet.eu.

CO₂GeoNet

Det europæiske netværk med fokus på geologisk lagring af CO₂



www.co2geonet.eu

Sekretariat: info@co2geonet.com

BGS Natural Environment Research Council-British Geological Survey, **BGR** Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, **BRGM** Bureau de Recherches Géologiques et Minières, **GEUS** De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland, **HWU** Heriot-Watt University, **IFP**, **IMPERIAL** Imperial College of Science, Technology and Medicine, **NIVA** Norsk Institutt for vannforskning, **OGS** Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale, **IRIS** International Research Institute of Stavanger, **SPR SINTEF** Petroleumsforskning AS, **TNO** Nederlandse Organisatie voor toegepast-natuurwetenschappelijk, **URS** Sapienza University of Rome Dip. Scienze della Terra.