

Vad innebär egentligen geologisk lagring av koldioxid?

Ansvarsfull användning
av fossila bränslen

Den viktigaste
växthusgasen tas om hand

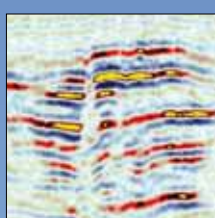
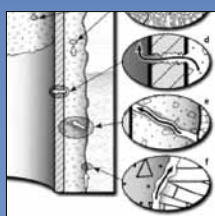
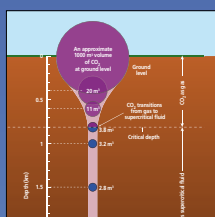
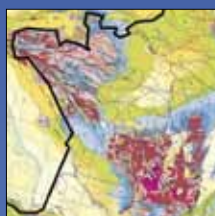
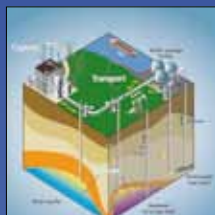
Kolet förs tillbaka
ner i marken

Vi får tid till att utveckla
klimatvänliga energikällor



CO₂GeoNet European Network of Excellence

Innehållsförteckning

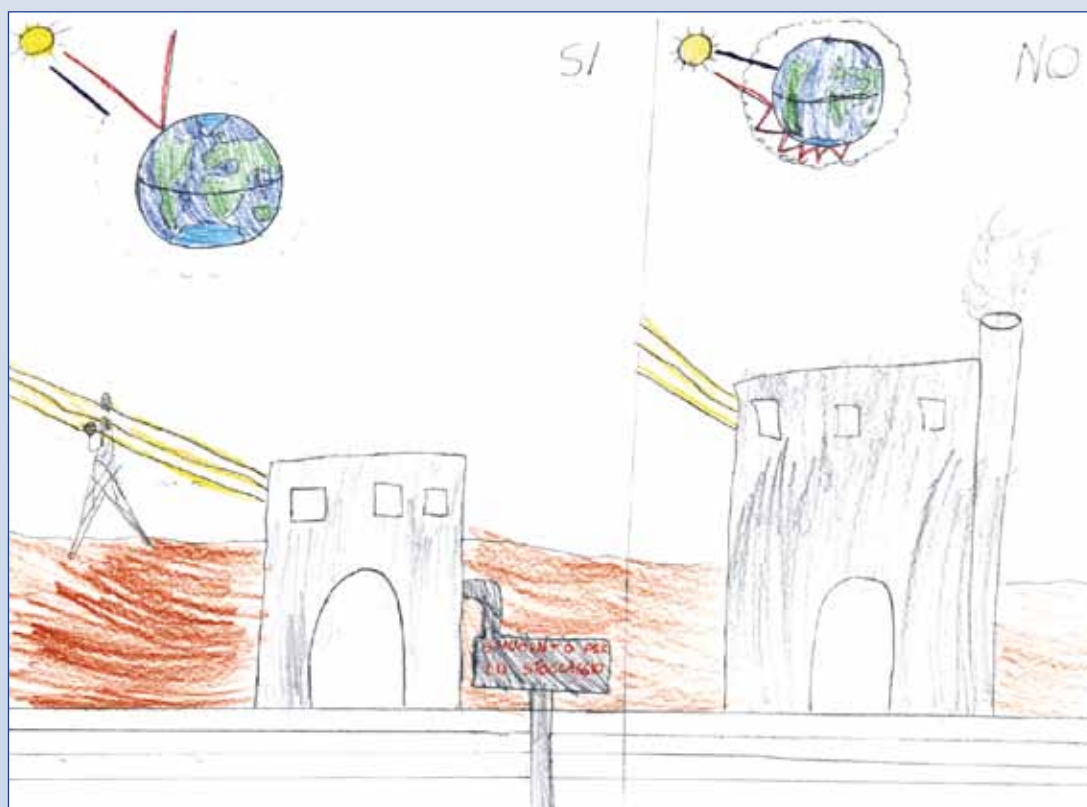


Klimatförändring och behovet av geologisk lagring av koldioxid	4
1. Var och hur mycket koldioxid kan vi lagra i berggrunden?	6
2. Hur kan vi transportera och injektera stora mängder koldioxid?	8
3. Vad händer med koldioxiden nere i lagringsutrymmet?	10
4. Kan CO₂ läcka från lagringsutrymmet och vilka blir i så fall konsekvenserna?	12
5. Hur kan vi övervaka lagringsplatsen på djupet och vid markytan?	14
6. Vilka säkerhetskriterier måste införas och uppfyllas?	16
Ordlista	18
Vad kan CO₂GeoNet göra för dig?	19

Den här broschyren har tagits fram med hjälp av:
 Rob Arts, Stanley Beaubien, Tjirk Benedictus, Isabelle Czernichowski-Lauriol, Hubert Fabriol, Marie Gastine,
 Ozgur Gundogan, Gary Kirby, Salvatore Lombardi, Franz May, Jonathan Pearce, Sergio Persoglia, Gijs Remmelts,
 Nick Riley, Mehran Sohrabi, Rowena Stead, Samuela Vercelli och Olga Vizika-Kawadias.

En framtidsvision

**Inga fler rykande skorstenar
En rörledning kommer med koldioxid
och för ner den i marken
Det är bra för Jorden**



© Sapienza URS

Massimo, 10 år, Rom - Italien

**För våra barn
är geologisk lagring av koldioxid vettigt**

Klimatförändring och behovet av geologisk lagring av koldioxid

Figur 1
Globala koldioxid-
utsläpp med koppling
till mänskliga
aktiviteter uppgår
till 30 miljarder ton
(30 Gt) per år, vilket
motsvarar 8,1 Gt kol:
6,5 Gt från
förbränning av fossila
bränslen och 1,6 Gt
från avskognings- och
jordbruksaktiviteter.

Vi människor släpper ut överflödiga koldioxid till atmosfären

Det är numera allmänt accepterat att människans aktiviteter stör kolets kretslopp på vår jord. Före den industriella revolutionen och ca 10 000 år tillbaka i tiden resulterade detta noggrant balanserade kretslopp, med ett naturligt utbyte av kol mellan geosfären, biosfären, havet och luften, i låga halter av koldioxid i atmosfären.

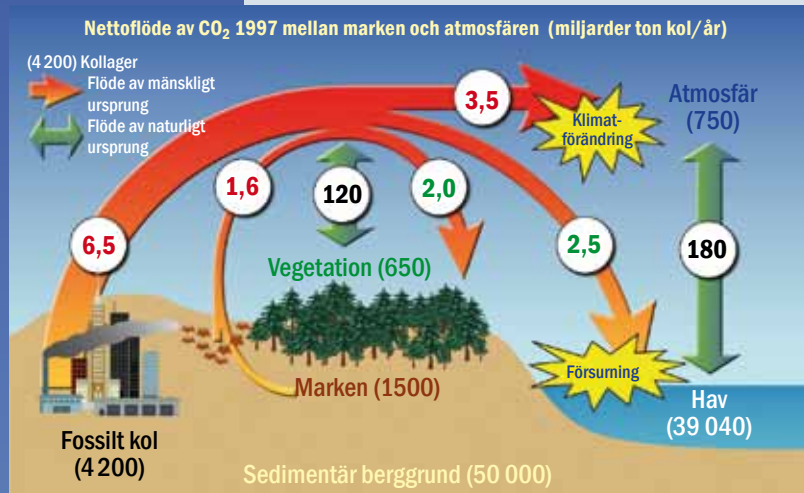
(omkring 280 ppm, det vill säga 0,028 procent). Men under de senaste 250 åren har vår omfattande förbränning av fossila bränslen (kol, olja och gas) för kraftproduktion, uppvärmning, industri och transporter oavbrutet ökat mängden koldioxid som släpps ut till atmosfären (**fig. 1**). Ungefär hälften av detta av människan orsakade överutsläpp har återabsorberats av vegetationen och lösts upp i havet. Där orsakar det försurning, som kan medföra skadliga effekter på marina djur och växter. Resten av koldioxiden har ackumulerats i atmosfären, där den medverkar till klimatförändringar eftersom koldioxid är en växthusgas som håller kvar en del av solvärmen och får jordens yta att värmas upp. Det behövs omedelbara och kraftfulla åtgärder för att halvera dagens koldioxidhalt i atmosfären som är 387 ppm, (en ökning på mer än 38 procent jämfört med innan den industriella revolutionen) från att öka till över den kritiska nivån på 450 ppm under kommande årtionden. Experter världen runt är ense om att det ovanför denna nivå kan bli omöjligt att undgå de mest allvarliga klimatkonsekvenserna.

Att återföra kol tillbaka ner i marken

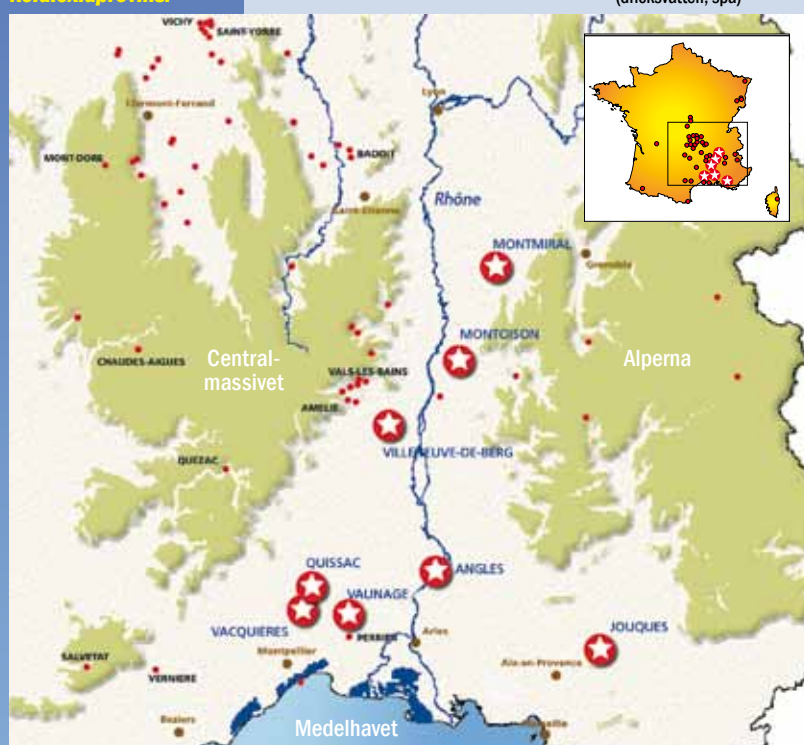
Vår värld har varit kraftigt beroende av fossila bränslen sedan den industriella revolutionens början på 1750-talet. Därför är det inte överraskande att omvandlingen av vårt samhälle till ett samhälle som bygger på klimatanliga energikällor kommer att kräva både tid och pengar. Det vi behöver är en kortsiktig lösning som kan hjälpa till att minska vårt beroende av fossila bränslen genom att, som ett första steg, använda dem på ett sätt som inte förorenar. Detta ger oss den tid som behövs för att utveckla teknik och infrastruktur för en framtid baserad på förnyelsebar energi. En sådan möjlighet är att skapa ett slutet kretslopp i energiproduktionen, där det kol som ursprungligen utvunnits från berggrunden i form av gas, olja eller kol återförs i form av koldioxid. Intressant är, att geologisk lagring av koldioxid inte är en mänsklig uppfinring utan ett helt naturligt fenomen som kan ses i de befintliga koldioxidreservoarer* som har funnits i tusentals till miljontals år. Ett sådant exempel är den serie av åtta naturliga koldioxidreservoarer i sydöstra Frankrike som upptäcktes i samband med oljeprospektering på 1960-talet (**fig. 2**). Dessa och många andra naturliga reservoarer världen runt visar att det går att lagra koldioxid i geologiska formationer på ett effektivt och säkert sätt under mycket lång tid.

Avskiljning och lagring av koldioxid: Ett hoppfullt steg mot en lösning

Bland det spektrum av åtgärder som snarast behöver genomföras för att mildra klimatförändringarna och min-



Figur 2
Frankrikes
koldioxidprovins.



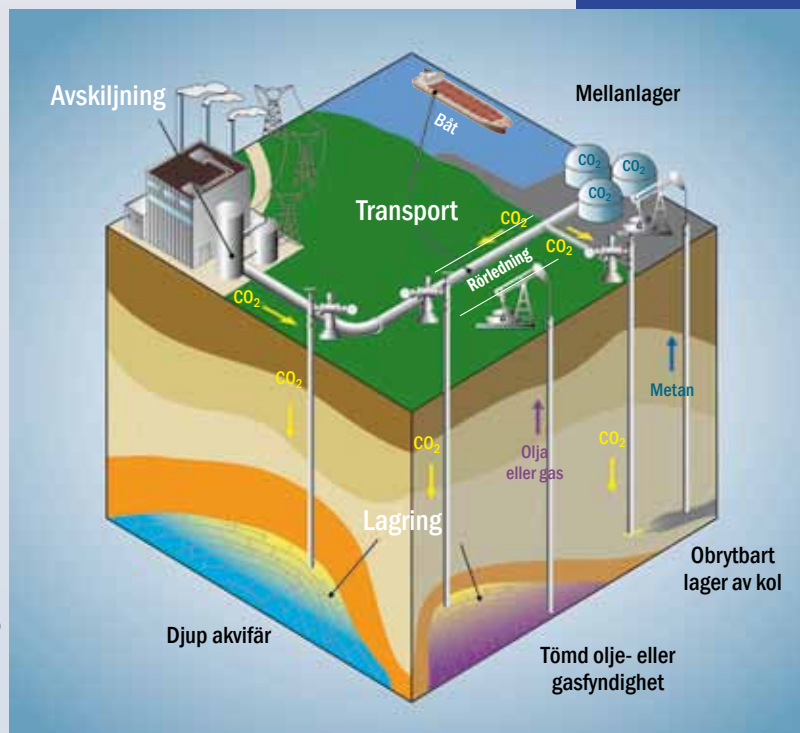
ska försurning av haven, kan avskiljning och lagring av koldioxid (CCS*) spela en avgörande roll. Detta eftersom metoden skulle kunna bidra med 33 procent av den minskningen som behövs fram till 2050. CCS innebär att man avskiljer koldioxid vid olje- gas- och koleldade kraftverk och vid industrier (stålverk, cementfabriker, oljeraffinaderier m.m.), transporterar den via en rörledning eller fartyg till en lagringsplats, och pumpar sedan ner koldioxiden via en djupborrad brunn* in i en lämplig geologisk formation för långtidslagring (**fig. 3**). Med tanke på befolkningsökningen i världen, det växande energibehovet i utvecklingsländer, och dagens brist på storskaliga alternativa "rena" energilösningar, är en fortsatt användning av fossila bränslen oundviklig på kort sikt. Men med hjälp av CCS kan mänskligheten utvecklas i en miljövänlig riktning samtidigt som vi skapar en bro till en världsekonomi som bygger på hållbar energiproduktion.

Blomstrande utveckling av CCS över hela världen

Sedan 1990-talet har omfattande forskning om CCS genomförts i Europa, USA, Kanada, Australien och Japan. Mycket kunskap har redan inhämtats genom världens första storskaliga demonstrationsprojekt, där koldioxid har injekterats djupt ner i berggrunden under flera år: Sleipner i Norge (ca 1 megaton per år sedan 1996), (**fig. 4**), Weyburn i Kanada (ca 1.8 megaton per år sedan år 2000) och In Salah i Algeriet (ca 1 megaton per år sedan 2004). Internationella forskningssamarbeten om koldioxidlagring som främjats av IEAGHG* och CSLF* vid dessa och andra platser har varit särskilt viktiga för att vidga förståelsen och utveckla en världsomspännande naturvetenskaplig forskningsgemenskap som tar sig an denna fråga. Ett utmärkt exempel är IPCCs* specialrapport om avskiljning och lagring av koldioxid (2005), som beskriver dagens kunskapsläge och de hinder som måste övervinnas för att tekniken ska kunna genomföras på bred front. Solid teknisk kunskap finns redan, och världen över går man nu med förtroende in i demonstrationsfasen. Förutom den tekniska utvecklingen skapas lagar och regleringar samt ekonomiska och politiska ramar, samtidigt som attityder och stöd från allmänhet och samhälle utvärderas. I Europa är målet att man ska ha så många som 12 demonstrationsprojekt i större skala igång till 2015 så att man kan åstadkomma utbredd kommersiell tillämpning till 2020. I detta syfte utfärdade Europakommissionen sitt "Klimat- och energipaket" i januari 2008, i vilken ett direktiv för geologisk lagring av koldioxid föreslås, tillsammans med andra åtgärder, för att främja utveckling och säker användning av CCS.

Nyckelfrågor kring geologisk lagring av koldioxid

"CO₂GeoNet Network of Excellence" skapades i Europakommissionens regi och utgörs av en grupp av forskningssinstitutioner som kan säkerställa att Europa fortsätter vara en ledande aktör inom den omfattande internatio-



© BRMG im@gé

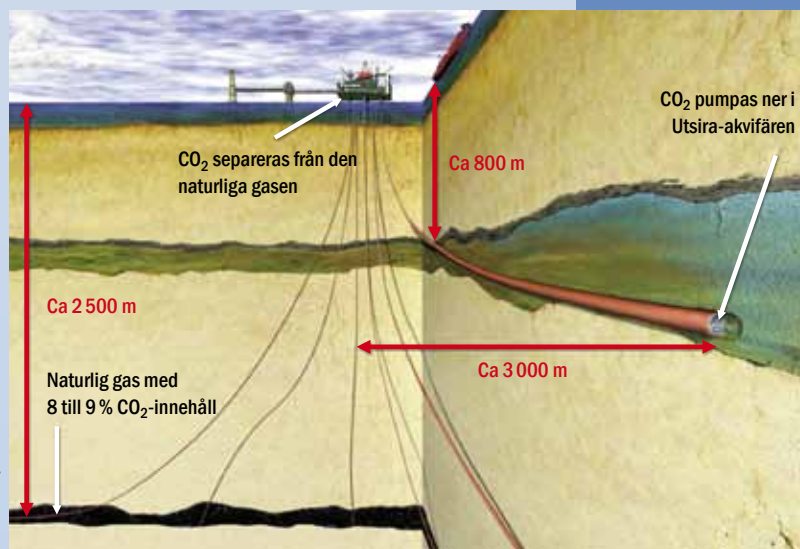
nella forskningen. Ett av nätverkets mål är att förmedla tydlig vetenskaplig information om de tekniska aspekterna av geologisk lagring av koldioxid. För att uppmuntra till dialog kring de centrala aspekterna för denna viktiga teknologi, har forskare från CO₂GeoNet tagit fram svar på de grundläggande frågor som ofta ställs. På de följande sidorna kan du läsa om hur geologisk lagring av koldioxid kan utföras, under vilka omständigheter som det är möjligt, och vad som krävs för att genomföra lagring på ett effektivt och säkert sätt.

Figur 4

Sleipner, Norge - vertikal genomskärning.

Naturlig gas, som utvinns från 2 500 meters djup, innehåller flera procent koldioxid som måste tas bort för att uppfylla kommersiella krav. Istället för att släppa ut gasen i atmosfären avskiljs koldioxiden och pumpas ner i den sandiga Utsira-akvifären* på ca 1 000 meters djup.

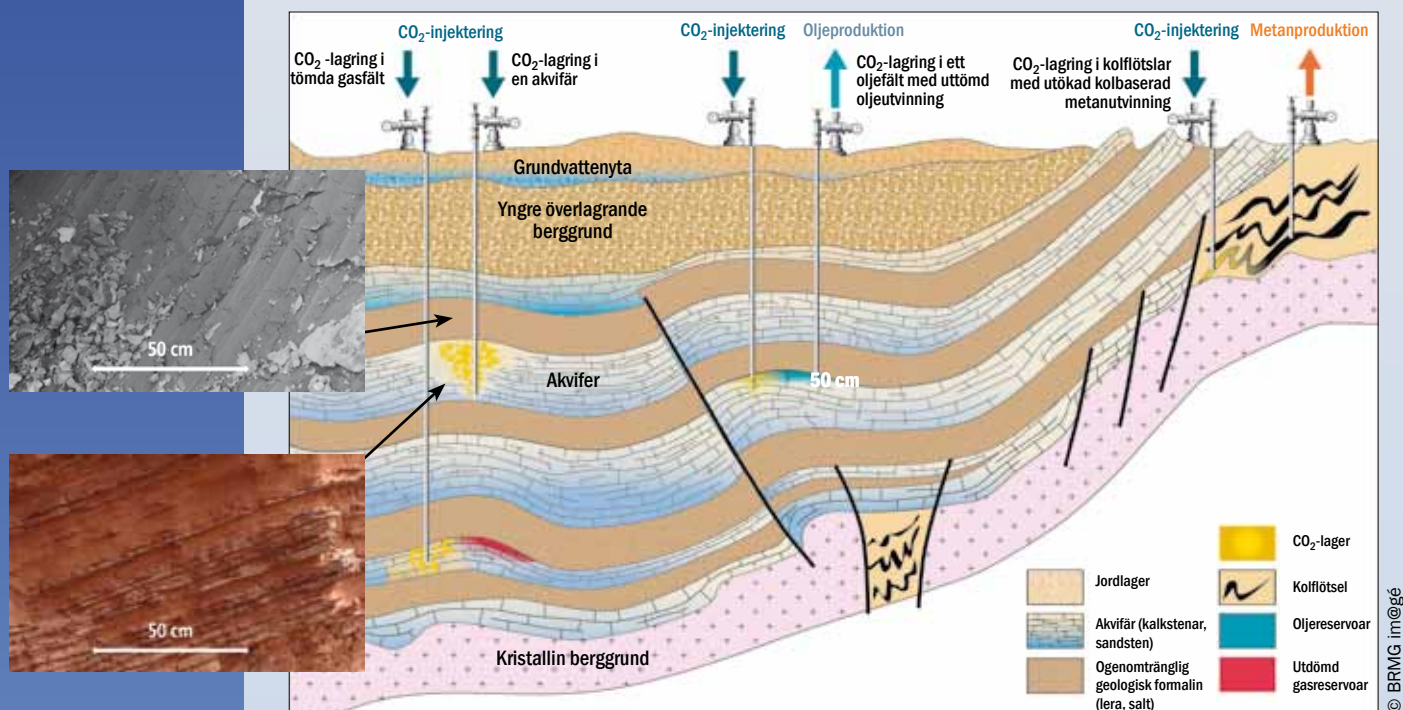
Figur 3
Vid elkraftverk sker avskiljning av koldioxid genom att separera koldioxiden från andra gaser. Den komprimeras sedan och transporteras via rörledning eller fartyg till lagringsplatsen som kan vara djup saltvattenakvifär*, tömd olje- och gasfyndighet samt icke brytbart lager av kol i berggrunden.



© StatoilHydro

Var och hur mycket koldioxid kan vi lagra i berggrunden?

Koldioxid kan inte pumpas ner var som helst i underjorden utan först måste man hitta lämplig berggrund. Möjliga platser för geologisk lagring av koldioxid finns världen över, och kapaciteten är tillräcklig för att kunna bidra till en omfattande minskning av människans klimatpåverkan.



Figur 1
Koldioxid injekteras in i djupt liggande geologiska lager som består av porös och genomsläpplig berggrund (t.ex. sandsten, se det nedre fotot), som överlagras av tät bergarter (t.ex. lersten, se det övre fotot), som förhindrar att koldioxid försvinner upp mot ytan. De huvudsakliga lagringsalternativen är:
1. Tömda olje-/naturgasreservoarer med utökad oljeutvinning* där så är möjligt;
2. Saltvattens-akviferer som inte kan användas för dricks-vattenkonsumtion;
3. Djupa icke brytbara kollager, som lokalt kan nyttjas för en förbättrad utvinning av metanogas.

Det finns tre huvudsakliga sätt att lagra koldioxid (**fig. 1**):

1. Tömda olje- och naturgasfält – välkända tack vare prospektering och utvinning av kolväten - erbjuder omedelbara möjligheter till lagring av koldioxid;
2. Saltvattenakviferer* – har en större lagringspotential, men är i allmänhet mindre välkända;
3. Icke brytbara lager av kol i berggrunden; en framtida möjlighet när man löst problemet hur man kan pumpa ner stora mängder koldioxid i kollager med låg permeabilitet*.

Reservoarer

När man pumpat ner koldioxid i en lämplig berggrund under marken lagras koldioxiden i porer mellan bergets mineralnär och i sprickor. Koldioxiden tränger då bort och ersätter den gas eller vätska, t.ex. vatten eller olja, som fanns där innan. Berggrund som ska kunna nyttjas till geologisk lagring av koldioxid bör därför ha hög porositet* och hög genomsläpplighet* (permeabilitet). Denna typ av berggrund är bildad genom avsättning av sediment och finns vanligtvis inom så kallade sedimentationsbassänger.

På en del platser finns dessa genomsläppliga bergarter växelagrade tillsammans med ogenomträngliga bergarter som kan fungera som tätande lager. Ofta förekommer oljereservoarer och naturliga koldioxidfält inom sedimentationsbassänger. Där har de bevarats under miljontals år, vilket visar på berggrundens förmåga att lagra olja, gas och t.o.m. ren koldioxid under mycket lång tid.

I illustrationer som redovisar möjliga platser för koldioxidlagring visas berggrunden ofta som en starkt förenklad, homogen lager-på-lager struktur. I verkligheten består den av ojämnt fördelade och lokalt uppspruckna geologiska formationer, reservoarutrymmen och takbergarter* som bildar komplexa och heterogena strukturer. Geovetenskaplig erfarenhet och ingående kunskap om platsen krävs för att bedöma den föreslagna berggrundens lämplighet för lagring av koldioxid på lång sikt.

Lämpliga platser för lagring av koldioxid måste uppfylla ett flertal kriterier. De viktigaste är:

- Tillräcklig porositet, genomsläpplighet och lagringskapacitet.
- Förekomst av ett tätt lager ovanpå – en så kallad "takbergart" (t.ex. lera, lersten, mörgel, stensalt), som

förhindrar att koldioxid stiger uppåt.

- Förekomsten av "slutna strukturer" – det vill säga former i berggrunden t.ex. ett kupolformat takberg, där man kan kontrollera hur koldioxiden rör sig inom lagringsformationen.
- Läget ska vara djupare än 800 meter; här är tryck och temperatur tillräckligt höga för att tillåta lagring av koldioxid som en komprimerad vätska, vilket maximerar lagringsmängden.
- Frånvaro av dricksvatten: koldioxid ska inte pumpas ner i reservoarer som kan användas till dricksvatten och andra mänskliga aktiviteter.

Var kan man hitta lagringsplatser i Europa

Sedimentationsbassänger finns i hela Europa, t.ex. till havs i Nordsjön och på land runt Alpernas bergskedjor (fig. 2). Många av formationerna i Europa uppfyller kriterierna för geologisk lagring, och forskare håller för närvarande på att kartlägga och karakterisera dessa. Andra områden i Europa består av gammalt urberg, t.ex. stora delar av Skandinavien, och där saknas lämplig berggrund för koldioxidlagring.

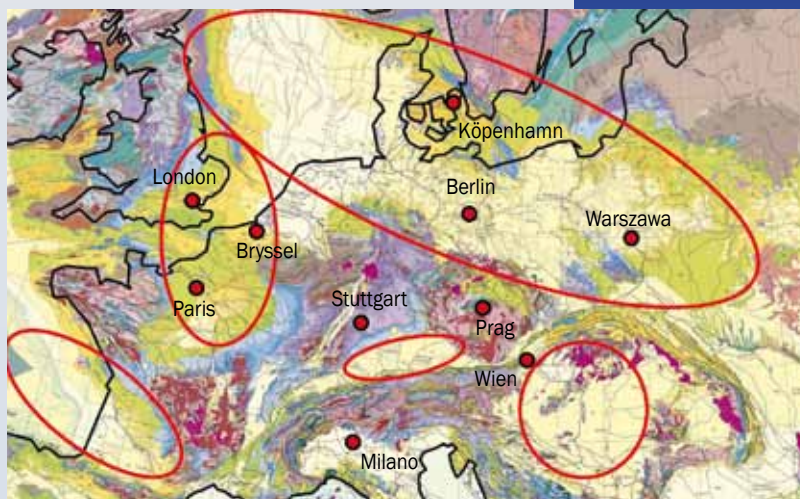
Ett exempel på ett område där koldioxidlagring kan vara möjlig är den sydliga permiska bassängen, som sträcker sig från England till Polen (den största ellipsen i **figur 2**). Här har sedimenten påverkats av berggrundsbildande processer som inneburit att en del av porutrymmet fyllts av saltvatten, olja eller naturgas. Leran som finns mellan de porösa sandstenarna har pressats samman till täta lager och hindrar vätskan att röra sig uppåt. Stora delar av sandstenslagren finns på djup mellan 1 och 4 km, där trycket är tillräckligt högt för att lagra koldioxid i tät fas. Saltinnehållet i vattnet som finns i sandstenen ökar under djupintervallet från ca 100 gram per liter till 400 gram per liter, det vill säga det är mycket saltare än havsvatten (35 gram per liter). Rörelser i berggrunden har orsakat plastisk deformation och skapat hundratals kupolformade strukturer där naturgas sedan har fångats. Det är dessa fällor som nu studeras som möjliga lagringsutrymmen för koldioxid.

Lagringskapacitet

Politiker, myndigheter och verksamhetsutövare behöver kunskap om lagringskapacitet för koldioxid. Uppskattningar av lagringskapacitet är för det mesta mycket ungefärliga och gjorda utifrån storleken på de potentiellt lämpliga formationerna. Kapaciteten kan uppskattas utifrån olika skalor, från grova bedömningar på nationell skala ner till mer detaljerade beräkningar på reservoarnivå, där hänsyn tas till den faktiska geologiska strukturens heterogenitet och komplexitet.

Volymetrisk kapacitet: Uppgifter om nationell lagringskapacitet baseras i allmänhet på beräkningar av formationernas porvolym. Teoretiskt sett kan lagringskapaciteten i en viss formation beräknas genom att multiplicera dess yta med dess tjocklek, medelporositet och

© BGR



Figur 2
Geologisk karta över Europa som visar lägen för Europas större sedimentationsbassänger (röda ellipser) där lämpliga reservoarer för koldioxidlagring kan förekomma (baserad på Geological Map of Europe, skala 1:5 000 000).

koldioxidens medeldensitet vid de förhållanden som gäller på reservoardjupet. Eftersom det redan finns vatten i porutrymmet kan dock endast en liten del användas till lagring av koldioxid. Normalt antas den delen uppgå till ca 1 - 3 procent. Denna kapacitetskoefficient används sedan för att uppskatta den volymetriska kapaciteten.

Faktisk kapacitet: Man kan få fram mer realistiska uppskattningar av lagringskapaciteten hos enskilda lagringsplatser genom detaljerade undersökningar. Formationens tjocklek är inte konstant, och reservoaregenskaperna kan variera över korta avstånd. Med hjälp av kunskap om strukturernas storlek, form och geologiska egenskaper kan man minska osäkerheterna i volymberäkningarna. Utifrån denna information kan man sedan använda datasimuleringar för att förutsäga hur koldioxiden kommer att röra sig inom reservoaren och till att uppskatta den faktiska lagringskapaciteten.

Realiserbar kapacitet: Lagringskapacitet handlar inte bara om berggrundens fysiska egenskaper. Även samhällsekonomiska faktorer avgör om en lämplig lagringsplats kommer att nyttjas eller inte. Transportkostnaderna kommer t.ex. att påverka möjligheten att flytta koldioxiden från källan till lagringsplatsen. Kapaciteten kommer också vara beroende av koldioxidens renhet, eftersom närvaro av andra gaser kommer att reducera den reservoarvolym som är tillgänglig för koldioxid. I slutändan kommer politiska beslut och acceptansen hos allmänheten att vara avgörande när det gäller om den tillgängliga lagringskapaciteten faktiskt kommer att utnyttjas.

Sammanfattningsvis vet vi att lagringskapaciteten för koldioxid är hög i Europa, även om det finns osäkerheter när det gäller reservoarnas komplexitet, heterogenitet och avseende samhällsekonomiska faktorer. Inom EU-projektet GESTCO* uppskattades lagringskapaciteten för koldioxid i olje- och gasfält i och omkring Nordsjön till 37 gigaton, vilket skulle möjliggöra injektering av koldioxid från stora anläggningar i regionen under flera årtionden. Uppdatering och fortsatt kartläggning av lagringskapacitet inom Europa är en fråga för löpande forskning inom enskilda medlemsländer och genom projektet EU Geocapacity* för Europa som helhet.



Hur kan vi transportera och injektera stora mängder koldioxid?

Efter avskiljningen vid kraftverk och industrier komprimeras koldioxiden, och sedan transporteras den och pumpas ner i lagringsformationen via en eller flera djupborrade brunnar. Hela kedjan måste optimeras för att möjliggöra lagring av flera miljoner ton koldioxid per år.

Komprimering

Koldioxiden komprimeras till en tät vätska som upptar betydligt mindre utrymme än en gas.

När koldioxiden har separerats från rökgaserna vid industrianläggningen eller kraftverket avfuktas och komprimeras den nu mycket koncentrerade koldioxidströmmen så att transport och lagring underlättas (**fig. 1**). Avfuktning krävs för att undvika korrosion av utrustning och infrastruktur, och för att undgå hydratbildning vid höga tryck (fasta isliknande kristaller som kan sätta igen utrustning och ledningar). Komprimering genomförs samtidigt med avvattning i en process som utförs i flera steg: upprepade cykler av komprimering, nedkylning och vattenavskiljning. Tryck, temperatur och vattenhalt måste anpassas efter transportsätt och efter de tryckegenskaper som finns vid lagringsplatsen. Gasens flödes hastighet, insugnings- och utflödestrycket, gasens värmekapacitet, samt kompressorns effektivitet är viktiga faktorer när man utformar komprimeringsanläggningen. Komprimeringstekniken finns och används redan inom många områden i industrin.

Transport

Koldioxid kan transporteras antingen med hjälp av far-

tyg eller rörledning.

Fartygstransport av koldioxid förekommer i dagsläget endast i mycket liten skala för industriellt bruk (10 000 - 15 000 m³). Det kan dock bli ett attraktivt alternativ i framtiden för CCS-projekt där en kustnära källa ligger mycket långt från en lämplig lagringsplats. Fartyg som används för transport av flytande petroleumgas (fotogen, fordonsgas, gasol etcetera) är lämpliga för koldioxidtransport. System som både är trycksatta och kylda fungerar särskilt väl eftersom koldioxiden då kan transporteras flytande. Moderna fartyg av denna typ rymmer upp till 200 000 m³ och kan transportera mängder på upp till 230 000 ton koldioxid. Fartygstransporter ger dock inte ett obrutet transportflöde, och kräver mellanlager inom hamnområdet för omlastning av koldioxid.

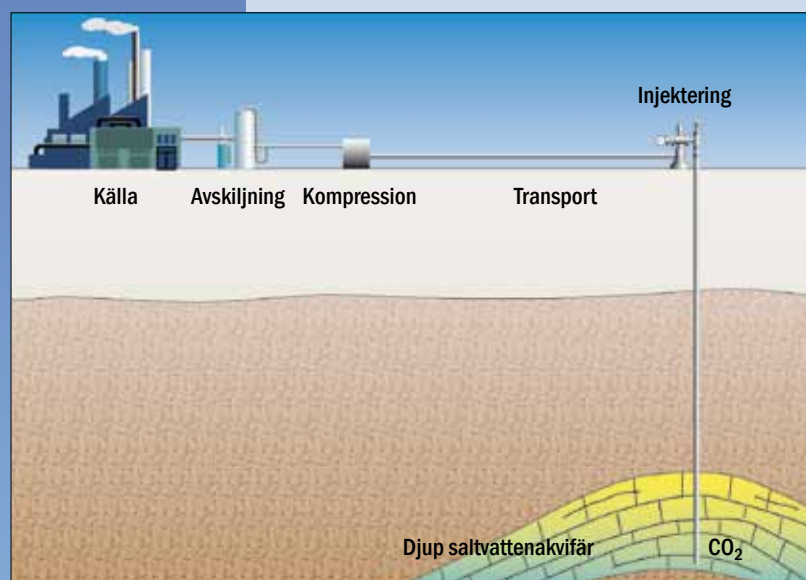
Stora mängder koldioxid transporteras idag via rörledning. Koldioxiden används av oljeföretag för så kallad utökad oljeutvinning* (EOR, Enhanced Oil Recovery*) (det finns ca 3 000 km rörledningar i världen, de flesta i USA). Detta innebär lägre kostnader än fartygstransporter och har även fördelen av ett kontinuerligt flöde från källan till lagringsplatsen. I befintliga rörledningar för koldioxid transporteras gasen under högt tryck, där så kallad superkritisk* koldioxid uppför sig som en gas men är lika tät som vätskefasen. Tre viktiga faktorer bestämmer vilken mängd koldioxid som en rörledning kan hantera: rörledningens diameter, trycket i längdriktningen och, följaktligen, rörväggens tjocklek.

Injektering

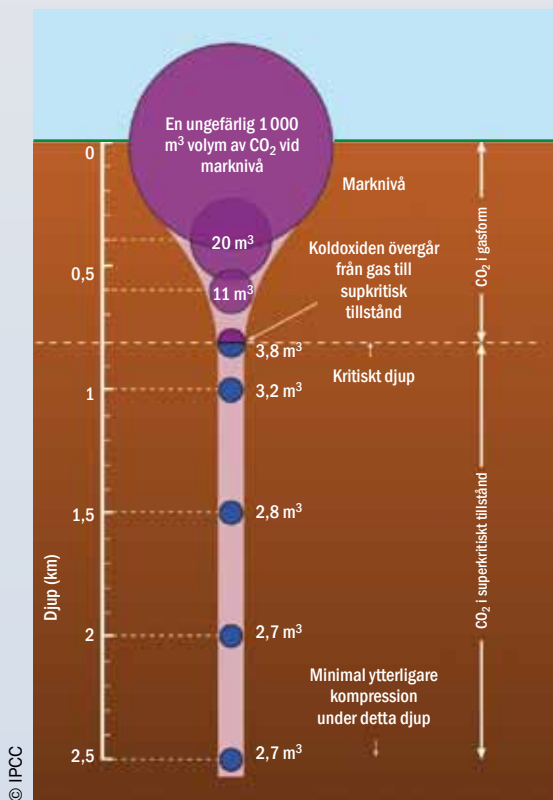
När koldioxiden anländer till lagringsplatsen injekteras den under tryck ner i reservoaren (**fig. 2**).

Injekteringsstrycket måste vara så mycket högre än trycket i reservoaren att den injekterade koldioxiden trycker undan reservoarvätskan från injekteringspunkten. Antalet injekteringsbrunnar beror på hur stor mängd koldioxid som ska lagras, injektionshastighet (mängd koldioxid per timme), reservoarens genomsläpplighet och tjocklek, det maximalt tillåtna, riskfria injekteringsstrycket, samt brunnstyp. Eftersom det främsta syftet är långtidslagring av koldioxid, måste vi vara säkra på lagringsformationens hydrauliska avgränsning. Hög injekteringshastighet kan orsaka tryckökningar vid injekteringspunkten, särskilt i formationer med låg genomsläpplighet. Injekteringsstrycket bör normalt inte överstiga gränstrycket för bergartens hållfasthet eftersom detta kan orsaka skador på

Figur 1
Geologisk lagring av koldioxid; processens olika skeden. En rad delprocesser säkerställer leverans av koldioxid från källan till en säker och långsiktig lagring: avskiljning, komprimering, transport och nedpumpning.



© BRMG im@gé



Figur 2
När koldioxid pumpas ner under jorden förblir den i superkritiskt tillstånd vid ca 0,8 kilometers djup. Koldioxidens volym minskar kraftigt under dessa förhållanden, från 1000 m³ vid markytan till 2,7 m³ vid 2 km djup. Det är ett av skälen till varför CCS-tekniken kan hantera stora mängder av koldioxid.

reservoaren eller på det tätande lagret ovanför. Man använder sig av geomekanisk analys och modellering för att bestämma det maximala injekteringsstryck som kan tillåtas utan att det blir skador på formationen.

Kemiska processer kan påverka injekteringshastigheten i lagringsformationen. Beroende på vilken bergart som bygger upp reservoaren, vätskesammansättning, reservoarens förutsättningar (temperatur, tryck, volym, halter, etc.), kan processer där mineral löses upp eller nybildas förekomma nära injekteringsbrunnen. Detta kan leda till ökad eller minskad injekteringshastighet. Så snart som man injekterat koldioxiden, löser en delmängd upp sig i det salthaltiga reservoarvattnet och pH-värdet* minskar något, buffrat av upplösningen av kalkrika mineral som finns i berggrunden. Vid injektering är det dessa som löses upp först. Processen kan öka reservoarens porositet och dess injekterbarhet, injektiviteten*. Efter det att mineralen lösts upp kan de emellertid åter mineraliseras, varvid berggrunden vid brunnen kan cementeras igen. Höga flödeshastigheter kan utnyttjas för att begränsa en minskning av genomsläppligheten nära injekteringspunkten. Då flyttas utfällningsområdet, det vill säga området där den geokemiska balansen inställer sig, längre bort från injekteringspunkten.

Injektering av koldioxid orsakar även uttorkning. Efter försumningsfasen, löser det överblivna vattnet som har samlats runt injekteringsbrunnen upp sig i den in pumpade

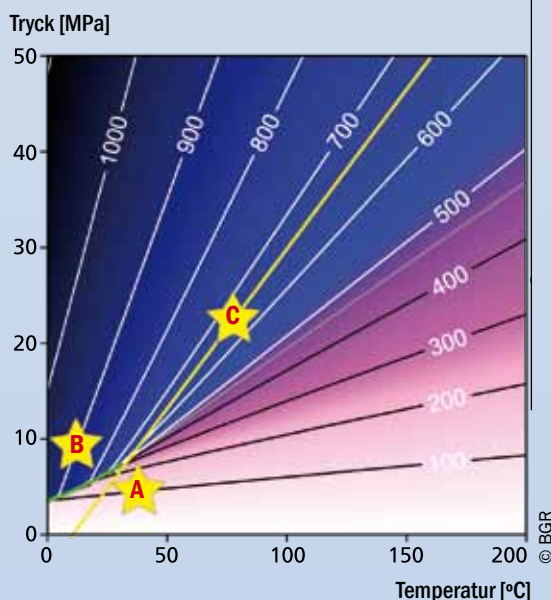
torra gasen, vilket i sin tur koncentrerar olika kemiska ämnen i det salta vatten som blir kvar. Mineral (så som salter) kan då fällas ut när vattnets mineralhalt blir tillräckligt hög, vilket leder till lägre genomsläpplighet kring brunnen.

Dessa frågeställningar kring injektering styrs av komplexa, interaktiva processer som pågår lokalt kring injekteringsbrunnen, processer som i hög grad även beror av tiden och avståndet från brunnen. Numeriska simuleringar görs för att bedöma dessa effekter. Flödeshastigheten måste justeras noggrant för att motverka de processer som kan begränsa injektering av önskvärda mängder koldioxid.

Koldioxidströmmens sammansättning

Koldioxidströmmens sammansättning och renhet bestäms av avskiljningsprocessen och har stor betydelse för lagringsprojektets kommande skeden. Även ett innehåll av några få procentandelar av andra ämnen, som vatten, vätesulfid (H_2S), svavel- och kväveoxider (SO_x och NO_x), kväve (N_2) och syre (O_2) - påverkar koldioxidens fysikaliska och kemiska egenskaper och därmed dess beteende och effekter. Man måste därför noggrant överväga i vilken grad andra ämnen finns närvarande när man utformar de olika processtegen; komprimering, transport och injektion, samt när man justerar driftförhållanden och utrustning.

Sammanfattningsvis är transport och injektering av stora mängder koldioxid redan möjligt. Om geologisk lagring av koldioxid ska kunna utnyttjas på bred front måste dock varje delsteg i processen utformas för att passa det enskilda projektet. De viktigaste faktorerna utgörs av koldioxidflödets termodynamiska egenskaper (fig. 3), flödeshastigheter, samt reservoarens egenskaper.



Figur 3
Densiteten (tätheten i kg per m³) hos oblandad (ren) koldioxid visas här som en funktion av temperatur och tryck. Den gula linjen utgör en typisk tryck- och temperatur-gradient i en sedimentationsbassäng. Reservoarens egenskaper vid djup över 800 m (cirka 8 megapascal, MPa) ger högre densiteter (blå toner). Den gröna linjen utgör fasgränsen mellan koldioxid i gas- respektive vätskeform. Typiska tryck- och temperatur-förhållanden vid avskiljning, transport respektive lagring ses vid A, B och C.

Vad händer med koldioxiden nere i lagringsutrymmet?

När koldioxiden pumpats ner i lagringsutrymmet kommer den att stiga uppåt och fylla reservoarens porer under takbergarten. Med tiden kommer en del av koldioxiden att lösas upp och så småningom omvandlas till mineral. Dessa processer tar olika lång tid och bidrar till att koldioxid kan lagras permanent.

Inläsningsmekanismer

När koldioxid pumpas ner i en reservoar, fyller den ut berggrundens porer, som i regel redan är fyllda med saltvatten.

Under injektering sätter nedanstående processer igång. Den första bedöms som viktigast och förhindrar att koldioxiden stiger upp till markytan. De andra tre medverkar till att lagringseffektiviteten och lagringssäkerheten ökar med tiden.

1. Ackumulering under takbergarten (strukturell fälla)

Eftersom komprimerad koldioxid är lättare än vatten, börjar den stiga uppåt. Rörelsen stannar upp när koldioxiden möter en tät bergart, den så kallade "takbergarten". Takbergarten består vanligen av lera eller salt och fungerar som en fälla som hindrar koldioxiden från att fortsätta uppåt, vilket innebär att den ackumuleras på undersidan av det täta lagret. I **figur 1** illustreras koldioxidens uppåtriktade rörelse genom berggrundens porer (i blått) tills den möter takbergarten.

2. Kvarhållning i små porer (kapillärfälla)

Denna typ av fälla uppkommer när porerna i berggrunden är så små att koldioxiden inte längre kan röra sig uppåt, trots att den är lättare än det omgivande vattnet. Processen sker främst medan koldioxid är i rörelse och kan normalt ta hand om några procent av den injekterade koldioxiden, beroende på berggrundens egenskaper.

3. Upplösning (fälla genom upplösning)

En mindre mängd av den nedpumpade koldioxiden löser upp sig, går i lösning, i det vatten som redan finns i reservoarens porutrymmen. En följd av upplösningen är att vatten som innehåller löst koldioxid blir tyngre än vatten utan koldioxid, och det tyngre vattnet rör sig därmed nedåt i reservoaren. Hur fort koldioxid löser sig i vattnet beror på kontakten mellan koldioxiden och vattnet. Mängden koldioxid som kan lösas upp begränsas av den maximala halt koldioxid som vattnet kan ta upp. Dock förnyas hela tiden kontakten mellan vatten och koldioxid på grund av koldioxidens stigande rörelse och det sjunkande koldioxidhaltiga vattnet. Detta gör att mängden koldioxid som kan lösas upp blir större. Ovanstående processer är ganska långsamma eftersom de pågår i de trånga porutrymmena. En grov uppskattning vid Sleipner-projektet tyder på att cirka 15 procent av den nedpumpade koldioxiden har löst upp sig efter tio års injektering.

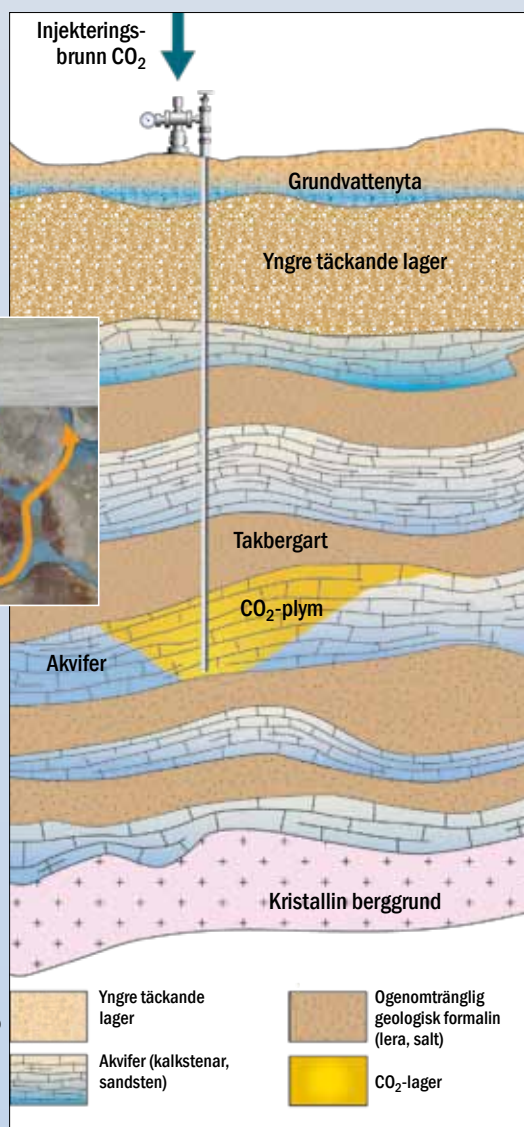
4. Mineralisering (mineralogisk fälla)

Koldioxid kan, särskilt i kombination med det befintliga saltvattnet, reagera med de mineral som finns i bergarten som bildar reservoaren. Beroende på pH och vilka mineral som berggrunden består av kan en del mineral lösas upp och andra nybildas (**fig. 2**). Uppskattningar i

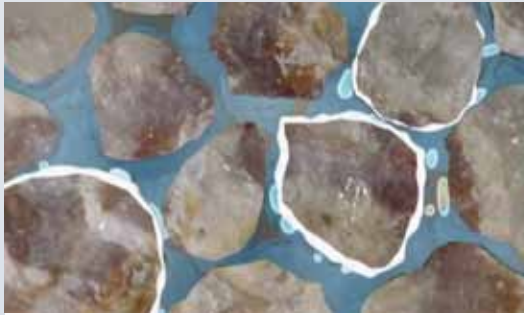
Mikroskopisk bild.



Figur 1
Injekterad koldioxid, som är lättare än vatten, stiger uppåt och stoppas av överliggande täta berggrundslager.



© BRMG im@gé

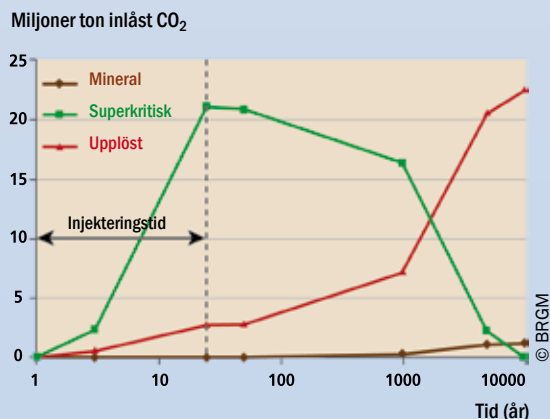


Figur 2
Komprimerad koldioxid rör sig uppåt (ljusblå bubblor), löser upp sig och reagerar med mineralkornen i berggrunden, vilket leder till fastläggning av kalkhaltiga mineral vid kornens ytterkanter (vitt).

Sleipnerprojektet tyder på att efter mycket lång tid kommer endast en ganska liten del av koldioxiden att ha tillfångatagits genom mineralisering. Efter 10 000 år har troligen endast fem procent av den injicerade koldioxiden mineraliserats, medan 95 procent har lösts upp, och ingen koldioxid finns kvar som en separat komprimerad vätska.

Hur viktiga dessa mekanismer är i förhållande till varandra beror på lagringsplatsen, det vill säga de plats-specifika förhållandena som råder i varje enskild reservoar. I kupolformade reservoarer kommer koldioxid till största delen bli kvar som en komprimerad vätska även under mycket långa tidsrymder, medan det mesta av den injicerade koldioxiden kommer att lösas upp eller mineraliseras i en horisontell reservoar som Sleipner.

Figur 3 visar hur koldioxid kommer att fördelas i de olika inläsningsmekanismerna för fallet Sleipner.



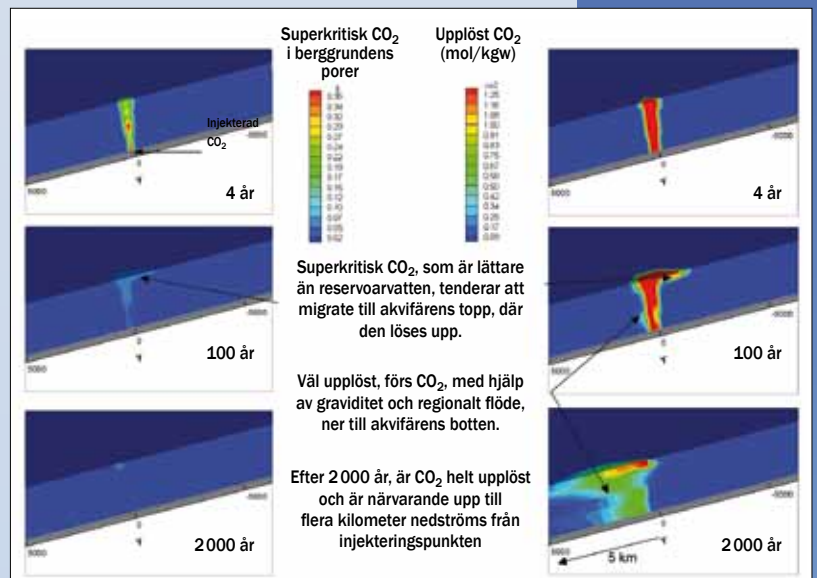
Figur 3
Flödessimuleringar visar hur fördelningen av koldioxid förändras över tiden i Sleipner-reservoaren. Koldioxiden hålls kvar i superkritisk fas av inläsningsmekanismerna 1 och 2, i löst form av mekanism 3, och i mineralform av mekanism 4.

Hur vet vi allt detta?

Kunskap om ovanstående processer kommer från fyra huvudsakliga informationskällor:

- **Laboratiemätningar:** experiment i liten skala avseende mineralisering, flöden och upplösning kan utföras på berggrundsprover och ge information om processer som pågår på kort sikt och i liten skala.
- **Matematiska simuleringar:** datamodeller har tagits fram som kan användas för att förutsäga hur koldioxid uppträder över betydligt längre tid (**fig. 4**). Man använder då laboratorieexperiment för att kalibrera (stämma av) simuleringarna.
- **Undersökningar av naturliga koldioxidreservoarer,** där koldioxiden (som vanligen har vulkaniskt ursprung) har kvarhållits i berggrunden under långa tidsrymder, ofta miljontals år. Sådana exempel brukar benämnas "naturliga analoger"*. Dessa platser ger oss information om hur gaser kan uppträda och om de mycket långsiktiga konsekvenserna av att koldioxid finns i berggrunden.
- **Övervakning av befintliga demonstrationsprojekt för geologisk lagring av koldioxid,** t.ex. Sleipner (utanför Norges kust), Weyburn (Kanada), In Salah (Algeriet) och K12-B (utanför Nederländernas kust). Resultaten från mer kortvariga simuleringar kan jämföras med faktiska fältdata och hjälpa till med att förfina modelleringarna.

Figur 4
3D-modellering av hur koldioxid rör sig i en akvifär, efter nedpumpning av 150 000 ton i den franska Dogger-akvifären under fyra års tid. Figuren visar superkritisk koldioxid (t.v.) och koldioxid upplöst i reservoarvattnet (t.h.) 4, 100 och 2 000 år efter injekteringen påbörjades. Simuleringen är baserad på fältmätningar och experiment.



Endast genom att hela tiden kontrollera och stämna av dessa fyra informationskällor mot varandra är det möjligt att få fram pålitlig kunskap om alla de processer som pågår 1 000 meter under oss.

Sammanfattningsvis vet vi att lagringssäkerheten brukar öka med tiden. Det mest kritiska momentet är att hitta en reservoar med en ovanförliggande lämplig takbergart som kan hålla kvar koldioxiden (strukturell fälla). Upplösning, mineralisering och kapillär infångning är processer som främjar infångningen genom att hindra koldioxid från att stiga upp till markytan.

Kan CO₂ läcka från lagringsutrymmet och vilka blir i så fall konsekvenserna?

Utifrån de studier som gjorts på naturliga system förväntar man sig inte att några betydande läckage kommer att uppstå vid noggrant utvalda lagringsplatser. Naturliga gasreservoarer hjälper oss att förstå vid vilka förhållanden som gas kan fångas in eller frigöras. Därutöver kan läckande reservoarer hjälpa oss att förstå vilka potentiella konsekvenser som kan uppstå vid koldioxidläckage.

Möjliga läckagevägar

Möjliga läckagevägar är i regel antingen konstgjorda (t.ex. djupa borrhål*) eller naturliga (t.ex. spricksystem och förkastningar).

Både aktiva och övergivna borrhål kan utgöra läckagevägar. För det första bildar de en direkt förbindelse mellan markytan och reservoaren, och för det andra består de av människan tillverkade material som kan korrodera på lång sikt (**fig. 1**). En ytterligare komplikation är att alla borrhål inte är borrade på samma sätt, och här är nyare borrhål i regel säkrare än äldre. Emellertid är den förväntade risken för läckage via borrhål låg, dels eftersom både nya och gamla borrhål kan övervakas på ett effektivt sätt med hjälp av känsliga och noggranna geokemiska och geofysiska metoder, och dels eftersom teknik redan finns inom oljeindustrin för de eventuella åtgärder som kan behövas. Läckage längs naturliga förkastningar och sprickor som kan finnas i takbergarten eller i lagren ovanför är svårare att hantera, eftersom det då rör sig om oregelbundna, plana strukturer med varierande genomsläpplighet. God vetenskaplig och teknisk förståelse för både läckande och läckagefria natur-

liga system ger oss möjlighet att utforma lagringssprojekt med samma egenskaper som de naturliga reservoarer som lagrat koldioxid och metangas i tusentals till miljontals år.

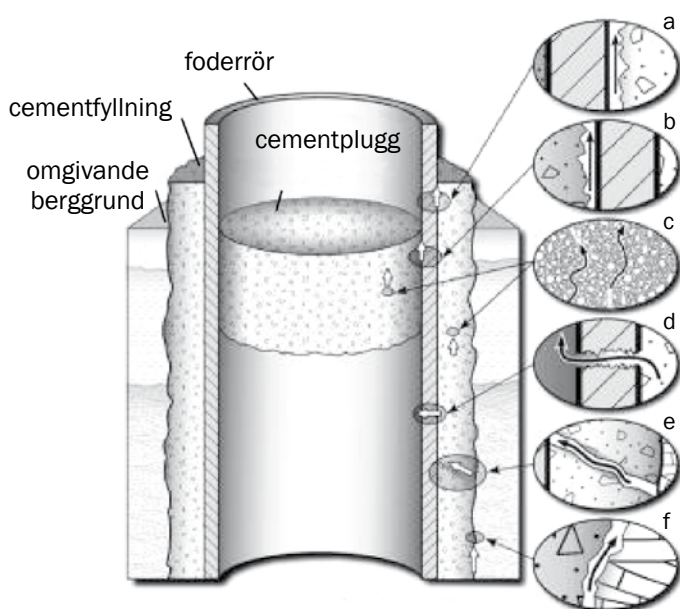
Vad kan vi lära oss av naturliga analoger?

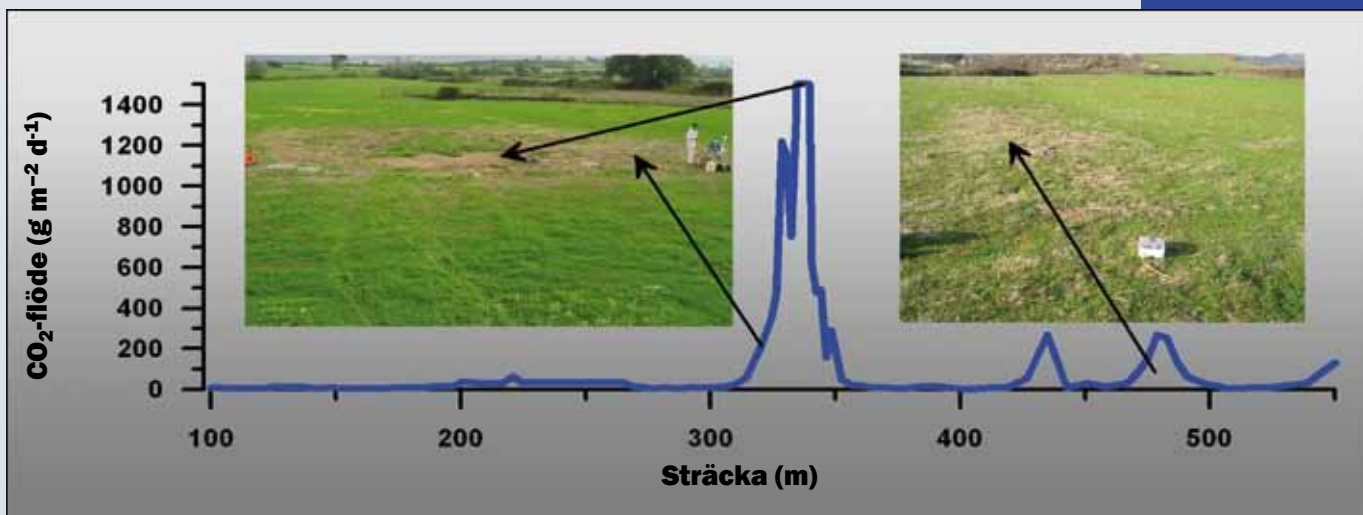
Naturliga system (s.k. naturliga analoger) utgör en ovärderlig källa till information som kan förbättra vår förståelse för hur gaser rör sig på djupet och hur gasutbyte sker mellan jorden och dess atmosfär. De viktigaste erfarenheterna som dragits från studier gjorda på ett stort antal läckande och läckagefria naturliga reservoarer är:

- Vid gynnsamma geologiska förhållanden kan naturligt uppkommen gas lagras i hundratusentals till miljontals år.
- Enstaka isolerade gasreservoarer och gasfickor återfinns till och med i de mest ogynnsamma geologiska miljöer (områden med vulkanism).
- Förflyttning av större gasmängder kräver advektion (det vill säga måste ske via ett tryckdrivet flöde) eftersom diffusion är en mycket långsam process.
- För att advektion ska uppstå krävs att vätskeförhållandena i reservoaren ligger nära det litostatiska* trycket så att sprickor och förkastningar hålls öppna eller för att mekaniskt skapa nya läckagevägar.
- Områden där naturligt förekommande gas läcker upp till ytan finns nästan bara i mycket sprickrika, seismiskt och vulkaniskt aktiva områden, och här sker läckaget längs aktiva eller nyligen aktiverade sprickor.
- Större gasläckage sker endast undantagsvis och är i regel begränsade till sprickrika vulkaniska och geotermiska områden där koldioxid uppstår kontinuerligt genom naturliga processer.
- Avvikande gasmängder vid markytan uppstår generellt bara lokalt och påverkan på närmiljön blir begränsad.

Det krävs således en kombination av särskilda omständigheter för att läckage ska uppstå. Därmed är det högst osannolikt att en väl vald och noggrant utformad geologisk lagringsplats för koldioxid kommer att läcka. Även om ris-

Figur 1
Möjliga läckagevägar för koldioxid i ett borrhål (brunn). Läckage via omvandlat material (c, d, e) eller längs fogar och kanter (a, b, f).





kerna för läckage är små måste läckageprocesserna och deras potentiella konsekvenser vara väl kända för att säkerställa rätt val, utformning och drift av såkrast möjliga lagringsplatser för koldioxid.

Påverkan på människor

Vi andas in koldioxid hela tiden. Koldioxid är bara farligt för hälsan vid mycket höga halter, värden på upp till 50 000 ppm (fem procent) orsakar huvudvärk, yrsel och illamående. Halter ovanför denna nivå kan vara dödliga om man utsätts under lång tid, framförallt på grund av kvävning om luftens syrehalt går ner under den nivå på 16 procent som krävs för att man människan ska kunna överleva. Om läckage av koldioxid sker till ett öppet eller plant område så skingras dock gasen snabbt, även vid svaga vindar. Den möjliga risken för människor är därmed begränsad till läckage i slutna miljöer eller svackor i terrängen. Där kan koldioxidhalterna bli högre eftersom koldioxid är tyngre än luft och brukar ansamlas nära marken. Kunskap om områden där det sker en naturlig gasavgång kan användas för att förebygga och hantera risker. I själva verket bor det många människor i områden där naturlig gasavgång förekommer dagligen. I Ciampino nära Rom i Italien ligger husen endast 30 meter från öppningar i marken där gasavgång sker. Där sker utsläpp till luften av cirka sju ton koldioxid per dag och koldioxidhalterna i jorden uppgår till 90 procent. Lokalbefolkningen undgår farorna genom att vidta enkla försiktighetsåtgärder som att inte sova i källaren och att vädra sina hus ordentligt.

Påverkan på miljön

Vilken typ av påverkan som skulle kunna uppstå på ekosystemet kan variera beroende på om lagringsplatsen återfinns till havs eller under landytan.

Den främsta konsekvensen av koldioxidläckage för marina ekosystem utgörs av lokal sänkning av pH-halten och de effekter som det kan medföra, framför allt för fastsittande djur som lever på havsbotten.

Påverkan är dock begränsad till närområdet och ekosystemet visar tecken på återhämtning när läckaget upphör

I stora drag kan påverkan på ekosystem på land sammanfattas som följer:

- **Växtlighet** – Även om gashalter i jord på upp till 20-30 procent koldioxid kan fungera som gödsel för växtligheten och öka tillväxttakten för vissa arter, kan högre halter vara dödliga för vissa, men inte alla, växter. Påverkan är dock mycket lokal kring läckagepunkten och växtligheten förblir frodig och välmående endast några meter bort (fig. 2).
- **Grundvattenkvalitet** – Grundvattnets kemiska sammansättning kan förändras av ett tillskott av koldioxid, eftersom vattnet då blir surare och ämnen från berggrundens mineral kan lösas upp i vattnet. Även om koldioxid skulle läcka in i en dricksvattenakvifer förblir påverkan lokal. Uppskattningar av effekternas omfattning görs för närvarande av forskare. Intressant är att många akviferer i Europa har naturligt förhöjda halter av koldioxid, och vattnet tappas upp på flaska och säljs som "kolsyrat mineralvatten".
- **Berggrundskvalitet** – Försurning av grundvatten kan leda till att olika bergarter löses upp, minskad berghållfasthet och hålligheter i marken. Denna typ av påverkan sker dock endast under mycket specifika förhållanden (seismiskt aktiva akviferer med höga flöden och kalkrika mineral), som sannolikt inte kommer att påträffas ovanför en av människan utformad lagringsplats.

Sammanfattningsvis kommer effekterna från ett hypotetiskt koldioxidläckage bero på de lokala förhållandena på plats. Ingående kunskap om den underliggande geologiska och strukturella miljön ger oss möjlighet att upptäcka möjliga läckagevägar, analysera koldioxidens beteende och välja platser med låg sannolikhet för läckage. Därmed kan vi bedöma och förhindra någon större påverkan på människa och miljö.

Figur 2
Påverkan på växtlighet vid koldioxidläckage, med ett högt flöde (t.v.) och ett lägre flöde (t.h.).
Påverkan är begränsad till det område där koldioxidutsläppet sker.

Hur kan vi övervaka lagringsplatsen på djupet och vid markytan?

Alla lagringsutrymmen för koldioxid måste övervakas - av driftmässiga, säkerhetsmässiga, miljömässiga, samhällsmässiga och ekonomiska skäl. En strategi måste utarbetas för att fastställa exakt vad som ska övervakas och hur det ska ske.

Varför behövs övervakning?

Övervakning av lagringsplatserna är av avgörande betydelse för att säkerställa att syftet med den geologiska lagringen uppnås, nämligen att koldioxid som härstammar från människans utsläpp ska tas bort ur kretsloppet på lång sikt. Det finns ett flertal skäl att övervaka lagringsplatserna, t.ex.:

- **Driftmässiga skäl:** för att kontrollera och optimera injekteringen av koldioxid.
- **Säkerhets- och miljöskäl:** för att minimera och förhindra påverkan på människor, djur och ekosystem i närheten av lagringsplatsen, och för att säkerställa minskad global klimatpåverkan.
- **Sociala skäl:** för att tillhandahålla den information som allmänheten behöver för att förstå att lagringsplatsen är säker samt medverka till att skapa förtroende hos allmänheten.
- **Ekonomiska:** för att skapa förtroende på marknaden för CCS-tekniken och för att verifiera vilka koldioxidmängder som förvaras, så att dessa kan medräknas som "inte utsläppta" i de kommande faserna av EU:s system för handel med utsläppsrätter, ETS (Emission Trading Scheme).

Övervakning av miljöförhållanden både före och efter anläggningen tagits i drift är ett viktigt lagkrav i EU-direktivet om geologisk lagring av koldioxid från den 23 april 2009. Verksamhetsutövare måste kunna visa att lagringsplatsen uppfyller lagkraven och att den kommer att göra det även på lång sikt. Övervakning är en viktig del av driften som kommer att minska osäkerheterna kring vad som händer under lagring. Därför bör övervakningen utformas med en tydlig koppling till anläggningens säkerhetsarbete.

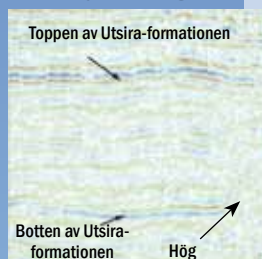
Vilka mål ska vi ha för övervakningen?

Övervakningen kan fokuseras på flera olika mål och processer inom lagringsplatsen som t.ex:

- Visualisering av plymen – man följer hur koldioxiden rör sig från injekteringspunkten. Detta ger viktiga data för att kunna kalibrera de modeller som ska förutsäga den framtida fördelningen av koldioxid inom lagringsutrymmet. Ett flertal etablerade metoder kan användas. Återkommande seismiska mätningar är en särskilt användbar metod som med framgång nyttjats vid ett flertal demonstrations- och pilotprojekt (**fig. 1**).
- Takbergartens skick – man behöver bedöma om koldioxiden hålls kvar inom lagringsutrymmet och kunna få tidig förvarning om eventuell oväntad migration av koldioxid. Detta kan vara särskilt viktigt under projektets injekteringsfas, då reservoartrycket tillfälligt ökar kraftigt.
- Brunnarnas skick – en viktig aspekt eftersom djupborrade brunnar skulle kunna utgöra en direkt förbindelse för koldioxid att ta sig upp till markytan. Injekteringsbrunnar för koldioxid samt eventuella observationsbrunnar och befintliga övergivna brunnar måste övervakas noggrant under och efter nedpumpningsskedet för att förhindra oväntat läckage av koldioxid. Övervakning görs också för att bekräfta att de brunnar som inte längre behövs har tätats på ett effektivt sätt. Befintliga system för övervakning som används som standard inom olje- och gasindustrin kan installeras inuti eller ovanpå brunnarna för att garantera säkerheten och ge möjlighet till förvarning.
- Läckage genom berggrunden ovanför takbergarten. Vid lagringsplatser där den ovanpåliggande berggrunden har liknande egenskaper som takberget, kan den en viktig del av skyddet mot risken för koldioxidläckage till luft eller hav. Övervakning av ovanpåliggande lager kommer att krävas om övervakningen av reservoarförhållanden eller runt takbergarten påvisar ett oväntat läckage. För denna övervakning kan många av de metoder som används för kontroll av plymutbredning eller övervakning av takbergartens skick användas.
- Läckage vid markytan och luftmätningar. För att se till att nedpumpad koldioxid inte har läckt upp

Figur 1
Seismiska profiler från övervakning av koldioxidplymens* utbredning vid Sleipner-projektet före injektering (som påbörjades 1996) och efter injektering (3 respektive 5 år senare).

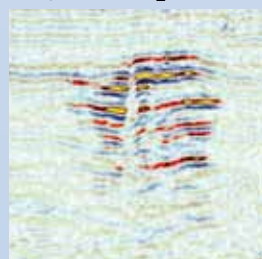
Före injektering (1994)



2,35 Mt CO₂ (1999)



4,36 Mt CO₂ (2001)



till markytan finns ett antal sätt att hitta läckor, bedöma och övervaka koldioxidfördelning i jorden samt dess spridning i luften eller i havsmiljön. Dessa omfattar geokemiska och biokemiska metoder samt fjärrövervakningsteknik (fig. 2).

- Lagrad mängd koldioxid för reglerings- och beskattningsändamål. Även om mängden koldioxid som injekterats kan mätas vid brunnen på ett enkelt sätt, är det tekniskt komplicerat att beräkna mängden i reservoaren. Om ett läckage upp till markytan sker måste utsläppsmängderna beräknas för att kunna bokföra dessa inom nationella sammanställningar över utsläpp av växthusgaser och inom det framtida ETS-systemet.
- Rörelser i marken och mikroseismicitet*. Ett ökat tryck i reservoaren p g a injektering av koldioxid kan, i särskilda fall, öka risken för mikroseismicitet och småskaliga markrörelser. Övervakningsteknik för mikroseismicitet och fjärrmätningar (mätning från flygplan eller satellit) finns som kan mäta även mycket små förändringar.

Hur sker övervakningen?

Ett stort antal olika övervakningsmetoder har redan använts vid befintliga demonstrations- och forskningsprojekt. Här ingår både metoder som direkt mäter koldioxid och indirekta mätningar av effekterna på berggrunden, formationsvätskor och miljön. Analys av vätskor i djupborrade brunnar och mätningar av gashalter i jord och luft är exempel på direkta mätningar. Geofysiska mätningar och övervakning av tryckförändringar i brunnar eller pH-förändringar i grundvattnet utgör exempel på indirekta mätningar.

Både lagringsutrymmen till havs och på land kommer att behöva övervakas. Valet av rätt övervakningsmetoder kommer att bero på lagringsplatsens tekniska och geologiska egenskaper samt syftet med övervakningen. En rad olika övervakningsmetoder finns redan tillgängliga (fig. 3). Många av dessa är väl etablerade inom olje- och

gasindustrin och anpassas nu för användning inom koldioxidlagring. Forskning pågår också för att optimera befintliga metoder och för att utveckla innovativ teknik. Målen är förbättrad noggrannhet och tillförlitlighet, minskade kostnader, ökad automatisering, samt att kunna visa på metodernas effektivitet.

Strategi för övervakning

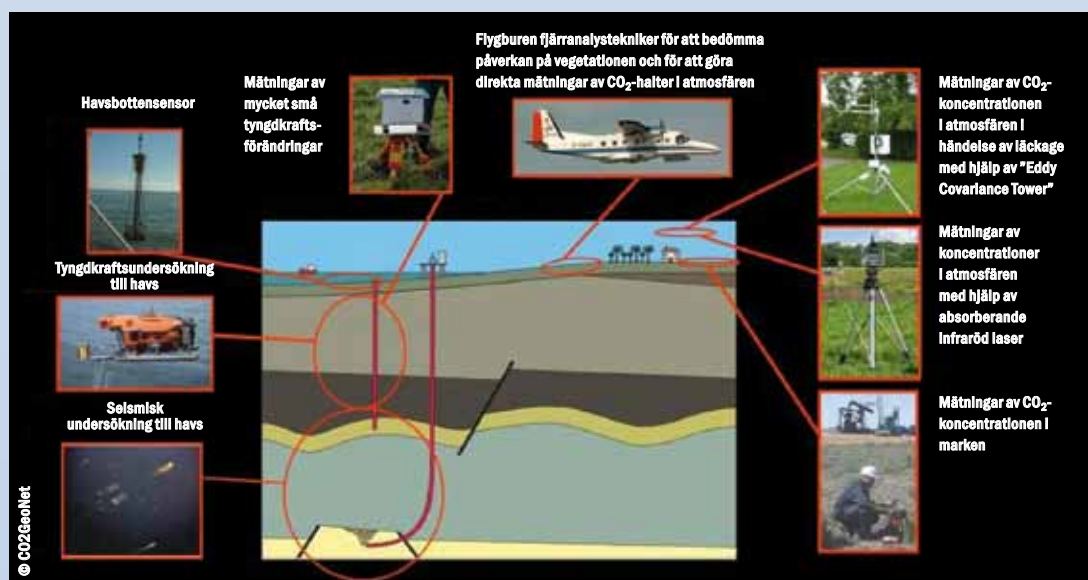
När man utformar en övervakningsstrategi måste många beslut tas som beror på plats-specifika förhållanden avseende både geologi och teknik, t.ex. reservoarens geometri och djup, koldioxidens förväntade utbredning, möjliga läckagevägar, geologiska förhållanden i ovanförliggande berggrund, pumpningstid och pumpflöde, samt förhållanden vid markytan: terräng, befolkningstäthet, infrastruktur och ekosystem. När man fattat beslut om vilka mätmetoder och mätpunkter som är mest lämpliga, måste utgångsmätningar göras innan man sätter igång injekteringsfasen. Dessa initiala mätningar fungerar sedan som referensvärden för alla framtida mätningar. Slutligen måste ett övervakningsprogram alltid vara flexibelt så att det kan förändras i takt med lagringsprojektet. En övervakningsstrategi som kan samordna alla dessa aspekter och samtidigt leda till förbättrad kostnadseffektivitet, kommer att utgöra en viktig del av projektets riskanalys, och hjälpa till att verifiera projektets säkerhetsarbete och effektivitet.

Sammanfattningsvis vet vi att övervakning av geologisk lagring av koldioxid redan är möjlig tack vare de många metoder som finns på marknaden eller är under utveckling. Forskning pågår, inte bara att utveckla nya verktyg (framför allt för användning på havsbotten), utan också för att optimera övervakningen och minska dess kostnader.



© CO₂GeoNet

Figur 2
Övervakningsboj med solpaneler för energiförsörjning, flytkroppar samt instrument som tar gasprover vid havsbotten.



Figur 3
Ett litet urval av de många olika metoder som finns för att övervaka de olika delarna av ett koldioxidlager.



Vilka säkerhetskriterier måste införas och uppfyllas?

För att tillse att lagringen blir säker och effektiv måste villkor för projektets utformning och drift sättas av myndigheterna och uppfyllas av verksamhetsutövaren.

Även om geologisk lagring av koldioxid nu är generellt accepterad som ett trovärdigt alternativ för att minska klimatpåverkan, måste man först fastställa säkerhetskriterier med avseende på människors hälsa och lokal miljö innan man kan komma igång på bred front med lagringsverksamhet i industriell skala. Dessa kriterier kan definieras som de krav på verksamhetsutövaren som ställs av myndigheterna för att säkerställa att påverkan på lokal hälsa, säkerhet och miljö (inklusive grundvattenresurser) är försumbar på kort, medellång och lång sikt.

En kärnfråga när det gäller koldioxidlagring är att lagringen ska vara permanent och därmed förväntas den ske utan läckage. Det finns dock ett "vad-händer-om?"-scenario, och därför måste riskbedömningar göras och verksamhetsutövare måste respektera att åtgärder krävs för att förhindra läckage eller avvikande händelser på lagringsplatsen. Enligt IPCC ska den nedpumpade koldioxiden bli kvar i berggrunden i åtminstone 1000 år. Detta ska ge koldioxidhalten i luften tid att stabiliseras eller minska genom ett naturligt utbyte mellan luft och hav, och därmed leda till en så liten ökning av jordens temperatur som möjligt. Lagringens lokala påverkan måste dock bedömas utifrån flera tidsperspektiv; från dagar upp till många tusen år.

Ett lagringsprojekt omfattar flera viktiga skeden under sin livstid (**fig. 1**). Säkerheten ska hela tiden tryggas genom:

- Omsorgsfullt val och kartläggning av lagringsplats.
- Att genomföra säkerhetsanalyser.
- Att säkerställa korrekt drift.

- Framtagande av en lämplig övervakningsplan.
- Fastställande av en åtgärdsplan.

De grundläggande målsättningarna i relation till ovanstående är att:

- Säkerställa att koldioxid kvarhålls i reservoaren.
- Tillse att alla borrhål/brunnar är i fullgott skick.
- Bevara reservoarens fysiska egenskaper (porositet, genomsläpplighet, injektivitet) och takbergartens täthet.
- Beakta koldioxidströmmens sammansättning, med särskild hänsyn till eventuella orenheter

som inte avlägsnats under avskiljningsprocessen. Detta är viktigt för att undvika skadlig inverkan på injektionsbrunnar, reservoaren, takberget, och, i händelse av läckage, eventuellt ovanförliggande grundvatten.

Säkerhetskriterier vid utformning

Innan verksamheten påbörjas måste man visa att säkerheten är tillfredsställande.

Vid val av lagringsplats ska framför allt följande aspekter undersökas:

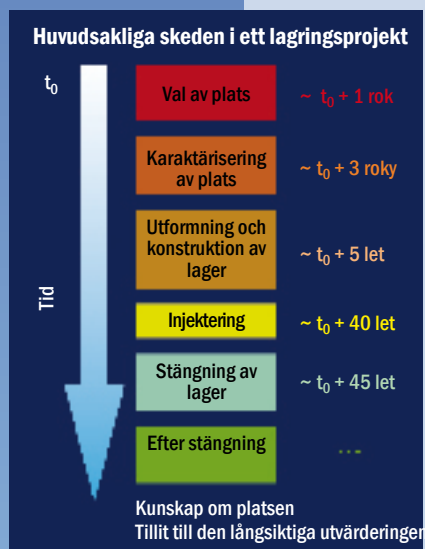
- reservoaren och takbergarten
- berggrunden ovanför takbergarten, särskilt lager med låg genomsläpplighet som kan fungera som sekundär tätning
- förekomsten av genomsläppliga förkastningar eller brunnar som kan fungera som läckagevägar upp till markytan
- dricksvattenakviferer
- restriktioner eller begränsningar på grund av miljö- eller befolkningsförhållanden på markytan.

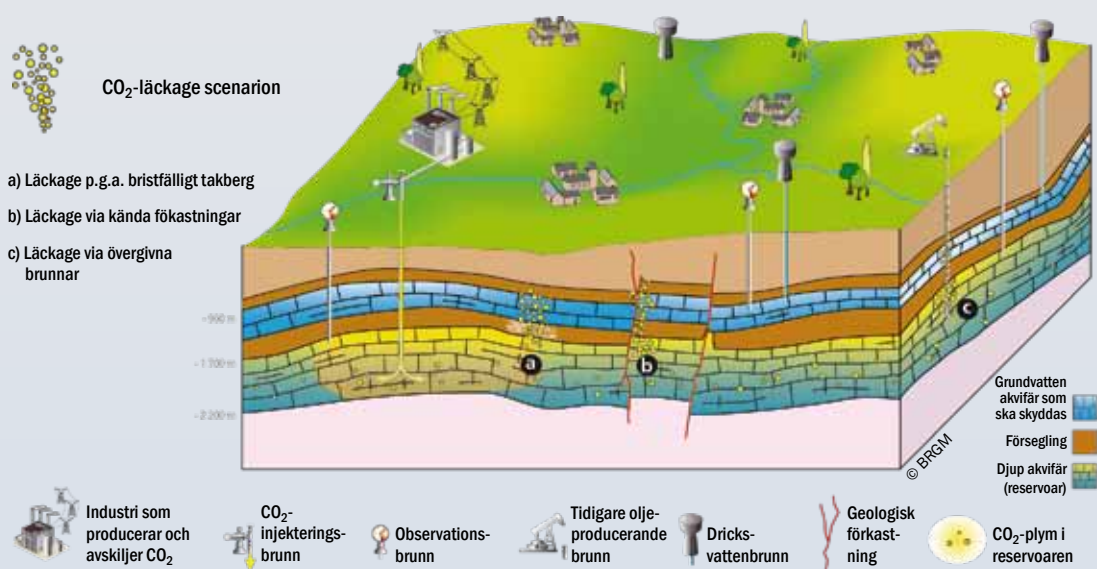
Metoder som används inom olje- och gasprospektering används för att bedöma lagringsplatsens geologi och geometri. Genom flödesmodellering samt geomekaniska och kemiska modelleringar av koldioxid i reservoaren kan man uppskatta hur koldioxiden kommer att uppträda på kort och lång sikt, och definiera förutsättningarna för en effektiv injektering.

Genom noggrann kartläggning av lagringsplatsen kan man se hur reservoaren fungerar under "normala" förhållanden, motsvarande en plats lämplig för lagring där man med säkerhet vet att koldioxiden kommer att hållas kvar i reservoaren.

Risikanalysen behöver sedan beakta mindre troliga framtida scenarier under lagringsplatsens livscykel, inklusive oväntade händelser. Det är särskilt viktigt att föreställa sig potentiella läckagevägar, möjlig exponering och vilka effekter detta kan få (**fig. 2**). Varje läckagescenario bör analyseras av experter och om möjligt bör man använda sig av numerisk modellering för att bedöma sannolikheten för att scenariot ska uppkomma och hur allvarliga konsekvenserna kan bli. Till exempel bör koldioxidplymens utbredning kartläggas omsorgsfullt för att upptäcka eventuella förbindelser med sprickzoner. I risikanalysen bör man noga utvärdera känsligheten för variationer i utgångsparametrar och osäkerheter. Bedömning av koldioxidens möjliga effekter på

Figur 1
De olika stegen i ett lagringsprojekt.





Figur 2
Exempel på möjliga
läckagevägar.

människor och miljö bör ske genom miljökonsekvensbeskrivningar, vilket är normalt i tillståndsprocesser för industrianläggningar. I en sådan process kommer både normala scenarier och läckagescenarier att övervägas för att bedöma eventuella risker som kan förknippas med anläggningen. Övervakningsprogrammet bör tas fram, på både kort och lång sikt, med utgångspunkt i riskanalysen. I programmet ska ingå kontroll av de kritiska aspekter som fastställts för de olika scenarierna. Viktiga målsättningar är att beskriva koldioxidplymens utbredning, kontrollera att brunnar och takbergarten är i gott skick, upptäcka eventuella koldioxidläckage, kontrollera grundvattenkvaliteten och att säkerställa att ingen koldioxid har nått markytan. Åtgärdsplanen är den sista delen av säkerhetsanalysen, och den ska syfta till att beskriva vilka korrigerande åtgärder som ska vidtas vid eventuella läckage eller avvikande händelser. Den ska innefatta takbergarten och brunnarnas funktion, under och efter injekteringsfasen, samt utvärdera extrema åtgärdsåtgärder som t.ex. att reversera lagringsförloppet. Befintlig kunskap omfattar metoder som ofta används inom olje- och gasindustrin, bl. a. brunnreparationer, minskning av injekteringsstrycket, delvis eller total urpumpning av koldioxid, urpumpning av vatten för att minska trycket, borttagning av ytliga gasansamlingar m.m.

Säkerhetskriterier under drift och efter avslut

Säkerheten är huvudsakligen en fråga för driftfasen: när injekteringsfasen avslutats kommer minskningen av trycket innebära en ökad säkerhet.

Förtroendet för kunskapen om säker injektering och lagring av koldioxid vilar på den erfarenhet som finns inom industrin. Koldioxid är en ganska vanlig produkt som används inom olika industrier, och hanteringen av ämnet ger därmed inte upphov till några okända problem. Utformning och kontroll av driftfasen kommer främst att baseras på den kunskap som finns inom olje- och gasindustrin, särskilt avseende lagring av naturgas och utökad oljeutvinning (EOR)*. De främsta parametrarna som behöver kontrolleras är:

- Injekteringsstryck och flödes hastighet – trycket bör hållas under gränstrycket för hållfastheten, det vill säga det tryck som kan orsaka sprickbild-

ning i takbergarten;

- Injekterad mängd, för att uppnå den mängd som fastställts i modelleringarna;
- Koldioxidströmmens sammansättning;
- Injekteringsbrunnarnas funktion samt eventuella borrhål och brunnar som finns inom eller i närheten av koldioxidplymens utbredningsområde;
- Koldioxidplymens utbredningsområde och eventuella läckage;
- Markstabilitet.

Under injektering kommer man hela tiden behöva kontrollera hur koldioxiden beter sig i jämförelse med tidigare bedömningar. Detta förbättrar kontinuerligt vår kunskap om lagringsplatsen. Om några avvikelser uppträder bör övervakningsprogrammet uppdateras och vid behov korrigerande åtgärder vidtas. Om man misstänker ett läckage någonstans, bör man använda lämplig utrustning för att övervaka detta område, hela vägen från reservoaren upp till markytan. Därmed kan eventuella koldioxidläckage upptäckas och också om några effekter uppstått som kan skada dricksvattenakvifärer, miljö eller människor.

När injekteringen avslutats påbörjas avslutningsfasen: alla brunnar bör stängas på ett korrekt sätt innan de överges, övervakningsprogrammet och modelleringarna bör uppdateras och vid behov korrigeringsåtgärder vidtas för att minska riskerna. När risknivåerna bedöms som tillräckligt låga ska ansvaret för lagringen överlåtas till statliga myndigheter. Övervakningsprogrammet kan då avslutas eller minimeras.

EU-direktivet om geologisk lagring av koldioxid ger grunden till ett regelverk som ska säkerställa att avskiljning och lagring av koldioxid blir ett reellt alternativ för minskning av klimatpåverkan, och att det kan göras på ett säkert och ansvarsfullt sätt.

Sammanfattningsvis är tillämpning av säkerhetskriterier av avgörande betydelse för att framgångsrikt kunna införa koldioxidlagring inom industrin. Kriterierna måste anpassas till varje enskild lagringsplats. De kommer att vara särskilt viktiga för att få allmän acceptans för koldioxidlagring, och helt nödvändiga i tillståndsprocessen, där myndigheterna måste fastställa detaljerna kring vilka kravnivåer som ska gälla för säkerheten.

Akvifär: genomsläpplig avgränsad berggrund som innehåller vatten. Ytligare akvifärer innehåller sötvatten som kan användas till dricksvatten. Djupa akvifärer innehåller salt vatten som inte kan nyttjas. De kallas saltvattensakvifärer.

Brunn/borrhål: ett cirkulärt hål som skapats genom borrhning, ofta ett djupt hål med liten diameter, t.ex. en djupborrad brunn.

CCS: CO₂ Capture and Storage, avskiljning och lagring av koldioxid.

CSLF: Carbon Sequestration Leadership Forum (ung. "ledarskapsforum för borttagning av kol"). Ett internationellt initiativ inom klimatfrågan med fokus på utvecklingen av bättre och mer kostnadseffektiva metoder för att avskilja, transportera och långtidslagra koldioxid.

Enhanced Oil Recovery (EOR): "utökad oljeutvinning" - en metod som ökar oljeproduktionen genom att man injekterar ämnen (t.ex. ånga eller koldioxid) för att öka oljans mobilitet och därmed möjligheten att utvinna ytterligare mängder ur reservoaren.

EU Geocapacity: ett avslutat forskningsprojekt där man bedömde Europas sammanlagda kapacitet för geologisk lagring av koldioxid som orsakats av människan.

Genomsläpplighet: se Permeabilitet.

GESTCO: ett redan genomfört europeiskt forskningsprojekt där möjligheterna för geologisk lagring av koldioxid uppskattades för åtta länder (Norge, Danmark, Storbritannien, Belgien, Nederländerna, Tyskland, Frankrike och Grekland).

IEAGHG: International Energy Agency - Greenhouse Gas R&D programme. Ett internationellt samarbete med syfte att: utvärdera metoder för minskning av utsläppen av växthusgaser, att sprida resultaten från dessa utredningar och att fastställa mål för forskning, utveckling och demonstration, samt att främja relevant arbete.

Injektivitet: beskriver hur lätt det är att injektera ett ämne (t.ex. koldioxid) i en geologisk formation. Definitionen för injektivitet är injekteringshastigheten dividerat med skillnaden mellan trycket vid injekteringspunkten inuti brunnen och trycket i formationen.

IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change (FNs klimatpanel). Organisationen bildades 1988 av

WMO (World Meteorological Organization) och UNEP (United Nations Environment Programme) för att utvärdera sådan naturvetenskaplig, teknisk och samhällsekonomisk information som är relevant för förståelsen av klimatzändringen, dess potentiella konsekvenser och möjligheter till anpassning och åtgärder. IPCC och Al Gore tilldelades Nobels fredspris år 2007.

Koldioxidplym: utbredningen av koldioxid i superkritisk form i reservoaren.

Litostatiskt tryck: den kraft som berggrund under jord utsätts för av den jord- och berggrund som finns ovanför. Det litostatiska trycket ökar med djupet.

Mikroseismicitet: lätta vibrationer eller skakningar i jordskorpan som inte är relaterade till jordbävningar utan kan ha flera olika naturliga och artificiella orsaker.

Naturlig analog: en naturligt förekommande koldioxidreservoar. Det finns både läckande och täta reservoarer och genom att studera dessa kan vi förbättra vår förståelse för vad som händer på lång sikt med koldioxid i djupa geologiska system.

Permeabilitet: förmågan eller kapaciteten hos porös berggrund att släppa igenom vätska; permeabiliteten är ett mått på hur lätt vätskan rör sig under tryck.

pH: mått på surheten i en lösning, där pH 7 motsvarar neutralt läge.

Porositet: Den delen av totalvolymen av en bergart som inte upptas av mineral. Dessa håligheter kallas porer och de kan fyllas med vätskor och gaser. I djupa berggrundslager fylls porerna i regel med saltvatten men även med olja eller gas, t.ex. metangas, eller också med naturligt förekommande koldioxid.

Reservoar: Berggrund eller sediment som är tillräckligt porös och genomsläpplig för att kunna ta emot och lagra koldioxid. Reservoarer av sandsten eller kalksten är vanligast.

Superkritisk: ett tillstånd som ett ämne befinner sig i när kritiska värden för tryck och temperatur överstigs (31.03 °C och 7.38 MPa för koldioxid). Egenskaperna hos superkritiska vätskor varierar kontinuerligt, från att vara mer gasliknande vid lägre tryck till mer vätske-liknande vid höga tryck.

Takbergart: ett tätt berggrundslager som utgör en barriär för vätskor och gaser och som bildar en fälla ovanför en reservoar.

Utökad oljeutvinning: se Enhanced Oil Recovery.

Mer information:

FN:s Klimatpanels (IPCC:s) rapport om CCS:

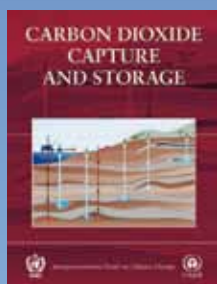
http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srccs/srccs_wholereport.pdf

Europakommissionens hemsida om CCS:

http://ec.europa.eu/clima/policies/lowcarbon/ccs_en.htm

IEA-GHG:s övervakningsverktyg:

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



Vad kan CO₂GeoNet göra för dig?



CO₂GeoNet är den europeiska vetenskapliga grupp som du kan vända dig till för klar och begriplig information om geologisk lagring av koldioxid, en nytänkande och kraftfull teknik för att begränsa klimatförändringar. CO₂GeoNet initierades av den Europeiska kommissionen som ett nätverk, "Network of Excellence" under det sjätte ramprogrammet (EC FP6 2004-2009). Det förenar 13 institutioner från sju europeiska länder, alla med hög internationell profil och kritisk massa gällande forskning om geologiska lagring av koldioxid. 2008 registrerades CO₂GeoNet som en icke vinstdrivande organisation under fransk lagstiftning för att fortsätta sina aktiviteter efter projektets avslutande.

CO₂GeoNet har en bred erfarenhet av forskningsprojekt som berör reservoaren, takbergarten, potentiella vägar för läckage av koldioxid till markytan, övervakningsverktyg, potentiell påverkan på människor och ekosystem, samt kommunikation till allmänheten. CO₂GeoNet erbjuder en rad olika tjänster inom fyra olika områden 1) gemensam forskning, 2) kompetensutveckling, 3) vetenskaplig rådgivning, 4) information och kommunikation.

CO₂GeoNet har med tiden blivit starkare och blivit en långsiktig vetenskaplig referens och auktoritet i Europa, och som kan ge den nödvändiga vetenskapliga hjälpen för en storskalig och säker utveckling av geologisk lagring av koldioxid. Utvidgningen av denna gemenskap för att få täckning över hela Europa är på väg genom projektet CGS Europe, en koordinationsaktion finansierad av EC FP7 (2010 - 2013). CGS Europe binder samman kärnan av de CO₂GeoNet associerade institutionerna med 21 andra forskningsinstitutioner, och inkluderar 28 europeiska länder (24 medlemsstater och fyra associerade länder). Detta har resulterat att en pool av flera hundra forskare finns tillgängliga, kunniga att ta itu med alla aspekter av geologisk lagring av koldioxid genom multidisciplinärt samarbete. Vårt syfte är att ge intressegrupper och allmänheten oberoende och vetenskapligt sund information om geologisk lagring av koldioxid.



CO₂GeoNet: the European network of Excellence on the Geological Storage of CO₂



www.co2geonet.eu

BGR (Tyskland); **BGS** (Storbritannien); **BRGM** (Frankrike); **GEUS** (Danmark); **HWU** (Storbritannien); **IFPEN** (Frankrike); **IMPERIAL** (Storbritannien); **NIVA** (Norge); **OGS** (Italien); **IRIS** (Norge); **SPR Sintef** (Norge); **TNO** (Nederländerna); **URS** (Italien).

CGS Europe: the Pan-European Coordination Action on the Geological Storage of CO₂



www.cgseurope.net

CO₂GeoNet (de 13 medlemmar som är uppräknade ovan); **CzGS** (Tjeckien); **GBA** (Österrike); **GEOCOMAR** (Rumänien); **GEO-INZ** (Slovenien); **G-IGME** (Grekland); **GSI** (Irland); **GTC** (Litauen); **GTK** (Finland); **LEGMC** (Lettland); **ELGI** (Ungern); **LNEG** (Portugal); **METU-PAL** (Turkiet); **PGI-NRI** (Polen); **RBINS-GSB** (Belgien); **SGU** (Sverige); **SGUDS** (Slovakien); **S-IGME** (Spanien); **SU** (Bulgarien); **TTUGI** (Estland); **UB** (Serbien); **UNIZG-RGNF** (Kroatien)

CO₂GeoNet är välkänt på både den europeiska och på den internationella arenan

CO₂GeoNet stöds av CSLF (the Carbon Sequestration Leadership Forum)



CO₂GeoNet har ett nära samarbete med IEAGHG (the Greenhouse Gas Programme of International Energy Agency)



Broschyrans bakgrund

För att öka allmänhetens kunskap om geologisk lagring av koldioxid har CO₂GeoNet tagit sig an den grundläggande frågan "Vad innebär egentligen geologisk lagring av koldioxid?". En panel av framstående vetenskapsmän från nätverket har sammanställt aktuella svar på sex väsentliga frågeställningar, baserad på internationell forskning och erfarenhet.

Målsättningen var att tillhandahålla tydlig och opartisk vetenskaplig information till en bred krets, och att uppmuntra en dialog kring centrala frågeställningar om de tekniska aspekterna på geologisk lagring av koldioxid. Arbetet, som sammanfattas i denna broschyr, presenterades på nätverkets första workshop "Utbildning & Dialog" i Paris den 3:e oktober 2007 och finns att ladda ner på många språk, se www.co2geonet.com/brochure.

CO₂GeoNet

The European Network of Excellence on the geological storage of 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** Geological Survey of Denmark and Greenland, **HWU** Heriot-Watt University, **IFPEN** IFP Energies nouvelles, **IMPERIAL** Imperial College of Science, Technology and Medicine, **NIVA** Norwegian Institute for Water Research, **OGS** Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale, **IRIS** International Research Institute of Stavanger, **SPR SINTEF** Petroleumsforskning AS, **TNO** Netherlands Organisation for Applied Scientific Research, **URS** Università di Roma La Sapienza-CERI.



Den här versionen har översatts till svenska inom ramen för FP7 projektet "CGS Europe-Pan-European coordination action on CO₂ Geological Storage" av Sveriges geologiska undersökning.

SGU

Sveriges geologiska undersökning
Geological Survey of Sweden

ISBN: 978-80-7075-767-3