

# Wat betekent ondergrondse CO<sub>2</sub>-opslag nu eigenlijk?

Verantwoord  
gebruik van fossiele  
brandstoffen

Wegnemen van de  
belangrijkste bron  
van klimaatverandering

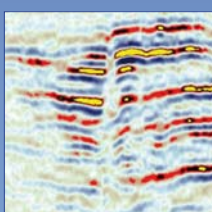
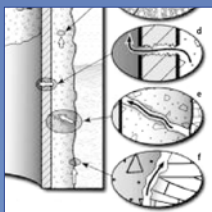
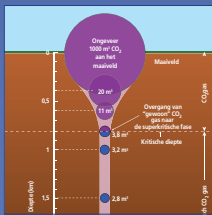
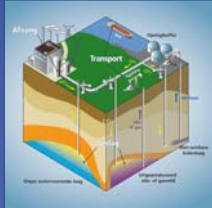
Terugstoppen van  
koolstof in de grond

Levert de tijd die nodig  
is om klimaatvriendelijke  
energiebronnen te ontwikkelen



CO<sub>2</sub>GeoNet European Network of Excellence

# Inhoudsopgave



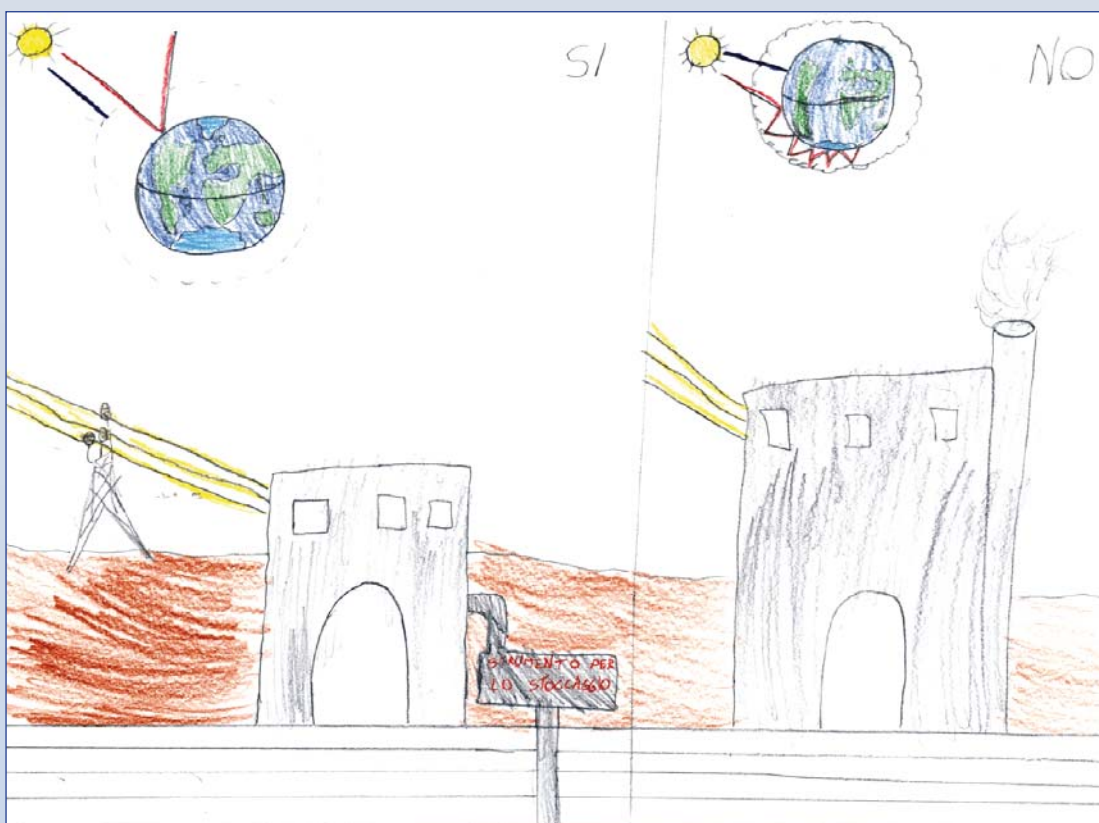
Klimaatverandering en de noodzaak van ondergrondse CO <sub>2</sub> -opslag .....	4
1. Waar kunnen we CO <sub>2</sub> ondergronds opslaan en hoeveel? .....	6
2. Hoe kunnen we grote hoeveelheden CO <sub>2</sub> transporteren en injecteren? .....	8
3. Wat gebeurt er met het CO <sub>2</sub> in het opslagreservoir? .....	10
4. Kan CO <sub>2</sub> uit het reservoir ontsnappen en, zo ja, wat zijn de mogelijke consequenties? .....	12
5. Hoe kunnen we de opslaglocatie monitoren in de diepte en aan de oppervlakte? .....	14
6. Welke veiligheidscriteria moeten we vaststellen en handhaven? .....	16
Woordenlijst .....	18
Wat CO <sub>2</sub> GeoNet voor u kan doen .....	19

Deze brochure is uitgebracht dankzij de bijdragen van 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, Olga Vizika-Kavvadias.

# Een toekomstbeeld



Geen rokende schoorstenen meer  
Een pijpleiding voert CO<sub>2</sub> aan en leidt het in  
de grond  
Dat is goed voor de aarde.



© Sapienza URS

Massimo, 10 jaar oud, Rome - Italië

Voor onze kinderen is ondergrondse opslag van CO<sub>2</sub>  
een vanzelfsprekende oplossing

# Klimaatverandering en de noodzaak voor ondergrondse opslag van CO<sub>2</sub>

**Figuur 1**  
Wereldwijde emissies van CO<sub>2</sub> als gevolg van menselijke activiteiten bedragen 30 miljard ton (Gt) per jaar, wat overeenkomt met 8,1 Gt koolstof: 6,5 Gt door verbranding van fossiele brandstoffen en 1,6 Gt door ontbossing en landbouw.

## De mens brengt te veel CO<sub>2</sub> in de atmosfeer

Men is het er nu algemeen over eens dat menselijke activiteiten de koolstofcyclus van onze planeet verstoren. Vanaf zo'n 10.000 jaar geleden tot het begin van de industriële revolutie was deze cyclus nauwkeurig in balans. Er vond natuurlijke uitwisseling van koolstof plaats tussen de ondergrond, de biosfeer, de oceanen en de atmosfeer, wat leidde tot lage CO<sub>2</sub>-concentraties in de atmosfeer (ongeveer 280 ppm, oftewel 0,028%). De afgelopen 250 jaar hebben we echter op grote

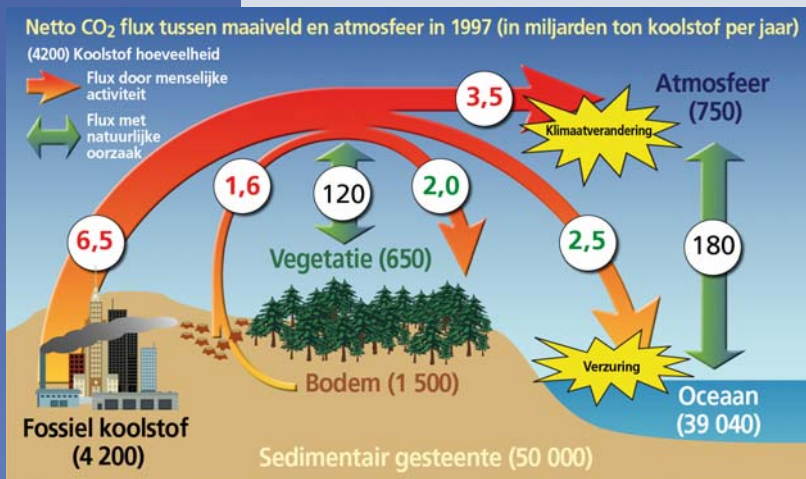
heeft op de flora en fauna in de zeeën. Zorgwekkender is echter de oplopende concentratie van dit broeikasgas in de atmosfeer, waardoor de Aarde minder straling van de Zon terugkaatst. Op deze wijze draagt het bij aan de opwarming van het aardoppervlak en aan klimaatverandering. Er zijn onmiddellijk vergaande maatregelen nodig om de huidige CO<sub>2</sub>-concentratie in de atmosfeer van 387 ppm (al een stijging van +38% vergeleken met het pre-industriële tijdperk) de komende tientallen jaren niet verder te laten stijgen dan het kritische niveau van 450 ppm. Deskundigen over de hele wereld zijn het er over eens dat boven dit niveau de meest ernstige gevolgen mogelijk onafwendbaar zijn.

## Het terugbrengen van koolstof in de grond

Al sinds het begin van het Industriële Tijdperk, halverwege de 18e eeuw, is onze wereld in sterke mate afhankelijk van fossiele brandstoffen. Daarom is het geen verrassing dat de omschakeling naar een maatschappij die is gebaseerd op klimaatvriendelijke energiebronnen zowel tijd als geld zal kosten. We hebben dan ook dringend een korte-termijnoplossing nodig die ons allereerst in staat stelt voorlopig fossiele brandstoffen op een niet-vervuilende manier te blijven gebruiken en daarnaast de tijd geeft om de technologie en infrastructuur te ontwikkelen voor grootschalig gebruik van hernieuwbare energiebronnen. Eén van de mogelijkheden is de productie van energie in een gesloten kringloop, waarbij de koolstof die uit de ondergrond wordt verkregen in de vorm van gas, olie en steenkool, wordt teruggebracht in de vorm van CO<sub>2</sub>. Interessant genoeg is ondergrondse opslag van CO<sub>2</sub> geen uitvinding van de mens, maar een volledig natuurlijk, veelvuldig voorkomend verschijnsel zoals blijkt uit de vele natuurlijke CO<sub>2</sub> reservoirs die al duizenden tot miljoenen jaren bestaan. Een voorbeeld daarvan is een groep van acht natuurlijke CO<sub>2</sub>-reservoirs in het zuidoosten van Frankrijk die zijn ontdekt tijdens het zoeken naar olie tussen 1960 en 1970 (Fig. 2). Ook in Nederland bevinden zich dergelijke CO<sub>2</sub>-rijke velden, onder andere nabij Werkendam – een natuurlijk reservoir gevuld met een gasmengsel met een CO<sub>2</sub> gehalte van zo'n 72%. Deze en vele andere locaties over de hele wereld tonen aan dat geologische formaties geschikt zijn voor het efficiënt en veilig opslaan van CO<sub>2</sub> gedurende zeer lange perioden.

## CO<sub>2</sub>-afvang en opslag: een veelbelovende maatregel voor CO<sub>2</sub>-emissiereductie

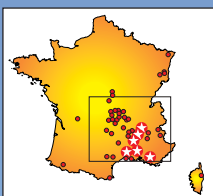
De groeiende wereldbevolking en de economische opkomst van ontwikkelingslanden leidt tot een



schaal fossiele brandstoffen (steenkool, olie, gas) gebruikt voor elektriciteitsproductie, verwarming, industrie en vervoer, waardoor de uitstoot van CO<sub>2</sub> voortdurend is gestegen (Fig. 1). Ongeveer de helft van deze door de mens veroorzaakte emissie is weer geabsorbeerd door vegetatie en opgelost in de oceanen, de rest heeft zich opgehoopt in de atmosfeer. Het oplossen van CO<sub>2</sub> in de oceanen heeft lichte verzuring veroorzaakt, wat mogelijk negatieve invloeden

**Figuur 2**  
De Franse koolzuurgas- en bronwaterprovincie.

- ★ Natuurlijk CO<sub>2</sub> gas
- Geëxploiteerde koolzuurhoudende waterbronnen

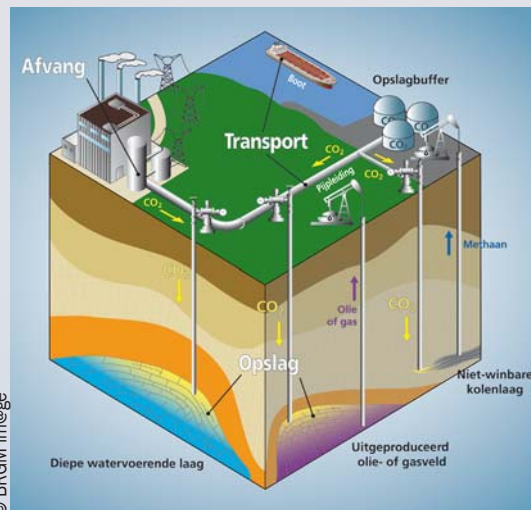


toenemende vraag naar energie. Omdat momenteel grootschalige alternatieve 'schone' energiebronnen ontoereikend zijn om aan deze groeiende vraag te voldoen, is het op korte termijn onvermijdelijk om fossiele brandstoffen te blijven gebruiken. De combinatie met CO<sub>2</sub>-afvang en opslag (CO<sub>2</sub> Capture and Storage - CCS\*) zou echter de transitieperiode kunnen overbruggen die nodig is om duurzame energiebronnen te ontwikkelen en tegelijkertijd het industriële concurrentievermogen te behouden op de wereldmarkt. CCS is een van de vele maatregelen die op korte termijn uitgevoerd moeten worden om de emissie van CO<sub>2</sub> te reduceren en klimaatverandering en de verzuring van de oceanen tegen te gaan. Deze maatregel kan een beslissende rol spelen aangezien het 33% zou kunnen opleveren van de CO<sub>2</sub>-reductie die nodig is in 2050. CCS (Fig. 3) houdt in:

- het afvangen van CO<sub>2</sub> bij kolen- of gasgestookte energiecentrales en fabrieken (hoogovens, cementfabrieken, raffinaderijen etc.);
- het transporteren van CO<sub>2</sub> per pijpleiding of schip naar een opslaglocatie;
- het via een put\* injecteren van CO<sub>2</sub> in een geschikte geologische formatie voor langdurige opslag.

### Voorspoedige wereldwijde ontwikkeling van CCS

Sinds de jaren '90 worden er verschillende belangrijke CCS-onderzoeksprogramma's uitgevoerd in Europa, de Verenigde Staten, Canada, Australië en Japan. Er is veel kennis vergaard in de eerste grootschalige demonstratieprojecten. Verspreid over de wereld wordt sinds een aantal jaren CO<sub>2</sub> geïnjecteerd in de diepe ondergrond: Sleipner in Noorwegen (ongeveer 1 miljoen ton per jaar sinds 1996) (Fig. 4), Weyburn in Canada (ongeveer 1,8 miljoen ton per jaar sinds 2000), en In Salah in Algerije (ongeveer 1 miljoen ton per jaar sinds 2004). Internationale samenwerking met betrekking tot onderzoek naar CO<sub>2</sub>-opslag op deze en andere locaties, gestimuleerd door het IEA-GHG\* en het CSLF\*, is zeer belangrijk geweest bij het vergaren van meer kennis en het ontstaan van een internationale wetenschappelijke gemeenschap die zich met dit onderwerp bezighoudt. Een uitstekend voorbeeld is het IPCC\* 'special report' uit 2005 over de afvang en opslag van CO<sub>2</sub>, dat een beschrijving bevat van het huidige kennisniveau en de hindernissen die nog moeten worden genomen om deze technologie op grote schaal te kunnen toepassen. Er is betrouwbare technische deskundigheid beschikbaar en men is vol vertrouwen begonnen aan de demonstratiefase. Naast technische ontwikkelingen wordt nu gewerkt aan het opstellen van regelgeving, en juridische, economische en politieke kaders en wordt er gekeken naar de perceptie en draagvlak in de samenleving. De Europese Commissie streeft er naar om in 2015 maar liefst 12 grootschalige demonstratieprojecten in Europa in bedrijf te hebben in aanloop naar wereldwijde commerciële toepassing in 2020. Daarvoor heeft de Europese Commissie in januari 2008 het



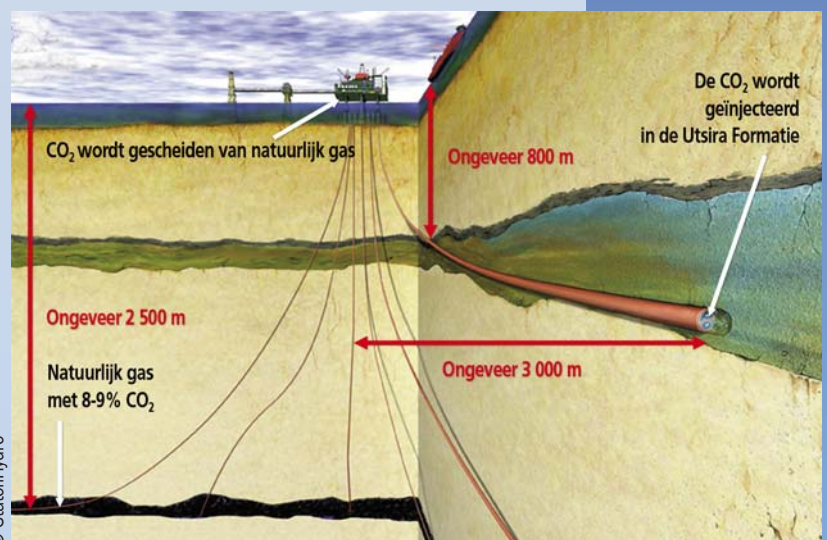
"Klimaatactie en hernieuwbare energie pakket" uitgegeven, met voorstellen voor een Richtlijn voor ondergrondse opslag van CO<sub>2</sub> en andere maatregelen ter bevordering van het ontwikkelen en veilig toepassen van CCS.

### Belangrijke vragen over ondergrondse opslag van CO<sub>2</sub>

CO<sub>2</sub>GeoNet is opgezet onder auspiciën van de Europese Commissie als een netwerk van onderzoeksinstituten die ervoor kunnen zorgen dat Europa voorop blijft lopen op het gebied van grootschalig internationaal onderzoek. Eén van de doelen van CO<sub>2</sub>GeoNet is om onafhankelijke wetenschappelijke informatie te verspreiden over de technische aspecten van ondergrondse opslag van CO<sub>2</sub>. Om de dialoog aangaande essentiële aspecten van deze uiterst belangrijke technologie te bevorderen, hebben onderzoekers van CO<sub>2</sub>GeoNet fundamentele antwoorden gegeven op veelgestelde vragen. Op de volgende pagina's vindt u uitleg over de manier waarop ondergrondse opslag van CO<sub>2</sub> kan worden gerealiseerd, onder welke omstandigheden het mogelijk is, en wat de criteria zijn voor veilige en efficiënte uitvoering.

**Figuur 3**  
Bij energiecentrales wordt CO<sub>2</sub> afgevangen door het van de andere gassen te scheiden. Vervolgens wordt het gecompriëerd en per pijpleiding of schip vervoerd naar de ondergrondse opslaglocatie in diepe zoutwaterlagen, uitgeproduceerde olie- en gasvelden, onmijnbare steenkoollagen.

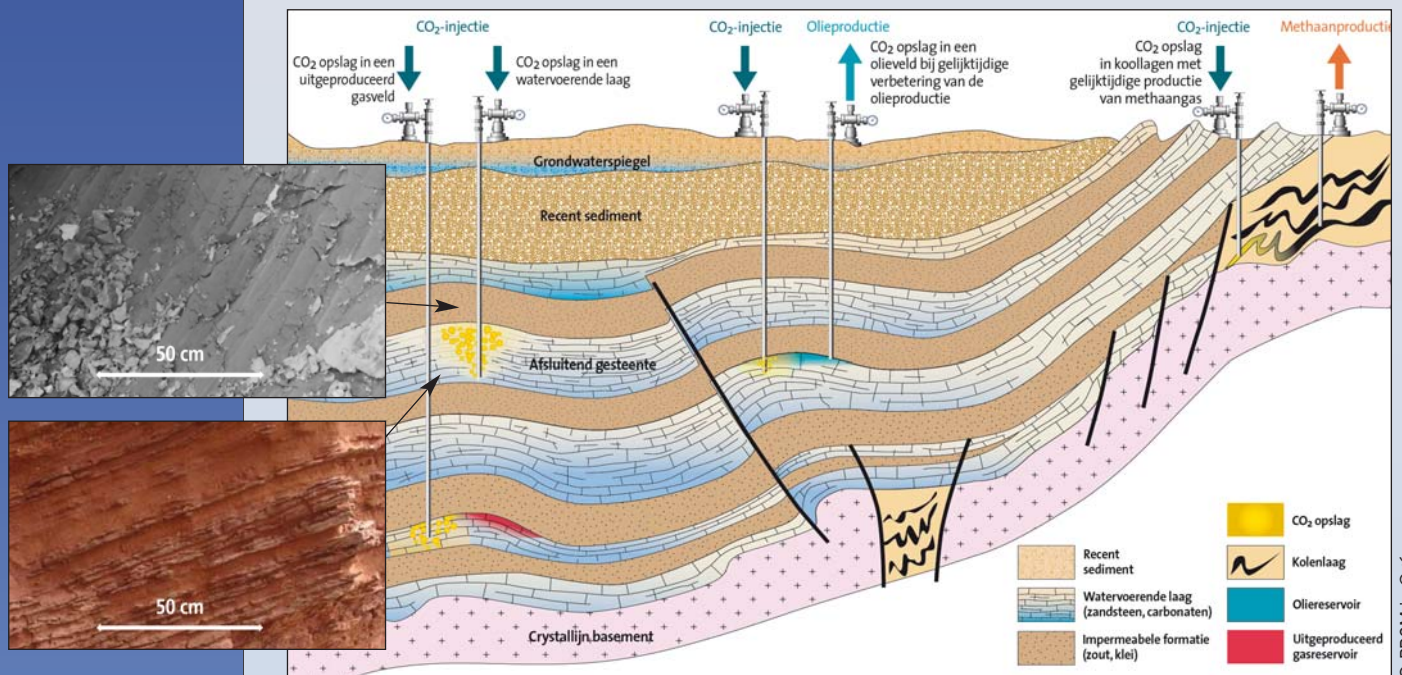
**Figuur 4**  
Een verticale dwarsdoorsnede van het Noorse Sleipnerveld. Het aardgas dat wordt gewonnen op een diepte van 2500 m, bevat een aantal procenten CO<sub>2</sub> dat moet worden verwijderd om te voldoen aan de commerciële normen. In plaats van het in de atmosfeer te laten ontsnappen, wordt het afgevangen CO<sub>2</sub> op een diepte van ongeveer 1000 m geïnjecteerd in de watervoerende Utsira Formatie.



\* Zie woordenlijst op p. 18

# Waar kunnen we CO<sub>2</sub> ondergronds opslaan en hoeveel?

CO<sub>2</sub> kan niet zomaar overal in de ondergrond worden geïnjecteerd, eerst moeten geschikte gesteenteformaties worden gevonden. Over de hele wereld zijn er potentiële reservoirs voor ondergrondse opslag van CO<sub>2</sub> die groot genoeg zijn om een aanzienlijke bijdrage te leveren aan CO<sub>2</sub>-emissiereductie en het verlichten van de door de mens veroorzaakte klimaatverandering.



**Figuur 1**  
CO<sub>2</sub> wordt geïnjecteerd in diepe geologische lagen van poreus en permeabel gesteente (zie zandsteen in onderste inzet), met daarboven een ondoorlatende laag (zie kleisteen in bovenste inzet) die voorkomt dat het CO<sub>2</sub> uit het reservoir ontsnapt. De belangrijkste opties voor opslag zijn:  
1. Uitgeputte olie- en gasreservoirs met waar mogelijk verbeterde olie- en gaswinning.  
2. Watervoerende lagen met zout water dat ongeschikt is voor menselijke consumptie.  
3. Diepe onwinbare kolenlagen waar mogelijk in combinatie met gelijktijdige verbeterde methaanwinning.

Er zijn drie belangrijke opties voor opslag van CO<sub>2</sub> (**Fig. 1**):

1. Uitgeproduceerde aardgas- en olievelen waarvan de eigenschappen goed bekend zijn door exploratie en exploitatie van koolwaterstoffen, bieden direct mogelijkheden voor CO<sub>2</sub>-opslag;
2. Zoutwaterlagen bieden wereldwijd meer mogelijkheden voor opslag maar zijn in het algemeen niet goed in kaart gebracht;
3. Onmijnbare steenkoolagen zijn een mogelijkheid voor de toekomst als eenmaal het probleem is opgelost van het injecteren van grote hoeveelheden CO<sub>2</sub> in slechtdoorlatende\* steenkoolagen.

## De reservoirs

Na injectie in een geschikt reservoirgesteente, verzamelt het CO<sub>2</sub> zich in de poriën tussen de korrels en in breukjes waar het de aanwezige stoffen zoals aardgas, water en olie verdringt en vervangt. Geschikte gesteenteformaties voor ondergrondse opslag van CO<sub>2</sub> moeten dus een hoge porositeit\* en permeabiliteit hebben. Dergelijke formaties, die zijn ontstaan door afzetting van sedimenten in het geologische verleden, bevinden zich in het algemeen in zogenaamde “sedimentaire bekkens”. Deze doorlaatbare formaties worden veelal afgewisseld

door ondoorlaatbare gesteenten die kunnen werken als afsluiting. Sedimentaire bekkens bevatten vaak reservoirs met koolwaterstoffen en natuurlijke CO<sub>2</sub>-velden die hebben bewezen dat ze vloeistoffen en gassen gedurende lange perioden kunnen vasthouden, aangezien ze miljoenen jaren op natuurlijke wijze olie, gas en zelfs zuiver CO<sub>2</sub> ingesloten hebben gehouden.

In afbeeldingen van opslagmogelijkheden voor CO<sub>2</sub> wordt de diepe bodem vaak sterk vereenvoudigd weergegeven als een homogene lagenstructuur. In de praktijk bestaat de ondergrond echter uit heterogene afwisselingen en complexe structuren van geschikt reservoirgesteente, plaatselijk gebroken formaties en afsluitende lagen. Net als in de olie- en gasindustrie is diepgaande kennis vereist van de locatie en geowetenschappelijke ervaring om de geschiktheid te kunnen beoordelen van ondergrondse structuren voor langdurige CO<sub>2</sub>-opslag. Mogelijke CO<sub>2</sub>-opslagreservoirs moeten voldoen aan vele eisen, waarvan de belangrijkste zijn:

- voldoende porositeit, permeabiliteit en opslagcapaciteit;
- de aanwezigheid van een bovenliggend ondoorlaatbaar gesteente (bv. klei, kleisteen, mergel, zoutsteen), zodat het CO<sub>2</sub> niet naar boven kan ontsnappen;
- de aanwezigheid van “insluitende structuren”, zoals

een koepelvormige afsluitende laag die het bereik van CO<sub>2</sub>-migratie binnen de opslagformatie beperkt;

- een locatie op een diepte groter dan 800 m, waar drukken en temperaturen hoog genoeg zijn voor opslag van CO<sub>2</sub> in een gecompriëerde vloeistoffase zodat zoveel mogelijk kan worden opgeslagen;
- de afwezigheid van drinkwater: CO<sub>2</sub> wordt niet geïnjecteerd in lagen die water voeren dat geschikt is voor menselijke consumptie en activiteiten.

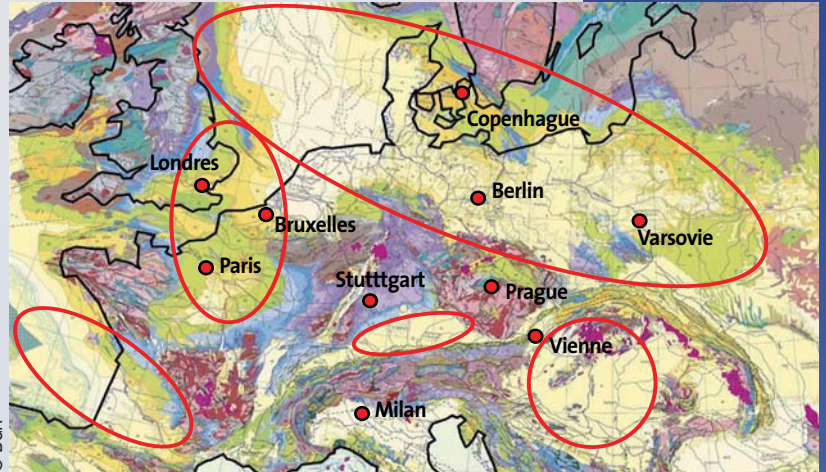
## Mogelijke opslaglocaties in Europa

Sedimentaire bekkens komen veel voor in Europa, bijvoorbeeld in de Noordzee of op land rond de Alpiene bergketens (Fig. 2). Veel formaties in de Europese bekkens voldoen aan de criteria voor ondergrondse opslag en worden momenteel door onderzoekers uitgebreid in kaart gebracht. Andere Europese gebieden, zoals een groot deel van Scandinavië, bestaan uit zeer oude aardkorst waar geen gesteenten te vinden zijn die zich lenen voor CO<sub>2</sub>-opslag. Een voorbeeld van een gebied waar mogelijkheden zijn voor opslag is het Zuidelijk Perm Bekken dat zich uitstrekt van Engeland tot Polen (in Figuur 2 weergegeven door de grootste ellips). De sedimenten zijn omgezet in gesteente en een deel van de poriënruimte is gevuld met zout water, olie of aardgas. De kleilagen die zich bevinden tussen de poreuze zandsteenlagen zijn gecompriëerd en geconsolideerd tot slecht doorlaatbare lagen die opwaartse stroming van vloeistoffen en gassen voorkomen. Veel van de zandsteenformaties bevinden zich op diepten tussen 1 en 4 km, waar de druk hoog genoeg is om CO<sub>2</sub> op te slaan in een fase met hoge dichtheid. Het zoutgehalte in het formatiewater neemt op deze diepte toe van ongeveer 100 g/l tot 400 g/l, waarmee het veel zouter is dan zeewater (35 g/l). Dynamiek in het sedimentaire bekken heeft plastische vervorming van het aanwezige steenzout veroorzaakt waardoor honderden koepelvormige structuren zijn ontstaan waarin vervolgens aardgas is ingesloten geraakt. Met name deze structuren worden nu onderzocht op mogelijkheden voor opslag van CO<sub>2</sub>.

## Opslagcapaciteit

Kennis over CO<sub>2</sub>-opslagcapaciteit is noodzakelijk voor politici, overheden en exploitanten. Schattingen van de opslagcapaciteit zijn echter meestal gebaseerd op de ruimtelijke afmetingen van de mogelijk geschikte formaties en zeer onnauwkeurig. De capaciteit kan worden bepaald op verschillende schalen; van nationale schaal voor ruwe schattingen, tot bekken- en reservoirschaal voor nauwkeuriger bepalingen, rekening houdend met de heterogeniteit en complexiteit van de werkelijke geologische structuur.

**Volumetrische capaciteit.** Gepubliceerde nationale opslagcapaciteiten zijn meestal gebaseerd op berekeningen van het poriënvolume van de formaties. In theorie kan de opslagcapaciteit van een bepaalde formatie worden berekend door het oppervlak te vermenigvuldigen met de dikte, de gemiddelde porositeit en de gemiddelde dichtheid van het CO<sub>2</sub> onder de omstandigheden op de diepte



**Figuur 2**  
Geologische kaart van Europa met de locaties van de belangrijkste sedimentaire bekkens (rode ellipsen) waar geschikte opslaglocaties voor CO<sub>2</sub> kunnen worden gevonden (gebaseerd op de Geologische Kaart van Europa op schaal 1:5.000.000).

van het reservoir. Omdat over het algemeen echter de poriënruimte al ingenomen wordt door water, kan slechts een klein deel (men neemt aan ongeveer 1-3%) gebruikt worden voor opslag. Deze coëfficiënt voor de opslagcapaciteit wordt toegepast bij het bepalen van de volumetrische capaciteit.

**Realistische capaciteit.** Realistische schattingen van de capaciteit kunnen worden opgesteld door gedetailleerd onderzoek van individuele opslaglocaties. De dikte van formaties is niet constant en de eigenschappen van reservoirs kunnen over korte afstanden verschillen. Kennis van de grootte, vorm en geologische eigenschappen van structuren maakt het mogelijk de onzekerheden in de volumeberekeningen te verminderen. Op basis van deze informatie kunnen computersimulaties vervolgens de injectie en beweging van CO<sub>2</sub> in het reservoir voorspellen om tot een realistischer schatting van de opslagcapaciteit te komen.

**Haalbare capaciteit.** Capaciteit is niet alleen maar een zaak van gesteentefysica. Sociaal-economische factoren zijn ook van belang voor de vraag of een geschikte locatie wel of niet zal worden gebruikt. De kosten voor het transport van het CO<sub>2</sub> van de bron naar de opslaglocatie zijn bijvoorbeeld van groot belang. De capaciteit hangt ook af van de zuiverheid van het CO<sub>2</sub> aangezien de aanwezigheid van andere gassen het beschikbare volume voor CO<sub>2</sub> in het reservoir zal verminderen. Tenslotte zijn politieke keuzes en publieke acceptatie de beslissende factoren als het gaat om het daadwerkelijk gebruik van de beschikbare reservoircapaciteit.

Samenvattend kunnen we zeggen dat we weten dat de opslagcapaciteit voor CO<sub>2</sub> in Europa hoog is, ook al bestaan er onzekerheden over de complexiteit en heterogeniteit van de reservoirs en over sociaaleconomische factoren. In het EU-project GESTCO\* is de CO<sub>2</sub>-opslagcapaciteit in olie- en gasvelden in en rond de Noordzee geschat op 37 Gt, wat voldoende is om in dit gebied gedurende tientallen jaren op industriële schaal CO<sub>2</sub> te injecteren. Bijwerken en verder in kaart brengen van opslagcapaciteit in Europa is onderwerp van voortdurend onderzoek, in individuele lidstaten en in het project EU Geocapacity\* voor Europa als geheel.



# Hoe kunnen we grote hoeveelheden CO<sub>2</sub> transporteren en injecteren?

Na het afvangen van CO<sub>2</sub> bij de fabriek wordt het gecomprimeerd, getransporteerd en via één of meer putten in het reservoir geïnjecteerd. De hele keten moet worden geoptimaliseerd om de opslag van vele miljoenen tonnen CO<sub>2</sub> per jaar mogelijk te maken.

## Compressie

CO<sub>2</sub> wordt gecomprimeerd tot een dichte vloeistof die aanzienlijk minder ruimte inneemt dan een gas.

Als het CO<sub>2</sub> in de energiecentrale of de fabriek is gescheiden van het rookgas, wordt de resulterende sterk geconcentreerde CO<sub>2</sub>-stroom gedroogd en gecomprimeerd voor efficiënter transport en opslag (Fig. 1). Drogen is nodig om corrosie van de apparatuur en infrastructuur en, onder hoge druk, de vorming van hydraten (vaste ijsachtige kristallen die apparatuur en leidingen kunnen verstoppert) te voorkomen.

Compressie gebeurt in combinatie met drogen in een meergefaseproces: herhaalde cycli van comprimeren, koelen en water afscheiden. Druk, temperatuur en watergehalte moeten allemaal worden aangepast aan de vorm van transport en de vereiste druk in de opslaglocatie. Sleutelfactoren voor het ontwerp van de compressorinstallatie zijn gasdebiet, aanzuig- en uitblaasdruk, warmtecapaciteit van het gas en het rendement van de compressor. De techniek voor de compressie is beschikbaar en wordt al uitgebreid toegepast in vele takken van industrie.

## Transport

CO<sub>2</sub> kan worden getransporteerd per schip of per pijpleiding.

Transport van CO<sub>2</sub> per schip vindt momenteel alleen op zeer kleine schaal plaats (10.000-15.000 m<sup>3</sup>) voor industriële toepassingen, maar dit zou in de toekomst

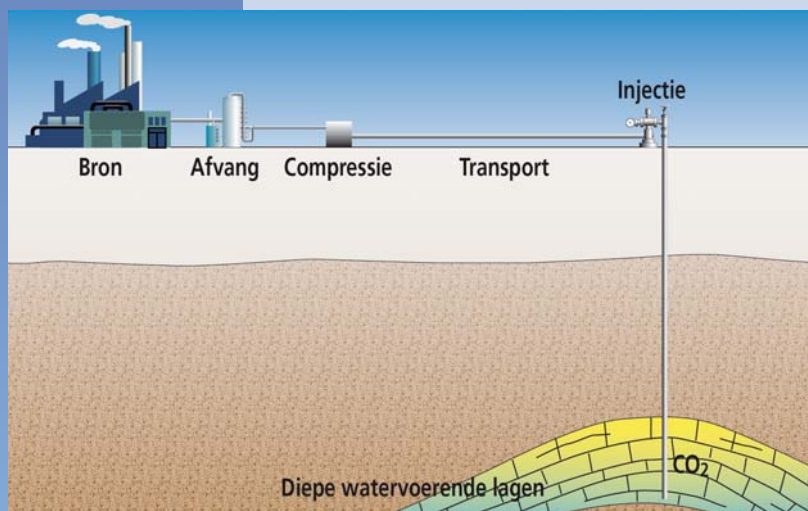
een aantrekkelijke mogelijkheid kunnen worden voor CCS-projecten indien een bron in de buurt van de kust zeer ver van een geschikt reservoir ligt. De schepen die momenteel worden gebruikt voor het vervoer van LNG zijn geschikt voor CO<sub>2</sub>-transport. In het bijzonder de semi-koelsystemen zijn onder druk gebracht en gekoeld zodat het CO<sub>2</sub> in vloeibare vorm kan worden getransporteerd. De nieuwste LNG-schepen hebben een inhoud tot 200.000 m<sup>3</sup> en kunnen 230.000 ton CO<sub>2</sub> vervoeren. Transport per schip levert echter geen continue toevoerstroom en er zijn voorzieningen voor tijdelijke opslag nodig in de haven voor de overslag van CO<sub>2</sub>. Transport via pijpleidingen kost minder dan transport per schip en heeft wel het voordeel van een continue stroom van de bron naar de opslaglocatie. Transport per pijpleiding wordt momenteel door oliemaatschappijen toegepast voor grote hoeveelheden CO<sub>2</sub> bij 'Enhanced Oil Recovery'\* (EOR - verbeterde oliewinning). Voor dit doel ligt er momenteel ongeveer 3000 km CO<sub>2</sub>-pijpleidingen over de hele wereld, de meeste in de Verenigde Staten. Bestaande CO<sub>2</sub>-pijpleidingen werken allemaal onder hoge druk en superkritische omstandigheden voor CO<sub>2</sub> waarbij het zich gedraagt als een gas maar de dichtheid heeft van een vloeistof. Drie belangrijke factoren bepalen de hoeveelheid die een pijpleiding kan verwerken: de diameter, de druk over de lengte en, daarmee samenhangend, de wanddikte.

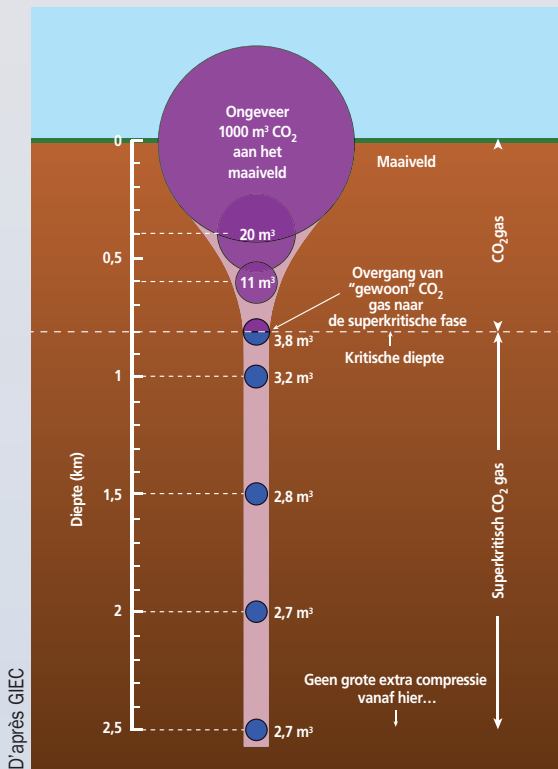
## Injectie

Als het CO<sub>2</sub> aankomt op de opslaglocatie, wordt het onder druk in het reservoir geïnjecteerd (Fig. 2).

De injectiedruk moet voldoende hoger zijn dan de druk in het reservoir om de vloeistof in het reservoir weg te drukken van het injectiepunt. De keuze voor het aantal injectieputten hangt af van de hoeveelheid op te slaan CO<sub>2</sub>, de injectiesnelheid (geïnjecteerd volume CO<sub>2</sub> per uur), de permeabiliteit en de dikte van het reservoir, de maximale veilige injectiedruk en het type put. Aangezien het belangrijkste doel is om CO<sub>2</sub> langdurig op te slaan, moeten we zeker zijn van de hydraulische integriteit van de formatie. Hoge injectiesnelheden kunnen lokale drukverhogingen veroorzaken bij de injectieplaats, vooral bij slecht doorlaatbare formaties. De injectiedruk mag niet hoger zijn dan de sterkte van het gesteente aangezien anders het reservoir of het afsluitende gesteente beschadigd zou kunnen worden. De maximale injectiedruk waarbij nog geen breuken

**Figuur 1**  
Fasen in ondergrondse opslag van CO<sub>2</sub>. Om CO<sub>2</sub> van het emissiepunt naar veilige en duurzame opslag te brengen, moet het een hele keten van processen ondergaan zoals afvangen, samenpersen, transport en injectie.





**Figuur 2**  
 Als CO<sub>2</sub> wordt geïnjecteerd, wordt het een dichte, superkritische vloeistof op een diepte van ongeveer 0,8 km. Het volume wordt zeer sterk verminderd. Zo is 1000 m<sup>3</sup> CO<sub>2</sub> aan de oppervlakte gelijk aan 2,7 m<sup>3</sup> op 2 km diepte. Dit is een van de factoren die ondergrondse opslag van grote hoeveelheden CO<sub>2</sub> zo aantrekkelijk maakt.

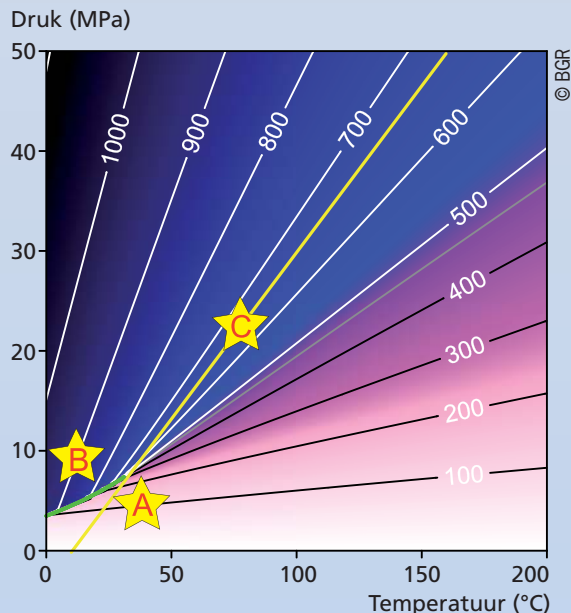
optreden in de formatie wordt bepaald met behulp van geomechanische analyse en computermodellen. Chemische processen kunnen ook invloed hebben op de snelheid waarmee CO<sub>2</sub> in de formatie kan worden geïnjecteerd. Afhankelijk van de steensoort van het reservoir, de samenstelling van de vloeistoffen en omstandigheden in het reservoir (zoals temperatuur, druk, volume, concentratie, etc.), kunnen processen als oplossen en neerslaan van mineralen nabij de put optreden. Dit kan leiden tot hogere of lagere mogelijke injectiesnelheden. Nadat CO<sub>2</sub> is geïnjecteerd, lost een deel op in het zoute water van het reservoir waardoor de pH\* iets afneemt, gebufferd door de mogelijke oplossing van carbonaten die zich bevinden in het gesteente. Carbonaten hebben een erg hoge reactiesnelheid zodat ze meteen beginnen op te lossen als CO<sub>2</sub> in contact komt met water. Dit oplossingsproces kan de porositeit van het gesteente en de injectiviteit\* verhogen. Het is echter mogelijk dat na het oplossen de carbonaten weer neerslaan en de formatie rond de put doen dichtslipen. Door met hoge injectiesnelheden te werken kan de vermindering van de permeabiliteit nabij de put worden beperkt doordat het gebied met geochemisch evenwicht waar neerslag optreedt, verder weg komt te liggen. Drogen is een ander verschijnsel dat wordt veroorzaakt door injectie. Na de verzuringsfase lost het overblijvende water rond de injectieput op in het geïnjecteerde droge gas, waardoor de concentratie van

chemicaliën in het pekewater\* toeneemt. Als het zoute water voldoende geconcentreerd is, kunnen mineralen (zoals zouten) dan neerslaan, waardoor de doorlaatbaarheid rond de put afneemt. Deze injectiviteitsproblemen hebben te maken met de wisselwerking tussen complexe processen die plaatselijk optreden rond de injectieput, maar die ook in sterke mate afhangen van de tijd en afstand tot de injectieput. Dergelijke effecten worden beoordeeld met behulp van numerieke simulaties. Men moet zorgvuldig omgaan met injectiesnelheden om te vermijden dat processen gaan optreden die de injectie van de gewenste hoeveelheden CO<sub>2</sub> zouden kunnen beperken.

### Samenstelling van de CO<sub>2</sub>-stroom

De samenstelling en zuiverheid van de CO<sub>2</sub>-stroom, die worden bepaald door de manier van afvangen, hebben een aanzienlijke invloed op alle verdere aspecten van een CO<sub>2</sub>-opslagproject. De aanwezigheid van een paar tienden procent andere stoffen, zoals water, zwavelwaterstof (H<sub>2</sub>S), zwavel- en stikstofoxiden (SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>), stikstof (N<sub>2</sub>) en zuurstof (O<sub>2</sub>) kan effect hebben op de fysische en chemische eigenschappen van het CO<sub>2</sub> en het daarmee samenhangende gedrag en de gevolgen. De aanwezigheid van dergelijke stoffen verdient daarvoor zorgvuldige aandacht bij het ontwerpen van de compressie-, transport- en injectiefasen en ook bij het aanpassen van de operationele omstandigheden en de apparatuur.

Samenvattend kunnen we stellen dat transport en injectie van grote hoeveelheden CO<sub>2</sub> al uitvoerbaar is. Voordat echter ondergrondse opslag van CO<sub>2</sub> op grote schaal kan worden toegepast, moeten alle fasen van het proces worden aangepast voor het specifieke opslagproject. De belangrijkste parameters zijn de thermodynamische eigenschappen van de CO<sub>2</sub>-stroom (Fig. 3), injectiesnelheden, en de omstandigheden vanaf de afvang tot aan de opslag in het reservoir.



**Figuur 3**  
 Dichtheid van zuiver CO<sub>2</sub> (in kg/m<sup>3</sup>) als functie van temperatuur en druk. De gele lijn geeft een algemene druk- en temperatuurgradiënt aan in een sedimentair bekken. Bij dieptes van meer dan 800 m (locale druk ~8 MPa), maken de omstandigheden in het reservoir hoge dichtheden mogelijk (blauwe arcering). De groene lijn is de fasegrens tussen gasvormig en vloeibaar CO<sub>2</sub>. Algemene druk- en temperatuuromstandigheden voor het afvangen, transporteren en opslaan worden aangegeven door respectievelijk A, B en C.

# Wat gebeurt er met het CO<sub>2</sub> in het opslagreservoir?

Als het CO<sub>2</sub> is geïnjecteerd in het reservoir migreert het opwaarts door dichtheidsverschillen en vult het de poriën onder de afsluitende laag. In de loop der tijd lost een deel van het CO<sub>2</sub> op en wordt het uiteindelijk omgezet in mineralen. Deze processen treden op over verschillende tijdschalen en dragen bij aan het permanent opslaan en vasthouden van CO<sub>2</sub>.

## Insluifingsmechanismen

Als het is geïnjecteerd in een reservoir, vult het CO<sub>2</sub> de poriën in het gesteente die in de meeste gevallen al gevuld zijn met zout formatiewater.

Vervolgens spelen de volgende mechanismen een rol bij de daadwerkelijk insluiting van CO<sub>2</sub>. Het eerste proces wordt beschouwd als het belangrijkste en voorkomt dat het CO<sub>2</sub> direct naar de oppervlakte stijgt. De andere drie processen dragen bij aan de doelmatigheid en de veiligheid van de opslag op de lange termijn.

### 1. Accumulatie onder de afsluitende laag (structurele insluiting)

Aangezien superkritisch CO<sub>2</sub> 'lichter' is dan water, zal het in het reservoir omhoog stromen. Deze beweging wordt gestopt als het CO<sub>2</sub> tegen een ondoorlaatbaar gesteente komt, de zogenaamde 'afsluitende laag'. Deze afsluitende laag bestaat meestal uit klei of zout en zorgt ervoor dat het CO<sub>2</sub> niet verder omhoog kan stromen zodat het vlak onder deze laag accumuleert. **Figuur 1** laat de opwaartse stroming zien van het CO<sub>2</sub> door de poriën in het gesteente (in blauw) totdat het de afsluitende laag bereikt.

### 2. Immobilisatie in kleine poriën (residuale insluiting)

Residuale immobilisatie treedt op als de poriënruimtes in het gesteente zo nauw zijn dat de de CO<sub>2</sub>, ondanks het verschil in dichtheid met het omringende water, niet verder omhoog kan stromen. Dit proces treedt voornamelijk op tijdens migratie van CO<sub>2</sub> en het kan in het algemeen een paar procent van het geïnjecteerde CO<sub>2</sub> immobiliseren, afhankelijk van de eigenschappen van het reservoir gesteente.

### 3. Oplossing (insluiting door oplossing)

Een klein deel van het geïnjecteerde CO<sub>2</sub> lost op in het zoute formatiewater dat zich al in de poriënruimtes van het reservoir bevindt. Omdat het water met daarin opgelost CO<sub>2</sub> zwaarder is dan het originele formatiewater, zal het water met het opgeloste CO<sub>2</sub> naar de bodem van het reservoir stromen. De oplossingsnelheid is afhankelijk van het contact tussen het CO<sub>2</sub> en het formatiewater. De hoeveelheid CO<sub>2</sub> die kan oplossen is beperkt tot een maximale concentratie. Doordat echter het geïnjecteerde CO<sub>2</sub> omhoog beweegt en het water met opgelost CO<sub>2</sub> naar beneden, treedt er voortdurend vernieuwing op van het contact tussen formatiewater en CO<sub>2</sub>, zodat de hoeveelheid die kan worden opgelost toeneemt. Deze processen zijn relatief langzaam, omdat ze plaatsvinden binnen nauwe poriënruimtes. Ruwe schattingen voor het Sleipner-project stellen dat 10 jaar na het begin van de CO<sub>2</sub> injectie ongeveer 15% van het geïnjecteerde CO<sub>2</sub> is opgelost.

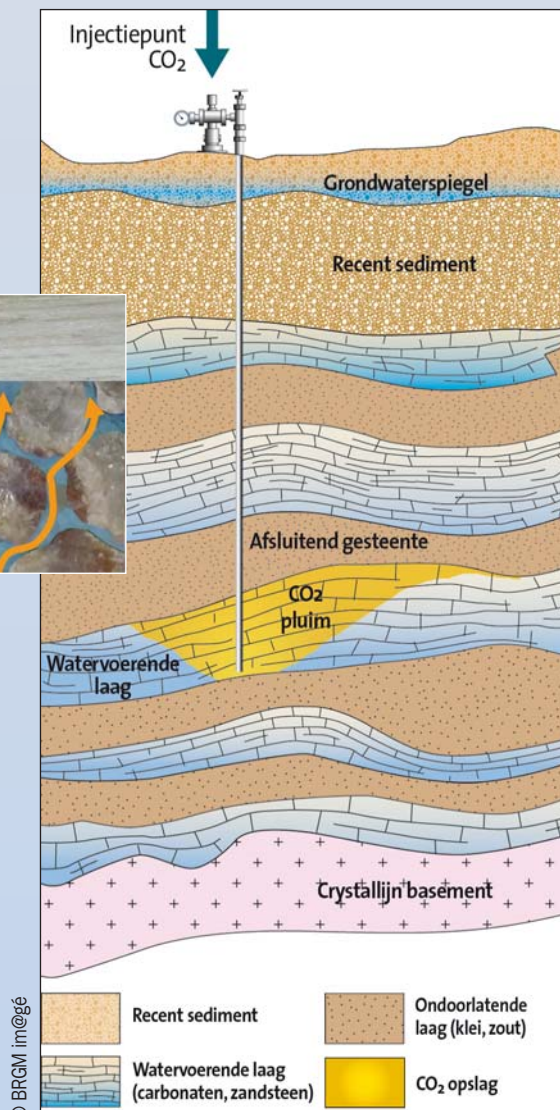
### 4. Mineralisatie (Minerale insluiting)

Vooral in combinatie met het formatiewater in het reservoir, kan CO<sub>2</sub> reageren met het aanwezige gesteente en zo mineralen vormen. Bepaalde mineralen zullen oplossen, terwijl andere neerslaan,

*Uitvergroet.*



**Figuur 1**  
Het geïnjecteerde CO<sub>2</sub> is lichter dan water zodat het de neiging heeft opwaarts te stromen en wordt gestopt door bovenliggende ondoorlaatbare gesteenten.



© BRGM im@gé



**Figuur 2**  
Superkritisch CO<sub>2</sub> dat naar boven migreert (lichtblauwe belletjes) lost op en reageert met het gesteente waardoor carbonaten neerslaan op de randen van de korrels (wit).

afhankelijk van de pH en de mineralen die het gesteente van het reservoir vormen (Fig. 2). Schattingen voor Sleipner geven aan dat slechts een relatief kleine fractie van het CO<sub>2</sub> na een zeer lange tijd zal worden geïmmobiliseerd door mineralisatie. Na 10.000 jaar is waarschijnlijk slechts 5% van het geïnjecteerde CO<sub>2</sub> gemineraliseerd, terwijl 95% zal zijn opgelost en geen CO<sub>2</sub> resteert als aparte fase.

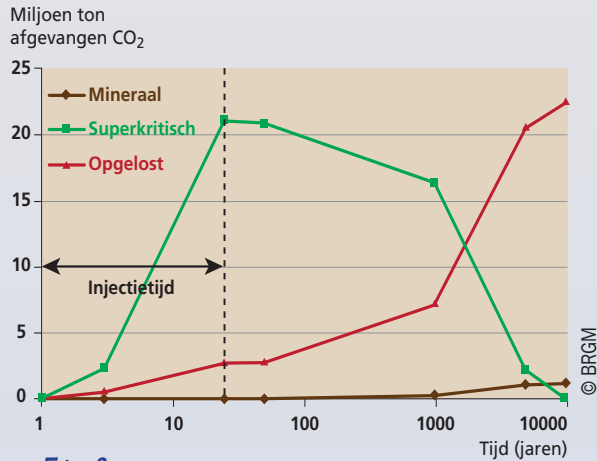
Het relatieve belang van deze insluitingsmechanismen verschilt per locatie omdat het afhangt van de specifieke kenmerken van elke locatie. In koepelvormige reservoirs bijvoorbeeld, zal CO<sub>2</sub> voornamelijk in de dichte fase verkeren, zelfs gedurende lange perioden, terwijl in vlakke reservoirs zoals Sleipner, het grootste deel van het geïnjecteerde CO<sub>2</sub> na verloop van tijd zal worden opgelost of gemineraliseerd.

De ontwikkeling in de tijd van het gedeelte CO<sub>2</sub> in de verschillende insluitingsmechanismen voor de Sleipner-situatie wordt weergegeven in Figuur 3.

### Hoe weten we dit allemaal?

De kennis over deze processen komt voort uit vier belangrijke informatiebronnen:

- **Laboratoriummetingen:** kleinschalige experimenten gericht op mineralisatie, stroming en oplossing kunnen worden uitgevoerd op gesteentemonsters en geven inzicht in processen op de korte termijn en op kleine schaal.
- **Numerieke simulaties:** er zijn computermodellen ontwikkeld die kunnen worden gebruikt om het gedrag van CO<sub>2</sub> over veel langere tijdschalen te voorspellen (Fig. 4). Resultaten van laboratoriumexperimenten worden gebruikt voor het kalibreren van deze numerieke simulaties.
- **Onderzoek van natuurlijke CO<sub>2</sub>-reservoirs,** waarin het CO<sub>2</sub> (meestal van vulkanische oorsprong) gedurende lange perioden (vaak miljoenen jaren) ingesloten is geweest. Deze locaties geven ons informatie over het gedrag van gas en de gevolgen op de zeer lange termijn van de aanwezigheid van CO<sub>2</sub> in de bodem. Een dergelijke omgeving wordt aangeduid als een



**Figuur 3**  
Ontwikkeling van het CO<sub>2</sub> in verschillende insluitingsmechanismen in het Sleipner-reservoir volgens stromingssimulaties. CO<sub>2</sub> wordt ingesloten in superkritische vorm door mechanismen 1 en 2, in opgeloste vorm door mechanisme 3, en in minerale vorm door mechanisme 4.

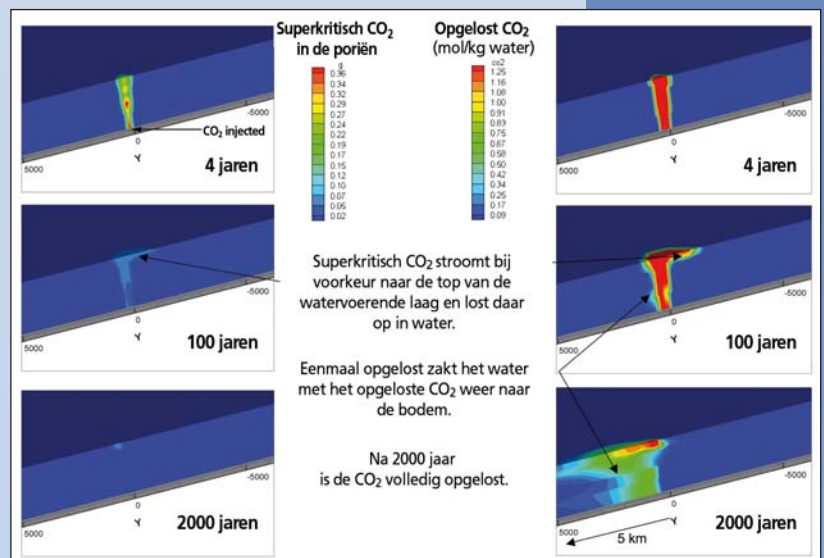
'natuurlijk analoog'\*.

- **Monitoren van bestaande demonstratieprojecten voor ondergrondse opslag van CO<sub>2</sub>,** zoals Sleipner (voor de Noorse kust), Weyburn (Canada), In Salah (Algerije) en K12-B (in de Noordzee). De resultaten van de simulaties op de korte termijn kunnen worden vergeleken met werkelijke veldgegevens zodat de modellen kunnen worden verfijnd.

Alleen door deze vier informatiebronnen voortdurend met elkaar te vergelijken en aan te passen is het mogelijk betrouwbare kennis te verkrijgen over alle processen die meer dan 1000 m onder onze voeten plaatsvinden.

Samenvattend kunnen we stellen dat we weten dat de veiligheid van een CO<sub>2</sub>-opslaglocatie in het algemeen in de loop der tijd toeneemt. Het meest kritische punt is het vinden van een reservoir met een geschikte afsluitende laag die het CO<sub>2</sub> kan tegenhouden (structureel insluiten). De processen met betrekking tot oplossen, mineralisatie en residuale insluiting spelen vervolgens een gezamenlijke rol bij het voorkomen dat CO<sub>2</sub> uit het opslagreservoir migreert.

**Figuur 4**  
Driedimensionaal model van CO<sub>2</sub>-migratie in een watervoerende laag, na injectie van 150.000 ton gedurende 4 jaar in de watervoerende Dogger formatie in Frankrijk. Afgebeeld hier is het superkritische CO<sub>2</sub> (links) en het opgeloste CO<sub>2</sub> in formatiewater (rechts) op tijdstippen 4, 100 en 2000 jaar na de start van de injectie. De simulatie is gebaseerd op veldgegevens en experimenten.



# Kan CO<sub>2</sub> uit het reservoir ontsnappen en zo ja, wat zijn de mogelijke consequenties?

Op basis van onderzoek aan natuurlijke systemen wordt verwacht dat bij zorgvuldig gekozen opslaglocaties geen significante lekkage zal optreden. Van natuurlijke gasreservoirs kunnen we leren onder welke omstandigheden gas wordt ingesloten of kan ontsnappen. Daarnaast helpen lekkende locaties ons begrijpen wat de mogelijke gevolgen van CO<sub>2</sub> lekkage kunnen zijn.

## Lekkagepaden

In het algemeen zijn mogelijke lekkagepaden voor CO<sub>2</sub> ofwel door de mens gecreëerd (zoals diepe boorputten) ofwel op natuurlijke manier ontstaan (zoals breuksystemen).

Zowel operationele als verlaten putten kunnen migratieroutes vormen. In de eerste plaats vormen ze een rechtstreekse verbinding tussen het oppervlak en het reservoir, en in de tweede plaats bestaan ze uit kunstmatige materialen die over langere perioden zouden kunnen coroderen (Fig. 1). Een verdere complicatie is dat niet alle putten met dezelfde technieken zijn gemaakt: door technische ontwikkelingen en aanscherpingen van de regelgeving is de kwaliteit van boorputten in de loop der jaren toegenomen, zodat nieuwere putten in het algemeen veiliger zijn dan oudere. Het risico van lekkage via putten wordt laag geacht, omdat zowel nieuwe als oude putten zorgvuldig kunnen worden bewaakt met gevoelige geochemische en geofysische methoden. Bovendien beschikt de olie-industrie over de juiste technieken mochten herstellende maatregelen nodig blijken.

Migratie langs natuurlijke breuken die zouden kunnen bestaan in de afsluitende laag of bovenliggende lagen is complexer omdat we hier te maken hebben met onregelmatige verspreiding en wisselende doorlaatbaarheden. Een goed wetenschappelijk en technisch begrip van zowel lek-

kende als niet-lekkende natuurlijke systemen stelt ons in staat om CO<sub>2</sub>-opslagprojecten te ontwerpen die dezelfde kenmerken hebben als natuurlijke reservoirs die al duizenden tot miljoenen jaren aardgas en CO<sub>2</sub> hebben ingesloten.

## Natuurlijke analogieën

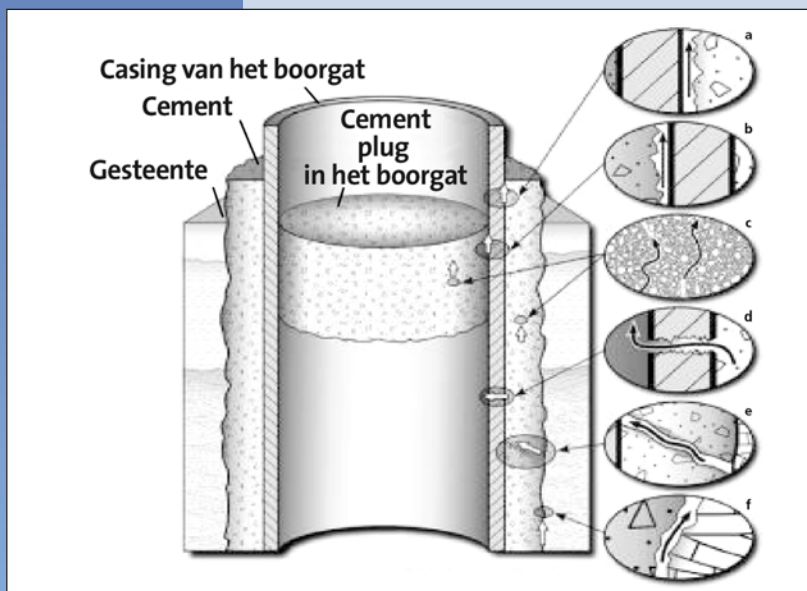
Natuurlijke systemen (zogenaamde “analogieën”) zijn waardevolle bronnen van informatie voor het verbeteren van ons begrip van diepe gasmigratie en de natuurlijke uitwisseling van gassen tussen de aarde en de atmosfeer. De belangrijkste bevindingen van onderzoek aan talrijke lekkende en niet-lekkende natuurlijke gasreservoirs zijn:

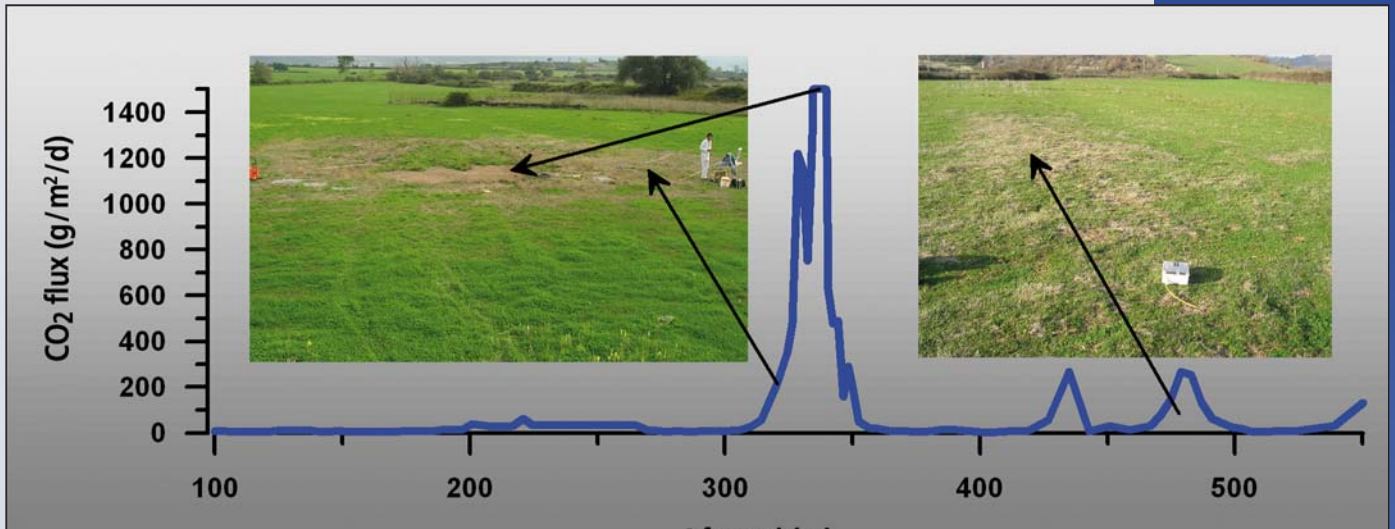
- onder gunstige geologische omstandigheden kunnen door de natuur geproduceerde gassen honderden of duizenden tot miljoenen jaren worden ingesloten;
- geïsoleerde gasreservoirs komen zelfs voor in de minst gunstige geologische omstandigheden (vulkanische gebieden);
- migratie van significante hoeveelheden gas vereist advectie (stroming veroorzaakt door drukverschillen) omdat diffusie (stroming veroorzaakt door verschillen in concentratie) een zeer langzaam proces is;
- advectie treedt op indien de vloeistofdrukken in het reservoir dicht bij de lithostatische druk\* liggen zodat bestaande breuken ‘open’ zijn of nieuwe breuken ontstaan;
- gebieden waar natuurlijk gas naar de oppervlakte lekt, liggen vrijwel uitsluitend in vulkanische en seismisch actieve regio's, waar lekkagepaden voor gas langs actieve of recent geactiveerde breuken liggen;
- lekkage van significante hoeveelheden gas is zeldzaam en komt vrijwel uitsluitend voor in vulkanisch en geothermisch actieve gebieden met veel breuken waar CO<sub>2</sub> voortdurend ontstaat door natuurlijke processen;
- gas-anomalieën aan het oppervlak komen meestal zeer lokaal voor en hun effect op de ondiepe ondergrond is ruimtelijk beperkt.

De combinatie van een aantal specifieke omstandigheden is derhalve noodzakelijk voordat lekkage kan optreden. Het is daarom uiterst onwaarschijnlijk dat een zorgvuldig gekozen en nauwkeurig geconstrueerde locatie voor ondergrondse opslag van CO<sub>2</sub> zal gaan lekken.

Hoewel de kans op lekkage uiteindelijk klein is, is het nodig de processen die tot lekkage kunnen leiden en mogelijke effecten van lekkage volledig te begrijpen om de veiligst

**Figuur 1**  
Mogelijke migratieroutes voor CO<sub>2</sub> in een put. Ontsnapping via de aantasting van materiaal (c, d, e) of langs grensvlakken (a, b, f).





mogelijke ondergrondse opslaglocaties voor CO<sub>2</sub> te kiezen, ontwerpen en gebruiken.

### Gevolgen voor de mens

We ademen voortdurend CO<sub>2</sub> uit. CO<sub>2</sub> is alleen gevaarlijk voor de mens bij zeer hoge concentraties, met waarden tot 50.000 ppm (5%) waarbij hoofdpijn, duizeligheid en misselijkheid optreden. Nog hogere waarden kunnen dodelijk zijn als de blootstelling te lang duurt, vooral door verstikking wanneer de concentratie zuurstof in de lucht lager wordt dan het niveau van 16% dat de mens nodig heeft om te kunnen overleven. Indien CO<sub>2</sub> zou lekken in een open of vlak terrein, verspreidt het zich snel in de lucht, zelfs bij zachte wind. Het mogelijke risico voor de bevolking blijft daardoor beperkt tot lekkage in een gesloten omgeving of topografische laagtes, waar concentraties kunnen stijgen doordat CO<sub>2</sub> zich verzamelt vlakbij de bodem aangezien het zwaarder is dan lucht. Kennis van de methoden voor het ontgassen van gebieden is nuttig bij risicobeheersing en preventie. In de praktijk leven veel mensen in gebieden waar dagelijks natuurlijke gassen vrijkomen. In het Italiaanse Ciampino, in de buurt van Rome, staan bijvoorbeeld huizen op niet meer dan 30 meter van locaties waar gas uit de ondergrond ontsnapt, waar de CO<sub>2</sub>-concentraties in de bodem oplopen tot 90% en dagelijks ongeveer 7 ton CO<sub>2</sub> de atmosfeer in wordt geblazen. De plaatselijke bewoners voorkomen gevaar door eenvoudige voorzorgsmaatregelen, zoals niet slapen in de kelder en de huizen goed ventileren.

### Gevolgen voor het milieu

Mogelijke gevolgen voor de ecosystemen hangen in de eerste plaats af van de vraag of de opslaglocatie zich op zee of op land bevindt.

In mariene ecosystemen is het belangrijkste gevolg van CO<sub>2</sub>-lekkage een lokale verlaging van de pH (verzuring) en de bijbehorende consequenties met name voor dieren die leven op de zeebodem en niet weg kunnen. De gevolgen

blijven echter ruimtelijk beperkt en na vermindering van de lekkage vertoont het ecosysteem snel tekenen van herstel. In ecosystemen op land kunnen de gevolgen ruwweg als volgt worden samengevat :

- **vegetatie** – Hoewel CO<sub>2</sub>-gasconcentraties in de bodem tot ongeveer 20-30% gunstig kunnen zijn voor planten en bepaalde soorten er sneller door gaan groeien, kunnen waarden boven deze drempel dodelijk zijn voor sommige, maar niet alle planten. Dit effect blijft echter strikt beperkt tot een gebied vlak bij de plek waar CO<sub>2</sub> ontsnapt en al een paar meter er vandaan blijft de vegetatie gezond (**Fig. 2**).
- **grondwaterkwaliteit** – De chemische samenstelling van grondwater kan veranderen door toevoeging van CO<sub>2</sub>, aangezien het water zuurder wordt en elementen vrij kunnen komen uit de gesteenten en mineralen van de watervoerende laag. Zelfs als CO<sub>2</sub> zou lekken in een drinkwaterlaag, blijven de effecten lokaal en de omvang van de gevolgen wordt momenteel onderzocht door wetenschappers. Interessant is dat veel watervoerende lagen in heel Europa een hoog natuurlijke gehalte CO<sub>2</sub> hebben, en dit water wordt zelfs gebotteld en verkocht als “bruisend mineraalwater”.
- **gesteente** – De verzuring van het grondwater kan leiden tot oplossen van het gesteente, verminderde sterkte en vorming van dolines. Dit soort gevolgen treedt echter alleen op onder zeer specifieke geologische en hydrogeologische omstandigheden (tektonisch activiteit, watervoerende lagen met hoge stromingssnelheid, hoog carbonaatgehalte), waarvan het niet waarschijnlijk is dat ze zullen optreden boven uitgekozen kunstmatige ondergrondse opslaglocaties.

Samenvattend kunnen we stellen dat de gevolgen van mogelijke CO<sub>2</sub>-lekkage afhankelijk zijn van een specifieke locatie. Diepgaande kennis van het onderliggende geologische systeem is daarom vereist om potentiële routes voor gas migratie vast te stellen, locaties te kiezen met het laagst mogelijke risico van CO<sub>2</sub>-lekkage en het gedrag van het gas te voorspellen. Op deze manier kunnen de gevolgen voor mensen en het ecosysteem worden geëvalueerd en voorkomen.

**Figuur 2**  
De gevolgen van CO<sub>2</sub>-lekkage voor vegetatie van een hoge (links) en een beperkte (rechts) stroming. De gevolgen blijven beperkt tot het gebied waar het CO<sub>2</sub> ontsnapt.

# Hoe kunnen we de opslaglocatie monitoren in de diepte en aan de oppervlakte?

Alle CO<sub>2</sub>-opslaglocaties moeten worden bewaakt wegens operationele en economische redenen, en vanwege veiligheid, milieu en samenleving. Er moet beleid worden geformuleerd om vast te stellen wat er precies moet worden bewaakt en hoe.

## Waarom moeten we bewaken?

Effectieve bewaking van de locatie is van vitaal belang om zeker te stellen dat het belangrijkste doel van ondergrondse opslag van CO<sub>2</sub> wordt bereikt, namelijk het gedurende lange tijd uit de atmosfeer houden van door de mens veroorzaakt CO<sub>2</sub>. Er zijn verscheidene redenen om de opslaglocaties te bewaken, zoals:

- **operationeel:** het injectieproces besturen en optimaliseren.
- **veiligheid en milieu:** minimaliseren of voorkomen van gevolgen voor mens en dier en ecosystemen in de buurt van een opslaglocatie en zorgen voor matiging van de wereldwijde klimaatverandering.
- **samenleving:** het publiek informatie verschaffen, nodig om het vertrouwen van het publiek te houden en te winnen op het punt van veiligheid.
- **financieel:** vertrouwen van de markt in CCS-technologie te versterken en de opgeslagen volumes CO<sub>2</sub> te controleren zodat ze kunnen worden toegekend als 'vermeden emissies' in toekomstige fasen van het systeem voor Emissiehandel van de Europese Unie (ETS).

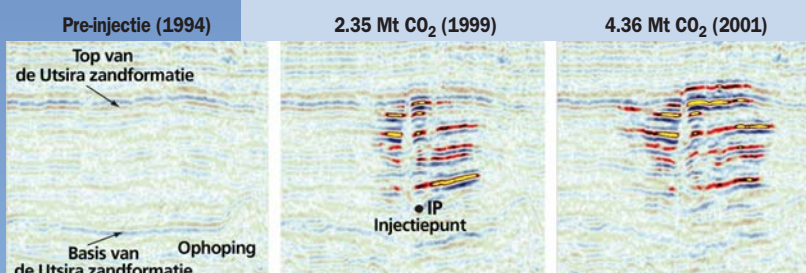
Bewaking van zowel de oorspronkelijke toestand van het milieu (zogenaamde "nulmeting") en de daaropvolgende activiteiten op de opslaglocatie is een belangrijk voorschrift volgens de EC CCS-Richtlijn waarvan het concept is gepubliceerd op 23 januari 2008. Beheerders moeten kunnen aantonen dat de opslag voldoet aan de voorschriften en dat op de lange termijn zal blijven doen. Bewaking is een belangrijk onderdeel dat onzekerheden betreffende opslag moet verminderen. Monitoring is dus een belangrijk onderdeel van veiligheidsbewaking.

## Wat zijn de doelstellingen van bewaking?

Bewaking kan ingezet worden op verschillende aspecten, zoals:

- Pluimweergave - het volgen van het CO<sub>2</sub> terwijl het migreert vanaf het injectiepunt. Dit levert belangrijke gegevens voor het ijken van modellen die de toekomstige verdeling van het CO<sub>2</sub> op de locatie voorspellen. Er zijn vele ver uitontwikkelde technieken beschikbaar, vooral herhaalde seismische "surveys" die met succes zijn toegepast bij verschillende demonstratie- en proefprojecten (**Fig. 1**).
- Integriteit van de afsluitende laag. Nodig om vast te stellen of het CO<sub>2</sub> binnen het opslagreservoir blijft en om tijdig te kunnen waarschuwen in het geval van onverwachte opwaartse migratie van CO<sub>2</sub>. Dit kan vooral van belang zijn tijdens de injectiefase van een project, als de drukken in het reservoir tijdelijk aanzienlijk hoger zijn.
- Integriteit van de put. Dit is belangrijk aangezien diepe putten een potentieel rechtstreeks pad voor het CO<sub>2</sub> vormen naar de oppervlakte. CO<sub>2</sub>-injectieputten en eventuele observatieputten of oudere verlaten putten moeten zorgvuldig worden gemonitord gedurende de injectiefase en daarna om plotseling ontsnappen van CO<sub>2</sub> te voorkomen. Monitoring wordt ook toegepast om te controleren of alle putten goed zijn afgesloten als ze niet langer nodig zijn. Bestaande geofysische en geochemische bewakingssystemen die standaard zijn in de olie- en gasindustrie, kunnen in of op putten worden geïnstalleerd voor tijdige signalering van onraad.
- Migratie in de lagen boven het reservoir. In opslaglocaties waar ondiepere gesteentes eigenschappen hebben die overeenkomen met die van de afsluitende laag, kunnen deze een belangrijke factor vormen voor het beperken van het risico dat CO<sub>2</sub> ontsnapt naar zee of atmosfeer. Als uit monitoring van het reservoir of rond de afsluitende laag onverwacht migratie door de afsluitende laag blijkt, is monitoring van de lagen daarboven noodzakelijk. Veel van de technieken die worden gebruikt bij pluimweergave of monitoring van de afsluitende laag kunnen ook hier worden toegepast.
- Detectie en meting van lekkage aan de oppervlakte en in de atmosfeer. Om er zeker van te zijn dat het geïnjecteerde CO<sub>2</sub> niet naar de oppervlakte is gemigreerd, zijn verschillende geochemische, biochemische en teledetectie-technieken beschikbaar voor het vaststellen van lekken, beoordelen en monitoren van de CO<sub>2</sub>-verdeling in de bodem en de dispersie in de atmosfeer of in het zeemilieu (**Fig. 2**).
- Hoeveelheid opgeslagen CO<sub>2</sub> voor wettelijke en fiscale

**Figuur 1**  
Seismische weergave voor het monitoren van de CO<sub>2</sub>-pluim\* in het Sleipner proefproject vóór injectie (die werd gestart in 1996) en na injectie (respectievelijk 3 en 5 jaar later).



doelinden. Hoewel de hoeveelheid geïnjecteerd CO<sub>2</sub> direct kan worden gemeten bovenin de put, is het kwantificeren in het reservoir een grote technische uitdaging. Als lekkage optreedt tot vlak onder de oppervlakte, moeten de vrijgekomen hoeveelheden worden gekwantificeerd voor boekhoudkundige doelinden voor de nationale hoeveelheden broeikasgas en toekomstige regelingen voor emissiehandel.

- Bodembewegingen en microseismiek\*. De toegenomen druk in het reservoir door de injectie van CO<sub>2</sub> zou in bepaalde gevallen kunnen leiden tot toenemende microseismiek en kleinschalige bodembewegingen. Microseismische bewakingstechnieken en teledetectie (onderzoeken vanuit vliegtuigen of satellieten) maken het mogelijk zelfs de kleinste beweging van de bodem te meten.

### Hoe vindt monitoring plaats?

Een groot aantal monitoringstechnieken is al toegepast bij bestaande demonstratie- en onderzoeksprojecten. Het gaat hierbij om methoden waarmee het CO<sub>2</sub> rechtstreeks wordt gemeten en methoden waarmee indirect de invloed wordt gemeten op gesteenten, vloeistoffen en het milieu. Directe metingen omvatten analyse van vloeistoffen uit diepe putten en meting van gasconcentraties in de bodem of de atmosfeer. Indirecte methoden zijn geofysische onderzoeken en het monitoren van drukveranderingen in putten en veranderingen in de pH van het grondwater.

Zowel opslaglocaties in zee als op het land moeten worden bewaakt. De keuze van de geschikte monitoringstechnieken zal afhangen van de technische en geologische kenmerken van de locatie en het doel. Er is een grote verscheidenheid aan monitoringstechnieken beschikbaar (Fig. 3) in algemeen gebruik in de olie- en gasindustrie; deze technieken worden momenteel aangepast voor CO<sub>2</sub>. Men werkt aan optimalisering van bestaande methoden en het ontwikkelen van nieuwe

technieken met het doel te komen tot verbetering van de resolutie en de betrouwbaarheid, beperking van de kosten, automatisering van de processen en aantonen van de effectiviteit van de opslag.

### Monitoringsstrategie

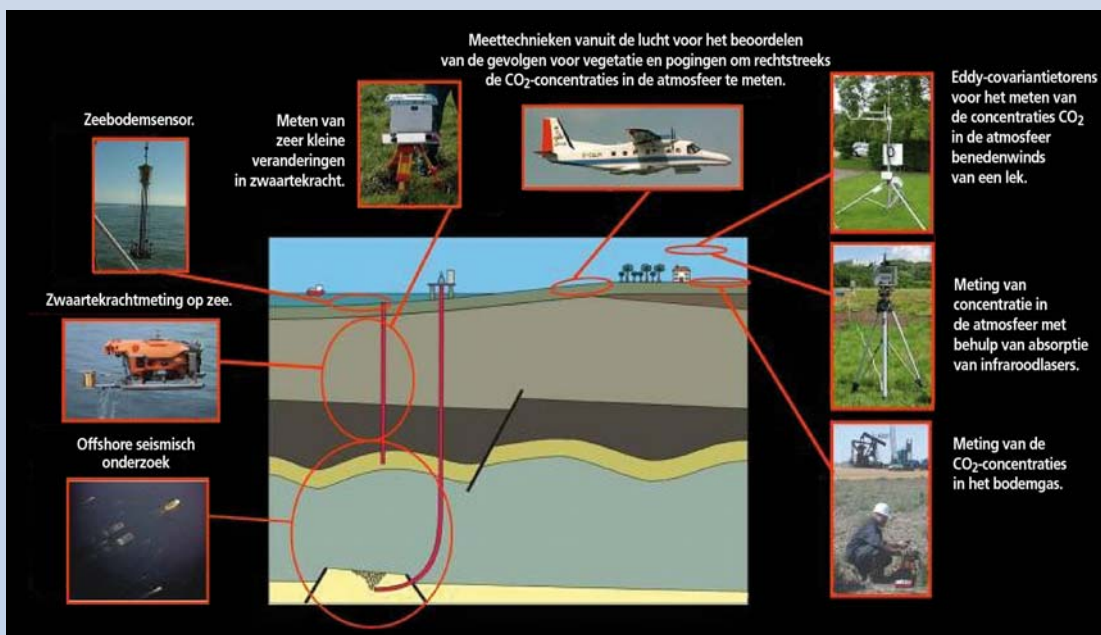
Bij het opstellen van een monitoringsstrategie moeten veel beslissingen worden genomen die afhangen van de specifieke geologische en technische omstandigheden voor elke locatie, zoals geometrie en diepte van het reservoir, verwachte spreiding van de CO<sub>2</sub>-pluim, mogelijke lekpaden, geologie van de lagen boven het reservoir, duur en debiet van de injectie, en oppervlakteomstandigheden zoals topografie, bevolkingsdichtheid, infrastructuur en ecosystemen. Als de beslissingen zijn genomen met betrekking tot de meest geschikte meettechnieken en locaties, moeten voordat er wordt geïnjecteerd nulmetingen worden uitgevoerd als referentie voor alle toekomstige metingen. Tenslotte moet elk bewakingsprogramma flexibel zijn, zodat het kan worden aangepast naarmate het opslagproject zich ontwikkelt. Een bewakingsstrategie waarin al deze onderwerpen zijn geïntegreerd en waarin tegelijkertijd de kosten binnen de perken blijven, zal een kritische component zijn bij de risicoanalyse en verificatie van de veiligheid en doelmatigheid van de locatie.

Samenvattend: we weten dat het monitoren van een CO<sub>2</sub>-opslaglocatie al haalbaar is met veel technieken die momenteel beschikbaar of in ontwikkeling zijn. Er wordt momenteel onderzoek uitgevoerd, niet alleen naar het ontwikkelen van nieuwe hulpmiddelen (vooral voor gebruik op de zeebodem) maar ook voor het optimaliseren van de bewaking en het beperken van de kosten.



© CO<sub>2</sub>-GeoNet

**Figuur 2**  
Bewakingsboei met zonnepanelen voor energievoorziening, drijvers en een apparaat voor het bemonsteren van gas op de zeebodem.



**Figuur 3**  
Een kleine selectie van de verschillende technieken die beschikbaar zijn om verschillende componenten van een CO<sub>2</sub>-opslagsysteem te monitoren.

# Welke veiligheidscriteria moeten we vaststellen en handhaven?

**Om de veiligheid en efficiëntie van de opslag zeker te stellen, moeten voorwaarden voor ontwerp en exploitatie van het project worden opgelegd door de toezichthouders en worden opgevolgd door de exploitanten.**

Hoewel ondergrondse opslag van CO<sub>2</sub> nu breed wordt geaccepteerd als een serieuze mogelijkheid voor het matigen van de klimaatverandering, moeten de veiligheidscriteria ten aanzien van mens en milieu nog worden vastgesteld voordat deze methode op industriële schaal kan worden toegepast. Dergelijke criteria kunnen worden geformuleerd als eisen te stellen aan exploitanten door de toezichthouders om te zorgen dat de negatieve gevolgen voor gezondheid, veiligheid en het milieu (grondwaterbronnen inbegrepen) verwaarloosbaar zijn op de korte, middellange en lange termijn.

Een belangrijk punt bij ondergrondse opslag van CO<sub>2</sub> is dat het permanent moet zijn en dat dus opslaglocaties niet mogen lekken. Het 'wat als?' scenario betekent echter dat de risico's moeten worden beoordeeld en dat exploitanten zich moeten houden aan maatregelen ter voorkoming van lekkage of abnormaal gedrag van de locaties. Volgens de IPCC moet het geïnjecteerde CO<sub>2</sub> tenminste 1000 jaar onder de grond blijven, zodat de CO<sub>2</sub>-concentraties in de atmosfeer zich kunnen stabiliseren of afnemen door natuurlijke uitwisseling met het zeewater, en de stijging van de oppervlaktetemperaturen als gevolg van het broeikaseffect minimaal blijft. Lokale gevolgen moeten echter beoordeeld worden op een tijdschaal die loopt van dagen tot vele duizenden jaren.

We kunnen verschillende hoofdfasen onderscheiden tijdens de levensduur van een CO<sub>2</sub>-opslagproject (**Fig. 1**). De veiligheid gedurende de verschillende projectfasen wordt gegarandeerd door:

- zorgvuldige selectie en karakterisatie van de locatie;
- veiligheidsassessment;
- professionele exploitatie;
- een geschikt monitoringsplan;
- een adequaat plan voor noodgevallen.

De bijbehorende kritische doelstellingen zijn:

- zeker stellen dat het CO<sub>2</sub> in het reservoir blijft;
- behoud van de integriteit van de put;
- behoud van de fysieke eigenschappen van het reservoir (zoals porositeit, doorlaatbaarheid, injectiviteit), en de doorlaatbaarheid van

de afsluitende laag;

- rekening houden met de samenstelling van de CO<sub>2</sub>-stroom, extra aandacht besteden aan eventuele onzuiverheden die tijdens het afvangen niet zijn verwijderd. Dit is belangrijk ter voorkoming van eventuele negatieve interacties met put, reservoir, de lagen boven het reservoir en, in geval van lekkage, met het grondwater.

## Veiligheidscriteria voor het projectontwerp

De veiligheid moet worden aangetoond voor de start van de activiteiten.

De belangrijkste aspecten die moeten worden onderzocht met betrekking tot de keuze van de locatie zijn:

- het reservoir en de afsluitende laag;
- de lagen boven het reservoir en in het bijzonder ondoorlaatbare lagen die als secundaire afsluiting zouden kunnen functioneren;
- de aanwezigheid van doorlaatbare breuken of putten die een lekpad naar de oppervlakte zouden kunnen vormen;
- de drinkwaterlagen;
- de beperkingen vanwege mens en milieu.

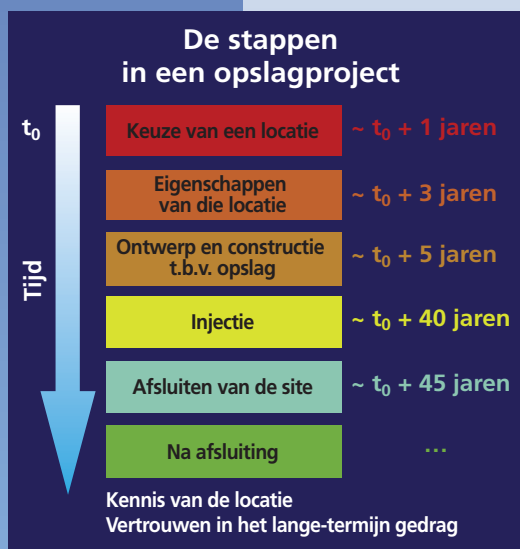
Exploratietechnieken voor olie en gas worden gebruikt ter beoordeling van de geologie en geometrie van de opslaglocatie. Modelleren van het CO<sub>2</sub> in het reservoir met betrekking tot vloeistofstroming, chemie en geomechanica, maakt voorspellingen mogelijk van het gedrag van het CO<sub>2</sub> en de resultaten op de lange termijn, evenals het vaststellen van de parameters voor efficiënte injectie.

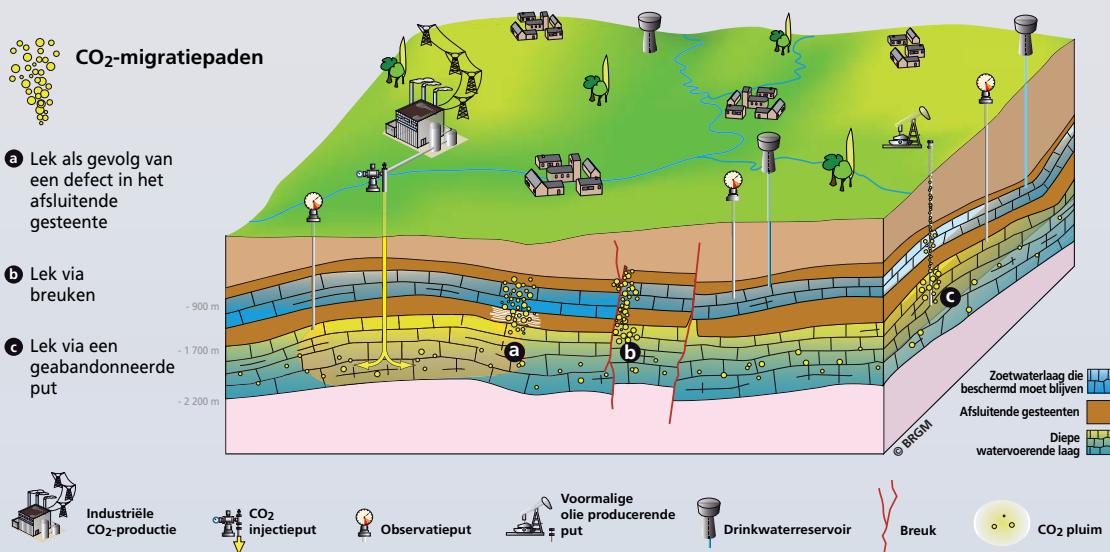
Dit betekent dat zorgvuldige karakterisatie van de locatie het mogelijk moet maken een 'normaal' scenario voor opslaggedrag vast te stellen voor een locatie die geschikt is voor betrouwbare opslag.

Vervolgens moet bij een risicoanalyse rekening worden gehouden met minder plausibele scenario's voor toekomstige toestanden van de opslaglocatie, inclusief onverwachte gebeurtenissen. In het bijzonder is het belangrijk te letten op mogelijke lekroutes en blootstelling. (**Fig. 2**). Elk lekkagescenario moet worden geanalyseerd door deskundigen en, waar mogelijk op basis van numeriek modelleren, moeten waarschijnlijkheid van optreden en risico worden beoordeeld. Zo moet de ontwikkeling van de CO<sub>2</sub>-pluim zorgvuldig in kaart worden gebracht om een mogelijke verbinding met een breukzone op te sporen. Gevoeligheid voor variaties in de invoerparameters en onzekerheden moet zorgvuldig worden geëvalueerd.

De mogelijke gevolgen van CO<sub>2</sub> voor mens en milieu

**Figuur 1**  
De verschillende stappen voor een opslagproject.





**Figuur 2**  
Voorbeeld van mogelijke lekkagescenario's.

moeten worden beoordeeld door middel van een milieueffectrapportage, zoals gebruikelijk is bij elke vergunningverlening voor een industrieel bedrijf.

Het monitoringsprogramma dient te worden opgezet in overeenstemming met de uitkomsten van de risicoanalyse en het dient de kritische parameters te betreffen die zijn vastgesteld voor de verschillende scenario's. De belangrijkste doelstellingen zijn reeds eerder besproken.

Het noodplan – bedoeld voor het geval dat er toch serieuze lekkage optreedt – is de laatste component van het projectontwerp en heeft ten doel en gedetailleerde lijst op te stellen van concrete maatregelen die genomen moeten worden in zulke noodgevallen. Het betreft dan serieuze problemen met de integriteit van de afsluitende laag en de put, tijdens en na injectie. Dit plan kan zeer extreme maatregelen bevatten, zoals het besluit – onder welomschreven omstandigheden – om de opslag op gecontroleerde manier ongedaan te maken. Hier wordt gebruik gemaakt van standaardtechnieken in de olie- en gasindustrie. Maar ook ontruiming van de locatie kan daar deel van uitmaken.

### Veiligheidscriteria tijdens exploitatie en na sluiting

Zorgen omtrent de veiligheid horen vooral – dus niet uitsluitend – bij de fase na het injecteren.

Vertrouwen in de mogelijkheid om CO<sub>2</sub> op een veilige manier te injecteren en op te slaan is mede afhankelijk van de ervaring van industriële bedrijven. CO<sub>2</sub> is een product dat vrij algemeen wordt gebruikt in diverse bedrijfstakken zodat in het omgaan met dit materiaal ruime ervaring voorhanden is. Het ontwerp en beheer van de exploitatie zullen voornamelijk afhankelijk zijn van kennis van de olie- en gasindustrie, in het bijzonder op het gebied van tijdelijke opslag van gas en verbeterde oliewinning (EOR). De belangrijkste parameters en fenomenen die in de hand gehouden moeten worden zijn:

- injectiedruk en –snelheid, de eerste moet lager worden gehouden dan de druk waarboven breuken ontstaan in de afsluitende laag;
- geïnjecteerd volume, om te voldoen aan de

voorspellingen uit het model;

- samenstelling van de geïnjecteerde CO<sub>2</sub>-stroom;
- integriteit van de injectieput(ten) en binnen of nabij het uitbreidingsgebied van de CO<sub>2</sub>-pluim gelegen putten;
- uitbreiding van de CO<sub>2</sub>-pluim en detectie van eventuele lekkage;
- stabiliteit van de bodem.

Tijdens injectie moet het werkelijke gedrag van het geïnjecteerde CO<sub>2</sub> herhaaldelijk worden vergeleken met de voorspellingen. Dat vergroot onze kennis van de locatie. Als onverwacht gedrag wordt vastgesteld, moet het monitoringsprogramma worden aangepast en eventueel moeten corrigerende maatregelen worden genomen.

Bij het vermoeden van lekkage moeten geschikte monitoringstechnieken worden ingezet op een specifiek deel van de opslaglocatie, van het reservoir tot aan het oppervlakte. Zo kan worden vastgesteld of CO<sub>2</sub> opstijgt en of er negatieve gevolgen kunnen zijn voor drinkwaterlagen, mens en milieu.

Na voltooiing van de injectie begint de afsluitfase: putten moeten op de juiste wijze worden gesloten, het modelleer- en bewakingsprogramma moet worden bijgewerkt en zo nodig moeten corrigerende maatregelen worden genomen om de risico's te beperken.

Als het risiconiveau voldoende laag wordt geacht, komt de aansprakelijkheid voor de opslag uiteindelijk bij de nationale overheid en het monitoringsprogramma kan worden aangepast.

De voorgestelde Europese Richtlijn definieert het wettelijk raamwerk om zeker te stellen dat het afvangen en opslaan van CO<sub>2</sub> een serieuze optie tot vermindering van het klimaatprobleem levert en dat het veilig en verantwoordelijk kan worden uitgevoerd

Concluderend zijn veiligheidscriteria essentieel voor het succes van de industriële realisatie van CO<sub>2</sub>-opslag. Ze moeten aan elke specifieke opslaglocatie worden aangepast. Deze criteria zijn in het bijzonder van belang voor de publieke acceptatie en essentieel voor de vergunningverlening door toezichthouders.

## Woordenlijst

**Afsluitende laag** : ondoorlaatbare (gesteente)laag die werkt als blokkade voor de beweging van vloeistoffen en gassen en een afsluiting vormt als hij boven een reservoir ligt.

**CCS**: CO<sub>2</sub> afvangen opslaan [Capture and Storage].

**CO<sub>2</sub>-pluim**: ruimtelijke verdeling van het superkritische CO<sub>2</sub> in het gesteente.

**CSLF**: Carbon Sequestration Leadership Forum. Een internationaal initiatief op het gebied van klimaatverandering dat zich richt op de ontwikkeling van verbeterde, economisch verantwoorde technologieën voor het scheiden en afvangen van kooldioxide en het transport en de langdurige veilige opslag daarvan.

**Doorlaatbaarheid**: de mate waarin poreus gesteente een vloeistof kan doorlaten; het is een maat voor het relatieve gemak waarmee vloeistof kan stromen onder een drukverschil.

**Enhanced Oil Recovery (EOR)** - verbeterde oliewinning: een techniek die de olieproductie verbetert door vloeistoffen (zoals stoom of CO<sub>2</sub>) te injecteren die helpen de olie in het reservoir in beweging te brengen.

**EU Geocapacity**: een lopend Europees onderzoeksproject ter bepaling van de totale ondergrondse opslagcapaciteit die in Europa beschikbaar is voor door de mens veroorzaakte CO<sub>2</sub>-emissies.

**GESTCO**: een voltooid Europees onderzoeksproject waarin de ondergrondse opslagmogelijkheden zijn bepaald voor CO<sub>2</sub> in 8 landen (Noorwegen, Denemarken, UK, België, Nederland, Duitsland, Frankrijk and Griekenland).

**IEA-GHG**: Internationaal Energieagentschap – Onderzoeksen ontwikkelingsprogramma voor broeikasgas. Een internationale samenwerking gericht op: het evalueren van technologieën voor het beperken van de emissies van broeikasgassen, bekendheid geven aan de resultaten van deze onderzoeken, en het aangeven van onderzoeksdoelen, onderwerpen voor ontwikkeling en demonstraties en het bevorderen van geschikte activiteiten.

**Injectiviteit**: is een maat voor het gemak waarmee een vloeistof (zoals CO<sub>2</sub>) kan worden geïnjecteerd in een geologische formatie. Hij wordt gedefinieerd als de injectiesnelheid gedeeld door het drukverschil tussen het injectiepunt onderin de put en de formatie.

**IPCC**: International Panel on Climate Change - internationaal panel voor klimaatverandering. Deze organisatie is in 1988

opgezet door de WMO (World Meteorological Organization) en de UNEP (United Nations Environment Programme) voor beoordeling van de wetenschappelijke, technische en sociaal-economische informatie die relevant is voor het begrijpen van klimaatverandering, de mogelijke gevolgen en opties voor aanpassing en matiging. IPCC en Al Gore hebben gezamenlijk in 2007 de Nobelprijs voor de Vrede gekregen.

**Lithostatische druk**: de kracht die wordt uitgeoefend op een gesteente onder het maaiveld door de bovenliggende gesteenten. De lithostatische druk neemt toe met de diepte.

**Microseismiek**: lichte beweging of trilling in de aardkorst, niet door aardbevingen, die kan worden veroorzaakt door een verscheidenheid aan natuurlijke en kunstmatige invloeden.

**Natuurlijk analogo**: natuurlijk CO<sub>2</sub>-reservoir. Er bestaan zowel lekkende als niet-lekkende locaties en het onderzoek daarvan kan ons begrip verbeteren van wat er op de lange duur gebeurt met CO<sub>2</sub> in diepe geologische systemen.

**Pekel**: zeer zout water dat een hoge concentratie opgeloste zouten bevat.

**pH**: zuurtegraad van een oplossing waarbij een pH van 7 een soort scheidslijn vormt. Bij een pH groter dan 7 hebben we een basisch milieu. Bij een pH kleiner dan 7 hebben we een zuur milieu.

**Porositeit**: percentage van het bruto volume van een gesteente dat niet wordt ingenomen door mineralen. Deze ruimten worden poriën genoemd en ze kunnen gevuld zijn met verschillende vloeistoffen en gassen; in diep gesteente is deze vloeistof meestal zout water maar het kan ook gaan om olie of gas zoals methaan of natuurlijk gevormd CO<sub>2</sub>.

**Put (of boorgat)**: een rond gat, gemaakt door te boren, in het bijzonder een diep gat met een kleine diameter, zoals een olieput.

**Reservoir**: een sedimentair lichaam dat voldoende poreus en doorlaatbaar is om CO<sub>2</sub> te kunnen bevatten. Zandsteen en kalksteen zijn de meest voorkomende reservoirgesteentes.

**Superkritisch**: de toestand van een stof bij drukken en temperaturen boven zekere kritische waarden, waarbij de stof eigenschappen van zowel een vloeistof als een gas heeft. Bij CO<sub>2</sub> zijn deze waarden 7,38 Mpa en 31,03 °C

**Watervoerende laag**: doorlaatbare bodemlaag die water bevat. De ondiepe watervoerende lagen bevatten meestal zoet water, geschikt voor menselijke consumptie. De diepe bevatten zout water dat ongeschikt is voor menselijk gebruik.

### Overig:

**The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Special Report on CCS:**

[http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srccs/srccs\\_wholereport.pdf](http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srccs/srccs_wholereport.pdf)

**De website van de Europese Commissie over CCS:**

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

**De EC Richtlijn:**

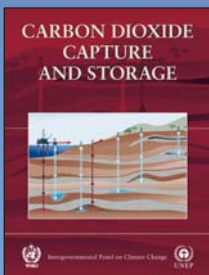
[http://ec.europa.eu/environment/climat/ccs/eccp1\\_en.htm](http://ec.europa.eu/environment/climat/ccs/eccp1_en.htm)

**Het ETS-systeem:**

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

**IEA GHG website over bewakingshulpmiddelen:**

[http://www.co2captureandstorage.info/co2tool\\_v2.1beta/introduction.html](http://www.co2captureandstorage.info/co2tool_v2.1beta/introduction.html)



# Wat CO<sub>2</sub>GeoNet voor u kan doen



**CO<sub>2</sub>GeoNet** 'European Network of Excellence' is een Europees netwerk van kennisinstellingen dat zich bezighoudt met het leveren van objectieve en wetenschappelijk verantwoorde informatie over de veiligheid en doelmatigheid van ondergrondse opslag van CO<sub>2</sub>. Het samenwerkingsverband omvat meer dan 150 wetenschappers bij 13 publieke onderzoeksinstituten waarbij elke deelnemer een belangrijke internationale rol speelt bij alle aspecten van onderzoek naar ondergrondse opslag van CO<sub>2</sub>. Het netwerk ontvangt een bijdrage van de Europese Commissie ingevolge het 6<sup>e</sup> Kaderprogramma.

## De bij het netwerk betrokken instituten zijn:

BGR , BGS , BRGM , GEUS , Heriot Watt University , IFP , Imperial College , NIVA , OGS , IRIS , SINTEF , TNO , Sapienza University of Rome .

## Activiteiten van het netwerk

De onderzoekers van het Netwerk werken samen aan het vergroten van onze kennis over de ondergrondse opslag van CO<sub>2</sub> en de hulpmiddelen die nodig zijn voor het veilig uitvoeren daarvan. Ze zijn betrokken bij een aantal "high profile" onderzoeksprojecten betreffende het reservoir, de afsluitende laag, mogelijke paden voor CO<sub>2</sub>-migratie naar de oppervlakte, mogelijke gevolgen voor de mens en lokale ecosystemen in het geval van lekkage, en het draagvlak bij en de communicatie met het publiek.

De kracht van CO<sub>2</sub>GeoNet ligt in het opzetten van multidisciplinaire teams van zeer ervaren specialisten, wat kan leiden tot een beter begrip van alle facetten van ondergrondse opslag en de manier waarop zij met elkaar samenhangen binnen een groter en complexer systeem.

Naast de onderzoeksactiviteiten kan CO<sub>2</sub>GeoNet ook:

- opleiding en kennisopbouw bieden voor de wetenschappers en technici die nodig zijn om CO<sub>2</sub>-opslag mogelijk te maken;
- wetenschappelijk advies geven en beoordelen van projectvoorstellen (geotechnische kwaliteit, milieubescherming, risicobeheer, zaken betreffende planning en voorschriften, etc.);
- onafhankelijke, objectieve informatie verspreiden op basis van zijn onderzoeksresultaten;
- communiceren met direct belanghebbenden.



Ter bevordering van het publieke bewustzijn aangaande ondergrondse opslag van CO<sub>2</sub> als haalbare optie voor het matigen van de klimaatverandering heeft CO<sub>2</sub>GeoNet zich gebogen over de fundamentele vraag "Wat betekent ondergrondse CO<sub>2</sub>-opslag nu eigenlijk?".

Een groep vooraanstaande wetenschappers van CO<sub>2</sub>GeoNet heeft op basis van de huidige kennis antwoorden opgesteld voor zes relevante vragen op basis van meer dan 10 jaar Europees onderzoek en de ervaring van demonstratieprojecten over de hele wereld. Het doel van deze inspanning is om duidelijke en objectieve wetenschappelijke informatie te leveren aan een breed publiek en de dialoog te bevorderen over essentiële vragen met betrekking tot de technische aspecten van ondergrondse opslag van CO<sub>2</sub>.

Deze arbeid, samengevat in deze brochure, is gepresenteerd tijdens de eerste Training- en Dialoog-workshop van het Netwerk, gehouden in Parijs op 3 oktober 2007.

Het aanwezige publiek bestond uit direct belanghebbenden, industriëlen, ingenieurs en wetenschappers, beleidsmakers, journalisten, NGO's, sociologen, onderwijzers en studenten. In totaal waren er 170 mensen aanwezig uit 21 verschillende landen en zij hadden de mogelijkheid ideeën uit te wisselen en meer begrip te krijgen van ondergrondse opslag van CO<sub>2</sub>.

Voor meer informatie en vragen over de mogelijkheden van soortgelijke cursussen op maat voor ondergrondse opslag kunt u contact opnemen met het CO<sub>2</sub>GeoNet secretariaat op [info@co2geonet.com](mailto:info@co2geonet.com) of onze website bezoeken op [www.co2geonet.eu](http://www.co2geonet.eu).

# CO<sub>2</sub>GeoNet

## Het Europese 'Network of Excellence' voor ondergrondse opslag van CO<sub>2</sub>



[www.co2geonet.eu](http://www.co2geonet.eu)

Secretariaat: [info@co2geonet.com](mailto: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, **IFP**, **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** Nederlandse Organisatie voor Toegepast Natuurwetenschappelijk Onderzoek, **URS** Sapienza University of Rome Dip. Scienze della Terra.