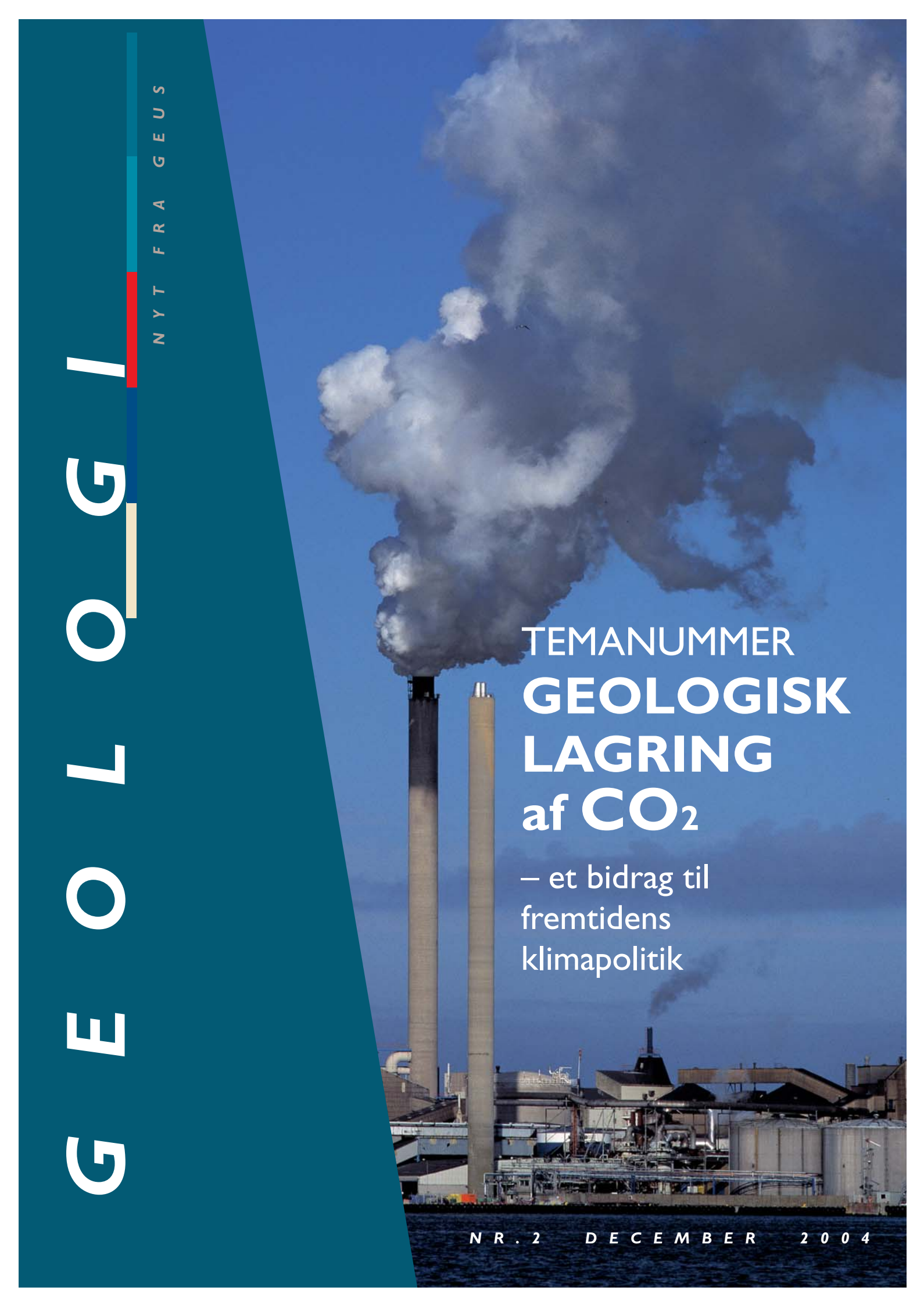




TEMANUMMER GEOLOGISK LAGRING af CO₂

– et bidrag til
fremtidens
klimapolitik

Geologisk lagring af CO₂ – et bidrag til fremtidens klimapolitik



Niels Peter Christensen
Peter Johannessen
Michael Larsen
Niels Springer
Kim Zink-Jørgensen



Udledning af CO₂ fra afbrænding af fossile brændsler så som kul, olie og gas kan føre til en række uønskede ændringer af jordens klima. Der er en international fælles vilje til at nedbringe CO₂ udledningen, som beskrevet i Kyoto-aftalen, men målene kan være svære at nå, da verden samtidig tørster efter energi til skabelse af vækst og velstand. Lagring af CO₂ i undergrunden er en oplagt mulighed for at indskrænke udledningen. Det kræver, at CO₂ adskilles fra røggassen eller brændslet, og at der findes egnede geologiske formationer, hvor den frigjorte CO₂ kan lagres sikkert i undergrunden. Undersøgelser af denne mulighed foregår igennem et antal internationale forskningsprojekter i EU-regi, hvor både offentlige forskningsinstitutioner og industrien deltager. GEUS er en aktiv aktør i dette samarbejde.

Udledning af drivhusgassen kuldioxid – CO₂ fra afbrænding af fossile brændsler som kul, olie, gas og andre kilder er et globalt problem. CO₂ bidrager som den vigtigste menneskeskabte faktor til en forøgelse af drivhuseffekten, hvorved der sker en gradvis opvarmning af Jordens atmosfære med en række klimaeffekter til følge. Da verdens lande mødtes til klimakonferencer i Brasilien og Japan i 1990'erne, var der stadig stor tvivl om, hvorvidt og i hvilket omfang de stigende udledninger af drivhusgasser kunne påvirke jordens klima. Denne tvivl er i dag afløst af diskussioner om, hvor stor påvirkningen er, og hvad man kan gøre for at bekæmpe de mange effekter af den globale opvarmning. Det drejer sig om effekter som afsmeltning af indlandsisen og globale havstigninger, mere ekstreme vejrtyper, stigende udbredelse af ørkenen, effekter på biodiversiteten m.v. I 1997 blev Kyoto-aftalen indgået med henblik på at reducere de industrialiserede landes udledning af drivhusgasser med 5,5% i forhold til år 1990. EU skal som sit bidrag til Kyoto-afta-



(Kilde: POLIFOTO)



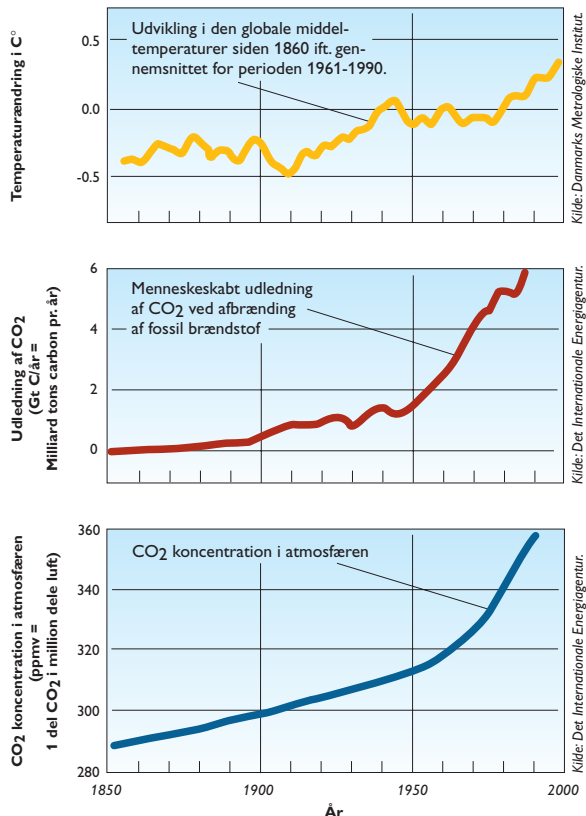
(Kilde: POLIFOTO)



(Foto: Dieter Zillman, Julissat)

Jordens klima påvirkes af de stigende udledninger af CO₂ til atmosfæren.

Udvikling af temperatur sammenholdt med atmosfærens indhold af CO₂



len reducere udslippet af drivhusgasser med 8%, hvilket svarer til at lukke eller erstatte omtrent 80 store kulkraftværker. Reduktionerne skal være i hus i perioden 2008 til 2012. Det er tanken, at aftalen skal danne grundlaget for en langt mere omfattende reduktion i resten af det 21. århundrede, men allerede fra starten løb aftalen ind i problemer. EU-landene havde fra starten sat stor prestige ind på at få aftalen ratificeret af de nødvendige 55% af verdens industrilande. Det så i langt tid ud til ikke at ville lykkes, idet USA – som står for en fjerdedel af verdens menneskeskabte CO₂ udslip – ikke ville godkende den indgåede aftale. Med den russiske Dumas ratificering af aftalen i oktober 2004 er det lykkedes at samle den fornødne tilslutning og aftalen trådte i kraft februar 2005.

CO₂ udledningen kan reduceres ved et mindre brug af fossile brændsler. Dette kan dels ske ved energibesparende foranstaltninger som for eksempel bedre isolering af

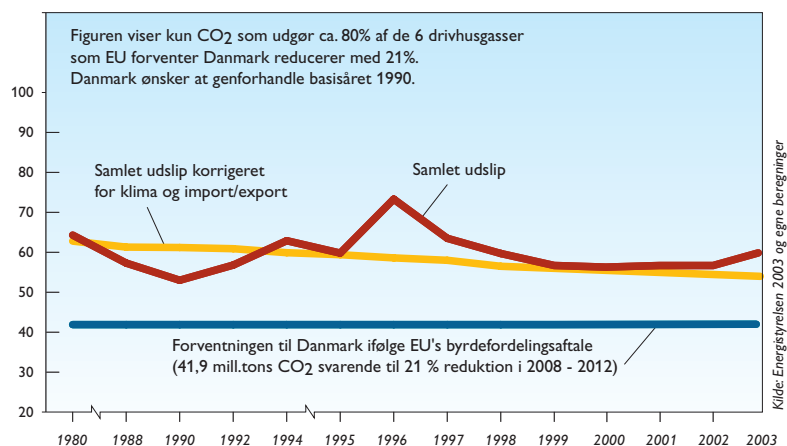
boliger, udvikling af biler der kører længere på literen, eller omstilling til alternative energiformer som ikke udleder CO₂ eller begrænser det. På længere sigt kan det være et problem at opfylde den globale målsætning om at nedbringe CO₂ udslippet. Dels

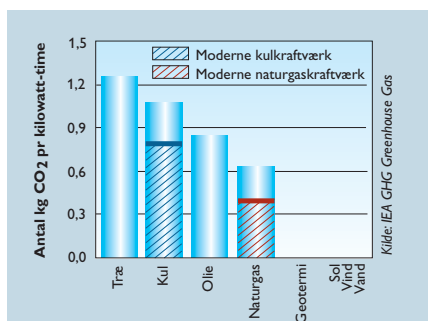
fordi det er vanskeligt at udvikle alternative energikilder så hurtigt, at de kan afløse de traditionelle energikilder i lande med et højt energiforbrug. Dels er der et kraftigt stigende energiforbrug i de tætbefolkede dele af jorden som for eksempel Kina og Indien, der har let adgang til billige fossile brændsler som kul. Det må derfor forudses at det vil tage mange årtier før afhængigheden af de fossile brændsler kan reduceres væsentligt.

I Danmark er kraftværkerne primært baseret på anvendelse af kul og i de senere år også naturgas samt en mindre mængde biomasse. De danske kulkraftværker er blandt de mest effektive i verden, men et skift til naturgas vil reducere CO₂ udslippet. Det vil kunne bidrage til at opfylde de kortsigtede CO₂ målsætninger som for eksempel Kyoto-målene. Det er ved dette skift fra kul til naturgas, at Storbritannien som et af de få EU-lande allerede har opnået en reel reduktion i CO₂ udslippet. På lidt længere sigt må der dog forventes et stigende pres og en højere pris på naturgas. Samtidig vil det ikke være tilstrækkeligt at skifte til naturgas, hvis der som det forventes i perioden efter Kyoto-aftalens udløb i 2012 skal ske langsigtede reduktioner på helt op til 2/3 af 1990 niveauet.

Der er derfor behov for udvikling af nye koncepter, der kan nedbringe udledningen af CO₂. En mulighed er lagring af CO₂ i undergrunden efter først at have separeret CO₂ fra røggassen, der fremkommer ved forbrænding eller separation af drivhusgassen direkte fra brændslet inden det bruges

Danmarks udslip af CO₂ i perioden 1980-2003 i millioner tons CO₂





Det er ikke lige meget hvilket brændsel kraftværkerne fyrer med. Af nedenstående kan man se mængden af CO₂ som udledes for hver kilowatt-time der produceres ud fra de forskellige typer brændsel. Af de fossile brændsler er brunkul værst og naturgas bedst, mens vedvarende energikilder per definition er CO₂ neutrale. På trods af den høje CO₂ udledning pr. kilowatt-time, anses træ og anden biomasse som CO₂ neutral såfremt der foretages genplantning.

til fyring. Der findes allerede i dag teknologier til de nævnte separationsmetoder, og det er derfor nærliggende at opfange den udskilte CO₂ og sende den via rørledninger til underjordiske lagre.

Underjordisk oplagring af CO₂ er allerede en realitet, og metoden anvendes i dag i Sleipner gasfeltet i Nordsøen af miljø-mæssige årsager, mens man i Nordamerika anvender CO₂ injektion i undergrunden til at forøge indvindingen fra eksisterende oliefelter. Den øgede olieindvinding er mulig fordi CO₂ blandes med olien og får den til at flyde lettere mod produktionsbrønde.

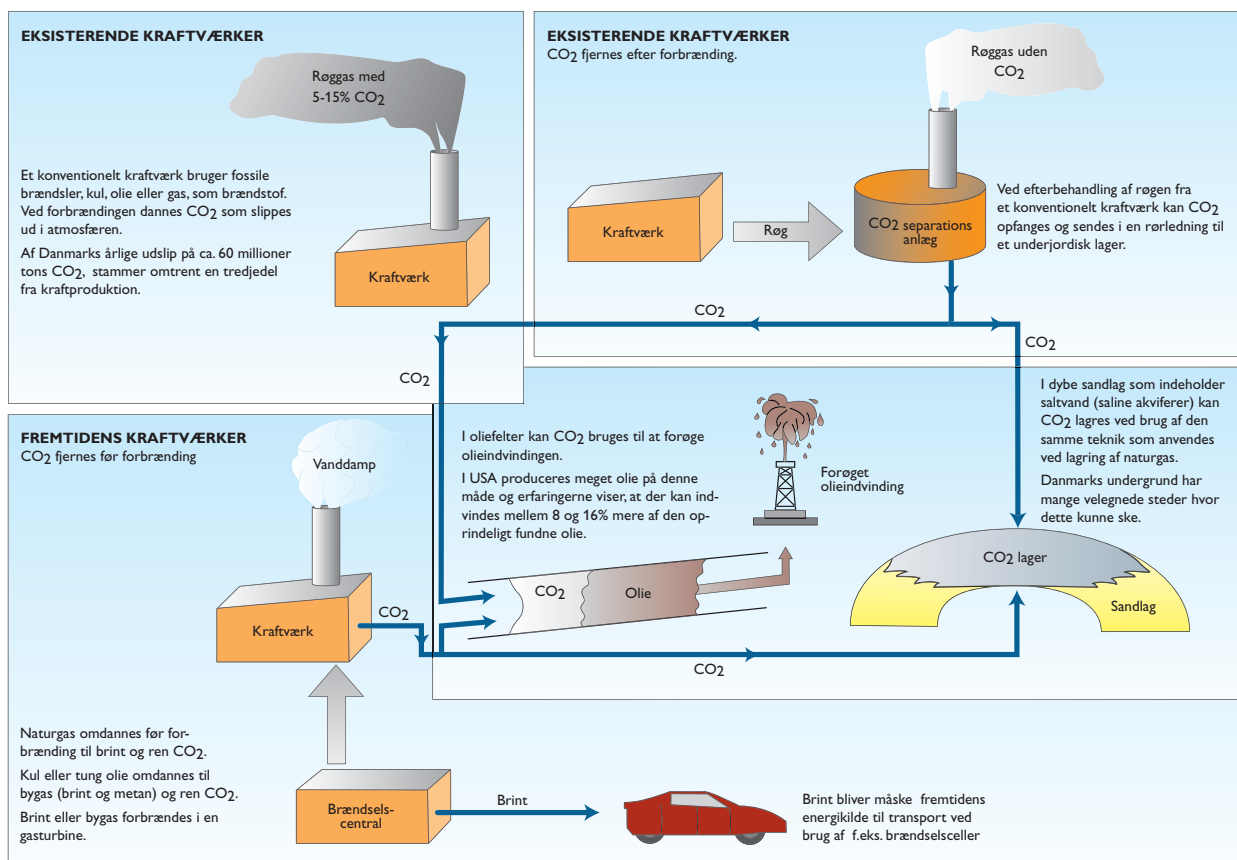
I et gennemsnitligt industriland stammer det menneskeskabte CO₂ udslip fra tre nogenlunde lige store kilder: (1) Kraftværker og tung industri, (2) transport og (3) husholdninger og andre småkilder. Hvis man kan lagre CO₂ fra de store punktkilder, ville man for Danmarks vedkommende kunne reducere udslippet med 30–40%, og hvis man kan

producere CO₂ frit brændstof til biler, vil reduktionen næsten kunne fordobles.

Den sidste mulighed er på tegnebrættet i to nye initiativer – det europæiske HYPOGEN og det amerikanske FutureGen, der går ud på at udvikle og bygge fremtidens kraftværker, som ikke udleder CO₂. I de nye kraftværker fjernes CO₂ fra brændslet før afbrændingen i lighed med rensning af CO₂ fra røggassen i konventionelle kraftværker. Ved CO₂ separationen skabes blandt andet brint, der kan bruges til energitransport i fremtidens biler baseret på brændselsceller.

Et antal internationale forskningsprojekter i EU-regi arbejder med at vurdere mulighederne for separation og lagring af CO₂ i undergrunden med henblik på at udvikle sikre metoder til lagring og at kortlægge egnede geologiske lag i undergrunden, der kan rumme fremtidens CO₂.

Fremtidens kraftværk



Geologisk lagring af CO₂

Lagring af gasser og væsker i undergrunden er en kendt teknologi som anvendes i stigende grad. Især lagres naturgas i undergrunden i nærheden af forbrugerne for at sikre forsyningen i tilfælde af leverancestop eller for at udjævne årstidsvariationer i forbruget. I Nordamerika er der omtrent 200 lagre af naturgas i undergrunden, medens der i Europa er cirka 100. Danmark har to lagre af geologisk forskellig karakter. Det drejer sig om udslyllede hulrum i en salthorst ved Ll. Torup i det nordlige Jylland og dybtliggende sandstenslag ved Stenlille i Vestsjælland.

CO₂ kan lagres i forskellige typer geologiske lag i undergrunden, som vi blandt andet kender fra olie- og gasefterforskning og eftersøgning af geotermiske reservoirer. Selve lageret kan bestå af geologiske lag med stor porøsitet, så de kan rumme me-

get CO₂, og stor permeabilitet så man hurtigt kan pumpe CO₂ ned i det. Det kan for eksempel være sandstens- eller kalklag. For at sikre, at CO₂ ikke bevæger sig opad og slipper ud til atmosfæren, skal lageret tillige være forseglet opad af et tæt lag som for eksempel et lerstenslag.

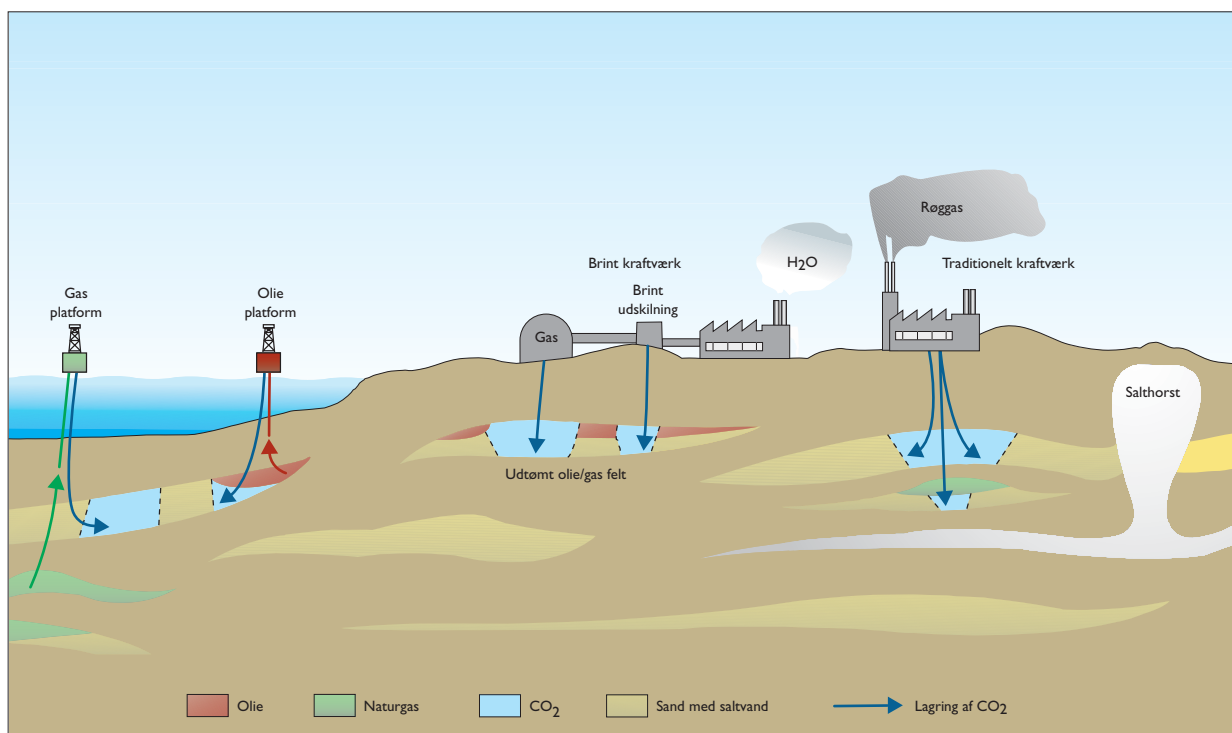
Tryk og temperatur stiger ned igennem jorden og ved cirka 800 meters dybde begynder gassen CO₂ at opføre sig som en væske – en såkaldt superkritisk væske. Det betyder, at den fylder mindre, og ved at lagre CO₂ under tryk i dybder på 800 meter eller mere, kan man lagre meget store mængder. Desuden bevirker den store dybde, at man undgår konflikter med drikkevandslag, idet dybtliggende reservoirer for det meste indeholder saltvand.

Den tekniske del af CO₂ lagring i dybtliggende reservoirer med salt porevand –

de såkaldte saline akviferer minder på mange måder om lagring af naturgas ved Stenlille. På væsentlige punkter er lagring af CO₂ dog anderledes, idet CO₂ opløst i vand danner en svag syre, som kan påvirke bjergarten i reservoiret og dæklagene, og man skal sikre sig, at CO₂ forbliver i reservoiret i flere hundreder eller tusinder år. Især det sidste punkt har givet ophav til debat, og det diskuteres stadig, hvor længe, der er lang tid nok.

Hvis CO₂ lagring i fremtiden skal blive en udbredt og generelt accepteret metode til reduktion af CO₂ udslippet skal man sikre sig, at lagrene er tætte og sikre og at der udvikles metoder til overvågning af lagrene. Flere forskningsgrupper arbejder med disse problemstillinger i forbindelse med aktuelle lagringsprojekter.

CO₂'s vej fra fossilt brændsel til geologisk lager



Erfaringer og studier fra udlandet viser, at CO₂ kan lagres sikkert i undergrunden, hvis en række forudsætninger er opfyldt. For at lagre CO₂ komprimeres gassen og pumpes ned i porøse sandstenslag eller udtømte olie/gas reservoirer. Lagringen sker på mere end 800 meters dybde, hvor CO₂ opfører sig som en væske. Uigennemtrængelige lerstenslag forhindrer, at CO₂ kan undslippe til atmosfæren. Tør CO₂ kan transporteres i almindelige rørledninger, som dem man anvender til naturgas. Hvis CO₂ bliver fugtig dannes en svag syre, kulsyre, som virker ætsende. Transport i rørledninger og skibe er en kendt teknologi, og der er mere end 3000 km CO₂ rørledninger i USA og Canada.

Praktiske erfaringer med lagring af CO₂ i undergrunden

Underjordisk oplagring af CO₂ er allerede en realitet i Nordsøen samt i Nordamerika, hvor man anvender CO₂ injektion i undergrunden til at forøge indvindingen fra eksisterende olieletter.

Nordsøen som laboratorium

Statoil har siden 1990'erne udvundet naturgas fra Jurassiske sandstenslag i Sleipner Feltet i Nordsøen. Naturgassen indeholder 5–10% CO₂, og da den kun må indeholde op til 2,5% CO₂ for at kunne sælges, bliver CO₂ separeret fra gassen på boreplatformen. I begyndelsen blev CO₂ gassen udledt direkte til atmosfæren, ligesom man stadig gør på de fleste andre boreplatforme i verden, men i 1996 besluttede Statoil og dets partnere at gå utraditionelle veje; de ville forsøge at pumpe CO₂'en ned i undergrunden igen for at skåne miljøet.

Injektionen af CO₂ begyndte i 1996, hvor Sleipner Feltet blev verdens første industriskala lagring af CO₂ i undergrunden. Samtidig startede Statoil og partnere et europæisk forskningsprojekt – SACS (Saline Aquifer CO₂ Storage), der skulle studere alle aspekter af CO₂ lagringen med udgangspunkt i data fra Sleipner.

I de sidste 8 år er der via en særlig injektionsboring blevet pumpet cirka 8 millioner tons CO₂ ned i den saltvandsholdige sandsten, og Statoil forventer at pumpe i alt 20 millioner tons ned i feltet i løbet af 20 år. Lagringen sker i Utsira Formationen i en dybde af cirka 1000 m. Her er temperaturen cirka 37°C og trykket cirka 110 bar, hvilket betyder at CO₂ opfører sig som en væske.

Utsira sandstenen udgør et overordentlig stort reservoir, der måler 400 km i nord-syd retning og 50–100 km i øst-vest retning. Sandstenslaget er cirka 50–250 m tykt og er meget porøst (35–40% af bjergarten er vandfyldte porerum) og permeabelt. Internt består Utsira Formationen af flere sandenheder, som er adskilt af tynde lersten. Et flere hundrede meter tykt lerstenslag (Nordland Shale Formationen) overlejrer reservoirsandet, og danner et impermeabelt dæklag, således at CO₂ ikke kan trænge op til havbunden og videre ud i atmosfæren.

SACS-projektet har i løbet af årene undersøgt hvordan CO₂'en påvirker reservoirsandstenen og det impermeable dæklag, samt nøje overvåget om CO₂'en bliver i undergrunden.

CO₂ påvirkningen er undersøgt i laboratoriet, hvor man har genskabt et lille stykke af reservoiret ved hjælp af borekerner fra undergrunden. Prøver fra kernerne er blevet mættet med CO₂ og saltvand, så det svarer til de forhold, man mener der findes i reservoiret, og dernæst har forskerne påvirket kernerne med tryk og temperaturer som findes i den ægte Utsira Formation. Undersøgelserne viser, at der kun er foregået meget få reaktioner mellem porevæsken og bjergarten. Dette kan betyde at CO₂'en ikke har nogen nævneværdig effekt eller at reaktionshastighederne er meget lave. Og set over flere årtusinder vil disse langsomme reaktioner måske kunne påvirke bjergarterne mærkbart. Det er derfor blevet forsøgt at vurdere, hvilke reaktioner der vil ske i reservoiret under lange tidsrum.

Overvågning af CO₂'ens bevægelse i reservoiret foregår ved hjælp af seismik. Før lagring af CO₂ blev der foretaget detaljerede seismiske undersøgelser (3D seismik) i Sleipner området. Fire år efter blev der igen foretaget en seismisk undersøgelse af det samme område. Ved at sammenligne resultaterne af disse to undersøgelser (4D seismik) kan man få et indtryk af CO₂ bob-

Naturlige forekomster af CO₂

CO₂ findes naturligt i vore omgivelser og udgør ca. 0,036% af jordens atmosfære. CO₂ er også kendt som kultveilde, kuldioxid eller tøris. Det anvendes til mange formål, blandt andet fremstilling af sodavand, øl, is og i skumslukkere. CO₂ produceres som biprodukt ved fremstilling af ammoniak og på raffinaderier som fremstiller benzin.

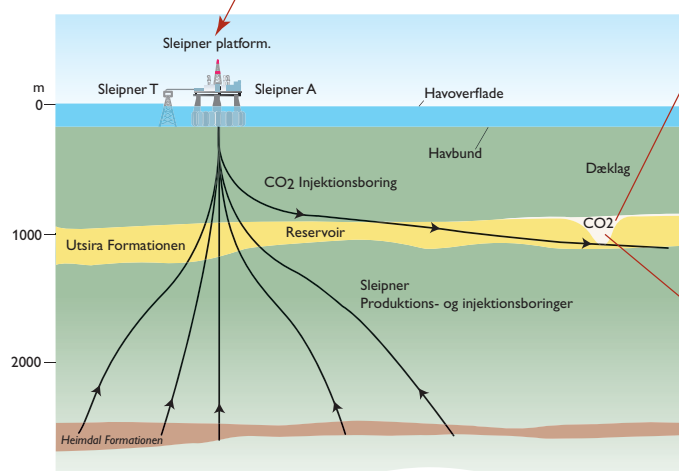
Mange steder i verden siver der CO₂ op til overfladen fra dybereliggende lag. Dette er stort set altid noget, der sker i forbindelse med områder med vulkansk aktivitet, som bidrager med langt den største mængde af atmosfærens CO₂ indhold. Det er også fra vulkanske områder at de fleste af de kendte mineralvande som for eksempel Perrier (Frankrig) og Gerolsteiner (Eifel-distriktet i Tyskland) stammer. Vandet indeholder naturligt CO₂ og indvindes fra dybtliggende kilder.

En række steder, især i Nordamerika men også enkelte steder i Europa, findes geologiske strukturer fyldt med CO₂ på samme måde som olie og naturgas. Også dette stammer sandsynligvis fra fortidig vulkansk aktivitet.

Ren CO₂ er uden smag og lugt. Den er ikke i sig selv giftigt, men da CO₂ er en relativ tung gasart, kan det fortrænge den atmosfæriske luft i lavninger eller kældre og give iltmangel.

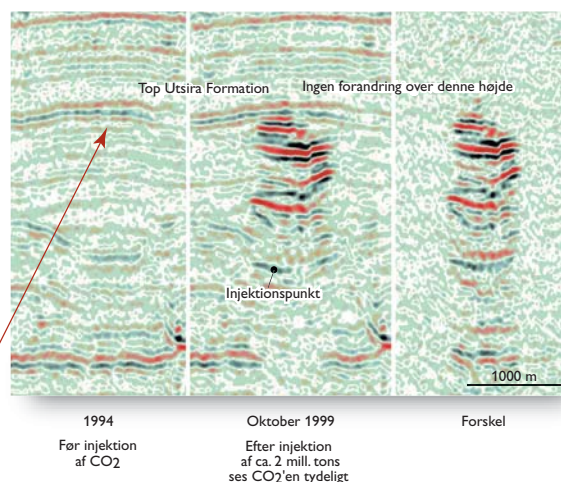


(Foto: Peter Werno-Moors, GEUS.)

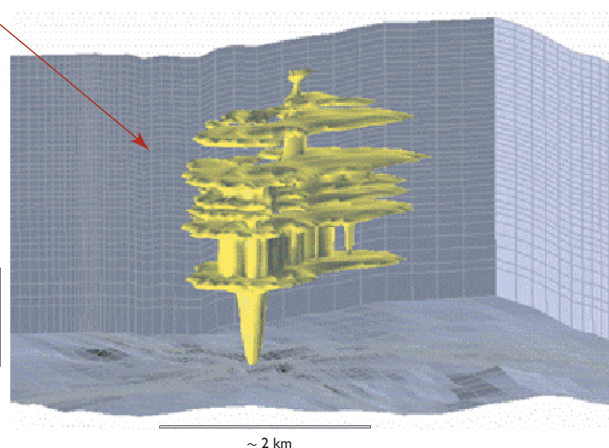


Utsira Formationen: Miocæn - Pliocæn reservoir sand hvor der injiceres CO₂ fra Sleipner platform.
Heimdal Formationen: Jurassisk reservoir sandsten der indeholder gas (Sleipner Feltet).

Det norske gasfelt Sleipner er verdens eneste anlæg, hvor CO₂ lagres i undergrunden af miljømæssige hensyn. (Reproduceret med tilladelse fra Statoil).



Bevægelsen af CO₂ i undergrunden efter injektionen i Sleipner gasfeltet overvåges nøje. Ved hjælp af seismiske undersøgelser kan udbredelsen af CO₂ i sandlaget direkte ses. (Reproduceret med tilladelse fra Statoil).



Computermodel som viser udbredelsen af CO₂ i sandstensreservoir. (Kilde: Meer, L.G.H. van der, Arts, R.J., Peterson, L., 2000. 5th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, Cairns (Australia)).

lens udbredelse og størrelse. CO₂ pumpes ud ved bunden af sandstenen og stiger som en væskeboble op gennem reservoiret, fordi den er lettere end det salte porevand. Processen svarer til de farvede væskebobler i en lavalampe, om end bevægelsen er uendeligt meget langsommere. Ved bunden af det tætte lerstenslag som dækker reservoiret breder CO₂'en sig ud, og CO₂ legemet har nu en udstrækning på 2 km i nord-syd

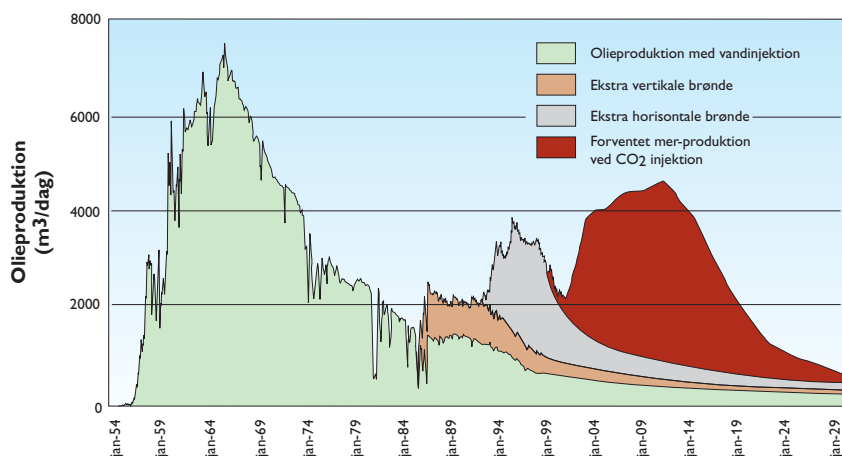
retning og 1/2 km i øst-vest retning.

Modelberegninger viser, at cirka 18% af den injicerede CO₂ vil blive opløst i porevandet på vejen op mod toppen af sandstenslaget. 5000 år efter at injektionen er ophørt, vil al CO₂ være opløst i formationsvandet og fordelt jævnt i reservoiret. Opløst CO₂ i porevandet vil dog blive frigivet igen, hvis det strømmer til områder med mindre tryk, præcis som når man åbner en

sodavand og den begynder at bruse.

På baggrund af erfaringerne fra SACS projektet kan man konkludere, at geologisk lagring af CO₂ i saline akviferer er såvel teknisk som økonomisk muligt. Fortsatte studier af CO₂ boblens bevægelse vil endvidere give informationer, som kan anvendes i risikovurdering af fremtidige geologiske lagre.

Nuværende og fremtidig olieproduktion fra Weyburn



Olieproduktion fra Weyburn Feltet afspejler effekten af vandinjektion og anvendelse af forskellige typer af produktionsbrønde. Den forventede merproduktion ved CO₂-EOR operationen indtil 2029 ses som den røde pukke yderst til højre i figuren. (Kilde: EnCana Corp/IPCC 2002).

CO₂ ned – ekstra olie op

I Nordamerika anvender man CO₂ injektion i undergrunden til at forøge indvindingen fra eksisterende oliefelter. Den øgede olieindvinding er mulig fordi CO₂ fortynder olien og får den til at flyde lettere mod produktionsbrønde. Metoden kaldes EOR (Enhanced Oil Recovery). Siden 1970'erne har man i USA praktiseret denne metode, dog fortrinsvis i mindre oliefelter, hvor man ikke har kunnet producere mere olie med traditionelle teknikker. Erfaringer fra det største CO₂ firma der har specialiseret sig i denne type opgaver viser, at der kan udvindes mellem 8 og 16% mere af den olie, der oprindeligt fandtes i oliefelterne.

Som et middel til at reducere udslippet af CO₂ til atmosfæren har de hidtidige EOR operationer i USA dog været virkningsløse, idet man har pumpet CO₂ op fra naturlige lagre i undergrunden af vulkansk oprindelse. Operationerne har derfor ikke haft nogen effekt på at reducere CO₂ udslippet til atmosfæren.

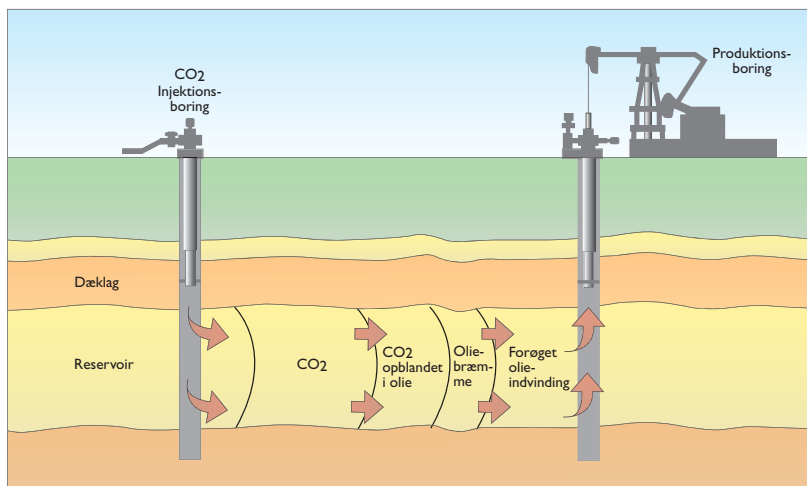
Men det forholder sig anderledes i Saskatchewan i det vestlige Canada, hvor man pumper CO₂ ned i et producerende oliefelt nær byen Weyburn. Her anvender man CO₂ fra et kemisk værk, der fremstiller syntetisk brændstof og kunstgødning ved gassifikation udfra kul. Man har billedligt talt "vendt skorstenen ned i jorden", og CO₂ er i de sidste fire år sendt via en 350 km lang rørledning til EOR projektet i Weyburn. Oliefeltet, der er på størrelse med Danfæltet i

Nordsøen, blev sat i produktion i midten af 1950'erne. Det forventes, at indvindingsgraden for feltet kan øges fra 25% til mindst 35% af den tilstedeværende oliemængde, i løbet af de 20 år EOR projektet er planlagt til at vare.

Det primære formål med denne operation er at få mere olie op af feltet, men som en sidegevinst får man lagret CO₂ i undergrunden til glæde for miljøet. Det er ganske store mængder det drejer sig om. Bereg-

ninger viser at der i alt vil være lagret 20 millioner tons CO₂ ved projektets afslutning, altså en mængde af samme størrelsesorden som i Sleipner projektet i Nordsøen.

Operatøren på Weyburn Feltet, det canadiske olieselskab EnCana Corp., tog tidligt initiativ til et stort internationalt forskningsprojekt sammen med det Internationale Energi Agentur (IEA). EU er senere kommet til via støtte fra Kommissionens forskningsprogram. Formålet med forskningen er dels at beskrive de reaktioner, der finder sted nede i oliefeltet når superkritisk CO₂ injiceres i et karbonatfelt, der hovedsagelig består af dolomit og calcit, og dels at iværksætte et program der skal overvåge, at CO₂ ikke slipper op til grundvandet og videre op til overfladen.

Forøget olieindvinding ved brug af CO₂

Kilde: IEA GHG

Når man indvinder olie ved hjælp af EOR, pumper CO₂ ned i pulser vekslende med vand. CO₂ er blandbar med olien som kvælder op. Trykket stiger, og blandingen, der især er rig på de lidt lettere oliefraktioner, drives hen mod oliebrønden. Ved overfladen separeres CO₂ fra oliefasen og pumpes igen ned i reservoiret sammen med ny CO₂. (Kilde: Saskatchewan Energy and Mines).

Et tankeeksperiment

Kan de amerikanske erfaringer overføres til Europa? Og kan man øge olieproduktionen ved at pumpe CO₂ i de danske kalkfelter – uden at beskadige dem? Vi kender ikke svarene i dag.

Men en del af de mere end 70 oliefelter, hvor man har anvendt CO₂ i USA og Canada, er felter hvor olien indvindes fra kalksten, og resultaterne er tilsyneladende ikke ringere end i sandreservoir. Desværre er der kun udført ganske få laborieforsøg med CO₂ i kalk, og det kan ikke afvises, at der vil ske en kemisk påvirkning af bjergarten.

I dag kan man i Nordsøen indvinde mellem en tredjedel og halvdelen af den olie som oprindeligt befandt sig i reservoiret ved hjælp af almindeligt kendte og økonomisk rentable metoder

til øget olieindvinding. Hvis man forestiller sig, at de Nordamerikanske erfaringer med en øget olieindvinding på 8–16% kan overføres til danske forhold, kan oliereserverne i Nordsøen strækkes betydeligt. En forøgelse af oliereserverne på eksempelvis 10% ville, for de fem største danske kalkfelter (Dan, Gorm, Skjold, Halfdan og Syd Arne), udgøre mellem 500 og 600 millioner tønder olie svarende til en værdi på mellem 75 og 150 milliarder kroner afhængig af om olieprisen er 25 eller 40 \$/tønde.

I den norske del af Nordsøen er potentialet for CO₂ EOR i størrelsesordenen 2 milliarder tønder ekstra olie, og noget tilsvarende gælder for den britiske sektor.

Store lagringskapaciteter i Danmark og Europa

At det er teknisk muligt at lagre CO₂ i undergrunden, viser erfaringer fra underjordiske gaslagre og udenlandske forsøgsprojekter med lagring af CO₂. Men er det også et muligt alternativ for Danmark? Et af de første spørgsmål som skal besvares er, om den danske undergrund rummer egnede geologiske formationer til injektion og opbevaring af CO₂.

På initiativ af GEUS blev der i 1999 iværksat et kortlægningsprojekt kaldet GESTCO (Geological Storage of CO₂ from Combustion of Fossil Fuel), med henblik på at bestemme den geologiske lagringskapacitet i Europa. GESTCO projektet blev støttet af EU's forskningsprogrammer og udført i samarbejde med geologiske undersøgelser fra otte europæiske lande.

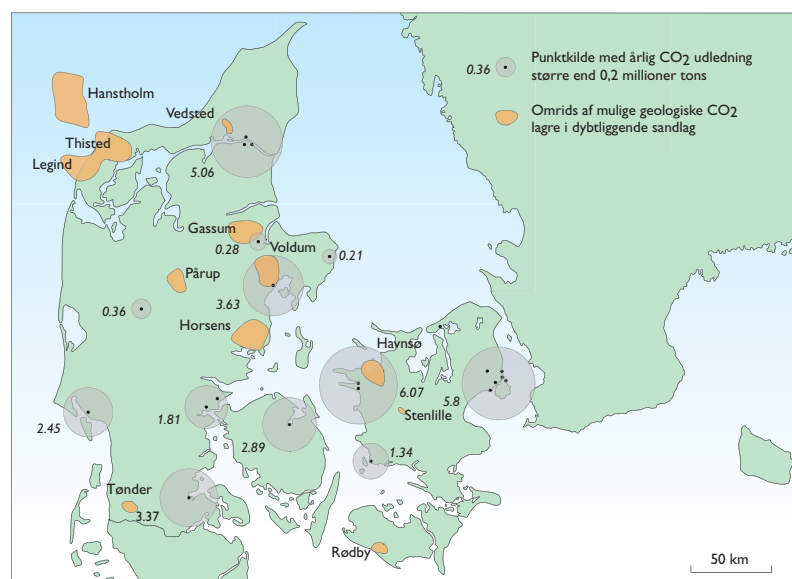
Ideen var at integrere oplysninger om store stationære CO₂ punktkilder som for eksempel kraftværker med oplysninger om den geologiske opbygning af undergrunden, for på den måde at identificere de største og økonomisk bedste muligheder for CO₂ lagring i Europa. Arbejdet omfattede også en vurdering af hvor store omkostninger der er forbundet med separation, transport og lagring i hvert enkelt tilfælde.

Første skridt på vejen var en beskrivelse af den regionale geologi i de enkelte lande. I den danske undergrund findes kilometer-tykk sedimentære lag af Mesozoisk og Tertiær alder. Mest kendt er måske de hvi-

de kridt- og kalkbjergarter, som ses i kystklinter ved Bulbjerg, Stevns og Møn, men under disse findes ældre porøse sandlag og tætte lerlag, som er aflejret i de sidste 250 millioner år. Hvor sedimentlagene er mægtigst, når de op på næsten 7 kilometers tykkelse. Set udfra et lagringssynspunkt er det imidlertid lagene i 800–3000 meters dybde, som er mest interessante, dels fordi CO₂ i

dette dybdeinterval opfører sig som en væske og dels fordi reservoierne bjergarter stadig er porøse og gennemtrængelige i modsætning til dybere reservoirer.

I praksis blev kortlægningen af den danske undergrund derfor koncentreret om dybtliggende sandlag af Trias og Jura alder. I den dybe undergrund har saltlag skubbet de overliggende lag op i store pudeforme-



Store CO₂ punktkilder som for eksempel kraftværker vist sammen med egnede geologiske strukturer til lagring af drivhusgassen.

Land	CO ₂ udledning fra store punktkilder (millioner tons pr. år)	Lagringskapacitet i saline akviferer (millioner tons)	Lagringskapacitet i olie/gas strukturer (millioner tons)	Kapacitet udtrykt som tid hvori CO ₂ fra punktkilder kan lagres (år)
Danmark	29	16000	630	575
Norge	23	13000	12600	1100
Tyskland (Nordtyske Bassin)	393	43000	2330	115
Storbritannien (Sydlige Nordsø)	218	15000	10450	115
Holland	96	1600	10960	130

CO₂ udledning og lagringskapacitet i udvalgte europæiske lande. Baseret på oplysninger fra GESTCO projektets slutrapport.

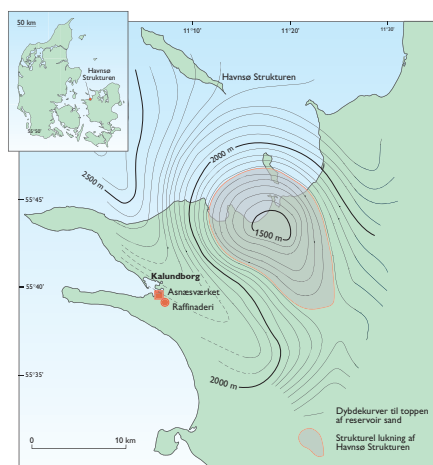
de strukturer. Sådanne strukturer danner ideelle fælder for olie og gas samt for lagring af CO₂. Kortlægningen har vist, at der findes 11 sådanne strukturer i den danske undergrund, og hvis det antages, at 40% af de hulrum som findes i reservoirerne kan fyldes med CO₂, så er den samlede kapacitet på 16000 millioner tons CO₂. Det svarer til Danmarks CO₂ udledning fra store

punktkilder i 575 år eller vores samlede Kyoto-forpligtigelse i næsten 1300 år.

For Europa som helhed er især det nordlige Tyskland interessant, men også England, Norge og Holland har store potentialer for geologisk lagring af CO₂. Med udvidelsen af EU mod øst i 2004 er nye områder med tung industri blevet en del af det Europæiske fællesskab, og nye områder er dermed inddraget i undersøgelserne af den geologiske lagringskapacitet. Under det EU-støttede forskningsprojekt CASTOR (CO₂ from Capture to Storage) fortsætter kortlægningen af den geologiske lagringskapaci-

tet i otte østeuropæiske lande. Foreløbige tal viser, at store mængder CO₂ vil kunne lagres i blandt andet Polen, Rumænien, Ungarn og Slovenien.

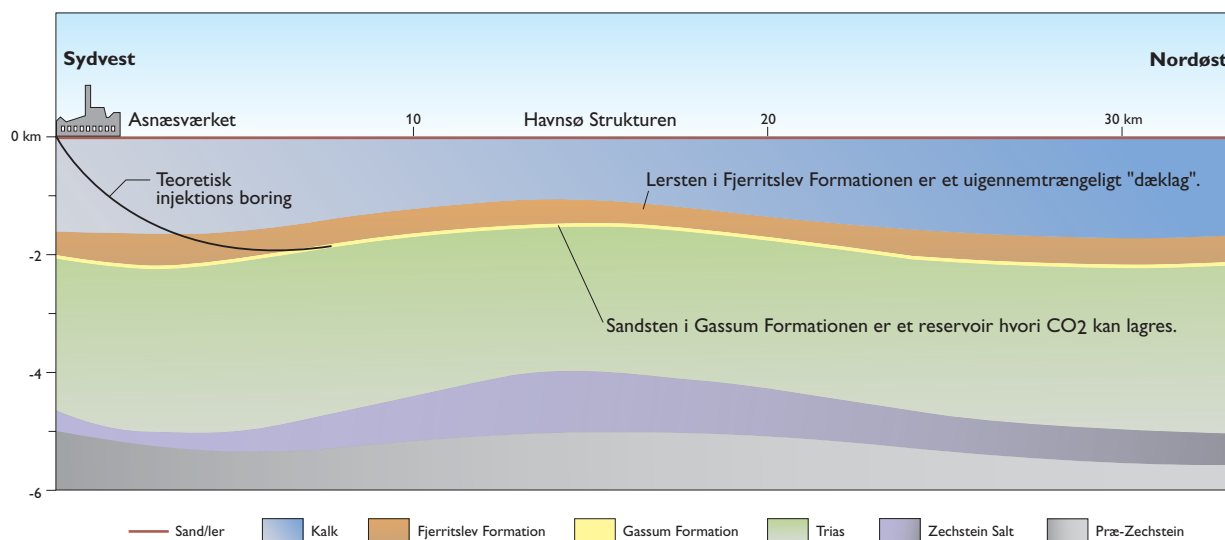
De indledende undersøgelser i GESTCO projektet konkluderer derfor, at Danmark geologisk set byder på flere attraktive muligheder for lagring af CO₂. Men inden der kan tages beslutning om at påbegynde lagring er det nødvendigt at foretage en række undersøgelser. De omfatter mere detaljerede beskrivelser af de geologiske strukturer, analyser af CO₂ kilderne og separationsmetoder, økonomiske analyser og sidst



Havnø Strukturen.



Asnæsværket og Statoils olieraffinaderi ved Kalundborg. Foto: Energi E2.



Geologisk tværsnit af Havnsø Strukturen tegnet på basis af seismiske undersøgelser.

men ikke mindst analyser af, om det er sikkert at fortage lagringen. Med henblik på at udnytte erfaringerne på tværs af landene i EU er der startet et nyt forskningsprojekt, der skal udvikle et fælles europæisk besluthingsgrundlag for start af konkrete lagringsprojekter. Projektet CO₂STORE (On-land and long term Saline Aquifer CO₂ storage) analyserer fire lagringsscenarier i henholdsvis Norge, Storbritannien, Tyskland og Danmark, der hver består af en el-

ler flere CO₂ kilder og et geologisk lager.

Det danske delprojekt undersøger de tekniske aspekter ved en mulig lagring af CO₂ fra to punktkilder ved Kalundborg. Det drejer sig om det kulfyrede kraftværk – Asnæsværket som ejes af Energi E2 og Statoil's olieraffineri. I studiet forudsættes det, at CO₂ i fremtiden vil blive udskilt fra røggassen og lagret i et dybtliggende sandlag beliggende nordøst for byen.

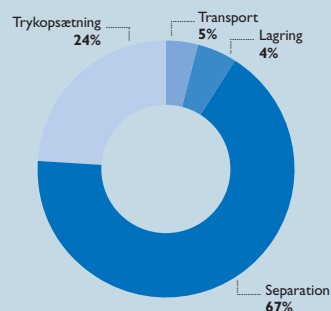
Det porøse sandlag af sen Trias – tidlig

Jura alder ligger omkring 1500 m under overfladen. Sandlaget er presset op i en svag pudeformet struktur med et areal på cirka 160 km². Ud fra den eksisterende viden om sandlagets tykkelse og porøsitet er det beregnet, at lagringskapaciteten er på 900 millioner tons CO₂. Dette svarer til mere end 150 års udledning af CO₂ fra raffineriet og Asnæsværket.

Hvad koster lagring af CO₂

Økonomien er en vigtig forudsætning for at geologisk lagring af CO₂ kan blive en realitet i fremtidens klimapolitik. Derfor har man i forskningsprojekterne regnet på, hvad det koster at lagre CO₂ i 17 mulige europæiske lagre. Lagrings-eksemplerne omfatter kul- og naturgas-fyrede kraftværker samt forskellige typer af industrivirksomheder. De samlede omkostninger for at nedbringe CO₂ udledningen til atmosfæren med et tons svinger mellem 780 kr. (105 €) og 235 kr. (32 €). Den dyreste del af processen er separationen af CO₂ før eller efter forbrænding. Dette kræver energi, ligesom komprimeringen af CO₂ til en væske også kræver energi. Transport og lagring af CO₂ koster ikke så meget. Hvis CO₂ bruges til forøget olieindvinding (EOR) kan der ligefrem blive tale om en indtægt.

Totale omkostninger 235 kr/ton CO₂



Eksempel på beregning af separation og lagring af CO₂ fra Asnæsværket ved Kalundborg. Beregningen bygger på en række forudsætninger opstillet i det EU finansierede GESTCO projekt. Bemærk fordelingen af de totale omkostninger på 235 kr./tons CO₂, hvor 160 kr./tons CO₂ eller 2/3 af omkostningerne går til separering af CO₂ fra røggassen.

Grønt lys for et CO₂-lagrings anlæg ved Berlin

I januar 2004 startede et projekt, der skal opføre og drive verdens første anlæg til oplagring af CO₂ fra et kraftværk. Projektet foregår i den lille by Ketzin, der ligger tæt ved Berlin i Tyskland.

Det EU-støttede forskningsprojekt CO₂SINK (In-situ R&D Laboratory for Geological Storage of CO₂) skal demonstrere, at det er teknisk muligt og sikkert at lagre CO₂ i undergrunden fra almindelig energiproduktion. Det er det første CO₂ projekt, der både skal analysere de tekniske og økonomiske sider og samtidig skabe folkelig accept og tryghed ved lagring nær et tætbeboet område. Projektet skal køre i fem år, og der deltager flere europæiske forskningsinstitutioner og industrivirksomheder, heriblandt GEUS.

Lagringen skal finde sted under et nedlagt naturgaslager ved Ketzin. Det gamle naturgaslager er under afvikling, men den ek-

sisterende infrastruktur omkring det gamle anlæg er fortsat intakt, og vil blive udnyttet i forbindelse med projektet. De geologiske forhold omkring strukturen er veldokumenterede gennem talrige gamle borer og seismiske undersøgelser. CO₂ gassen til den geologiske forsøglagring vil blive leveret fra et lokalt energianlæg.

Der er planlagt en injektionsboring og to observationsboringer nær toppen af Ketzin strukturen, og overvågning af eventuel udsivning af CO₂ til overfladen vil blive fulgt ved seismiske undersøgelser og fintfølede instrumenter på overfladen.

Forud for nedpumpningen af CO₂ vil der blive foretaget en række geologiske undersøgelser for at dokumentere Ketzin strukturens tilstand, og geologer og ingeniører vil grundigt analysere de faktorer, der kan forårsage udsivning af CO₂ fra det underjordiske lager. Overordnet set kan der skel-

nes mellem tekniske og geologiske risici. Tekniske risici kan for eksempel være utætte pakninger langs en borestreng, dårligt cementerede foringsrør og kemiske reaktioner mellem CO₂-holdigt vand og cementen. Af geologiske risici kan eksempelvis nævnes utætheder i dæklaget over CO₂ lageret som følge af sprækker/forkastninger i laget eller tilstedeværelse af porøse lag som leder den injicerede CO₂ væk fra lagringsstrukturen.

De samlede indledende undersøgelser skal udmunde i beredskabsplaner med henblik på overvågning og nedbringelse eller eliminering af risikoen ved projektet. CO₂ er en ugiftig luftart under normale tryk og temperaturer, men CO₂ er tungere end atmosfærisk luft. Derfor kan udsivende CO₂ samles i lavninger i landskabet eller i kældre, hvor den vil fortrænge luftens ilt med risiko for kvælning.



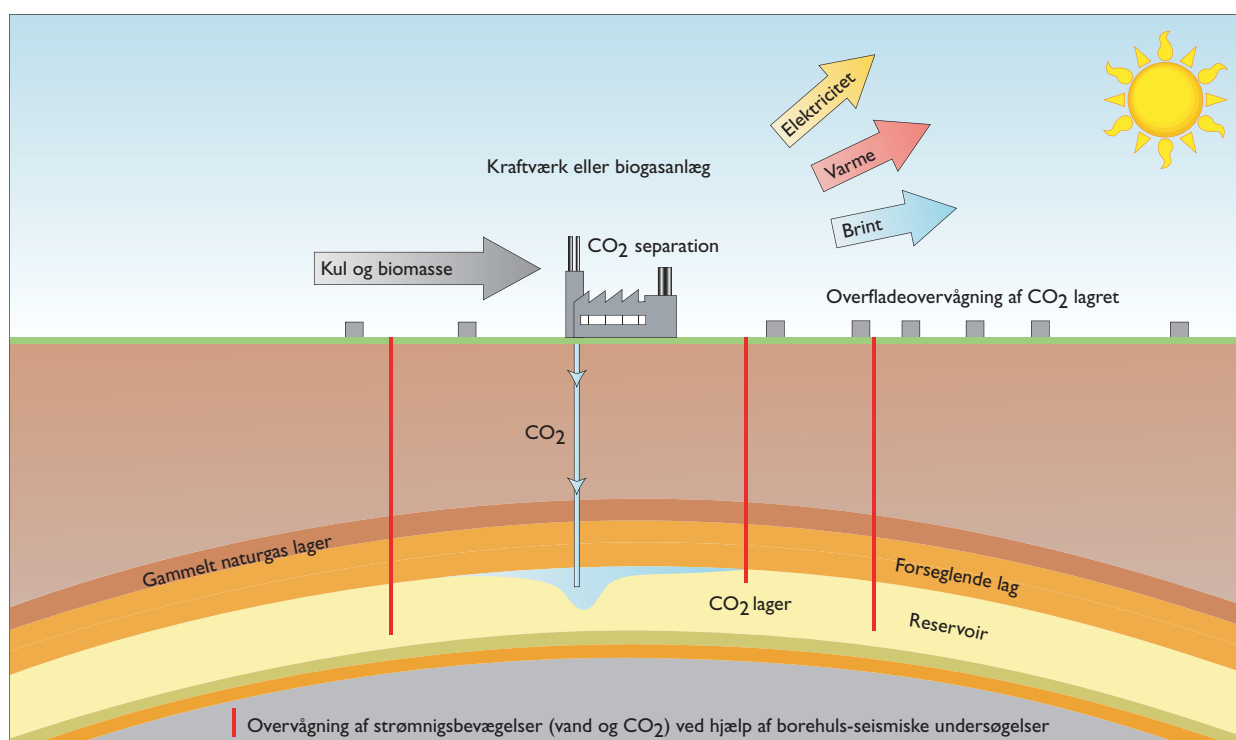
Placering af Ketzin naturgaslager og fremtidigt CO₂-anlæg. Foto: GeoForschungsZentrum Potsdam.

Maksimal sikkerhed samt offentlig accept og tryghed ved CO₂ lagring i Ketzin strukturen er helt afgørende for projektets succes, og dermed også for fremtidige muligheder for geologisk lagring af CO₂ i tætbefolkede områder. I erkendelse af dette deltager der to grupper i projektet, der har ansvar for sikkerhed og formidling til offentligheden. På formidlingssiden satser

projektet på en koordineret indsats, der skal sørge for løbende kommunikation om projektets aktiviteter, resultater og sikkerhedsniveau med lokale myndigheder, beboere, græsrodsorganisationer, industrien, og medier m.v.

Fem år er en ret kort tidshorisont for et forskningsprojekt som CO₂SINK. Der vil gå mindst to år før den første CO₂ kan lagres,

og der vil derfor inden for projektets levetid ikke være mulighed for at studere CO₂ gassens udbredelse i reservoiret på længere sigt. Derfor er det også håbet, at CO₂ lagret ved Ketzin i mange år efter projektets afslutning kan anvendes af fremtidige forskningsprojekter, som et forskningslaboratorium for geologisk lagring af CO₂.



Principskitse af CO₂-lagraings anlægget ved Ketzin i Tyskland.

Fremtiden for CO₂ lagring

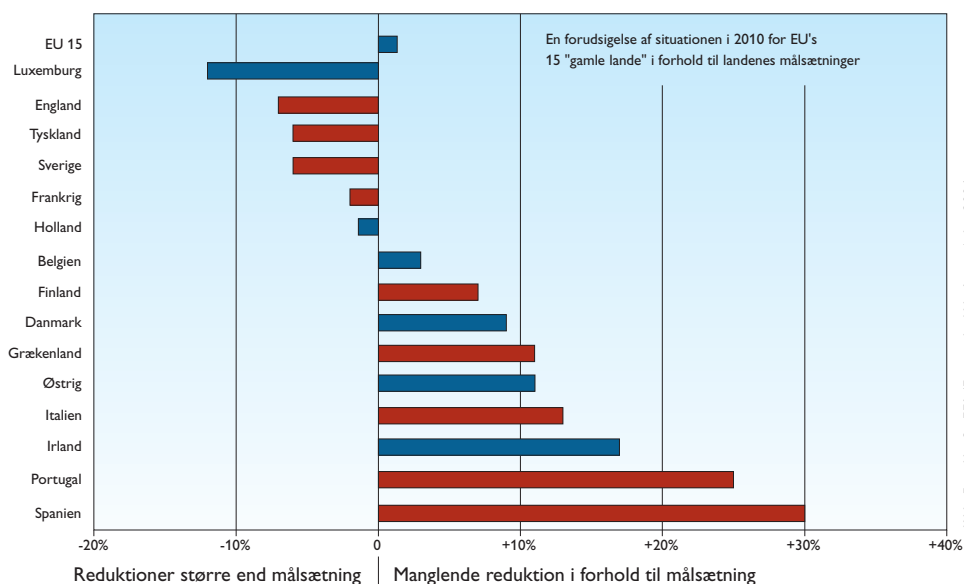
Lagring af CO₂ i undergrunden kan i lande som for eksempel Danmark, Tyskland, Norge og Storbritannien, hvor der findes gunstige geologiske forhold, sikre så store reduktioner af CO₂ udslippet, at det vil være muligt fortsat at anvende kul og naturgas. Og hvis det lykkes at udvikle brændselsceller baseret på brint, vil udledning af CO₂ yderligere kunne reduceres, uanset om brinten er produceret ved brug af vedvarende energikilder eller stammer fra kul og natur-

gas. I det hele taget behøver der ikke at være modstrid mellem idéen om separation og lagring af CO₂ og den langsigtede udvikling mod vedvarende energi. Udviklingen af vedvarende energi kan tage mange årtier, og i denne periode vil de industrialiserede lande, og i stigende grad også udviklingslande som Kina og Indien, være afhængige af fossile brændsler. Det er her CO₂ lagring kommer ind i billedet.

USA bliver i stigende grad afhængig af

importeret olie og naturgas, og den amerikanske regering har iværksat en række initiativer med henblik på fremtidens energiforsyning. Det mest interessante initiativ er det såkaldte FutureGen program. Med et budget på en milliard dollars er amerikanerne begyndt at designe og bygge fremtidens kraftværk i West Virginia. Kraftværket skal være på 200–300 megawatt (omtrent halvt så stort som Asnæsværket), og det skal kunne levere både el og varme,

Hvordan går det med at opfylde EU's interne byrdefordelingsaftale



På grundlag af landenes indberetninger for 2002 har det Europæiske Miljøagentur foretaget et skøn over i hvilket omfang de enkelte lande i 2010 vil kunne opfylde EU's interne byrdefordelingsaftale. I Agenturets skøn indgår landenes hjemlige foranstaltninger (Rød) og brug af de såkaldte Kyoto-mekanismer som blandt andet åbner for international handel med kvoter (Blå).

samt brint til fremtidens biler med brændselsceller. Brændslet bliver kul, som USA har store reserver af, og værket skal stå færdigt i 2013. CO₂-en skal separeres fra røgen og lagres i undergrunden.

Kun få af EU's medlemslande har en så langsigtet plan for udviklingen af fossile CO₂ fri energikilder, og de fleste landes planer på området rækker ikke ud over Kyoto-perioden som slutter i 2012. De kortsigtede nationale planer hænger muligvis sammen med EU's aftalesystem for opfyldelse af Kyoto-aftalen, idet der internt er aftalt en byrdefordeling mellem EU-landene. Fra starten af 2005 træder et sådan aftalekompleks i kraft i EU (ETS – Emission Trading System). ETS kaldes også et kvotedirektiv og fungerer i lighed med de nationale systemer, som har været gældende for Danmarks kraftværker i nogle år. Alternativt kan der handles og byttes CO₂ kvoter. Da udledningerne fra det tidligere Sovjetunionen og østbloklændene i dag er meget lavere end referenceåret 1990, er begrebet 'varm luft' opstået som en betegnelse for en salgbar kvote, som ellers ikke ville kunne udnyttes. Denne 'varme luft' er knyttet til Kyoto-aftalen og vil ophøre med at eksistere ved aftalens udløb i 2012.

stere ved aftalens udløb i 2012.

På fælles EU niveau foregår en hastig udvikling af både teknologi og fremtidsplaner. EU's såkaldte Kick Start program har til formål at sætte gang i den europæiske udvikling, især ved at fremme infrastruktur projekter som for eksempel høj-hastighedstog og broer. Som en del af dette program ventes HYPOGEN initiativet iværksat med et anslået budget på 1,3 milliarder €. Dette initiativ har til formål at udvikle fremtidens europæiske kraftværker, og det er et krav, at de skal være CO₂ fri, og at de desuden kan producere brint. Brændslet forventes at kunne blive både naturgas og kul. Et forstudie af de mulige kraftværkstyper og deres placering forventes at begynde næste år.

Uanset udviklingen i USA og EU vil både Kina og Indien, som begge har enorme kulreserver, have et hastigt stigende energiforbrug. Et forbrug som allerede i dag vokser i takt med industrialiseringen og stigningen af velstanden. Det betyder, at der vil være store globale muligheder i at udvikle ny teknologi til CO₂ separation og lagring. EU støtter disse initiativer og har blandt andet etableret to forskningsnetværk CO₂NET

og CO₂GEONET til udveksling af erfaringer og ideer om CO₂ separation og lagring.

Set fra et rent dansk perspektiv vil anvendelsen af CO₂ separation og lagring sandsynligvis kunne benyttes til at øge indvindingen af olie i Nordsøen betragteligt, som forslået af Elsam, der tilbyder at levere CO₂ til oliefelterne. Som en del af et større EU forskningsprojekt (CASTOR) vil der i løbet af et par år blive opført et testanlæg til separation af CO₂ fra Vestkraft kulkraftværket ved Esbjerg. Dette separationsanlæg, som bliver det første af sin art i Europa, vil kunne producere nogle få tusinde tons CO₂ om året. Selv om anlægget ikke bliver stort, så vil det sandsynligvis give vigtige erfaringer til, hvorledes CO₂ separation fra kulfværker i stor skala vil kunne foregå i fremtiden.

Danmarks – og især Europas – kraftværker producerer langt større mængder CO₂ end der kan anvendes og lagres i oliefelterne. Derfor vil det også være fornuftigt at anvende lagring i saline akviferer, som blandt andet her i Danmark har et enormt potentiale for sikker og langvarig lagring af CO₂.



Her kan du læse videre

GEUS' temasider om geologisk lagring af CO₂.

www.geus.dk/co2

Energistyrelsen om CO₂ udledning og olie/gas produktion.

www.ens.dk

Dansk Meteorologisk Institut's klimasider.

www.dmi.dk

På GEUS's hjemmeside kan du hente yderligere information og links til internationale projekter om CO₂ lagring.

Referencer

Christensen N. P. & Larsen, M. 2004.

Assessing the European potential for geological storage of CO₂: the GESTCO project. Geological Survey of Denmark and Greenland Bulletin 4, 13–16.

Christensen, N. P. & Holloway, S. 2003.

Geological storage of CO₂ from combustion of fossil fuel, summary report. Geological Survey of Denmark and Greenland 34 pp.

Chadwick, R.A., Zweigel, P., Gregersen, U., Kirby, G.A., Holloway, S. & Johannessen, P.N. (2004).

Geological reservoir characterization of a CO₂ storage site: The Utsira Sand, Sleipner, northern North Sea. *Energy*, **29**, 1371–1381.

Springer, N., Olsen, D. & Stenoft, N. (2004).

Geologisk lagring af kuldioxid kan reducere den menneskeskabte drivhuseffekt. Tidskriftet VARV, nr. 4.

Information

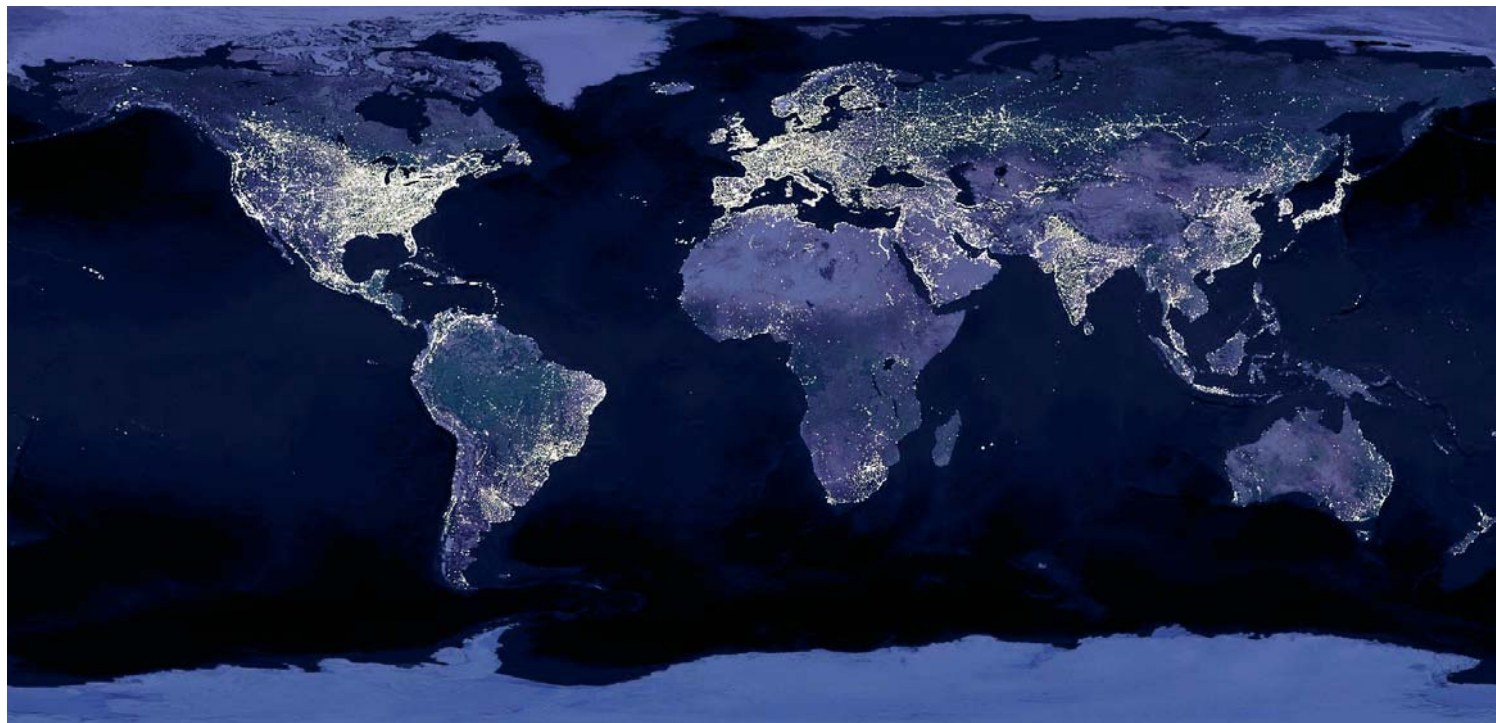
Dansk Geologisk Forening (DGF) vil d. 15. marts 2005 afholde et temamøde om separation og lagring af CO₂. På mødet vil der blive lejlighed til at høre nærmere om de mange aktiviteter på området og stille spørgsmål. Mødet vil blive annonceret på DGF's hjemmeside Dansk Geologisk Forening.

www.2dgf.dk

Læs også mere om stort og småt indenfor lagring af CO₂ på GEUS's nye CO₂ hjemmeside.

www.geus.dk/co2

Jorden ved nattetid



Verdens energiforbrug er ulig fordelt.

(Kilde: POLFOTO.)

Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse (GEUS) er en forsknings- og rådgivningsinstitution i Miljøministeriet. Institutionens hovedformål er at udføre videnskabelige og praktiske undersøgelser på naturressource- og miljøområdet samt at foretage geologisk kortlægning af Danmark og Grønland.

GEUS udfører tillige rekvirerede opgaver på forretningsmæssige vilkår.

GEUS giver i øvrigt gerne yderligere oplysninger om de behandlede emner eller andre emner af geologisk karakter.

Eftertryk er tilladt med kildeangivelse.

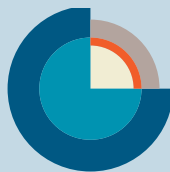
GEOLOGI - NYT FRA GEUS

Er redigeret af geolog Henrik Højmark Thomsen (ansvarshavende) i samarbejde med en redaktionsgruppe på institutionen.

Skriv, ring eller mail:

GEUS

Danmarks og Grønlands
Geologiske Undersøgelse
Øster Voldgade 10, 1350 København K.
Tlf.: 38 14 20 00
Fax.: 38 14 20 50
E-post: geus@geus.dk
Internetside: www.geus.dk




GEUS

GEUS publikationer:

Hos Geografforlaget kan alle GEUS' udgivelser købes.
Henvendelse kan ske enten på tlf.:
63 44 16 83 eller telefax: 63 44 16 97
E-post: go@geografforlaget.dk
Hjemmeside: www.geografforlaget.dk

Adressen er:
GEOGRAFFORLAGET,
Rugårdsvej 55
5000 Odense C



ISSN 1396-2353

Produktion: Annabeth Andersen,

Tryk: Schultz Grafisk A/S.

Forsidebillede: Peter Warnemoors.

Illustrationer: Eva Melskens og
Jette Halskov.