

Et hjertesukk

“Ser vi på Norges utslipp av klimagasser isolert, så er de i det globale regnskapet knapt målbare. Likevel diskuterer politikerne å pålegge norsk industri de høyeste CO₂-avgifter i verden.”

Dette hjertesukket er det adm. direktør Birger Solberg i North Cape Minerals som står for (ncm nytt, mars 2007). Vi forstår godt at han er bekymret. For her snakker vi om å endre rammebetingelsene for norsk industri på en måte som skader norske arbeidsplasser og norsk industriutvikling uten at vi samtidig får noen gevinst.

“Handel med CO₂-kvoter og utslippstillatelser er en fornuftig tanke, hvis alle land deltar. Men så lenge verken Kina eller USA, verdens største forurenser, ikke vil slutte seg til Kyoto-avtalen, blir det meningsløst å sette inn å sette inn ensidige og kostbare miljøløstiltak i land som Norge. Dette vil bare medføre en rask utvikling av store deler av norsk industri, og utflytting til land der miljøskadene blir mye større,” fortsetter Solberg.

Han har selvsagt rett. Ingen må tro at vi “redder verden” ved ensidige tiltak i en nasjon som mange knapt har hørt om. - Men vi må gå foran med et godt eksempel, vil noen argumentere. Ja, kanskje det, og derfor bør vi som har tatt fordel av olje- og gasseskport satse hardt på forskning og utvikling av teknologi som kan avhjelpe problemene med CO₂-utslipp.

Birger Solberg sier det slik: “Vårt beste bidrag vil være å satse på å videreutvikle og selge norsk miljøteknologi til utviklingsland. Det vil være bra for klimaet og samtidig fremme økonomisk og teknologisk utvikling i fattige land.”

Halfdan Carstens

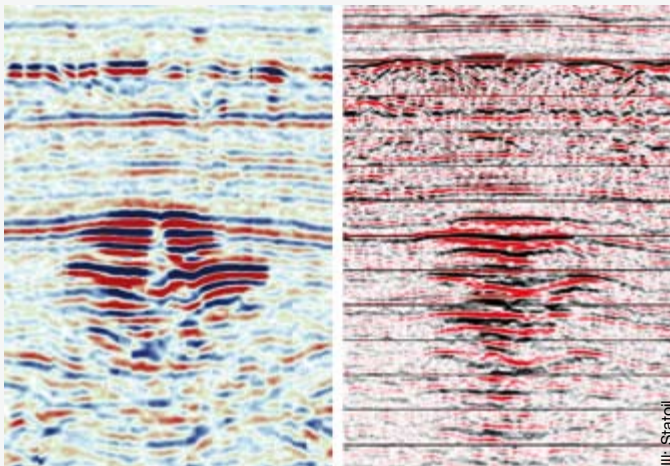
“February 2nd [dagen da IPCC la frem sin oppsummering] will be remembered as the date when question marks were removed on whether climate change has anything to do with human activity - the moment when attention will shift to what on earth we are going to do about it.”

Achim Steiner

Direktør FN's miljøprogram

De vet hvor CO₂-en er

Lagring av CO₂ dypt nede i bakken er en attraktiv løsning for å redusere utslippene av klimagassen til atmosfæren i stor skala. Men hvordan vet vi om gassen holder seg nede i berggrunnen - og ikke lekker opp igjen? Statoil har svaret.



Grunn seismikk med høye frekvenser (til høyre) gir mye bedre vertikal oppløsning enn 3D-seismikk med lave frekvenser (til venstre).

Statoils forskningsavdeling i Trondheim har utviklet tre metoder for å følge med på hvor CO₂-en befinner seg og hvor mye det er av den. To avbilder gassen med lydbølger (seismikk), og en måler endringer i tyngdekraften (gravimetri).

Utgangspunktet er at gassen fra Sleipner-feltet i Nord-sjøen inneholder for mye CO₂ (opp til 10 %) til at den kan sendes videre til kundene på kontinentet. CO₂-en blir derfor skilt ut og sendt i flytende form ned i undergrunnen. I ti år har selskapet pumpet CO₂ ned i Utsira-formasjonen på 1000 meters dyp, og så langt er ikke en boble kommet opp igjen. Ingen andre selskaper har gjort noe tilsvarende, og Statoil kan dermed trygt kalle seg verdensledende på lagring av CO₂ i stor skala.

4D seismikk

Hele fem ganger har Statoil gjort seismiske undersøkelser som viser hvordan CO₂-en har bredt seg ut i det grunne sandsteinsreservoaret. Statoil og SINTEF har brukt store ressurser på å vise frem denne satsingen, og resultatene de presenterer i foredrag og symposier vekker oppsikt hos tilhørere

verden rundt.

- Hvor langt gassen spres, hvilken retning den går og hvor tykt CO₂-laget er, kan vi avbilde med 4D-seismikk. De repeterte bildene bekrefter at metoden virker og at vi kan følge med hvordan CO₂-gassen forflytter seg, sier forskningsleder Tore A. Torp i Statoil.

Men 4D-seismikk (gjentatte 3D-undersøkelser) er dyrt, og den gir ikke all nødvendig informasjon om den deponerte CO₂-gassen. Statoil har derfor testet ut to nye metoder med støtte fra Norges forskningsråd og EU.

Grunn seismikk

Når operatørselskapene borer etter olje og gass, er de på vakt mot grunne gasslommer. Gasslommene ligger på 2-500 meters dyp og kan føre til livsfarlige utblåsninger. På norsk sokkel har det vært nære på noen få ganger. Derfor samles det inn såkalt grunn seismikk som skal avdekke gasslommene før boringen begynner. Den gir høyere oppløsning på bildene og flere detaljer enn vanlig 3D-seismikk, noe som har sammenheng med hvilket frekvensinnhold de seismiske dataene har. Siden lydbølgene bare skal gå gjennom noen hundre meters dyp,

kan frekvensen økes fra 60 til 150 Hz, og høyere frekvens gir bedre oppløsning.

Forsker Ola Eiken i Statoil fikk ideen om å bruke den samme teknologien til å følge CO₂ på 1000 meters dyp. Fordelen med metoden er at den er enklere enn tradisjonell 3D-seismikk og dermed billigere. Skepsisen har vært stor til å bruke metoden på så store dyp fordi lydsignaler med høy frekvens svekkes fortere med dyppet enn signaler med lav frekvens.

Statoil prøvde ut metoden i fjor sommer, og de foreløpige tolkningene viser at den fungerte veldig bra. Årsaken er at CO₂-reservoaret de har bygget opp gjennom ti år gir en mye sterkere refleksor enn andre lag på 1000 meters dyp. Gassen vil derfor synes på grunnseismikken.

- Du ser det samme som på 3D-seismikk, men siden du har høyere frekvens blir seismikkbildene betydelige skarpere. Den romlige dekningen er ikke så god som i 3D-seismikk, men vi har veldig god vertikal oppløsning, sier Eiken.

Når Statoil nå får et skarpere bilde av toppen på sandsteinsformasjonen, kan selskapet med enda større sikkerhet si at CO₂-en oppfører seg som forventet, og ikke lekker ut.

- Dette er et gjennombrudd for en metode som brukes utenfor området der den er forventet å virke. Mange vil bli overrasket over at grunn seismikk virker så godt på såpass store dyp sier Torp.

Statoil har med hjelp fra SINTEF og andre europeiske forskningsinstitutter simulert at det vil ta mange hundre år før all CO₂-en som er injisert på Sleipner i løpet av 25 år er løst opp i vannet. Men etter hvert som det skjer, blir sjansene for lekkasje mindre og mindre.

Grunn seismikk-prosjektet er en del av EU-prosjektet CO₂STORE og er støttet med ca. fire millioner kroner fra EUs 6. rammeprogram.

Artikkelen er hentet fra "Nyhetsbrev fra CLIMIT" (Nr 1, 2007) som utgis av Norges forskningsråd og Gassnova.

Global oppvarming i Jura

Studier av breksjepiper i Karoobassenget i Sør-Afrika antyder at CO₂-utslippene til atmosfæren i tidlig jura tid kan ha vært 1000 ganger større enn i dag. Disse utslippene kan ha vært årsaken til en periode med global oppvarming på den tiden.



Foto: Henrik Svensen

Breksjepipe utenfor i Karoobassenget i Sør-Afrika. Pipene danner ofte små koller fordi de er mer motstandsdyktige mot vær og vind enn omkringliggende sedimenter. En tykk vulkansk laggang danner et platå på toppen av åsen i bakgrunnen. Lokale bønder borer ofte etter vann i pipene da disse har høyere permeabilitet enn sedimentære bergarter i området.

For 183 millioner år siden økte den globale temperaturen med omtrent 6 °C i løpet av bare noen få tusen år. Dermed avtok oksygeninnholdet i havvannet samtidig som det ble surere. Resultatet var at en rekke marine arter døde ut. Det skulle ta 200.000 år før klimaet vendte tilbake til det opprinnelige.

Nye funn som vi har gjort i Sør-Afrika styrker koblingen mellom dannelsen av vulkanske bassenger og globale klimaendringer. Denne hypotesen går på tvers av en rekke andre hypoteser som har blitt lansert i løpet av de siste 15-20 år, herunder oseanografiske endringer og smelting av gashydrater i marine sedimenter.

En gruppe forskere fra Universitetet i Oslo (Geologiske prosessers fysikk og Institutt for geofag), Volcanic Basin Petroleum Research (VBPR) og Council for Geoscience i Sør-Afrika knytter nå klimaendringen til dannelsen av det vulkanske Karoobassenget. Arbeidet, som er et resultat av flere års studier i vulkanprovinser Karoo-Ferrari i Sør-Afrika, ble i vinter publisert i *Earth and Planetary Science Letters*.

Hovedtrekket i den nye hypotesen er at vulkansk smelte (magma),

med en temperatur på over 1000 °C, trengte inn som tykke lagganger i den sedimentære lagpakken i Karoobassenget tidlig i jura. Den intrusive vulkanismen førte til kraftig oppvarming av organisk rike sedimenter. Dermed ble det dannet store mengder drivhusgasser. Trykket økte i de såkalte kontaktaureolene, og sedimentene sprakk opp, hvorpå gassene ble transportert til atmosfæren gjennom sprekkesonene. Restene av disse vulkanske gangene finnes i dag i et område som er større enn hele Norge.

I den vestlige delen av Karoobassenget har vi funnet en ny type geologiske strukturer, såkalte breksjepiper, dannet som en konsekvens av trykkøkningen og oppsprekningen. Pipene er sirkulære, vertikale strukturer som inneholder fragmenterte og metamorfe sedimenter. Nær landsbyen Loriesfontein nordvest i Sør-Afrika har vi funnet mer enn 400 slike piper. Alle har opphav i kontaktaureoler. Det finnes mer enn ti kjente områder med tilsvarende samlinger av breksjepiper, og det totale antallet breksjepiper er antakeligvis flere tusen.

Tidspunktet for utslippene er estimert fra analyse av mineralet zirkon som er funnet i intrusjonene.

Aldrene overlapper med dateringene av den globale klimaendringen. Dette styrker en årsakssammenheng mellom disse to hendelsene.

Geokjemiske analyser av stein fra borehull i og utenfor pipene viser at innholdet av organisk karbon er kraftig redusert i kontaktaureolene. Ved å beregne massen av det organiske materialet som er fjernet fra de svarte skifrene, har vi kunnet regne ut den mengden med drivhusgasser som ble sluppet ut i atmosfæren tidlig i jura.

Beregningene våre viser at mengden med drivhusgasser som ble sluppet ut fra Karoobassenget omtrent tilsvarer 1000 ganger det årlige utslippet av fossilt CO₂ i dag. Utslipp av slike mengder drivhusgasser ville ha vært tilstrekkelig for endre den globale karbonsyklusen og sette i gang en global oppvarming.

Den nye hypotesen er en viktig oppfølger til teorien vi lanserte i 2004 om sammenhengen mellom den intrusive vulkanismen i Norskehavet og den globale klimaendringen på grensen mellom paleocen og eocen for ca. 55 millioner år siden (GEO 04/2004).

Henrik Svensen og Sverre Planke

Dødelig metan

I følge barnelærdommen dannes metan (CH₄) når mikrober som lever uten tilgang på oksygen (anaerobe bakterier) bryter ned organisk materiale. Derfor er våtmarker og rismarker de største kildene til metan i atmosfæren, men kyr, sauer og termitter gir også et betydelig bidrag. Det samme gjør skogbranner og forbrenning av fossile energikilder.

Ny forskning viser nå at metan også dannes av levende planter (Scientific American, Februar 2007). Beregninger viser at levende planter produserer 60-240 millioner tonn metan per år. Det meste av dette kommer fra tropene.

Til sammen mottar atmosfæren 600 millioner tonn metan per år fra naturlige og antropogene kilder. Samtidig vet vi at metan har 23 ganger større effekt som klimagass enn karbondioksid. Dessverre står menneskene for en tredobling av metangassutslippene i løpet av de siste 150 år.

Disse forskningsresultatene kan forklare at metankonsentrasjonen i atmosfæren er lav når det er istid og høy når det er mellomistid, slik det også er tilfelle med konsentrasjonen av karbondioksid.

Liknende klimascenarier kan ha forekommet også tidligere i Jordens historie. Forfatterne av artikkelen spekulerer på om masseutdøingen i overgangen mellom perm og trias og mellom trias og jura kan skyldes en tilbakekoblingsmekanisme. Svært høye konsentrasjoner av karbondioksid kan i første omgang ha forårsaket en dramatisk økning i Jordens biomasse. Disse levende plantene kan så igjen ha forårsaket utslipp av metan og en enda større drivhuseffekt som til slutt har tatt livet av mange arter og enda flere individer.



Les mer om dødelig vulkanisme i **Månedens spesial** på www.geoportalen.no

Ingeniøren TORE A. TORP

Statoil har gjennom det ti år gamle prosjektet på Sleipner-feltet vist at selskapet er verdensledende når det gjelder lagring av CO₂ i undergrunnen. Overingeniør Tore A. Torp ved forskningssenteret i Trondheim, som har vært sentral i dette arbeidet helt siden tidlig på 1990-tallet, er svært opptatt av å formidle at vi nå har vist at klimagassen kan lagres trygt i tusener av år.

Det er nå ti år siden lagringen av CO₂ på Sleipner-feltet tok til. Det er vel riktig å si at Statoil har fått mye og god anerkjennelse for dette prosjektet?

Statoil og Sleipner er kjent i regjeringskontorer og miljøkretser fra Canberra i Australia via Canada og USA til Europas hovedsteder. Fra å være en teknisk raritet, så er CO₂-lagring blitt et tema på G8-møtet, altså på høyeste internasjonale politiske plan. Det har gått så fort at vi holder på å miste pusten. Vi klarer nesten ikke å henge med i antall forespørslers om å delta på konferanser og internasjonale fora hvor lagring er tema. Men vi holder ikke foredrag bare for å vise oss frem, vi gjør det faktisk for å forsikre oss om at alle skal forstå at dette er trygt. For Statoil og Norge tror vi det er viktig at CO₂-lagring blir oppfattet som trygt verden rundt. Det må til hvis vi skal få lov å drive med det.

Kan du med hånden på hjertet si at gassen ikke er på full fart tilbake til atmosfæren?

Ja. Vi har testet ut vha. seismikk og gravimetri gjentatte ganger. Vi vet hvor den injiserte gassen er blitt av. Den er ikke på vei ut noen steder. Det er ingen kanaler eller sprekker som leder den vekk fra reservoaret. I så fall ville vi ha sett det. Injeksjonen på Sleipner skjer nederst i reservoaret, og CO₂-gassen stiger opp. Etter hvert løses den i vann og synker til bunns i reservoaret. Så selv om det ble en utblåsning fra injeksjonsbrønnen, ville det ikke skje noe verre enn at ca. 200 tonn forsvant ut i løse luften.

Du er altså ikke i tvil om at skifteen over reservoaret er tett?

Over reservoaret ligg et 800 m tykt lag med duktil, altså ikke

sprø, leire. Kjerneprøver fra denne takbergarten er undersøkt i både engelske, franske og danske laboratorier. De viser at vi har å gjøre med en leire med ekstremt lav permeabilitet. Hvis den blir utsatt for CO₂-væske, tyder laboratorietestene på at den blir enda tettere fordi glaukonittmineralene sveller.

Når tror du vi kommer til å ta i bruk metoden i større skala for volumer som virkelig monner i norsk og internasjonal sammenheng?

Jeg tror lagring i samme skala vil komme mange steder i Europa i løpet av ti år. Prosjekter er allerede planlagt i Nederland, Tyskland, Frankrike, Spania, Polen og Danmark. Foruten at vi har flere nye prosjekter planlagt i Norge. Før dette blir en realitet, må imidlertid både lovregler og økonomi på plass, og dette avhenger av internasjonale klimaforhandlinger.

Men da er det vel bare å pøse CO₂-gass ned i undergrunnen så fort som mulig?

Lovregler, økonomi og tekniske utfordringer løser vi. Det som jeg opplever som mest kritisk er om publikum, mannen i gata, vil akseptere denne løsningen. Vi må legge mye energi i at vanlige folk virkelig forstår hva vi holder på med.

Men vet vi nok? Har vi den kunnskapen vi trenger?

I dag foregår injeksjon på 4-5 steder. Men fordi de geologiske betingelsene varierer, trenger vi å teste mange flere steder. Vi har et behov for bredere erfaringsmateriale. Dessuten forsker vi på hva vi gjør hvis noe går galt, for eksempel hvis gassen skulle lekke opp gjennom havbunnen. Vi har også flere forskningsprosjekt, både i laboratoriet og ute i naturen (vul-

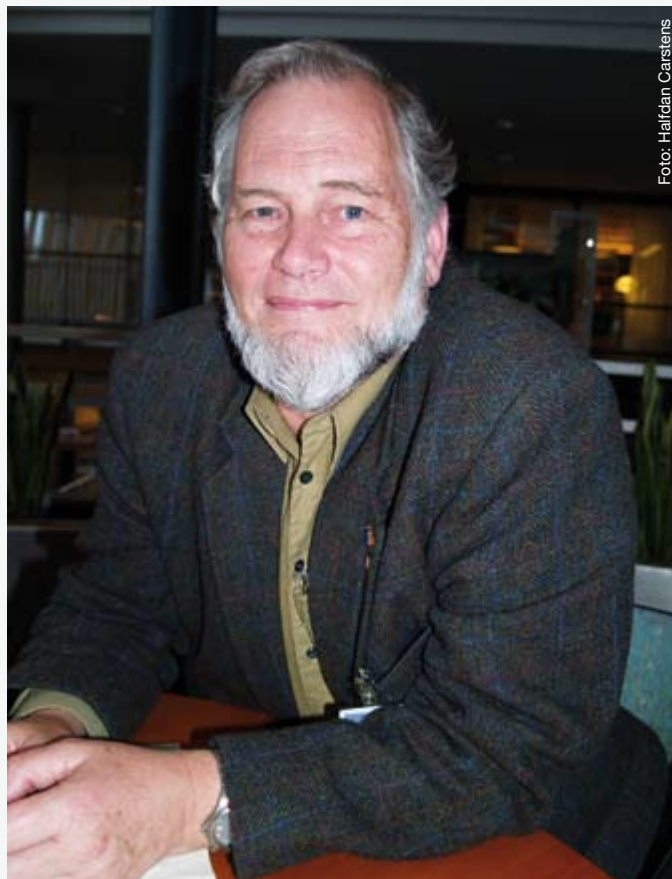


Foto: Halfdan Carstensen

Tore A. Torp utdannet sivilingeniør fra NTH og har vært i Statoil siden 1984, de siste årene med tittel "rådgiver CO₂-lagring". Foruten å ta initiativ til og være med å lede en rekke europeiske og interkontinentale FoU-prosjekter om CO₂, har han vært en av "Lead Authors" for IPCCs spesialrapport om CCS-CO₂ Capture and Storage.

kanske områder med CO₂-utslipp), for å se virkningene av CO₂-gass på plante- og dyrelivet.

Hvor mye CO₂ tror du hele norsk sokkel kan lagre totalt?

Utsiraformasjonen er beregnet til å kunne romme omtrent 600 Gt (milliarder tonn). I tillegg har vi antagelig minst like store lagringmuligheter på midtnorsk og nordnorsk sokkel. Til sammenligning er de totale utslippene fra alle Europas kraftverk 1 Gt per år. Også utenfor norsk sokkel er det gode muligheter for lagring. Derfor er ikke lagringskapasitet noe problem for Europa i flere generasjoner fremover.

Fot et par måneder siden kom nyheten om at forskere jobber med "kald" lagring av CO₂, dvs. å pumpe gassen ned på steder hvor den vil omdannes til gasshydrater

("iskrystaller"). Har du noen tro på dette?

Selv om CO₂ lagres like under havbunnen og danner hydratis, vil CO₂ løses i vannet over tid. Dette er en teknisk fysisk gjennomførbar metode, men den er ikke akseptabel fordi lagringstiden på noen hundre år er for kort. I IPCC-rapporten sies det at vi må ha en lagringstid på minst 1000 år, og i denne perioden må det ikke lekke mer enn 0,01 % per år, hvilket tilsvarer en oppholdstid på 10.000 år.

Du er i det helt tatt ikke i tvil om at de menneskelige CO₂-utslippene påvirker klimaet?

Som ansatt i et oljeselskap har jeg nok ingen troverdighet i debatten om klimaendringene er menneskeskapt eller ikke.

PRODUCTION GEOSCIENCE 2007

November 5th and 6th, 2007 Norwegian Petroleum Directorate, Stavanger

GEOLOGICAL SOCIETY OF NORWAY

Kilde/Coverfoto: © NASA

From Geo to Flow – Dealing With the Bottlenecks

Practical details

Where and when:
Stavanger, November 5th and 6th, 2007
www.geologi.no/PG2007

Important dates:

Abstract deadline:
1st of June 2007
Registration with reduced fee:
1st of October 2007

Call for papers:

Authors are invited to submit abstracts on relevant topics for presentations. Invited lecturers have also to deliver abstracts. Information about abstract submission is available on the conference web page. Please, submit abstract by e-mail to: ngf@geologi.no

Call for paper submissions for Norwegian Journal of Geology:

Prospective abstract authors are encouraged to submit papers for Norwegian Journal of Geology.

For more information about arrangement for publications of Production Geoscience papers see conference web page: www.geologi.no/PG2007

Registration:

For information and registration, see the conference web page: www.geologi.no/PG2007

Conference organizer:

Geological Society of Norway (NGF)
www.geologi.no

Contact information:

ngf@geologi.no
Tlf.: +47 73 90 44 68

Featuring:

- All you need to know about integrated reservoir modelling (T. Woodhead, Principal Tech. Expert, Shell);
- Several case studies from both Green and Brown fields;
- Technology outlook (e.g. the use of EM technology in production - J. Hesthammer, Rocksource; a novel technique for making fracture models - P. Gillespie, Hydro).

This is a conference you don't want to miss!



Disse institusjonene støtter publiseringen av forskningsnyheter



Platetektonikk – nye tanker

Professor Harald Furnes ved Institutt for geovitenskap ved Universitetet i Bergen har fått stor oppmerksomhet omkring funnet av 3,8 milliarder år gamle bergarter på Grønland (sist i det populærfaglige tidsskriftet *New Scientist*, 31. mars 2007). Oppslagene er basert på en artikkel i *Science* (vol. 315).

Alderen i seg selv er ikke oppsiktsvekkende. Så gamle bergarter er påvist tidligere både på Grønland og i Sør-Afrika. Overraskelsen ligger i at de spesielle bergartene antyder at Jordens platebevegelser begynte ganske tidlig i urtiden, i begynnelsen av arkeikum (se tidskala side 11), og ikke – som tidligere trodd – ved overgangen mellom arkeikum og proterozoikum for 2,5 milliarder år siden.

Det som Furnes og kollegene har funnet er biter av en gammel ofiolitt, altså rester etter gammel havbunn som dannes langs midthavsryggene når to plater beveger seg fra hverandre (GEO 08, 2006). Like ved dette funnet fant de også bergarter som kan være dannet i en subduksjonssone hvor én plate glir over en annen plate. Til sammen er dette nok til å postulere at de platetektoniske prosessene allerede var i gang for 3,8 milliarder år siden.

I GEO 05 med utgivelse i august vil professor Furnes selv beskrive funnene på Grønland og hvilke konsekvenser de har for våre ideer om når platetektonikken kom i gang.

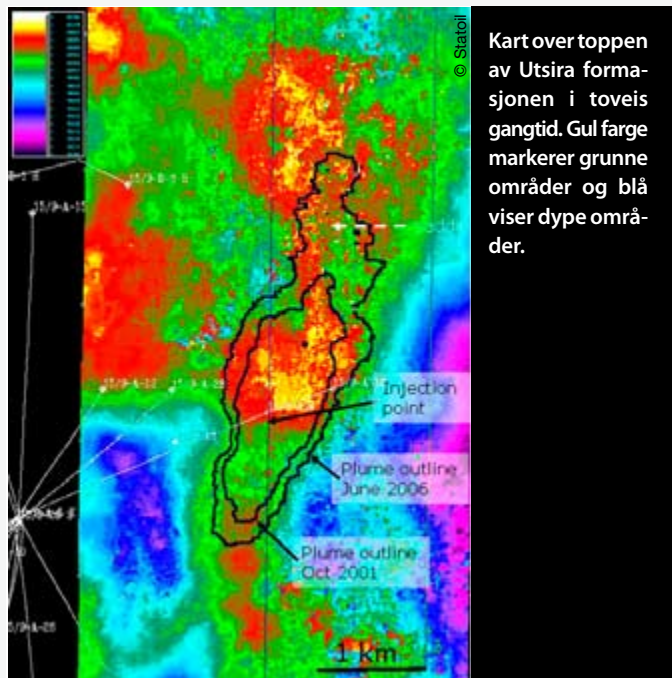


Foto: Harald Furnes

Ofiolittiske bergarter på Grønland har tilført ny viten om platetektonikk.

Ti års overvåkning av CO₂-injeksjon

Ti år med injeksjon og lagring av CO₂ i Utsiraformasjonen 1000 m under havoverflaten gir grunn til å tro at dette er en sikker måte å bli kvitt klimagassen på.



Kart over toppen av Utsira formasjonen i toveis gangtid. Gul farge markerer grunne områder og blå viser dype områder.

Injeksjon av CO₂ i Utsiraformasjonen startet fra Sleipner A plattformen i 1996. Til nå (april, 2007) har 9,1 millioner tonn blitt lagret i sandsteiner som ligger 700-900 m under havbunnen. I tillegg til CO₂ består injeksjonsgassen av små mengder metan (<2 %) og tyngre hydrokarboner. Injeksjonsbrønnen er boret med høyt avvik, og en 36 m lang perforering er satt 2.5 km til side for plattformen, 1010 m under havoverflaten. Her

danner Utsiraformasjonen en svak antiklinal som fungerer som felle.

Tynne lag stopper gassen

Vi har et unikt sett med seismiske monitoreringsdata gjennom injeksjonshistorien på Sleipner-feltet. 3D data er samlet inn hele fem ganger: i 1999, 2001, 2002, 2004 og senest i juni 2006.

CO₂-gassen har vist seg å gi svært gode refleksjoner, og seismik-

ken viser tydelig akkumulasjoner på opp til ni nivåer. Årsaken til at gassen samles i så mange lag tror vi skyldes tynne skiferlag (< én meter) i den ellers sandige Utsiraformasjonen som fanger CO₂ under seg i opp til noen meters tykkelse.

Reflektiviteten har blitt forklart som "tynn-lags refleksjoner", dvs. interferens mellom topp og bunn av lag på opp til noen få meters tykkelse. Da får vi et tyndt forhold mellom lagtykkelse og amplitude, og kvantitative beregninger viser at omlag 80% av injisert mengde kan plasseres i slike lag. Det største laget ligger omtrent midt i Utsiraformasjonen, mens topplaget har vært raskest voksende de siste årene.

De nederste lagene har sluttet å vokse, og reflektiviteten er tilsynelatende redusert. Men dette trenger ikke å være reelt, det kan også skyldes at de øverste lagene i økende grad danner akustiske skygger, eller at den økende hastighetsreduksjonen i lagene over gjør det vanskeligere å avbilde den dypere delen av CO₂-skyen seismisk.

Seismikken viser tydelige tidsforsinkelser for bølger som har gått gjennom CO₂-skyen ("pushdown"). Dette kan brukes til å beregne mengde CO₂ – hvis en kjenner forholdet mellom hastighet og CO₂-metning.

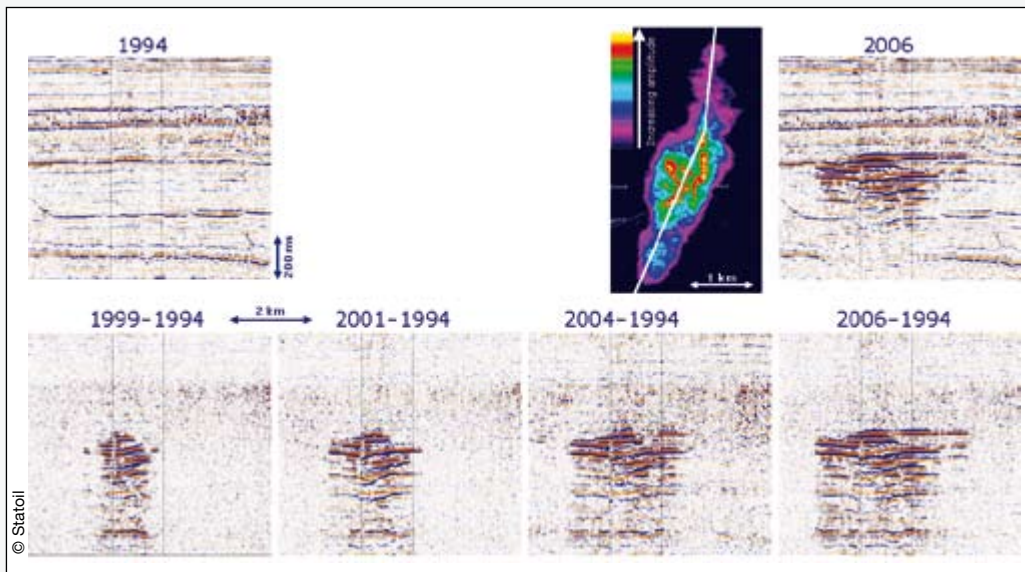


Ola Eiken, geofysiker ved Statoils forskningsavdeling i Trondheim, har vært involvert i monitoreringen av CO₂-gassen inn i Utsiraformasjonen siden oppstarten på dette arbeidet i 1998. I hht. gode kolleger har han vært en foregangsmann, og derfor nyter han stor internasjonal anerkjennelse for den jobben han har gjort.

De bergartsfysiske modellene har betydelig usikkerhet, fordi metningen kan være jevnt eller ujevnt fordelt på sub-seismisk skala. Likevel må den store tidsforsinkelsen forklares med at en del CO₂ befinner seg i "diffus" spredning ved lavere metning, som ikke gir sterk reflektivitet. Dette tilfredsstillende seismikken, men det er vanskeligere å forklare hvordan CO₂ kan strømme ved lav metning.

Voksende areal

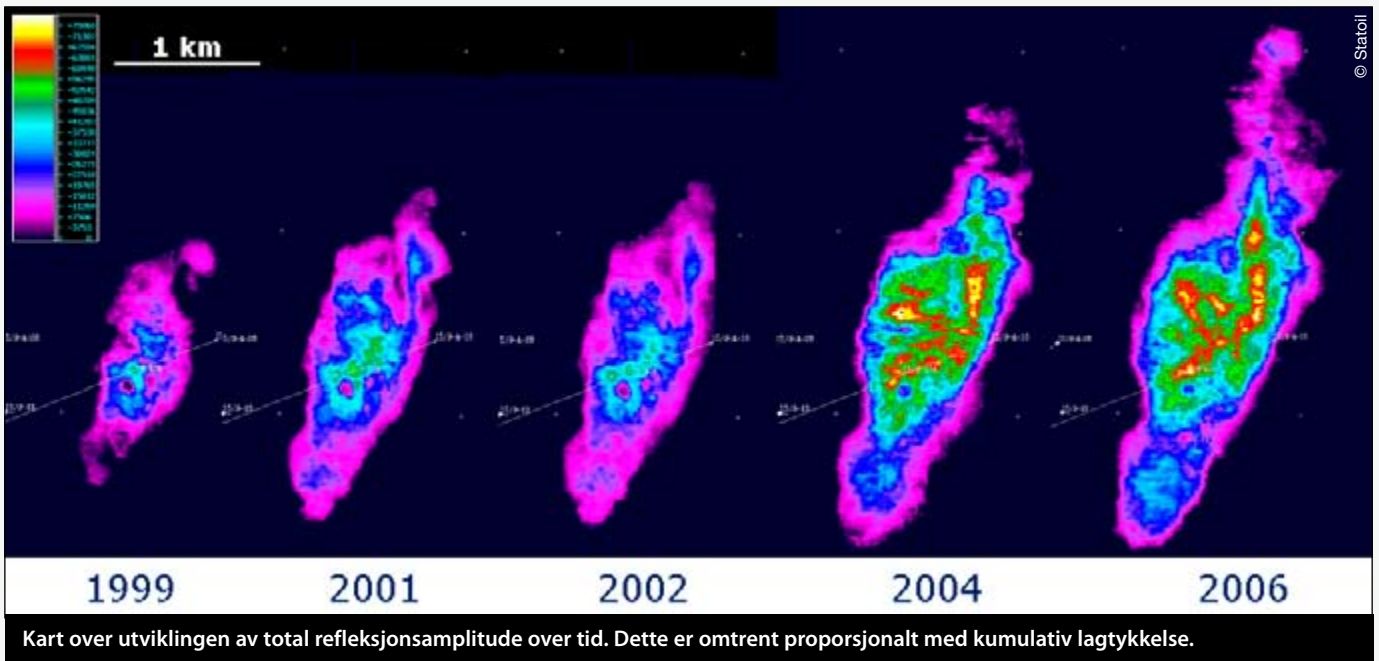
Aralet på CO₂-skyen har vokst jevnt i de ti årene injeksjonen har foregått, og ved siste måling i 2006 var den 2,8 km². Fronten beveger seg langsomt i alle retninger (~10-30 m/år). Mot nord går det derimot fortere. Her har fronthastigheten vært



Seismiske snitt på langs av CO₂-skyen på Sleipner.

Øverst: I 1994, før injeksjonen startet, og i 2006, hvor CO₂-akkumulasjonen kan sees tydelig.

Nederst: Differanseseksjoner, alle med 1994 som referanse, slik at det meste av den geologiske informasjonen forsvinner. CO₂-akkumulasjonen trår nå tydeligere frem



oppe i ca. 240 m/år. Vi forventer derfor at CO₂-gassen i de nærmeste årene også vil fylle opp antiklinalen som ligger nord for den sørligste.

En vertikal "pipe" gjennom alle refleksjonene, helt til toppen av Utsira formasjonen, kan observeres like ved injeksjonspunktet. Opp gjennom årene har lagene både vokst i tykkelse og utbredelse ut fra denne "pipen". Vi antar at den er forårsaket av CO₂-injeksjonen og danner en vertikal tilførselskanal. Mekanismene som har dannet tilførselskanalen, og permeabilitetsegenskapene i den, er ennå usikre.

Seismikken viser ingen tegn til lekkasje over reservoaret. Repeterbarheten i dataene er god, og trolig vil akkumulasjoner på noen titalls til hundretalls tonn CO₂ være detekterbare.

Permeabiliteten i Utsira formasjonen er målt til flere Darcy, og porøsiteten er anslått til 37% i gjennomsnitt. Under slike betingelser vil strømmingen av CO₂ være drevet av oppdriftskrefter og kontrollert av topografien på de forseggende skifrene. Reliefet på toppen av den forseggende skiferen er bare på noen få meter. Små hastighetsvariasjoner i lagene over kan derfor gjøre store utslag i dybdekartet. Dette gjør det vanskeligere å forutsi hvordan gassen vil strømme til sidene. Forventningene om at den brer seg mest mot nord holder likevel stikk.

Vi har lite kjennskap til tettheten til CO₂-gassen i Utsira-lageret, både fordi vi ikke har noen direkte målinger og



fordi gassen befinner seg nær kritisk punkt. Ut fra perforeringen antar vi trykket er nær hydrostatisk, dvs. rundt 100 bar. Selv om temperaturen kan være så høy som 57 °C, er formasjo-

nens opprinnelige temperatur lavere (rundt 42 °C ved injeksjonspunktet), og med sandsteienes store varmekapasitet vil CO₂-gassen raskt kjøles ned og øke tettheten. Dette vil redusere både volumet og oppdriftskreftene. Når tettheten i undergrunnen endrer seg, vil også tyngdekraften på overflaten endres med ørsmå verdier. Ved repeterte gravimetrisk målinger fra betongklosser som er permanent satt ut på havbunnen, viste målinger i 2002 og 2005 en reduksjon i tyngdekraften på ca. 7 µGal (som er 7 milliard-deler av gravitasjonsfeltet vi lever i). Når vi kjenner geometrien til CO₂-skyen ut fra seismikk, kan vi bruke gravimetrien til å estimere tettheten; 530 kg/m³ (+/- 65 kg/m³ med 95% signifikans).

Gir verden kunnskap

God kjennskap til fordeling, strømming og tetthet av CO₂ er viktig for å forutsi hvor gassen tar veien, og innenfor en tidshorisont på flere århundrer vil det være helt vesentlig om gassen løses i formasjonsvannet. I dag, etter ti års injeksjon og monitorering, er tids spennet stort nok til at vi skal kunne si noe om fremtiden. Her er Sleipnererfaringen unik, idet andre CO₂-lagre bare så vidt har startet injeksjonen. Slik sett har Statoil, partnere og Norge gitt verden en flott sjanse til bedre å forstå og akseptere tryggheten med geologisk lagring av CO₂.

Ola Eiken

Referanser til publikasjoner i internasjonale tidsskrift:

Chadwick, R.A., Arts, R. and Eiken, O. 4D seismic quantification of a growing CO₂ plume at Sleipner, North Sea. In: DORÉ, A.G. & VINING, B.A. (eds) Petroleum Geology: North-West Europe and Global Perspectives—Proceedings of the 6th Petroleum Geology Conference, 1385-1399.

R.A. Chadwick, R. Arts, O. Eiken, G.A. Kirby, E. Lindeberg and P. Zweigel. 4D seismic imaging of a CO₂ bubble at the Sleipner Field, central North Sea. In: Davies, R.J., Cartwright, J.A., Stewart, S.A., Lappin, M. & Underhill, J.R. (eds.) 3-D Seismic Technology Application to the Exploration of Sedimentary Basins. Geological Society, London, Memoirs, 29, 305-314.

Hansen, H., Eiken, O. and Aasum, T.O., 2005. Tracing the path of carbon dioxide from a gas-condensate reservoir, through an amine plant and back into a subsurface aquifer. Case study: The Sleipner area, Norwegian North Sea. SPE-96742.

Nooner, S., Eiken, O., Hermannrud, C., Sasagawa, G., Stenvold, T. and Zumberge, M. 2007. Constraining the in situ density of CO₂ within the Utsira formation from time-lapse seafloor gravity measurements. International Journal of Greenhouse Gas Control, 1, 2, 198-214.