

Beskrivelse av skoleforsøket: Lagring av CO₂ under havbunnen

Jan Martin Nordbotten og Kristin Rygg

14. februar 2010

Gjennom et klasseromsforsøk om lagring av CO₂ under havbunnen (også beskrevet i (1)) gis elevene kunnskap om de viktigste fysiske prosessene bak lagring av CO₂ i vannfylte formasjoner. I tillegg får elevene gjennom forsøket innsikt i viktige risikofaktorer knyttet til lekkasjer fra geologisk lagret CO₂, og konsekvenser av slike hendelser. For å analysere dataene må elevene bruke naturfaglige og matematiske kunnskaper, og de får innsikt i usikkerheter i målemetoder. Forsøket bør settes inn i riktig kontekst slik at elevene får muligheten til å forstå idealiseringen som foregår når vi gjør laboratorieeksperiment. For mer informasjon om geologisk lagring, se (2) og (3).

Forsøket er tidligere utført med en 6. klasse på St. Paul skole i Bergen i forbindelse med forskningsdagene 2008. Det kan likevel være hensiktsmessig å gjennomføre forsøket på høyere klassetrinn siden dette vil gi bedre faglig bakgrunn for forsøket. I forsøket gjør elevene målinger av lengde, vekt og volum. Disse målingene blir siden bearbeidet. Det er opp til læreren å tilpasse vanskelighetsgraden i etterarbeidet. Minimumskravet til elevene er at de kan måle lengde, vekt og volum samt multiplikasjon og deling, men økt forståelse gis om elevene behersker brøkrekning, prosentregning og kan tegne datapunkter i figur. Det er også hensiktsmessig om elevene har grunnlag for å forstå ligningene brukt i avsnitt 3.

Forsøkets omfang kan varieres, men kjernen i forsøket kan gjennomføres på to skoletimer hvis utstyr er klart og læreren har god forståelse av forsøket.

Vedlegget er delt i fire deler, i del 1 er det listet opp utstyr som trengs for å gjennomføre forsøket, del 2 beskriver fremgangsmåten for forsøket, og del 3 beskriver ligninger i forbindelse med beregninger i etterkant av forsøket. Tilslutt tar del 4 for seg det samfunnsmessige aspektet ved CO₂-lagring.

1 Utstyrliste

Skoleforsøket kan gjennomføres ved bruk av enkle hjelpemidler som finnes på de fleste kjøkken. Listen er veiledende.

1. Sand, gjerne med flere sandstørrelser. Jo mer inhomogen sandmasse, jo bedre. Dersom det velges å kjøpe sand, bør fortrinnsvis flere typer sand kjøpes og de ulike sandtypene blandes.
2. Bøtte.
3. Rørepinne.
4. Vann.

5. Sandkar, sandkaret bør helst ha åpning i begge ender og må være lite nok til å få plass inni vannkaret. Det kan gjerne brukes en to-liters vannflaske med avskjært bunn.
6. Gjennomiktig vannkar, fortrinnsvis med enkel geometri, sylindrerformet eller firkantet for å forenkle volumberegningene. Som et eksempel kan et akvarium benyttes. Vannkaret bør ikke være mye større enn sandkaret. Dersom volumet av sandkaret er mye større enn sandkaret vil volumet av den fortrenkte væsken utgjøre liten vannstandsending i vannkaret. Målefeilen vil dermed bli stor. På den andre siden, om vannkaret er av nesten identisk størrelse som sandkaret vil vannstandsendingen bli stor og trykket vil dermed ikke være konstant gjennom forsøket.
7. Filter, for eksempel lintøy, brus kork med hull i osv.
8. Hyssing/strikk til å feste filteret med.
9. Rist, risten må være liten nok til å få plass oppi vannkaret.
10. Øse.
11. Måleband.
12. Tusj.
13. Tape.
14. Sugerør.
15. Videokamera og/eller digitalt kamera.
16. Notatblokk.
17. Vekt.
18. Målebeger.
19. Stekepanne.
20. Komfyr.
21. Kniv/saks.

2 Fremgangsmåte

Den eksperimentelle delen av forsøket kan deles inn i målinger for gjøre porøsitetsberegninger og selve CO₂-lagringsforsøket, som består i å lage en akvifer av sand og vann og injisere luft i akviferen. Om det er mest praktisk i forhold til gjennomføringen av forsøket kan målingene til porøsitetsberegningene utføres på et annet tidspunkt. Til selve CO₂-lagringsforsøket består utstyrlisten av punkt 1-16 i avsnitt 1.

Sørg for at du har rikelige mengder med sand og vann tilgjengelig før forsøket begynner. Fordel så klassen inn i ulike grupper med ulike arbeidsoppgaver, bildetaking, måling av vannstand, notater, osv.

Det foreslås at forsøket først blir gjennomført i plenum og at det i etterkant blir utført flere parallelle forsøk for å undersøke effekten av ulike forbedringstiltak. For ideer til slike modifikasjoner, se avsnitt 2.3.

2.1 Forberedelser

Før selve forsøket begynner bør sanden vaskes. Hovedårsaken til at sanden vaskes er at når sanden kommer i kontakt med luft oppstår det krefter på overflaten mellom sand og luft, disse kreftene kalles overflatespenninger eller kapillærkrefter. Sanden inneholder derfor opprinnelig også luft. I forsøket velger vi av praktiske årsaker å lagre luft, ikke CO₂. Denne luften lagrer vi så i en akvifer som vi lager selv av sand og vann. For at vi skal kunne anslå hvor mye luft vi har lagret må vi først fjerne den opprinnelige luften i sanden. Dette gjøres ved å bryte ned det porøse mediet og og deretter få størst mulig overflate av sanden i kontakt med vann slik at luften blir frigjort fra sanden. Etter at luften er fjernet må vi være veldig forsiktig så sanden ikke kommer i kontakt med luft igjen. Sanden holdes derfor til en hver tid våt under vann. Selve vaskingen av sand foregår enklest ved å fylle bøtten delvis med sand og deretter fylle på med vann. Rør omkring i sanden så de letteste sandkornene hvirvler opp. Hell deretter av vannet. Gjenta prosedyren inntil en kan se sanden gjennom vannet samtidig som en rører i bøtten. Andre årsaker til å vaske sanden er å fjerne de minste sandpartiklene som kan tette filteret mellom sandkaret og vannkaret underveis i forsøket. Ved å fjerne de minste sandpartiklene blir også vannet i vannkaret renere og det er enklere å se luften i akviferen.

Parallelt med forsøket kan en gjøre porøsitetsberegninger. Porøsitet er definert som andel hulrom av det totale volumet. For å utføre porøsitetsberegningene trengs målinger av volumet av sandprøven, tyngden av den våte sanden og tyngden av tørr sand. Mål opp 2 dl våt sand (husk at den våte sanden ikke må i kontakt med luft). Vei den våte sandprøven og noter vekten som T_{vs} (tyngde våt sand). Vi må tørke sanden. Dette kan enklest gjøres ved hjelp av en stekepanne. Vei den tørre sanden og noter vekten som T_{ts} (tyngde tørr sand). I avsnitt 3.1 er det presentert ulike metoder som kan benyttes for å beregne porøsiteten til “akviferen”.

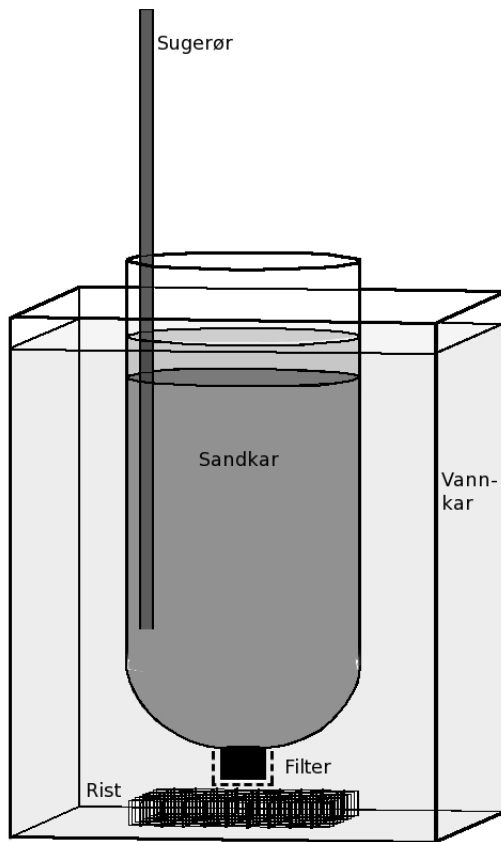
I etterkant av forsøket skal det gjøres beregninger av lagringsvolum (avsnitt 3.2), til disse beregningene trengs arealet av tverrsnittene til sandkaret og vannkaret. Mål diameterene av karene og beregn arealene. Noter verdiene som A_{vk} og A_{sk} (areal vannkar og areal sandkar).

For å kunne vurdere hvor det er lagret mest luft og hvor det er tryggest å lagre CO₂ trengs det bilder tatt underveis i forsøket. For å kunne sammenligne “tidsseriene” er det viktig at disse bildene blir tatt fra samme avstand og vinkel. Lag en liste over hvilke bilder som representerer hvilket tidspunkt i forsøket og hvilken posisjon bildet er tatt fra.

2.2 Gjennomføring av forsøket

Figur 1 viser oppsettet av utstyret brukt i forsøket. Fyll vannkaret med vann, plasser det et sted hvor det ikke er så farlig om litt vann skvulper over kanten og plasser en rist i bunnen av vannkaret. Finn frem en to-litersflaske og skjær av bunnen. Filteret monteres på tuten av flasken og festes med strikk eller hyssing. To-litersflasken (sandkaret) plasseres deretter med tuten ned oppå risten. Det er ikke farlig om det er høyere vannstand i sandkaret enn i vannkaret. Ved motsatt tilfelle må vannstanden forsiktig utjevnes underveis i forsøket.

Finn en øse og bruk denne til å fylle bunnen av sandkaret med vann. Det er viktig at sanden ikke kommer i kontakt med luft og øsen bør derfor være liten



Figur 1: Oppsett av forsøket.

nok til at det er enkelt å helle sanden over i sandkaret under vann.

For å siden kunne injisere luft i akviferen trengs en injeksjonsbrønn. Til injeksjonsbrønn benytter vi et sugerør. Plasser sugerøret så langt nedi “akviferen” som mulig, men samtidig så høyt at det er mulig å blåse i sugerøret. Fyll deretter resten av sandkaret med sand. Observer hvordan de store sandkornene synker raskere enn de lette slik at en lagdeling med mer og mindre gjennomtrengbare lag oppstår. I løpet av de millionene år før CO_2 -lagringen fant sted ble formasjonen utsatt for flere jordskjelv. Løft og slipp sandkaret noen ganger for å illustrere disse jordskjelvene.

For å beregne totalt lagringsvolum trengs høyden av det totale lagringsvolumet. Mål lengden av et sugerør og trekk fra lengden av sugerøret som stikker opp av sanden. Høyden av det totale lagringsvolumet er lengden av sugerøret minus lengden av sugerøret som stikker opp av sanden. Noter høyden av lagringsvolumet som h .

Etterhvert som luft kommer inn i akviferen vil luften fortrenge vannet som er i sandkaret før luftinjeksjonen. For å beregne hvor mye luft som er lagret

trenger vi derfor vite den opprinnelige vannstanden i vannkaret før injisering av luft. Merk av vannstanden i vannkaret. Til dette kan det være hensiktsmessig å benytte tape og tusj. Ta også et bilde av vannstanden med kameraet.

Vi er nå klar til å injisere luft. En person blåser sakte, men stødig inn i injeksjonsbrønnen (det trengs nokså høyt trykk). Samtidig står en person ved siden av karet og sier fra straks en ser luft i akviferen. Stopp blåsing straks det kommer bobler til overflaten. De sølvfargede områdene i akviferen er områder hvor det er lagret luft. Ta bilder av sandkaret (fra samme vinkler og avstander som før injisering av luft). Mål deretter endringen i vannstand fra før injiseringen av luft og noter endringen som h_{inj} .

Ved lagring av CO₂ under havbunnen ønsker man at den lagrede CO₂en skal bli værende i formasjonen i tusenvis av år. Det er derfor viktig at det ikke forekommer lekkasjer fra formasjonen. For å sjekke om akviferen lekker kan karet dekket med plastfolie (for å hindre fordampning) til neste dag. Kontroller så om noe har lekket. Dersom formasjonen lekker vil vannstanden ha endret seg.

Jordskjelv kan generere sprekker i formasjonen og slik føre til lekkasjer. For å illustrere effekten av et jordskjelv, løfter og slipper vi sandkaret på samme måte som før vi injiserte luft. Ta nye bilder etter "jordskjelvet" og mål av vannstanden. Vannstandsendringen fra før det ble injisert luft noteres som h_{jord} .

Brønner fører til kontinuerlige kanaler fra overflaten til akviferen, og er blant de største bidragsyterne til risikoen for lekkasje av geologisk lagret CO₂. Lekkasjer kan oppstå under selve CO₂-injiseringen, eller i etterkant ved at brønnen forvitrer. For å illustrere en slik lekkasje kan forsøket avsluttes ved å trekke ut injeksjonsbrønnen (sugerøret). Dette illustrerer en lekkasje i det noe dramatiske tilfellet at brønnen forvitrer bort. Noter endringen i vannstand fra den opprinnelige vannstanden som $h_{brønn}$ og ta nye bilder fra samme avstander og vinkler som etter luftinjiseringen og jordskjelvet.

2.3 Modifikasjoner

Forsøket kan gjentas med ulike modifikasjoner for å gi videre innsikt. Under er det beskrevet flere forslag til modifikasjoner som kan utføres av de enkelte gruppene. Gi hver gruppe ansvar for sin modifikasjon og gjennomfør ellers forsøket som beskrevet i avsnitt 2.2. Vær nøyaktig med målinger og notater og utfør etterarbeidet for hver av modifikasjonene. I etterkant kan en sammenligne effektene av ulike tiltak. Noen forslag er:

1. Stopp injiseringen av luft før luften passerer det øverste laget (før det kommer bobler til overflaten).
2. Etter at sandkaret er fylt pakkes sanden forsiktig tettere sammen, slik som når en lager sandlott. Hensikten er at det øverste laget skal være mer realistisk pakket sammen. Injisere luft i formasjonen, men vær forsiktig så ikke formasjonen slår sprekker, stopp injiseringen av luft før luften når toppen av akviferen (før det kommer luftbobler til overflaten).
3. Hvis det er tilgang på ulike sandtyper, kan man lage lagdelte strukturer når man konstruerer akviferen. Leire er spesielt bra.
4. Har elevene flere forslag til modifikasjoner? Gjennomfør disse.

3 Etterarbeid/beregninger

Etter at selve forsøket er gjennomført har vi data som kan benyttes til porøsitetsberegninger og beregninger av ulike lagringsvolum. Vi har også tidsserier (bilder) av akviferen som viser hvor luften er lagret. Ut fra disse bildene kan det kartlegges hvor det er tryggest å lagre CO₂. Avsnitt 3.1 forteller om porøsitetsberegningene, avsnitt 3.2 om beregning av ulike lagringsvolumer og avsnitt 3.3 om analyse av bildene.

3.1 Porsøsitetsberegninger

Porøsiteten, andel hulrom av totalt volum, kan beregnes ved hjelp av tre ulike metoder. Hvilke(n) metode(r) som benyttes er avhengig av elevenes matematikkunnskaper og er opp til læreren å vurdere. Metodene kan benyttes direkte eller en kan ta med utledninger. Det kan velges å bruke en enkelt metode, eller å ta med flere metoder for å illustrere usikkerhet.

3.1.1 Metode 1

For å beregne porøsitet ved hjelp av metode 1 trengs volumet av sandprøven og tyngden av den våte sanden. Dersom vi antar at akviferen før injiseringen er uten luft består akviferen av kun vann og tørr sand. Tyngden til den tørre sanden, T_{ts} , kan uttrykkes som massetettheten av tørr sand, d_{ts} , ganger volumet, V , ganger andelen av det målte volumet som inneholder sand, A_{ts} ,

$$T_{ts} = d_{ts} \cdot V \cdot A_{ts} . \quad (1)$$

Andelen av sand, A_{ts} , som opptar det målte volumet er 100% - porøsiteten. Total tyngde av den våte sandprøven er tyngden av tørr sand pluss tyngden av vann,

$$\begin{aligned} T_{vs} &= T_{ts} + T_v , \\ &= d_{ts} \cdot V \cdot A_{ts} + d_v \cdot V \cdot A_v , \\ &= d_{ts} \cdot V \cdot \frac{(100 - P_1)}{100} + d_v \cdot V \cdot \frac{P_1}{100} . \end{aligned} \quad (2)$$

Massetettheten til sand, d_{ts} , er typisk omtrent 260 g dl⁻¹, og massetettheten til vann, d_v er 100 g dl⁻¹. Ved å snu om på Ligning (2) kan porøsiteten P_1 , uttrykkes ved,

$$P_1 = \frac{(V \cdot d_{ts} - T_{vs}) \cdot 100}{V \cdot (d_{ts} - d_v)} . \quad (3)$$

3.1.2 Metode 2

Porøsiteten kan også beregnes ut fra tyngden av det fordampede vannet (vannet som har fylt hulrommene). Til denne beregningen trengs tyngden av den våte sandprøven, tyngden av tørr sand og volumet av sandprøven. Forskjellen på tyngden av våt sand og tørr sand forteller hvor mye vann som har fordampet,

$$T_{vann} = T_{vs} - T_{ts} = d_v \cdot V \cdot \frac{P_2}{100} , \quad (4)$$

som igjen kan skrives som,

$$P_2 = \frac{100 \cdot (T_{vs} - T_{ts})}{V \cdot d_v} . \quad (5)$$

3.1.3 Metode 3

Dersom vi kjenner til massetettheten til stein (typisk 260 g dl^{-1}) kan porøsiteten beregnes direkte fra målingen av vekten til tørr sand og volumet. Tyngden av den tørre sanden kan da uttrykkes ved,

$$T_{ts} = d_{ts} \cdot V \cdot \frac{(100 - P_3)}{100} , \quad (6)$$

som også kan skrives som,

$$P_3 = 100 - \frac{100 \cdot T_{ts}}{V \cdot d_{ts}} . \quad (7)$$

3.2 Hvor mye luft er lagret i ”akviferen“?

Det totale volumet av ”akviferen“ hvor det er mulig å lagre CO_2 er volumet av sandkaret fra bunnen av injeksjonsbrønnen til toppen av ”akviferen“. Totalt lagringsvolum kan dermed beregnes som arealet av sandkaret, A_{sk} , ganger lengden av sugerøret som er dekket av sanden, h ,

$$V_{tot} = A_{sk} \cdot h . \quad (8)$$

Før en beregner volumet av den lagrede luften, oppfordres det til å ha en gjettestruktur om hvor mye luft som er lagret. Maksimal mengde luft som kan lagres er volumet av porene mellom sandkornene i det totale lagringsvolumet som opprinnelig var fylt med vann. Dette kan uttrykkes som maksimalt lagringsvolum ganger porøsiteten (Ligning (3), (5) og (7)),

$$V_{maks} = P \cdot V_{tot} . \quad (9)$$

3.2.1 Reellt maksimalt lagringsvolum

Før at en væske skal kunne strøkke mellom porene, må porene være sammenhengende. Reellt maksimalt lagringsvolum vil derfor være mindre enn det totale volumet av porene mellom sandkornene (Ligning (9)). Ut fra endringen i vannstand etter injiseringen kan en beregne reellt maksimalt lagringsvolum,

$$V_{lagret} = h_{inj} \cdot (A_{vk} - A_{sk}) . \quad (10)$$

Volumet, V_{lagret} , er luft lagret på grunn av krefter som virker på overflaten mellom sand, vann og luft (kapillære krefter), men også på grunn av strukturelle barrierer.

3.2.2 Trygg lagringskapasitet med tanke på jordskjelv

Ved et jordskjelv kan strukturen i formasjonen endre seg og lag med mindre gjennomtrengbarhet kan få brister og dermed frigjøre veier for luft fra ”akviferen“ til overflaten. Trygg lagringskapasitet med tanke på jordskjelv er volum

lagret hovedsaklig ut fra kapillære krefter. Dette volumet kan beregnes ut fra vannstanden etter jordskjelvet,

$$V_{jord} = h_{jord} \cdot (A_{vk} - A_{sk}) . \quad (11)$$

3.2.3 Trygg lagringskapasitet med tanke på brønnlekkasjer

Dersom brønnen forvitrer vil det bli en direkte kobling mellom akviferen og overflaten som kan være årsak til store lekkasjer. Trygg lagringskapasitet med tanke på lekkasje gjennom brønnen kan beregnes ut fra endringen i vannstand fra før injiseringen av luft til etter at sugerøret er trukket ut, $h_{brønn}$,

$$V_{brønn} = h_{brønn} \cdot (A_{vk} - A_{sk}) . \quad (12)$$

3.3 Hvor er det tryggest å lagre luft?

Dersom det ble tatt bilder underveis i forsøket kan disse bildene brukes til å kartlegge hvor det er lagret mest luft. Sorter bildene så bilder tatt fra samme vinkel blir sammenlignet. For hver vinkel skal det være tre bilder, bilde av sandkaret etter injisering av luft, etter jordskjelv og etter brønnlekkasje. Skriv ut bildene på lysark. Legg deretter lysarkene over et ruteark og gå gjennom hvert enkelt bilde, linje for linje og noter antall ruter som er fylt med luft (er sølvfarget) og antall ruter som er halvfulle på hver linje. Lag en figur der det for hver linje er illustrert antall fulle ruter pluss halvparten av de halvfulle rutene. Gjenta dette for alle bildene.

Ut fra denne figuren kan en se hvor mye luft som er lagret i de ulike dybdene, og fra hvilke dybder lekkasjene skjer. Hvor er det tryggest å lagre CO₂? Hva ville skjedd om vi hadde sluttet å injisere luft tidligere? Figuren kan også brukes til en enkel introduksjon til integrasjon.

4 Samfunnsvitenskapelige aspekter

Forsøket gir grunnlag for å diskutere de tre store overordnede spørsmålene ved CO₂-lagring:

1. Hvor raskt kan vi lagre CO₂? Med andre ord hvor raskt kan vi gjøre noe med de globale CO₂-utslippene?
2. Hvor mye kan vi lagre? Kan vi lagre i stor nok målestokk til at det vil redusere utslipp på global skala?
3. Hva er risikoen ved å lagre CO₂? Og kan vi gjøre noe for å redusere negative konsekvenser om noe går galt?

Risiko er definert som sannsynligheten for at en hendelse skjer ganger konsekvensen av hendelsen,

$$\text{Risiko} = \text{Frekvens} \cdot \text{Konsekvens} . \quad (13)$$

I forsøket har vi sett på konsekvenser, og hvor mye som lekker ved to ulike hendelser; jordskjelv og forvitring av brønner. Hvilket scenario har den mest

alvorlige konsekvensen (størst lekkasjemengde)? Hvordan kan vi tallfeste konsekvenser? Det fins flere måter å tallfeste konsekvenser på, volumet av CO₂ som har lekket over totalt lagret volum av CO₂ kan være et eksempel,

$$\text{Konsekvens} = \frac{\text{Volumet av luften som har lekket}}{\text{Volumet av luften som opprinnelig var i formasjonen}} \cdot \quad (14)$$

Har elevene forslag til andre og bedre estimat?

Hvilket av de to scenarioene tror elevene har den høyeste frekvensen, og hva kan gjøres for å redusere hyppigheten av de to typene lekkasjer? Vurder ut fra punktene over hva som utgjør den største risikoen forbundet med lagring av CO₂.

Se for dere at det i fremtiden blir besluttet at lagret CO₂ må fjernes fra en akvifer, enten til industrielle formål eller på grunn av sikkerhetshensyn. Er dette mulig? Prøv å fjerne CO₂ ved å suge i injeksjonsbrønnen. Dette må gjøres veldig forsiktig! Kan vi sammenligne fjerning av CO₂ fra en akvifer med dagens olje- og gassutvinning?

For å lagre CO₂ sikkert både for nåtiden og fremtiden trengs et grundig regelverk ((4), (5)). Regelverket bør ta for seg ansvarsforhold både nå og i uoverskuelig fremtid. Basert på elevenes forkunnskaper og erfaringene fra forsøket, hvordan ville de ha utformet et slikt regelverk? Hvilke kriterier bør være tilstede for å få lagre CO₂ under havbunnen, og hvordan bør ansvarsforholdet mellom stat og selskaper som lagrer CO₂ være? Sammenlign forslagene fra elevene med utkastene til regelverk fra EU (6) og USA.

Referanser

- [1] J. M. Nordbotten og K. Rygg. Klasseromsforsøk om lagring av CO₂ under havbunnen. www.bora.uib.no, 2008.
- [2] J. M. Nordbotten. Store løsninger dype problemer. AKA, 2003.
- [3] D. Biello. Future of 'clean coal' power tied to (uncertain) success of carbon capture and storage. *Scientific American*, 2007.
- [4] Bellona. EU lanserer regelverk for CO₂-lagring. http://www.bellona.no/nyheter/nyheter_2008/foreslar_regelverk_for_co2_lagring, 2008.
- [5] Nyhetsblikket.no. Fjerner hindringer for CO₂-lagring under vann. http://www.nyhetsblikket.no/?category=miljo/fjerner_hindringer_for_co2_lagring_under_vann/, 2008.
- [6] Kommisionen for de europæiske fælleskaber. Forslag til EUROPA PARLAMENTETS OG RÅDETS DIREKTIV om geologisk lagring af kuldioxid og om ændring av Rådets direktiv 85/337/EØF, 96/61/EF, 2000/60/EF, 2001/80/EF, 2004/35/EF, 2006/12/EF og forordning (EF) nr.1013/2006. <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2008:0018:FIN:DA:PDE>, 23. januar 2008.