



NGU Rapport 98.149

Muligheter for undergrunnsdeponering av CO<sub>2</sub> i  
kystnære områder - en forstudie

Rapport nr.: 98.149		ISSN 0800-3416	Gradering: Åpen
Tittel: Muligheter for undergrunnsdeponering av CO <sub>2</sub> i kystnære områder - en forstudie			
Forfatter: Reidulv Bøe, Morten Sand, Brian A. Sturt		Oppdragsgiver: NGU, OD	
Fylke:		Kommune:	
Kartblad (M=1:250.000)		Kartbladnr. og -navn (M=1:50.000)	
Forekomstens navn og koordinater:		Sidetall: 43	Pris: kr. 315,-
		Kartbilag: 1	
Feltarbeid utført:	Rapportdato: 31. januar 1999	Prosjektnr.: 2664.21	Ansvarlig: <i>Oystein Nordmark</i>
<p>Sammendrag:</p> <p>Det er nå generelt akseptert at menneskeskapte CO<sub>2</sub>-utslipp bidrar til den globale økningen i atmosfærisk CO<sub>2</sub>-nivå og en sterkere drivhuseffekt. Muligheten for at den økende drivhuseffekten kan føre til klimatiske forandringer er årsak til internasjonal bekymring, og forskjellige metoder for hvordan en skal kunne redusere utslippene av CO<sub>2</sub> til atmosfæren blir diskutert.</p> <p>Dette forstudiet omhandler mulighetene for kystnær undergrunnsdeponering av CO<sub>2</sub>, løselig definert som deponering i områder nærmere kysten enn de nærmeste olje- og gassfeltene, som ligger ca. 60 km fra land. Kostnadene ved deponering av CO<sub>2</sub> øker ved lang avstand fra utskillingssted til deponeringsanlegg. Hvis store mengder CO<sub>2</sub> fra punktutslipp på land skal deponeres i undergrunnen må en derfor prøve å finne et velegnet lagringssted så nært utslippspunktet som mulig. Hovedformålet med rapporten har vært å undersøke potensialet for deponering av CO<sub>2</sub> i akviferer på land, i fjordene og i de nære områdene utenfor kysten, og å komme med en anbefaling om hvorvidt en bør gå videre med detaljerte undersøkelser innen spesielle geografiske områder. Rapporten er ment som en oppsummering av relevante, eksisterende data, og mange hull i den geologiske kunnskapen må fylles før en kommer til et punkt der CO<sub>2</sub>-deponering kan bli aktuelt.</p> <p>Hovedkonklusjonen i rapporten er at de beste forholdene for kystnær undergrunnsdeponering av karbondioksyd finnes i sedimentære bergarter fra juratiden. Deponering i kretaiske og tertiære bergarter er tenkelig, mens deponeringspotensialet i kvartære sedimenter og bergarter eldre enn jura er begrenset. Sedimentære og krystalline bergarter som finnes på land langs kysten er uegnet for CO<sub>2</sub>-deponering. Et omfattende pilotprosjekt med reservoarsimulering, nyinnsamling av seismiske data og boring med kjerneprøvetaking vil måtte gjennomføres for å kartlegge hvor en har akviferer som egner seg for deponering av karbondioksyd i undergrunnen.</p>			
Emneord: Maringeologi	Berggrunnsgeologi	Drivhuseffekt	
Sedimentologi	Stratigrafi	Strukturgeologi	
Karbondioksyd	Klima	Fagrapport	

## INNHold

1. INNLEDNING.....	5
2. CO <sub>2</sub> -UTSLIPP I NORGE - HVILKE UTSLIPP KAN LAGRES.....	9
3. HVA GJØRES I ANDRE LAND RUNDT NORDSJØEN.....	9
4. KONSEPTER FOR LAGRING AV CO <sub>2</sub> I UNDERGRUNNEN.....	10
5. GEOLOGISKE FORUTSETNINGER FOR LAGRING AV CO <sub>2</sub> I AKVIFERER.....	13
6. GEOLOGISKE FORHOLD LANGS NORSKEKYSTEN.....	15
6.1 Geologien på land.....	15
6.2 Geologien i fjord- og havområdene utenfor kysten.....	16
7. BERGARTER OG FORMASJONER EGNET FOR CO <sub>2</sub> -DEPONERING.....	17
7.1 Deponering i bergartsformasjoner på land.....	18
7.2 Deponering i sedimentære bergartsformasjoner innaskjærs og i kystsonen.....	18
7.3 Deponering i sedimentære bergartsformasjoner under havområdene utenfor kysten.....	24
7.3.1 Deponering i avsetninger fra tertiær-tiden.....	24
7.3.2 Deponering i avsetninger fra kritt-tiden.....	27
7.3.3 Deponering i avsetninger fra juratiden.....	28
8. OPPSUMMERING OG FORSLAG TIL VIDERE UNDERSØKELSER.....	34
8.1 Oppsummering av potensielle deponeringsområder.....	34
8.2 Forslag til videre undersøkelser og anbefalinger.....	36
9. KONKLUSJONER.....	38
10. REFERANSER.....	39

## FIGURER

Fig. 1. Figur som viser prinsippet for deponering av CO<sub>2</sub> i undergrunnen.

Fig. 2. Kart som omtrentlig viser innergrensen mot land av bergarter som kan være aktuelle for CO<sub>2</sub>-deponering.

Fig. 3. Geologisk kart over Beitstadjorden (fra Bøe & Bjerkli (1989)).

Fig. 4. Seismisk snitt over Beitstadjorden.

Fig. 5. Geologisk kart over Frohavet (fra (Bøe 1991)).

Fig. 6. Seismisk snitt over Frohavet.

Fig. 7. Kart over Utsiraformasjonen (fra Gregersen et al. (1998)).

Fig. 8. Seismisk snitt over Varnesgrabenen.

Fig. 9. Seismisk snitt over området fra Trollfeltet mot land.

Fig. 10. Profil over de juraiske forkastningsbassengene vest for Sotra (fra Fossen (1998)).

## TABELLER

Tabell 1. CO<sub>2</sub>-lagringskapasitet (gegatonn CO<sub>2</sub>) i geologiske feller (gassfelt, oljefelt og lukkede akviferer) i EU-landene og Norge. Tabellen viser også de enkelte landenes CO<sub>2</sub>-utslipp over en 25-års periode i forhold til 1990-nivået (fra Holloway (1996)).

Tabell 2. Total CO<sub>2</sub>-lagringskapasitet (gegatonn CO<sub>2</sub>) i akviferer i EU-landene og Norge. Anslaget er basert på et relativt tynt og lite komplett datasett. Lagringseffektiviteten er 2% for lukkede akviferer og 6% for åpne akviferer. Der det er uklart om en akvifer er åpen eller lukket, er det benyttet en lagringseffektivitet på 4% (fra Holloway (1996)).

Tabell 3. Oppsummering av kystnære områder og formasjoner aktuelle for CO<sub>2</sub>-deponering. Formasjonene som er vurdert er yngre enn Trias, bortsett fra i Finnmark, der det ikke finnes så unge formasjoner nær kysten.

## VEDLEGG

Vedlegg 1. Berggrunnskart, Norge med havområder. Målestokk 1:3 millioner (Sigmond 1992).

## 1. INNLEDNING

Det er nå generelt akseptert at menneskeskapte CO<sub>2</sub>-utslipp bidrar til den globale økningen i atmosfærisk CO<sub>2</sub>-nivå. En økning i CO<sub>2</sub>-innhold forårsaker økende strålingsoppvarming av jordoverflaten og de lavere atmosfæriske lag, og dermed en sterkere drivhuseffekt. Muligheten for at den økende drivhuseffekten kan føre til klimatiske forandringer, noe som kan være skadelig for både mennesker og jordens naturlige økosystemer, er årsak til internasjonal bekymring.

Over 5000 representanter fra over 160 medlemsland deltok på klimakonferansen arrangert av FN i Kyoto 1-10 desember 1997. En bindende avtale ble undertegnet 11. desember samme år. Ved ratifikasjon av avtalen forplikter de industrialiserte landene seg til å redusere sine utslipp av drivhusgassene karbondioksyd (CO<sub>2</sub>), metan (CH<sub>4</sub>), lystgass (N<sub>2</sub>O), hydrofluorkarboner (forkortet til HFK), perfluorkarboner (forkortet til PFK) og svovelheksafluorid (SF<sub>6</sub>). For Norge sin del er det i hovedsak snakk om CO<sub>2</sub>. Avtalen binder de industrialiserte land til å redusere sine samlede utslipp med 5,2 prosent i forhold til 1990-nivået. Kun tre land får tillatelse til å øke sitt utslippsnivå, nemlig Norge med 1 prosent, Australia med 8 prosent og Island med 10 prosent, mens Russland, Ukraina og New Zealand får tillatelse til å stabilisere sine utslipp på 1990-nivå. Ut ifra tilgjengelige prognoser for klimagassutslipp har en kalkulert at hvis Norge skal fryse sine utslipp på 101 prosent av 1990-nivå vil en måtte redusere utslippene med ca. 12 millioner tonn CO<sub>2</sub> i perioden 2008-2012.

Et viktig poeng framhevet på Kyotokonferansen var at med det nåværende avskogingstempoet i verden vil drivhuseffekten bli ytterligere forsterket. Mesteparten av de menneskeskapte CO<sub>2</sub>-utslippene skyldes imidlertid bruk av fossile brennstoff som for eksempel olje, gass, kull og ved. Av det totale energiforbruket i Europa stammer 2/3 fra forbrenning av hydrokarboner. Av dette benyttes 1/3 til energiproduksjon i kraftverk, 1/3 til transport, og 1/3 til andre formål. Hvis kraftverkene alene skal stå for den planlagte reduksjonen i CO<sub>2</sub>-utslipp, medfører dette at de må redusere sine utslipp med 45%. I dagens industrialiserte samfunn, inkludert Norge, er bruk av fossile brennstoff en livsnødvendighet, og kan ikke enkelt unngås. En har derfor et øyeblikkelig behov for å finne ut hvordan CO<sub>2</sub>-utslippene kan forminskes uten at det fører til drastiske forandringer i vår levemåte.

Det finnes mange muligheter for hvordan en skal kunne redusere konsentrasjonen av CO<sub>2</sub> i atmosfæren. De mest innlysende er å produsere mindre CO<sub>2</sub> ved å øke effektiviteten i den eksisterende energiproduksjonen, og ved å benytte mer fornybar energi, f.eks. vannkraft, solenergi, vindkraft og geotermisk energi fra varmepumper. Produsert CO<sub>2</sub> kan fjernes ved biofiksering, og utnyttes blant annet av algekulturer og i skogplantingsprogrammer. Drivhusgassen CO<sub>2</sub> kan også fjernes ved lagring dypt i undergrunnen. Ved lagring i undergrunnen er det av avgjørende betydning at en kjenner godt til reservoarforholdene der CO<sub>2</sub> skal deponeres.



## Skjematisk framstilling av karbondioksyd-deponering i undergrunnen

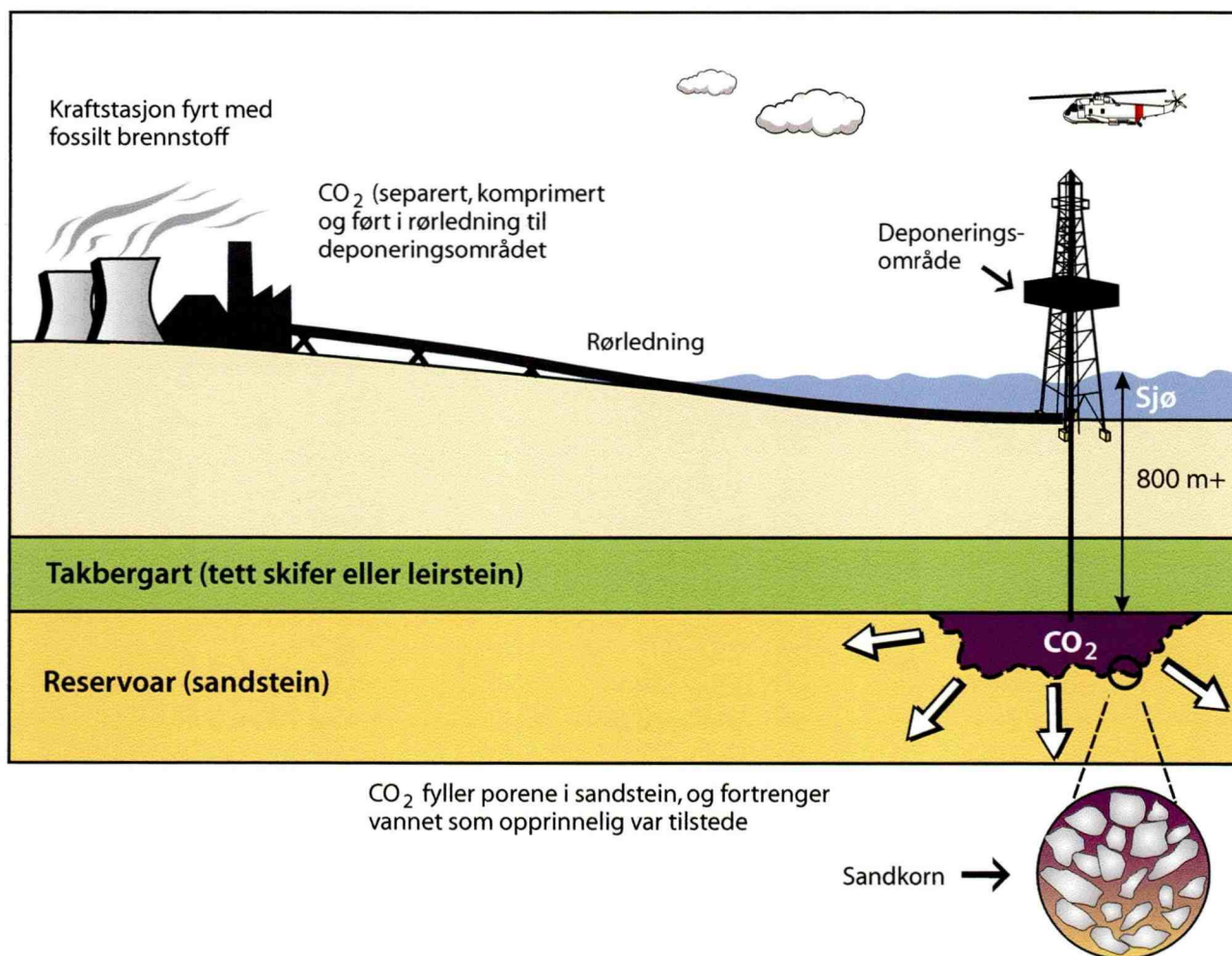


Fig. 1. Figur som viser prinsippet for deponering av CO<sub>2</sub> i undergrunnen (etter Rochelle & Holloway).

Mange anlegg produserer i dag flere megatonn CO<sub>2</sub> årlig, slik som:

- Kull-, olje- og gasskraftverk
- Industrianlegg, for eksempel oljeraffinerier og papir- og cellulosefabrikker
- Gass- og oljeproduksjonsplattformer

Fra slike anlegg (punktkilder) er det fullt mulig å utskille CO<sub>2</sub>-gass med tanke på deponering.

Avgassene fra et kullfyrt kraftverk inneholder 3-16% CO<sub>2</sub> (Holloway et al. 1996). Det er nødvendig å separere denne gassen fra de andre komponentene, og å konvertere karbonmonoksyd (CO) i avgassene til karbondioksyd. Tilgjengelige teknikker finnes for å fjerne urenheter fra avgassene og å kunne utvinne omtrent 95% av karbondioksyden. Da CO<sub>2</sub>-separeringen krever energi, vil den effektive reduksjonen av CO<sub>2</sub>-utslippene være omkring 85%. Lignende forhold gjelder for separering av CO<sub>2</sub> fra avgassene i konvensjonelle oljefyrte og naturgassfyrte kraftverk, om enn i ulik grad. Lignende effektivitet vil gjelde også hvor CO<sub>2</sub> ekstraheres fra naturgass før energiproduksjonen, slik som i Norsk Hydros planlagte gasskraftverk på Karmøy.

Gassen må deretter komprimeres og transporteres gjennom rørledninger til injeksjonsanlegget (Fig. 1). Etter injeksjon i en dyp akvifer eller i et olje- eller gassfelt, må gassen forbli isolert fra atmosfæren så lenge som en økning i drivhuseffekten vil kunne utgjøre en trussel mot miljøet på jorden.

Hovedformålet med denne rapporten er å undersøke potensialet for deponering av CO<sub>2</sub> i undergrunnen, både på land, i fjordene og i de nære områdene utenfor kysten, og å komme med en anbefaling om hvorvidt en bør gå videre med detaljerte undersøkelser innen spesielle geografiske områder. Ved konstruksjon av et CO<sub>2</sub>-fjerningsopplegg og drift over et visst antall år utgjør kostnadene relatert til rørledning, injeksjonsbrønn og transport ca. 25% av de totale kostnadene (T. Torp, pers. medd. 1999). Kostnadene ved legging av en rørledning øker mer eller mindre lineært med lengden på rørledningen. Etter at et anlegg er kommet i drift utgjør transportkostnadene en relativt liten andel av deponeringskostnadene. Ved samling av utslipp fra flere kilder i samme transportsystem kan den relative kostnaden senkes.

Hvis CO<sub>2</sub> fra punktutslipp på land skal deponeres i undergrunnen, kan en få ned rørlednings- og transportkostnadene ved å finne et velegnet lagringssted nær utslippspunktet. De fleste olje- og gassfeltene på norsk sokkel, der en også kan tenke seg CO<sub>2</sub>-deponering, ligger minst 60-70 km utenfor kysten. Granefeltet, hvor Norsk Hydro planlegger å injisere CO<sub>2</sub> fra et gasskraftverk på Karmøy, ligger ca. 160 km fra produksjonsstedet. Denne rapporten omhandler mulighetene for kystnær deponering av CO<sub>2</sub>, løselig definert som områder nærmere kysten enn de nærmeste olje- og gassfeltene, som ligger ca. 60 km fra land (Fig. 2).



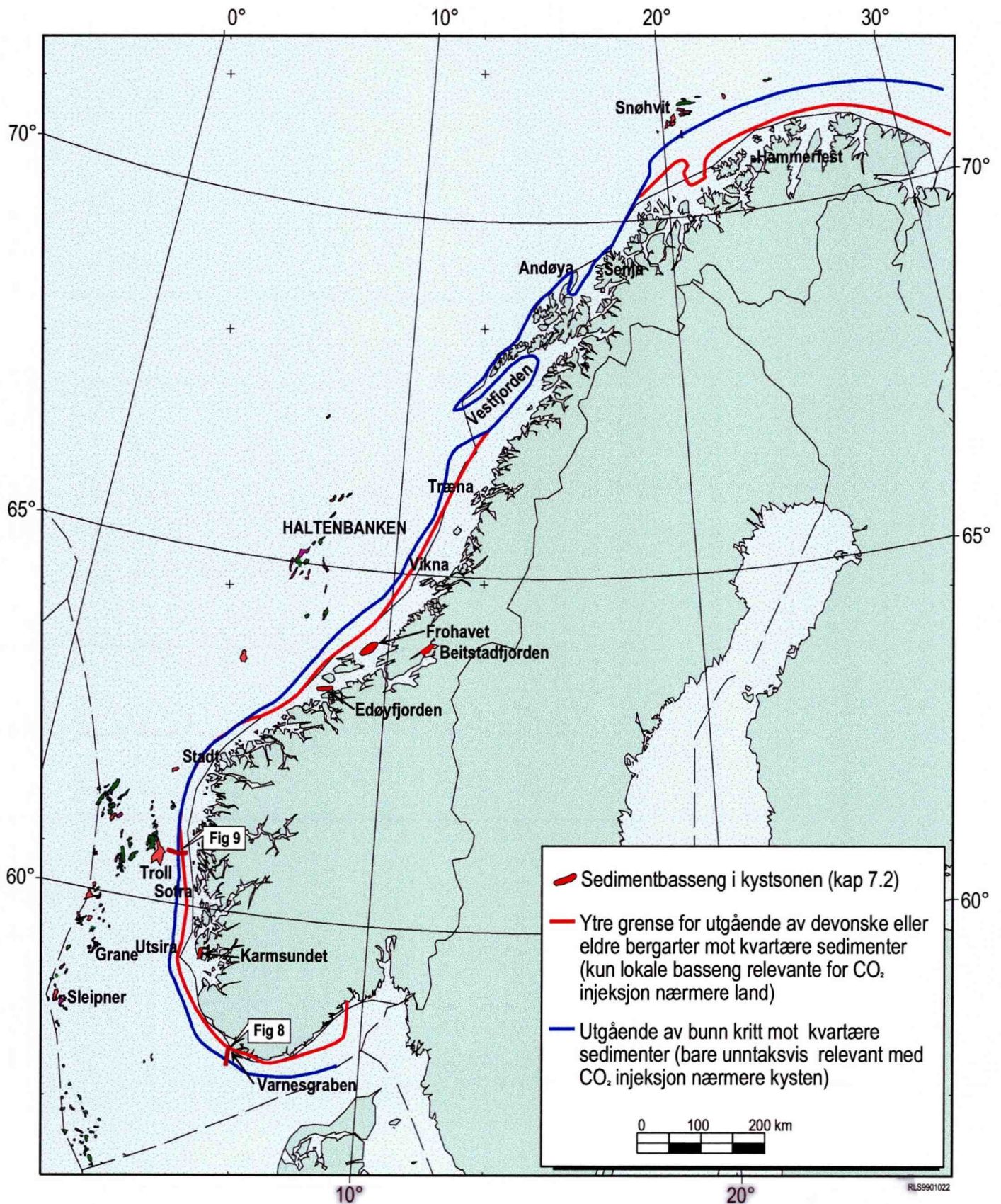


Fig. 2. Kart som omtrentlig viser innergrensen mot land av bergarter som kan være aktuelle for CO<sub>2</sub>-deponering.



## **2. CO<sub>2</sub>-UTSLIPP I NORGE - HVILKE UTSLIPP KAN LAGRES**

Med dagens teknologi er det hovedsaklig CO<sub>2</sub>-utslipp fra større punktkilder som vil være aktuelle for deponering. Disse punktkildene kan enten være fabrikker, kraftverk eller olje- og gassplattformer. En kan også tenke seg oppsamling av avgasser fra en samling av middels store punktkilder. Kostnadene ved oppsamling, rensing og framføring i rørledninger av mindre CO<sub>2</sub>-utslipp vil imidlertid sannsynligvis bli for høye til at dette vil kunne bli aktuelt.

Den norske kontinentalsokkelen skjuler betydelige reserver av naturgass, og på mange felt, både i Nordsjøen og i Norskehavet, pågår det utvinning. Teoretisk sett kan gasskraftverk bygges overalt langs kysten der en har mulighet til å legge gassrørledninger fra gassfeltene og inn til land. Hvor eventuelle gasskraftverk blir plassert langs kysten er et politisk spørsmål, men det er ikke umulig at flere slike kraftverk vil kunne bli bygget i det første tiåret av neste århundre. En effekt av dette vil være at klimagassutslippene i Norge vil øke. Eventuelle gasskraftverk vil i flere tilfeller sannsynligvis bli plassert nær andre industriområder med punktutslipp av CO<sub>2</sub>.

Et kraftverk drevet av naturgass produserer ca. 0.53 kg CO<sub>2</sub>/kilowatttime. Av kraftverk basert på fossilt brennstoff, er de som drives med brunkull de mest forurensende. Slike produserer ca. 1,18 kg CO<sub>2</sub>/kilowatttime. Selv om mengden karbondioksyd i avgassene fra et gasskraftverk er mye lavere enn i et kullkraftverk, vil CO<sub>2</sub>-utslippene også fra gasskraftverk representere et betydelig problem. I framtiden vil det etter all sannsynlighet bli viktig å kunne deponere CO<sub>2</sub>-utslipp fra gasskraftverk i undergrunnen, men en må regne med også å måtte deponere utslipp fra industrianlegg og olje-/gassplattformer.

I enkelte gassfelt inneholder naturgassen en høy andel CO<sub>2</sub>. Denne karbondioksyden må skilles ut og tas hånd om før hydrokarbongassen kan benyttes videre. På Sleipnerfeltet blir karbondioksyden separert på en av installasjonene og pumpet direkte ned i havbunnen igjen (se under). Også på andre felter, kanskje først og fremst på Snøhvitfeltet i Barentshavet, må en forberede seg på å ta hånd om store mengder CO<sub>2</sub> før naturgassen kan benyttes.

## **3. HVA GJØRES I ANDRE LAND RUNDT NORDSJØEN**

I landene rundt Nordsjøen pågår det relativt lite forskningsaktivitet relatert til CO<sub>2</sub>-deponering, men enkelte land er kommet lenger enn andre. I Storbritannia har British Geological Survey (BGS) vært ledende på forskning omkring CO<sub>2</sub>-deponering i undergrunnen, med vekt på geologiske og geokjemiske problemstillinger. I 1991 utførte BGS en forstudie for British Coal, der de vurderte potensialet for å lagre karbondioksyd i gruver og

andre menneskeskapte strukturer, samt i dype, saline akviferer (reservoarer med salt grunnvann) på land og under havbunnen (Holliday et al. 1991, Holloway & Savage 1993). I 1993-1996 koordinerte de Joule II-prosjektet (The Underground Disposal of Carbon Dioxide), som tok for seg mange forskjellige temaer i forbindelse med undergrunnsdeponering av CO<sub>2</sub> (Holloway 1996). I 1998 ble de med som deltagere i prosjektet "Saline Aquifer CO<sub>2</sub> storage - a demonstration project at the Sleipner Field" (SACS), der formålet er å overvåke hva som skjer i en akvifer (Utsiraformasjonen, se under) når CO<sub>2</sub> injiseres, og å modellere hvordan karbondioksyd vil oppføre seg videre framover.

I Norge utføres mesteparten av forskningen innen CO<sub>2</sub>-deponering av Statoil, Nansen-Senteret og IKU. Statoil har prosjektlederansvaret for SACS-prosjektet, som er et pionerprosjekt i verdenssammenheng. Formålet er å utnytte deres pilotanlegg på Sleipner til erfaringsoverføring og verifikasjon av metoder og verktøy. Partnere i SACS-prosjektet er, foruten oljeselskap og industribedrifter, forskningsinstitusjoner i Norge, Danmark, Nederland, Storbritannia og Frankrike. Prosjektet er støttet av nasjonale myndigheter i flere land samt av EU/Thermieprogrammet, og data og erfaringer utveksles med Canada, USA, Japan, Australia og andre via IEA GreenHouse Gas R&D.

I Nederland undersøkes mulighetene for å lagre CO<sub>2</sub> i gamle olje- og gassfelter. I Danmark har Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøkelse skaffet seg en foreløpig oversikt over aktuelle reservoarer/akviferer som kan benyttes til CO<sub>2</sub>-deponering, og hvor kullkraftverk med store CO<sub>2</sub>-utslipp er lokalisert i forhold til disse. I begge disse landene er det utført en del forskning relatert til CO<sub>2</sub>-deponering i undergrunnen.

#### **4. KONSEPTER FOR LAGRING AV CO<sub>2</sub> I UNDERGRUNNEN**

Hovedprinsippet ved lagring av CO<sub>2</sub> i undergrunnen går ut på å injisere gass i tilnærmet ren form inn i porerommene i permeable bergarter (Fig. 1). Det er stor forskjell på volumet CO<sub>2</sub> opptar i gassform og i flytende form. For at deponering av CO<sub>2</sub> skal være praktisk mulig (for at en skal ha store nok reservoarer til å få plass til all CO<sub>2</sub>) må karbondioksyd lagres i relativt tett fase (superkritisk tilstand, dvs. i flytende eller tilnærmet flytende form). Ut fra termodynamiske prinsipper (trykk og temperatur) vil karbondioksyd være i en relativt tett fase ved et dyp på ca. 800 m under havoverflaten, der det hydrostatiske trykket er slik at tettheten på CO<sub>2</sub> vil variere mellom 440 og 740 kg/m<sup>3</sup> (Holloway et al. 1996). Komprimert avgass med et CO<sub>2</sub>-innhold på 15% opptar 68 m<sup>3</sup> lagringsplass per tonn CO<sub>2</sub> under slike forhold. Ren CO<sub>2</sub> i komprimert form vil ved et trykk på 11 MPa og en temperatur på 35°C (typisk trykk og temperatur ved undergrunnsdeponering) være en superkritisk væske og trenge en lagringsplass på kun 1,34 m<sup>3</sup>/tonn. Lagring av CO<sub>2</sub> vil derfor være uinteressant i bergarter som ligger grunnere enn ca. 800 m under havoverflaten. I lukkede formasjoner med overtrykk kan en tenke seg at lagring kan foretas ved mindre dyp, men en økning av trykket ved CO<sub>2</sub>-injeksjon i

slike formasjoner vil kunne føre til store geotekniske problemer og oppsprekking, og er i realiteten uaktuelt (Holloway et al. 1996).

Karbondioksyd i superkritisk tilstand er mobil, og fordi den har en lav tetthet i forhold til grunnvann, vil den ha en tendens til å bevege seg (migrere) oppover mot overflaten. Til deponeringsformål er det derfor nødvendig å finne bergarter med høy permeabilitet, som er overleiret av tette takbergarter, eller takbergarter med lav permeabilitet, for eksempel skifer. En viktig faktor er lateral (sidelengs) gassmigrasjon. Når den deponerte gassen beveger seg lateralt, kan den komme til geologiske strukturer, for eksempel åpne forkastningssoner, der den vil kunne strømme opp mot overflaten. En mulighet er å injisere gassen inn i geologiske feller som er lukket både over og på sidene av tette bergarter eller strukturer.

Injeksjon av karbondioksyd kan skje enten i vannfylte, porøse bergarter (akviferer) eller i olje- eller gassførende reservoarer:

i) Olje- og gassfelt kan benyttes til deponering av CO<sub>2</sub> når de er tømt for utvinnbare petroleumsressurser. Slike reservoarer er ideelle for deponering da de, i og med at de har inneholdt olje og gass, har bevist at de er tette. Dessuten er reservoaregenskapene vanligvis grundig utforsket.

ii) CO<sub>2</sub>-injeksjon kan også være aktuelt i oljefelt som er under produksjon. Flere steder i USA blir injeksjon av CO<sub>2</sub> benyttet til å øke utvinningsgraden ved at den øker trykket i reservoaret og gjør tyktflytende olje mer tyntflytende. Dette er også tanken bak Norsk Hydros planer om et gasskraftverk på Karmøy, der de vil benytte CO<sub>2</sub> separert fra naturgass til å øke utvinningsgraden av hydrokarboner på Granefeltet.

iii) Injeksjon i akviferer er en relativt ny tanke, som har sin mest åpne styrke i store volum tilgjengelig lagerplass.

Tabell 1 og 2 viser omtrentlige anslag på tilgjengelige volum i olje-/gassfelt (når de er tømt og forlatt) og akviferer. Beregningene er svært omtrentlige, men de viser klart at olje- og gassfelt som i framtida blir forlatt har begrensede volum, mens det under Nordsjøen finnes sandsteinsakviferer med svært stor utstrekning og tykkelse. Disse har kapasitet til å lagre all CO<sub>2</sub> produsert av kraftstasjoner i Nord-Europa i flere hundre år framover. På Sleipnerfeltet i den norske delen av Nordsjøen utføres det nå et pionerprosjekt der det blir pumpet ca. 1 millon tonn CO<sub>2</sub> årlig ned i Utsiraformasjonen, som er en sandsteinsakvifer avsatt i Miocen tid (Christensen 1998, Torp & Christensen 1998).

LAND	UNDER HAVOMRÅDENE				PÅ LAND				TOTAL hav- områder & land	25 års CO <sub>2</sub> - utslipp fra kraft- stasjoner
	gass	olje	akviferer i feller	total under hav- områdene	gass	olje	akviferer i feller	total på land		
Belgia	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,62
Danmark	0,46	0,13	?	0,59	0,00	0,00	5,60	5,60	6,19	0,58
Frankrike	0,00	0,00	?	0,00	0,88	0,05	1,53	2,46	2,46	1,11
Tyskland	0,00	0,00	?	0,00	2,34	0,06	0,47	2,87	2,87	8,52
Hellas	0,02	0,01	?	0,03	0,00	0,00	?	0,00	0,03	0,90
Irland	0,16	0,00	?	0,16	0,00	0,00	?	0,00	0,16	0,28
Italia	0,84	0,07	0,08	0,99	0,85	0,04	0,35	1,24	2,23	3,07
Luxemburg	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04
Nederland	0,82	0,00	?	0,82	8,46	0,03	1,01	9,51	10,33	1,15
Norge	7,19	3,10	10,85	21,15	0,00	0,00	0,00	0,00	21,15	0,00
Portugal	0,00	0,00	?	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,38
Spania	0,04	0,01	0,01	0,06	0,00	0,00	1,46	1,46	1,52	1,61
Storbritannia	4,88	2,62	8,56	16,06	0,00	0,04	0,25	0,29	16,35	5,52
Total	14,40	5,94	19,51	39,86	12,54	0,22	10,67	23,43	63,29	23,75

Tabell 1. CO<sub>2</sub>-lagringskapasitet (gegatonn CO<sub>2</sub>) i geologiske feller (gassfelt, oljefelt og lukkede akviferer) i EU-landene og Norge (fra Holloway 1996). Tabellen viser også de enkelte landenes CO<sub>2</sub>-utslipp over en 25-års periode i forhold til 1990-nivået.

Land	Under havområdene	På land	Total
Belgia	0	0	0
Danmark	?	47	47
Frankrike	?	3	3
Tyskland	?	2	2
Hellas	?	?	0
Irland	?	?	0
Italia	?	0	0
Luxemburg	0	0	0
Nederland	?	5	5
Norge	476	0	476
Portugal	?	0	0
Spania	?	?	0
Storbritannia	240	0	240
Total	716	57	773

Tabell 2. Total CO<sub>2</sub>-lagringskapasitet (gegatonn CO<sub>2</sub>) i akviferer i EU-landene og Norge (fra Holloway 1996). Anslaget er basert på et relativt tynt og lite komplett datasett. Lagringseffektiviteten er 2% for lukkede akviferer og 6% for åpne akviferer. Der det er uklart om en akvifer er åpen eller lukket, er det benyttet en lagringseffektivitet på 4%.



Ved injisering av CO<sub>2</sub> i en vannfylt bergart vil karbondioksyden fylle porerommene på tilnærmet samme måte som olje eller naturgass gjør i et olje- eller gassfelt. Etter en tid vil en del av karbondioksyden bli oppløst i det gjenværende porevannet, og en vil få kjemiske reaksjoner mellom porevannet og mineralene i bergartene. Over tid vil dette føre til utfelling av mineraler, f.eks. kalsitt. En vil derved få mindre mobilt CO<sub>2</sub> i porerommene. En sekundær effekt vil være at de utfelte mineralene tetter porerommene og reduserer permeabiliteten.

Hovedformålet med denne rapporten er å undersøke potensialet for deponering av CO<sub>2</sub> i undergrunnen på land, i fjordene eller i de nære områdene utenfor kysten. I disse områdene har vi ingen påviste olje- eller gassfelter, og deponering vil derfor måtte skje i vannfylte akviferer. Vi vil først diskutere en del geologiske forutsetninger som må være oppfylt for at slik deponering skal kunne finne sted.

## 5. GEOLOGISKE FORUTSETNINGER FOR LAGRING AV CO<sub>2</sub> I AKVIFERER

For at det skal være aktuelt å lagre CO<sub>2</sub> i vannfylte akviferer i undergrunnen må en del geologiske forutsetninger være oppfylt. De viktigste er at:

- Bergartene eller sedimentene har tilstrekkelig porøsitet og permeabilitet til at de egner seg for lagring.
- Formasjonene befinner seg på stort nok dyp (mer enn ca. 800 m under havoverflaten) slik at CO<sub>2</sub> kan lagres i superkritisk fase.
- Formasjonene representerer vannmettede akviferer med stort nok volum (utbredelse og mektighet).
- En har tette takbergarter eller takbergarter med svært lav permeabilitet for å hindre at gassen stiger oppover mot overflaten.
- Deponiområdet er tektonisk stabilt, med minimal jordskjelvfrekvens og uten neotektonisk aktivitet.

I motsetning til i olje- og gassfelt, der reservoartrykket ofte er senket som et resultat av hydrokarbonproduksjon, har en i akviferer alltid hydrostatisk trykk eller mer. Trykkforholdene i en akvifer vil være avgjørende med tanke på hvor mye CO<sub>2</sub> som kan lagres i den. Når CO<sub>2</sub> injiseres i en akvifer der porerommene er fylt med vann, vil en få en trykkoppbygging rundt injeksjonsbrønnen. Hvor høyt trykket blir, og hvor lang tid det går før trykket igjen jevner seg ut, vil være avhengig av injeksjonshastigheten, permeabiliteten og volumet av akviferen, og permeabiliteten langs ytterkantene av akviferen. For at akviferen skal kunne ta unna de store mengdene CO<sub>2</sub> som vil måtte pumpes inn, er det viktig at en har tilstrekkelig høy permeabilitet rundt injeksjonsbrønnen. Etersom trykket avtar radialt fra injeksjonsbrønnen, er det ikke nødvendig med fullt så høy permeabilitet i større avstand fra injeksjonsbrønnen.

En kan forestille seg to forskjellige typer akviferer:

*Åpne akviferer*, der det er åpen kommunikasjon mellom grunnvannet i akviferen og grunnvannet i overliggende akviferer, overflaten eller havbunnen. Når CO<sub>2</sub> injiseres inn i et åpent system vil det bygge seg opp et øket trykk rundt brønnen. Trykkøkningen vil være størst i akviferer med lav permeabilitet. Trykket rundt injeksjonsbrønnen vil jevne seg ut med tiden, og kan teoretisk sett bli som før injiseringen startet. I et åpent system vil injisert karbondioksyd fortrenge grunnvannet, som vil migrere mot overliggende akviferer, overflaten eller havbunnen. I forbindelse med CO<sub>2</sub>-deponering i kystnære områder vil fortrent grunnvann eller formasjonsvann fra en akvifer i de fleste tilfeller være saltvann. Uttrenging av salt formasjonsvann på havbunnen vil sannsynligvis føre til små eller ingen miljømessige konsekvenser.

*Lukkede akviferer*, som er fullstendig lukket og uten kommunikasjon med andre akviferer, overflaten eller havbunnen. Et lukket system er per definisjon en felle, og plassen som vil være tilgjengelig for CO<sub>2</sub>-injeksjon må skapes ved kompresjon av matriksen i akviferen og det tilstedeværende grunnvannet. Det er anslått at i lukkede akviferer i Nordsjøen vil et injisert CO<sub>2</sub>-volum på 2% i forhold til volumet av akviferen føre til en trykkøkning på ca. 10 MPa. I en lukket akvifer med normalt hydrostatisk trykk kan en trykkøkning på 10 MPa sannsynligvis være forsvarlig. Hvis der er overtrykk i en akvifer vil den mengde CO<sub>2</sub> som kan lagres begrenses, idet lagerkapasiteten kontrolleres av takbergartenes sprekkeinitieringstrykk minus akvifertrykket. Overtrykk i en bergart viser imidlertid at en har forsegling. I lukkede akviferer med stort overtrykk vil injeksjon av CO<sub>2</sub> være risikabelt, da trykkøkningen rundt injeksjonsbrønnen vil kunne føre til oppsprekking av akviferen og takbergartene og resultere i lekkasje.

I praksis vil de fleste akviferer representere en mellomting mellom disse to endeledene, da det gjennom intrikate systemer av delvis lukkede permeabilitetsbarrierer vil være forbindelser mellom akviferene og havbunnen/overflaten. CO<sub>2</sub> fortrenger formasjonsvann på en ineffektiv måte, og vil fortrinnsvis migrere langs soner med relativt høy permeabilitet. Dette fører til at store områder i akviferen vil være utilgjengelige for injisert karbondioksyd. Ved reservoarsimulering har en funnet ut at kun 2% (i gjennomsnitt) av lagringskapasiteten i en geologisk felle i en akvifer vil kunne utnyttes (van der Meer 1994, Holt et al. 1994). For å illustrere med tall kan en ta et typisk kullkraftverk på 500 MW, som slipper ut ca. 4 millioner tonn CO<sub>2</sub> per år. Over en gjennomsnittlig levetid på 30 år tilsvarer dette CO<sub>2</sub>-utslipp på 120 millioner tonn. Til lagring av dette trengs det et effektivt porevolum på 0.18 km<sup>3</sup>. Hvis en går ut fra lagring i en akvifer med 30% porøsitet og en lagringseffektivitet på 2%, tilsvarer dette et bergartsvolum på 30 km<sup>3</sup>, eller et 100 m tykt reservoar med en diameter på 19.5 km (Holloway et al. 1996).

Det er viktig at akviferene har en så liten helning som mulig i forhold til horisontalplanet. Karbondioksyd har en større oppdrift og er mer tyntflytende enn formasjonsvann, og vil derfor

ha en tendens til å migrere oppover. Dette er spesielt viktig i områdene rundt norskekysten, der de mest aktuelle sedimentære bergartene for CO<sub>2</sub>-deponering ligger med en generell helning ut fra land, noe som skyldes landhevning i seintertiær- og kvartærtid. Injisert karbondioksyd vil derfor migrere oppover mot en takbergart og deretter innover mot land der den, hvis ikke akviferen er lukket, vil lekke ut på havbunnen. Lagningen kan også være skråstilt eller foldet som en følge av jordskorpebevegelser (tektonikk) i tidligere tider. I tilfeller med store, sub-horisontale reservoarer vil imidlertid injisert karbondioksyd migrere lateralt i et lavere tempo, og en kan tenke seg at gassen vil bli oppløst i formasjonsvannet før den kommer til et punkt der den kan lekke ut av akviferen.

## **6. GEOLOGISKE FORHOLD LANGS NORSKEKYSTEN**

### **6.1 Geologien på land**

Landområdene langs kysten av Norge er kjennetegnet av bergarter av variabel opprinnelse, og med forskjellig sammensetning og struktur (Vedlegg 1). Felles for de fleste bergartene er at de er gamle og kompakte og har en porøsitet tilnærmet lik null, når en ser bort fra porøsitet i forbindelse med oppsprekking av bergartene. De eldste bergartene i Norge er av prekambrisk alder (mer enn 545 mill. år gamle, Vedlegg 1).

Langs kysten av Sør-Norge og i store deler av Nord-Norge dominerer omdannede (metamorfe) bergarter slike som gneiss og amfibolitt, som er blitt til ved omdanning av størkningsbergarter (magmatiske bergarter) og avsetningsbergarter (sedimentære bergarter). Trykk og temperatur har påvirket bergartene slik at de har forandret utseende, nye mineraler har vokst fram, og porøsiteten og permeabiliteten har blitt redusert til nær null.

Størkningsbergarter er dannet av bergartssmelter, enten størknet på dypet (dypbergart) eller nær overflaten som ganger og kiler. Bergarter som er blitt til av størknet lava på overflaten kalles gjerne dagbergarter eller vulkanske bergarter. Størkningsbergarter av forskjellig alder finner en mange forskjellige steder langs kysten. Det yngste området med størkningsbergarter (permisk alder, ca. 290-250 mill. år) strekker seg fra Oslo og sørover til Langesund og Moss (Vedlegg 1). Langs kysten finner en ellers store områder med størkningsbergarter på Vestlandet, på Hitra og Smøla, og i de tre nordligste fylkene med unntak av i Lofoten og på Varangerhalvøya. Størkningsbergartene er generelt dannet i tidsperioden kambrium-silur (ca. 420-545 mill. år gamle).

I Norge finnes avsetningsbergarter på land langs kysten flere steder. Felles for disse er at de, med ett unntak (Andøya), er svært gamle og kompakte. På Varangerhalvøya har en bevart et stort område med prekambriske sedimentære bergarter (Vedlegg 1). I de tre nordligste fylkene og på Vestlandet finnes mange andre områder med sedimentære bergarter, men disse er oftest

delvis omdannet, da de har vært utsatt for høyt trykk og temperatur under fjellkjedefoldinger. Også sandsteinene og konglomeratene avsatt i devontiden (for 355-420 mill. år siden) på Vestlandet og i Trøndelag/Møre og Romsdal har svært liten porøsitet. I området fra Langesund/Moss til Oslo ligger det avsetningsbergarter fra de samme tidsperiodene (kambrium-silur) som på Vestlandet og i Nord-Norge. Disse er mindre omdannet, men har svært lav porøsitet.

Det eneste stedet i Norge der en har relativt "unge" bergarter bevart på land er på østkysten av Andøya (Dalland 1979, Vedlegg 1). Bergartene her ble avsatt i midt-jura, senjura og i tidlig kritt (for ca. 170-120 mill. år siden), og er altså omtrent like gamle som bergartene en finner olje og gass i under havbunnen utenfor kysten. Bergartene består av leirstein, siltstein og sandstein med enkelte lag av kull og kalkstein (se under).

## **6.2 Geologien i fjord- og havområdene utenfor kysten**

I fjordene og havområdene nær kysten er geologien gjennomgående svært lik den en har langs kysten på land. Det finnes imidlertid noen unntak. Områder (bassenger) med sedimentære bergarter tilnærmet like gamle (jura og kritt) som de en finner på Andøya og i havområdene lenger ute er kartlagt blant annet i Andfjorden, Vestfjorden, Frohavet, Beitstadfjorden og Edøyfjorden (Fig. 2, Vedlegg 1). Bergartene i disse bassengene består av leirstein, siltstein, sandstein og konglomerat med enkelte lag av kull og kalkstein. I mange av bassengene er bergartene bevart ved at de har sunket ned langs forkastninger og dermed har unngått erosjon under de siste istidene. Det er sannsynlig at sandsteinene i enkelte tilfeller har relativt høy porøsitet, muligens like høy som i sandsteinsreservoarene for olje og gass utenfor kysten.

De sedimentære bergartene i disse avgrensede bassengene langs kysten er rester av et mer kontinuerlig sedimentdekke som opprinnelig dekket store deler av de gamle bergartene i kystsonen. Ut fra kysten er de sedimentære bergartene bevart i et mer kontinuerlig dekke. Innergrensen går i svinger og buer, og påtreffes i en avstand varierende fra bare noen få kilometer til opp til ca. 50 km utenfor de ytterste skjær. Det er vanligvis slik at de eldste bergartene ligger lengst inn mot land, mens en må gradvis lenger ut for å finne yngre bergarter. Dette skyldes hovedsaklig at bergartene ligger med en helning utover fra land, og at eroderende isbreer i løpet av kvartærtiden har fjernet de yngste bergartene i områdene nær land.

I en sone mellom de prekambriske/kambosiluriske bergartene og sedimentene avsatt i jura, kritt og tertiær har en mange steder bergarter av karbonisk, permisk og triasisk alder. Dette gjelder først og fremst langs Finnmarkskysten, fra Laksefjorden i øst til Lyngenfjorden i vest, og utenfor Nordland og Rogaland (Vedlegg 1).



## 7. BERGARTER OG FORMASJONER EGNET FOR CO<sub>2</sub>-DEPONERING

Noen innledende betraktninger setter begrensninger for hvilke bergarter og sedimenter som er relevante for CO<sub>2</sub>-deponering:

a) En av de viktigste parametre i vurderingen av hvilke bergarter som egner seg for lagring av karbondioksyd er porøsitet. I gamle og/eller omdannede bergarter har trykk og temperatur påvirket bergarten slik at nye mineraler har vokst fram og mer eller mindre fylt de opprinnelige porerommene mellom mineralkornene. Det antas at langs norskekysten har sedimentære bergarter som er eldre enn jura (ca. 205 mill. år gamle) generelt for lavt poreromsvolum (poreromsporøsitet) til å være aktuelle for lagring av karbondioksyd.

b) Porøsitet i en bergart er ikke bare avhengig av volumet av porerommene mellom mineralkornene, men også av volumet av åpne sprekker i bergarten. Mange områder i Norge har opp gjennom den geologiske historien vært utsatt for kraftig tektonisk påvirkning, noe som har ført til knusing og oppsprekking av fjellet (Gabrielsen & Ramberg 1979, Aanstad et al. 1981). Det samlede volumet av åpne sprekker i en bergart (sprekkeporøsiteten) kan bli så høyt at lagring av CO<sub>2</sub> teoretisk sett kan være mulig, også i bergarter eldre enn de juraiske. Sprekkeporøsiteten avtar imidlertid med økende dyp i jordskorpen. Ved et dyp på rundt 800 m, som omtrentlig tilsvarer det minimumsdyp CO<sub>2</sub> må lagres på utifra termodynamiske betraktninger, er sprekkeporøsiteten lav. En annen ulempe ved lagring i kraftig oppsprukkede bergarter, hvis det ikke finnes tette takbergarter over, vil være store gasslekkasjer oppover mot overflaten. Dette eliminerer effektivt lagring på land i bergarter eldre enn de fra juratiden.

c) Dess mer grovkornet og godt sortert et sediment er, desto større er permeabiliteten og desto mer velegnet er det i utgangspunktet for lagring av CO<sub>2</sub>. Sandstein vil ofte være den ideelle reservoarbergart for lagring av karbondioksyd, men faktorer som for eksempel mineralsammensetning spiller også inn. I rene kvartssandsteiner vil en kunne forvente god permeabilitet og små kjemiske forandringer ved injeksjon av karbondioksyd. I enkelte sandsteiner vil imidlertid mineralogien være slik at karbondioksyd reagerer kjemisk med bergarten og porerommene tettes, med en reduksjon av permeabiliteten som følge. I en kalkstein vil en kunne få oppløsning av mineraler rundt injeksjonsbrønnen, og utfelling av nye mineraler lenger borte.

d) På grunn av de termodynamiske begrensningene er deponering av CO<sub>2</sub> i kvartære avsetninger (grus, sand, silt og leire) uaktuelt. Det finnes ikke kystnære, kvartære avsetninger på norsk sokkel som ligger dypt nok (utenom i fjordene), har stort nok volum, og har riktig sammensetning til å tilfredsstillere kravene. Kun i sentrale deler av Nordsjøen, ved utløpet av Norskerenna lengst nord i Nordsjøen, på sokkelen utenfor midt-Norge, og ved utløpet av

Barentshavet i Norskehavet sør for Bjørnøya (Vorren et al. 1998), finnes det kvartære avsetninger som teoretisk kan være aktuelle for CO<sub>2</sub>-deponering.

## 7.1 Deponering i bergartsformasjoner på land

Bergartene på land er gjennomgående uegnet for lagring av CO<sub>2</sub>. Et mulig unntak er de permiske lavaene langs kysten mellom Langesund og Oslo, hvor porøsiteten muligens er såpass høy at hvis porøsitet var eneste kriterium ville disse kunne være aktuelle for deponering av CO<sub>2</sub>. Lavaene har imidlertid lav permeabilitet, slik at porerommene er relativt utilgjengelige. Lavaene i Oslofeltet ligger dessuten grunt og er derfor lite aktuelle for lagring av karbondioksyd. Oslofeltet er tett befolket, slik at en også må ta hensyn til forurensingsproblematikken i forhold til grunnvannsforsyning. Også Lindeberg (i Holloway (1996)) konkluderte med at bergartene på land i Norge er uegnet for CO<sub>2</sub>-deponering.

## 7.2 Deponering i sedimentære bergartsformasjoner innaskjærs og i kystsonen

Når det gjelder deponering av CO<sub>2</sub> innaskjærs og i kystsonen, peker de juraiske og kretaiske sedimentbassengene (Fig. 2) seg ut som de mest aktuelle. I de fleste av disse er de sedimentære lagpakke imidlertid ikke særlig tykke. I **Edøyfjorden**, sør for Smøla, er dybden fra havoverflaten til bunnen av bassenget med sedimentære bergarter i underkant av 800 m (Bøe & Bjerkli 1989). Området er derfor sannsynligvis uinteressant for CO<sub>2</sub>-deponering.

I **Beitstadfjorden**, innerst i Trondheimsfjorden, ligger lagdelte, sedimentære bergarter bevart under havbunnen i et område på ca. 5x15 km (Fig. 3). Fragmenter av kull, siderittisk jernstein og kalkholdig sandstein skrapet opp av isen og avsatt på land under siste istid viser at sedimentene er midt-juraiske (og sannsynligvis kan korreleres med sedimentene i Fangstgruppen på Haltenbanken) og muligens underjuraiske (Manum 1964, Vigran 1970, Oftedahl 1972, Bøe & Bjerkli 1989). Nye seismiske data innsamlet av Oljedirektoratet viser at at en har bevart en lagpakke som på det mektigste, langs nordvestsiden av fjorden der vanddypet er rundt 200 m, er rundt 1000 m tykk (Fig. 4). Hvis det i bunnen av denne lagpakken finnes sandsteinslag av en viss mektighet og med riktige egenskaper, kan dette være et potensielt område for deponering av CO<sub>2</sub>. Det presiseres imidlertid at bergartene kun i et begrenset område ligger mer enn 800 meter under havoverflaten, og at de har en bratt helning som gjør at gassen vil bevege seg oppover mot overflaten og ekspandere relativt raskt. En vet ikke om det finnes lukkede formasjoner som vil kunne egne seg til deponering. En god del småforkastninger vil kunne føre til gasslekkasjer, hvis disse ikke er tette. Alt i alt er Beitstadfjorden et usikkert, men potensielt område for CO<sub>2</sub>-deponering.

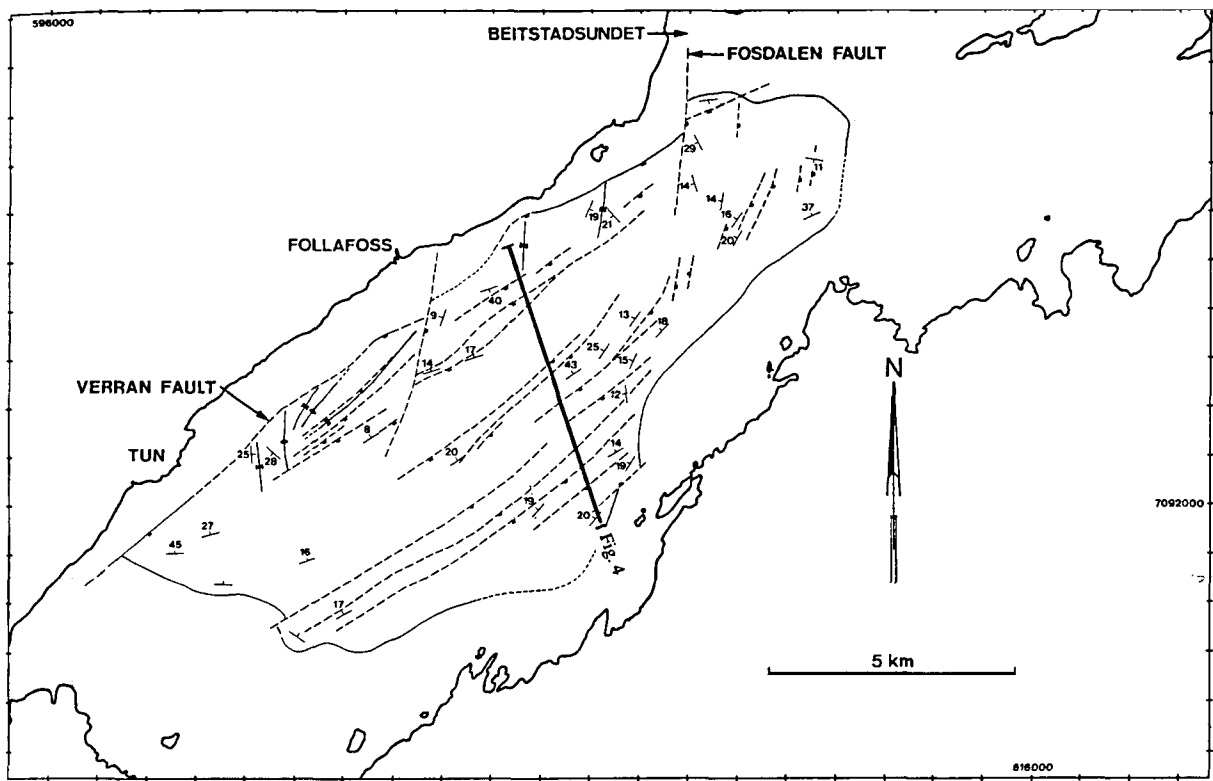


Fig. 3. Geologisk kart over Beitstadsfjorden (modifisert fra Bøe & Bjerkli (1989)).

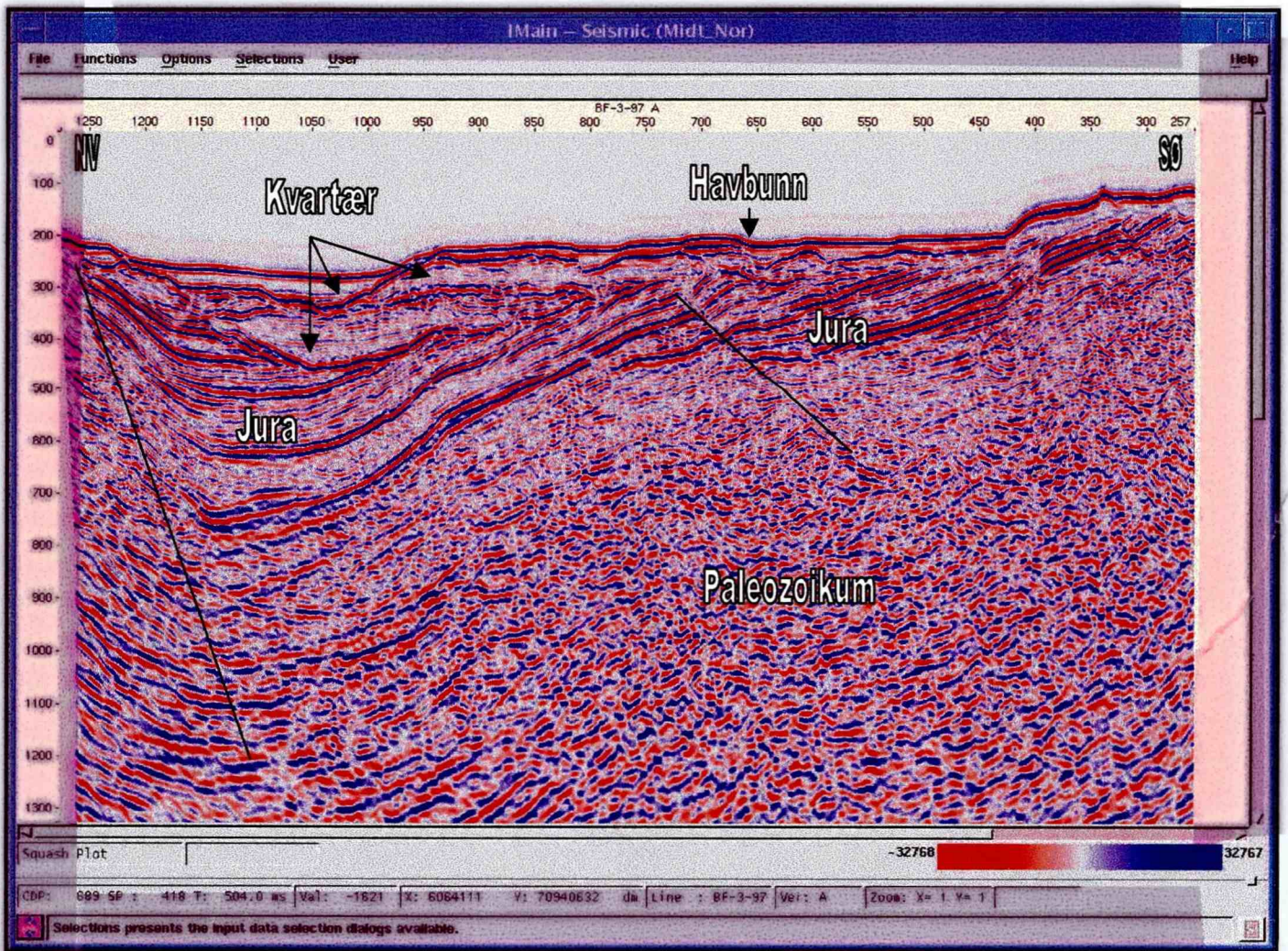


Fig. 4. Seismisk snitt over Beitstadfjorden. Se Fig. 3 for lokalisering av linjen.



I **Frohavet**, utenfor Fosen på Trøndelagskysten, har en et område med sedimentære bergarter (ca. 15x60 km) som på mange måter ligner Beitstadjorden (Bøe 1991, Bøe et al. 1992b, 1992c, Fig. 5). Som i Beitstadjorden er alderen på bergartene bestemt fra fossiler i blokker skrapet opp av isen og avsatt på øyene utenfor under siste istid. Disse består blant annet av kalkholdig sandstein, konglomerat og breksje, og er datert til å være midt-juraiske (Nordhagen 1921, Oftedahl 1975). Nye seismiske data fra Oljedirektoratet viser at lagpakken er i overkant av 1000 m tykk på det mektigste (Fig. 6). Forskjellen fra Beitstadjorden er at de sedimentære bergartene i Frohavet dekker et atskillig større område, og området med sedimentære bergarter som ligger mer enn 800 m under havoverflaten er større. Ellers har en de samme usikkerhetene knyttet til avsetningene i Frohavet som i Beitstadjorden. Det er ukjent om her finnes lag av sandstein med riktige egenskaper, utbredelse og tykkelse som kan egne seg til CO<sub>2</sub>-deponering. Lagene har en helning som gjør at gassen vil migrere mot havbunnen, og det er ukjent om der finnes lukkede sandsteinsakviferer som kan egne seg til deponering og forhindre gasslekkasjer. Også graden av oppsprekking i bergartene er ukjent.

I **Andfjorden** og **Vestfjorden**, henholdsvis nord og sør for Lofoten, finnes sedimentære bergarter som kan være aktuelle for CO<sub>2</sub>-deponering. Disse opptrer i store mektigheter, med en relativt tynn (noen hundre meter) juraisk lagpakke underst, overleiret av tykke, kretaiske avsetninger (Gustavson & Blystad 1995, Henningsen & Tveten 1998, Zwaan et al. 1998). I ytre Andfjorden når mektigheten ca. 5 km, mens lagpakken i Vestfjorden er enda tykkere (Vedlegg 1). Det er sannsynlig at bergartene i disse områdene, spesielt de midt-juraiske, har sandsteinslag med gode egenskaper for CO<sub>2</sub>-deponering. På vestsiden av Andfjorden ligger de sedimentære bergartene inn på land på Andøya, og når en tykkelse på i overkant av 800 m (den kretaiske lagpakken alene er over 600 m) i små forkastningsavgrensede områder. Med hensyn til dyp under overflaten er dette i underkant av hva som er akseptabelt for CO<sub>2</sub>-deponering på land.

Detaljerte undersøkelser er utført av sedimentene på Andøya (Dalland 1979). De består av sandsteiner, siltsteiner og leirskifre som i utgangspunktet, hvis de samme bergartene også finnes under Andfjorden, burde kunne være aktuelle for CO<sub>2</sub>-deponering. De mest aktuelle bergartene for deponering vil være de midt-juraiske sandsteinene (Ramsåformasjonen) som finnes i den underste delen av lagpakken. Disse sandsteinene har en porøsitet på opptil 30%. Utbredelsen og tykkelsen av sandsteinslagene, oppsprekkingsmønsteret i området, samt hvor godt forseglet sandsteinene er av tette leirskifre og forkastninger vil være avgjørende for hvor egnet de er for CO<sub>2</sub>-deponering.

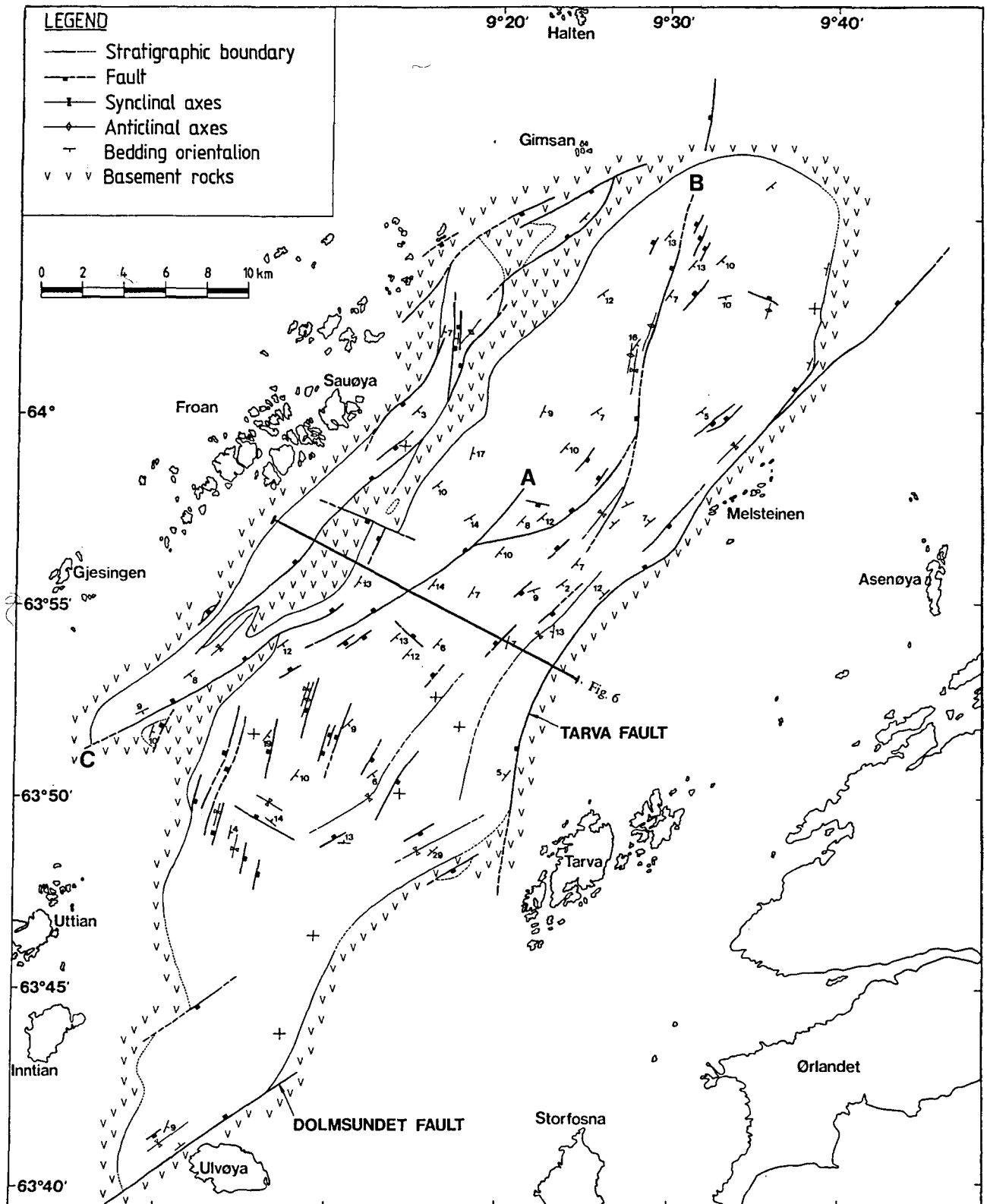


Fig. 5. Geologisk kart over Frohavet (modifisert fra Bøe (1991)).

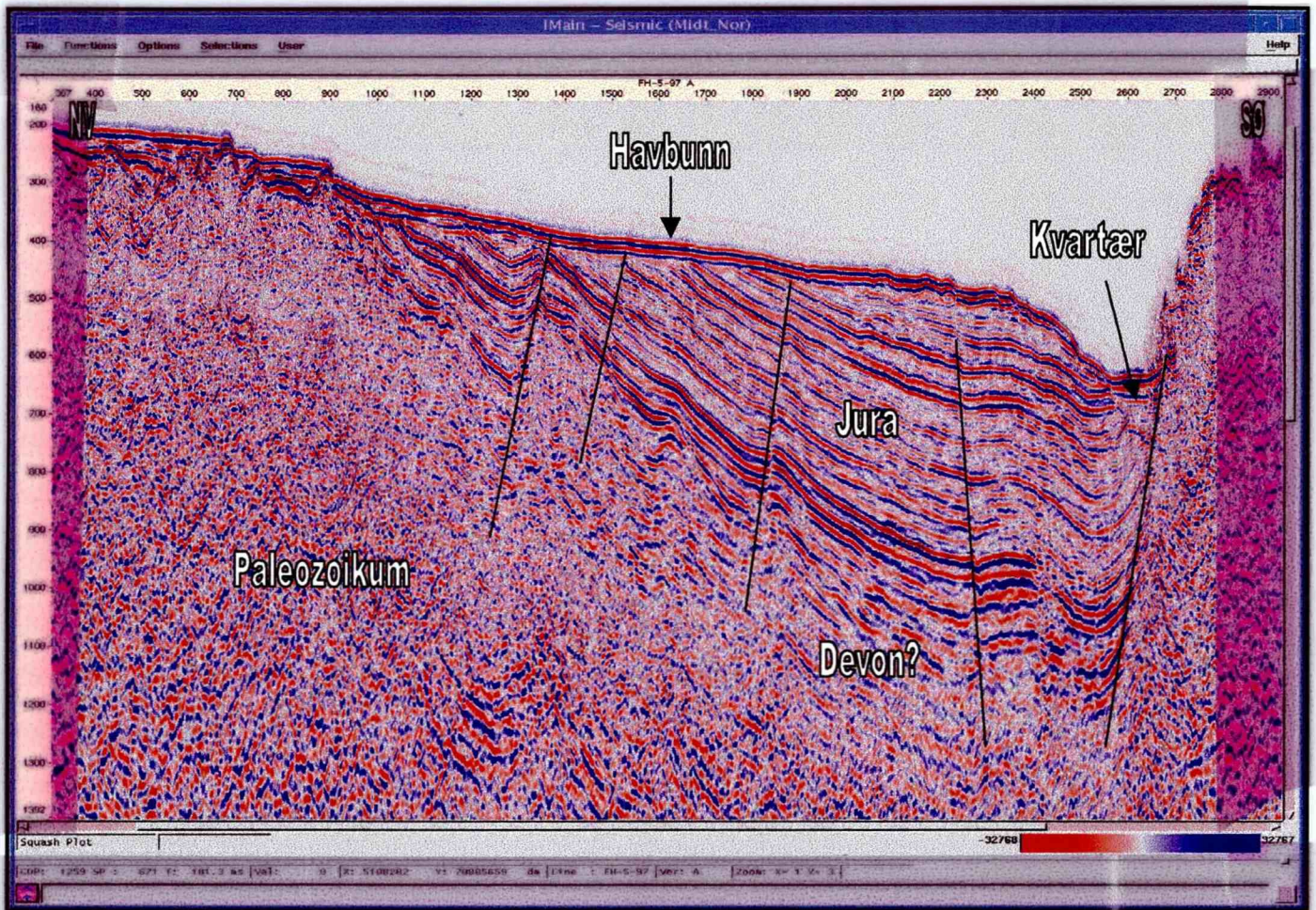


Fig. 6. Seismisk snitt over Frohavet. Se Fig. 5 for lokalisering av linjen.

Både i Vestfjorden og Andfjorden er mesteparten av den kretaiske lagpakken dominert av leirstein og siltstein, men det er ikke umulig at der også finnes betydelige sandsteinslag. På Andøya er det kartlagt sandsteiner i den underste delen av den kretaiske lagpakken. Eventuelle sandsteinslag i den kretaiske lagpakken i Andfjorden og Vestfjorden kan kun dokumenteres ved boring. Langs yttergrensene av Vestfjordbassenget, ut mot Lofoten og inn mot land, har de sedimentære bergartene en bratt helning oppover mot overflaten, og bassenget er delvis avgrenset av store forkastningssystemer. For å kunne benytte sandsteiner i de kretaiske lagpakkene til CO<sub>2</sub>-deponering, er en avhengig av at de er innesluttet i relativt tette skifre eller lukket mot tette forkastningsplan for å unngå at karbondioksyd beveger seg videre oppover mot overflaten.

I **Karmsundet**, sør og øst for Karmøy, er det kartlagt et område med lagdelte sedimentære bergarter (Bøe et al. 1992a). Nye dateringer av kullfragmenter funnet under arkeologiske utgravinger i området indikerer en juraisk/triasisk alder (C. Magnus og R. Williams, pers. medd. 1998) på disse sedimentene, men en permisk til karbonsk alder kan ikke utelukkes. Tykkelsen av lagpakken når imidlertid bare ca. 600 m, og selv om vanddypet er i størrelsesorden 300 m, betrakter vi disse bergartene som uaktuelle for CO<sub>2</sub>-deponering. Lagpakken har også en bratt helning opp mot vest, slik at gass etter all sannsynlighet vil bevege seg hurtig opp mot overflaten.

### **7.3 Deponering i sedimentære bergartsformasjoner under havområdene utenfor kysten**

Deponering av CO<sub>2</sub> er teoretisk sett mulig i mange sedimentære bergartsformasjoner utenfor kysten, både juraiske, kretaiske og tertiære. Dette er laterale ekvivalenter til bergartene en finner olje- og gassreservoarer i, og de kan i enkelte tilfeller følges nesten inn til land. Informasjonen en har innhentet i forbindelse med leting etter, og utvinning av olje og gass (seismiske data og informasjon fra boringer) er svært relevant for kystnær deponering av CO<sub>2</sub>. Dette gjelder informasjon om dyp til, tykkelse og utbredelse av sedimentære formasjoner, såvel som informasjon om litologi, porøsitet, permeabilitet, trykk, temperatur og oppsprekking.

#### 7.3.1 Deponering i avsetninger fra tertiær-tiden

En av de viktigste bergartsformasjonene for deponering av CO<sub>2</sub> ser ut til å kunne bli Utsiraformasjonen, som ble avsatt i midt-Miocen til sen-Miocen tid (ca. 16-5 mill. år siden) i Nordsjøen. På Sleipnerfeltet har Statoil allerede startet med injeksjon av CO<sub>2</sub> i denne formasjonen (Christensen 1998, Torp & Christensen 1998). Utsiraformasjonen har stor utbredelse og en tykkelse som gjør at en i denne formasjonen alene kan deponere CO<sub>2</sub>-



utslippene fra alle nord-Europas kraftverk og store industribedrifter i mange hundre år (Torp & Christensen 1998). Utsiraformasjonen er også en kilde for vann til injeksjon i oljefeltene for å oppnå større utvinningsgrad. Eventuell injeksjon i Utsiraformasjonen må ta hensyn til dette.

Utsiraformasjonen består av sandsteiner og leirsteiner, opprinnelig avsatt som sedimenter i havet (Isaksen & Tonstad 1989), som er overleiret av tette leirsteiner. Sandsteinene er oftest finkornede, og opptrer i lag adskilt av plastiske leirsteinslag. Tykkelsen av Utsiraformasjonen er mer enn 400 m i de sentrale delene av nordlige Nordsjøen, og den er kartlagt fra ca. 58°N (i sør) til området vest for Måløy i nord (Gregersen et al. 1998). Formasjonen blir tynnere i østlig retning og kiler ut mellom Osebergfeltet og Trollfeltet. Dette tyder på at sedimentene hovedsaklig har kommet fra vest. Fig. 7 viser utbredelsen av Utsiraformasjonen. På det nærmeste ligger formasjonen 60-70 km utenfor kysten. I dette området har de tertiære bergartene en generell helning opp mot øst slik at eventuell deponert gass vil bevege seg oppover og østover.

I tertiæravsetningene i Nordsjøen finnes mange andre sandsteinsformasjoner som kan være aktuelle for CO<sub>2</sub>-deponering. Skade- og Vadeformasjonene (avsatt i oligocen tid) og Frigg- og Gridformasjonene (hovedsaklig avsatt i eocen tid) ligger imidlertid så langt vest (mer enn ca. 100 km fra kysten) at de er uaktuelle for kystnær CO<sub>2</sub>-deponering. Det samme er tilfelle for sandsteinsformasjonene avsatt i paleocen tid (Forties-, Fiskebank-, Hermod-, Andrew-, Heimdal-, Maureen- og Tyformasjonene samt Meileddet). Paleocene og eocene sedimenter nord for Trollfeltet er mulige kandidater for CO<sub>2</sub>-injeksjon. Det er også mulig at det finnes tertiære sandsteiner med lokal utbredelse nærmere kysten.

I den øverste delen av den tertiære lagpakken utenfor midt-Norge er det påvist sandlag og lag med grove sedimenter i Kaiformasjonen (miocen-pliocen) og Naustformasjonen (pliocen-pleistocen). En må 50-60 km utenfor kysten for å påtreffe disse avsetningene, og de er derfor uaktuelle for kystnær CO<sub>2</sub>-deponering. I de østlige deler av Bryggeformasjonen (eocen-miocen) er det referert til sandstein som fingerer inn i mer finkornede sedimenter mot vest (Dalland et al. 1988). Disse avsetningene kan sannsynligvis korreleres med den uformelle Frøyryggformasjonen (trolig feilreferert som Røyrvikformasjonen av Dalland et al. (1988)) og som Askvik og Rokoengen (1985) antok var avsatt i oligocen. Det nærmeste disse avsetningen kommer land er ca. 30 km, utenfor Møre. De eldste tertiære sedimentene utenfor midt-Norge tilhører Tang- og Tareformasjonene, som er avsatt i paleocen tid. Disse er dominert av leirstein, men det er ikke umulig at en nærmest kysten kommer inn i mer sandrike lag. Eventuelle sandsteinslag i Tang- og Tareformasjonene såvel som i Bryggeformasjonen betraktes som uaktuelle for CO<sub>2</sub>-deponering, da de kun opptrer i de østlige deler av formasjonene, der lagene har en markert helning opp mot øst. Gass lagret i disse områdene vil raskt bevege seg opp mot overflaten.



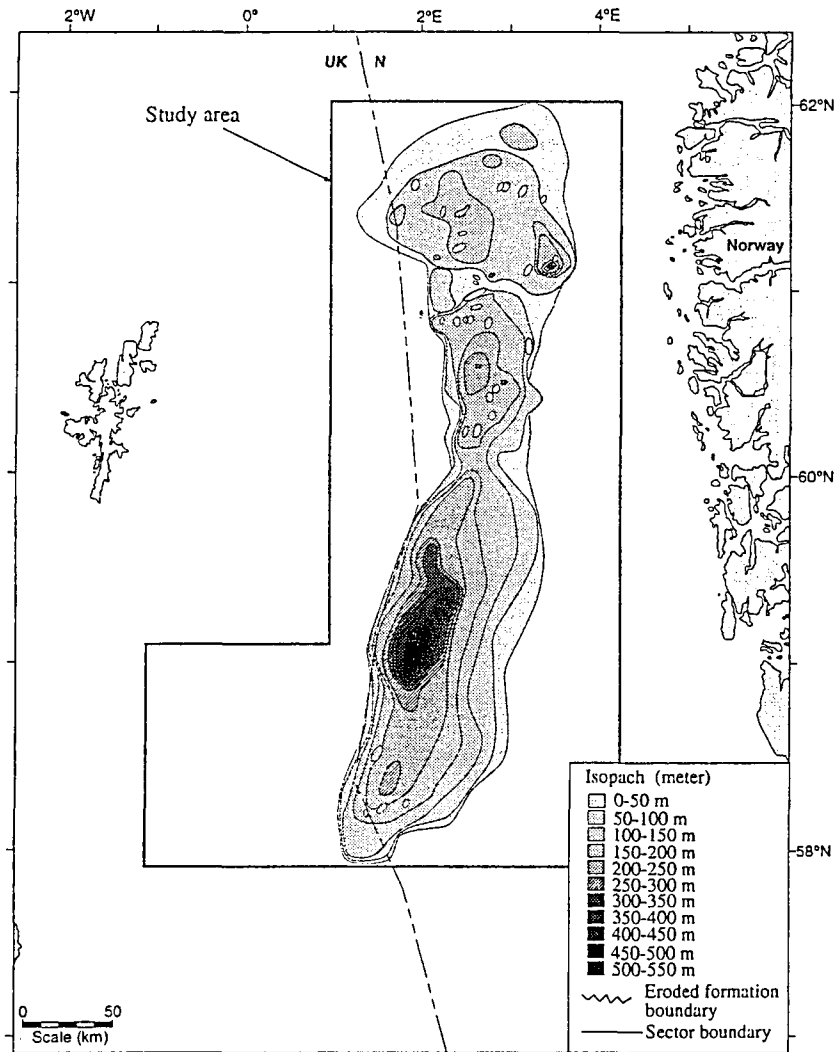


Fig. 7. Kart over Utsiraformasjonen. Figuren er hentet fra Gregersen et al. (1998).

Utenfor Nord-Norge er det ikke beskrevet kystnære tertiære avsetninger som ser ut til å kunne egne seg for CO<sub>2</sub>-deponering. Unntaket er muligens området nord for Vesterålen/vest for Troms, der tertiære og pliocene/kvartære avsetninger ligger bare 5-10 km utenfor kysten (Vedlegg 1, Zwaan et al. 1998). Sammensetningen av sedimentene i dette området er ukjent. For å kunne vurdere potensialet for CO<sub>2</sub>-deponering må det bores gjennom avsetningene for å finne ut hvilke sedimenttyper som er til stede.

Som en oppsummering må en kunne si at de tertiære avsetningene rundt norskekysten, muligens med unntak av avsetningene nord for Troll og utenfor Troms og Vesterålen, sannsynligvis ikke er velegnet til "kystnær" CO<sub>2</sub>-deponering.

### 7.3.2 Deponering i avsetninger fra kritt-tiden

De kretaiske bergartene i Nordsjøen består hovedsaklig av kalksteiner (øvre kritt) og kalkholdige leirskifre (undre kritt), men forskjellige andre sedimentære bergarter opptrer lokalt. De kretaiske bergartene er avsatt som sedimenter i havet.

Sandstein spiller en underordnet rolle i den kretaiske lagpakken, men er kartlagt i mindre områder spredt over store deler av den norske Nordsjøen. Dette gjelder først og fremst Ransandsteinsenhetene og Agatformasjonen (Isaksen og Tonstad 1989), som begge er avsatt i tidlig kritt-tid (Agatformasjonen strekker seg så vidt inn i sen-kritt). Ransandsteinsenhetene, som ikke er rapportert nærmere land enn 60-70 km, er beskrevet som leir-, kalk- og glaukonittholdige, og er tolket som dårlige reservoarbergarter. Det er også mulig at beskrivelsen av disse enhetene som sandsteiner er gal. Enhetene er derfor sannsynligvis uegnet til CO<sub>2</sub>-deponering.

Agatformasjonen, som er kartlagt på Agatfeltet ca. 45 km vest for Stadt, antas å være avsatt i et belte langs vestlandskysten og videre nord for Stadt. Sandsteinene har begrenset utbredelse vinkelrett på kysten. Ut fra kysten går de over i leirstein. Inn mot kysten stopper de gjerne mot større forkastninger eller ved den kvartære erosjonsflaten. Agatformasjonen og bergarter av samme alder ligger bevart nærmest land i området fra Bergen og nordover, og kan muligens være aktuelle for CO<sub>2</sub>-deponering. Grundige studier må imidlertid til før en vet hvor sandstein er avsatt, om CO<sub>2</sub>-deponering uten lekkasjer kan foretas, og om den ellers er egnet for CO<sub>2</sub>-deponering.

For å påtreffe overkretaiske sedimenter i Nordsjøen (Ekofisk-, Tor-, Hod- og Hidraformasjonene) må en 30-45 km ut fra kysten. Disse formasjonene består hovedsaklig av kalkstein (kritt) med lav matrikspermeabilitet, men det opptrer også leirsteiner og kalkholdige leirsteiner. Den høye sprekkpermeabiliteten gjør at krittformasjonene kan være egnet for gassinjeksjon, noe som er testet på oljefeltene. Relativt nær kysten opptrer en brachiopodekalk

med høy porøsitet. Permeabiliteten i denne formasjonen er ukjent, og det samme gjelder forsegling av formasjonen for å hindre gasslekkasje. Formasjonen kan være interessant for CO<sub>2</sub>-injeksjon.

De kretaiske sedimentene utenfor midt-Norge er dominert av leirstein og mergelstein med tynne lag av kalkstein og sandstein. Lysingformasjonen, som er ca. 90 mill. år gammel, er dominert av sandstein, men denne opptrer hovedsaklig på Haltenbanken og er ikke kartlagt langs kysten. Sedimenter fra kritt-tiden ligger næmest land utenfor kysten av Møre (ca. 15 km fra land), i Vestfjorden (se over), og utenfor Lofoten og Vesterålen, der de er kartlagt nesten inn i fjæresteinene (Vedlegg 1, Henningsen & Tveten 1998, Zwaan et al. 1998). For å finne sedimenter av kretaisk alder utenfor Finnmark må en minst 30 km utom kysten i vest (Grogan & Zwaan 1997), og minst dobbelt så langt ut i øst. Sedimenttypene er omtrent de samme som man finner utenfor midt-Norge. Sandstein er påvist i Kvitingformasjonen (avsatt i campan, ca. 70-80 mill. år siden), men det er ukjent om denne fortsetter inn mot land.

Det er mulig at kritt-sedimentene langs kysten lokalt er dominert av sandstein. Eventuelle sandsteinslag må imidlertid kartlegges ved hjelp av nye seismiske data og borer. Bergartene har generelt en helning ut fra land, slik at om eventuelle sandsteiner skal være aktuelle for CO<sub>2</sub>-deponering, må de være innesluttet i tette skifre eller være avgrenset av tette forkastningsplan.

De kretaiske bergartene langs kysten er sannsynligvis lite egnet for CO<sub>2</sub>-deponering. Det er imidlertid mulig at Agatformasjonen og de nevnte overkretaiske formasjonene har et potensiale for CO<sub>2</sub>-injeksjon. Omfattende undersøkelser vil måtte utføres for å kartlegge om aktuelle sandsteinslag avsatt i denne tidsperioden finnes relativt nær kysten.

### 7.3.3 Deponering i avsetninger fra juratiden

Sedimentære bergarter avsatt i juratiden er trolig de mest aktuelle for kystnær CO<sub>2</sub>-deponering. Sandsteiner avsatt i denne perioden finnes flere steder relativt nært land. I tillegg til områdene beskrevet innaskjærs og i kystsonen (se over), kan de følges nesten kontinuerlig fra Skagerrak og nordover.

I Skagerrak og utenfor kysten av Sørlandet ligger sedimenter avsatt både i tidlig, midt- og sen-juraisk tid. I Skagerrak må en 15-20 km utenfor kysten for å komme til jurasedimentene (Bøe et al. 1999, Rise et al., under arbeid). Sedimentene bevart nærmest kysten er avsatt i tidlig juraisk tid, og består av konglomerat og sandstein (Smelror et al. 1989, konfidensiell rapport), sannsynligvis tilhørende Gassumformasjonen. Lenger ute finnes sandsteiner tilhørende Bryneformasjonen, som er avsatt i midtjura. Ellers er den juraiske lagpakken i Skagerrak dominert av mer finkornige sedimenter. Sør for kyststrekningen Kristiansand-Lindesnes er de

geologiske forholdene utenfor kysten kompliserte, og mer seismiske data må samles inn før en kan vurdere potensialet for CO<sub>2</sub>-deponering. Juraiske sedimenter ligger ca. 10-15 km utenfor kysten, og det er sannsynlig at der finnes sandsteiner som kan egne seg.

I det norsk-danske basseng, utenfor sørvestlandet, finnes sandsteiner tilhørende Gassumformasjonene (undre jura) og Bryne- og Sandnesformasjonene (midt-jura). Det er ukjent hvor nært land disse formasjonene opptrer, men Sandnesformasjonen er kartlagt i Egersundsub-bassenget, ca. 50 km utenfor kysten.

I Varnesgrabenen vest for Lista ligger juraiske sedimenter nesten opp i fjæresteinene (Bøe et al. 1999). De sedimentære bergartene lengst øst, i det såkalte Listabassenget, har tidligere vært tolket til å være avsatt i sen triasisk tid og tidlig juraisk tid (Holtedahl 1988). Nye data viser at de sannligvis hovedsaklig er underjuraiske, og at de et stykke ut fra kysten er overleiret av midt-juraiske og overjuraiske sedimenter. Bergartsfragmenter fra havbunnen vest for Lista består av underjuraisk sandstein, siltstein og leirstein (Holtedahl 1988), muligens tilhørende Gassumformasjonen. Juraiske sandsteiner med gode reservoarkvaliteter er vanlige i Nordsjøen. Det er derfor sannsynlig at sandsteiner i lagpakken i Varnesgrabenen, både underjuraiske og midt-juraiske, vil kunne egne seg til CO<sub>2</sub>-deponering. Et snitt over Varnesgrabenen er vist i Fig. 8. Vest for Lindesnes ligger bunnen av sedimentbassenget ca. 1200 m under havoverflaten. En er avhengig av at sandsteinene er overleiret av tette bergarter, f.eks. skifer, slik at gass ikke beveger seg oppover mot overflaten på grunn av oppdrift, og at en ikke får gasslekkasjer langs forkastningsplan. Bergartene har en helning ut fra land, og deponert karbondioksyd vil derfor bevege seg opp og innover mot land. Eventuell deponering vil kanskje kunne foretas i en avstand på ca. 15 km fra kysten, sentralt i Varnesgrabenen.

Videre nordover langs vestlandskysten ligger juraiske sedimenter bevart i en avstand fra 10 til 20 km fra de ytterste skjær (Sigmond 1992, Fossen et al. 1997, Fossen 1998), bortsett fra ved Utsira, der sen-juraiske sedimenter finnes bare 2-3 km fra land (Rokoengen & Sørensen 1990, Ragnhildstveit et al. 1998). Viktige geologiske strukturer er Horda- og Øygardenforkastningssonene, som går i nord-sør retning 40-50 km utenfor kysten sør for Bergen, og 20-30 km utenfor kysten mellom Bergen og Nordfjord (Vollset og Doré 1984, Brekke et al. 1992). Vest for disse strukturene finnes en mektig juraisk lagpakke (Fig. 9). Denne inkluderer sandsteiner som sannsynligvis vil kunne egne seg til deponering av CO<sub>2</sub>. På Hordaplattformen nordvest for Bergen, der Øygardenforkastningssonen går ca. 20 km utenfor kysten, har juralagene lokalt et slakt fall mot øst, inn i forkastningssonen. Jurasedimentene er overleiret av kretaiske skifre, som vil kunne fungere som gode takbergarter. Potensialet for gasslekkasjer fra sprekker og forkastninger er ukjent.



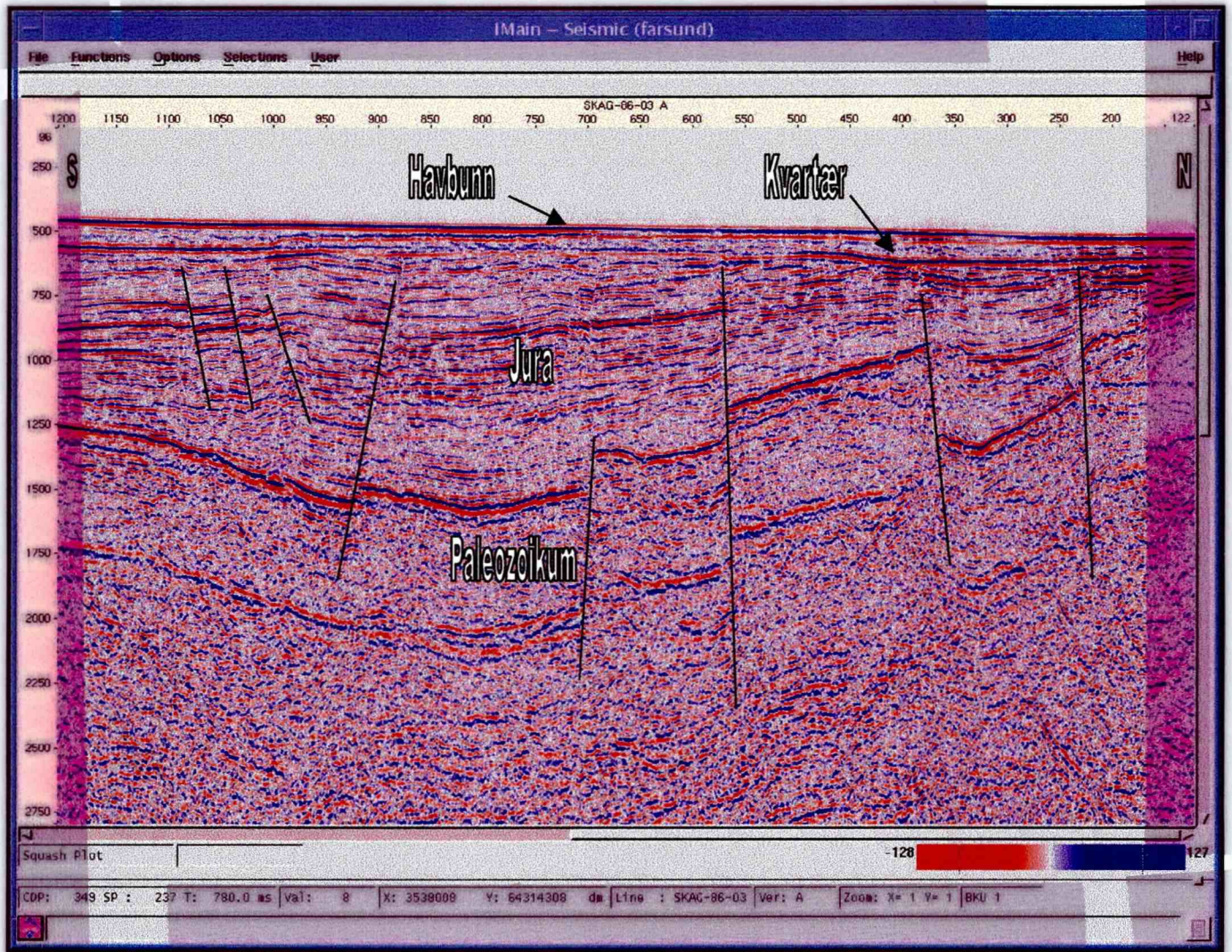


Fig. 8. Seismisk snitt over Varnesgrabenen. Se Fig. 2 for lokalisering av snittet.



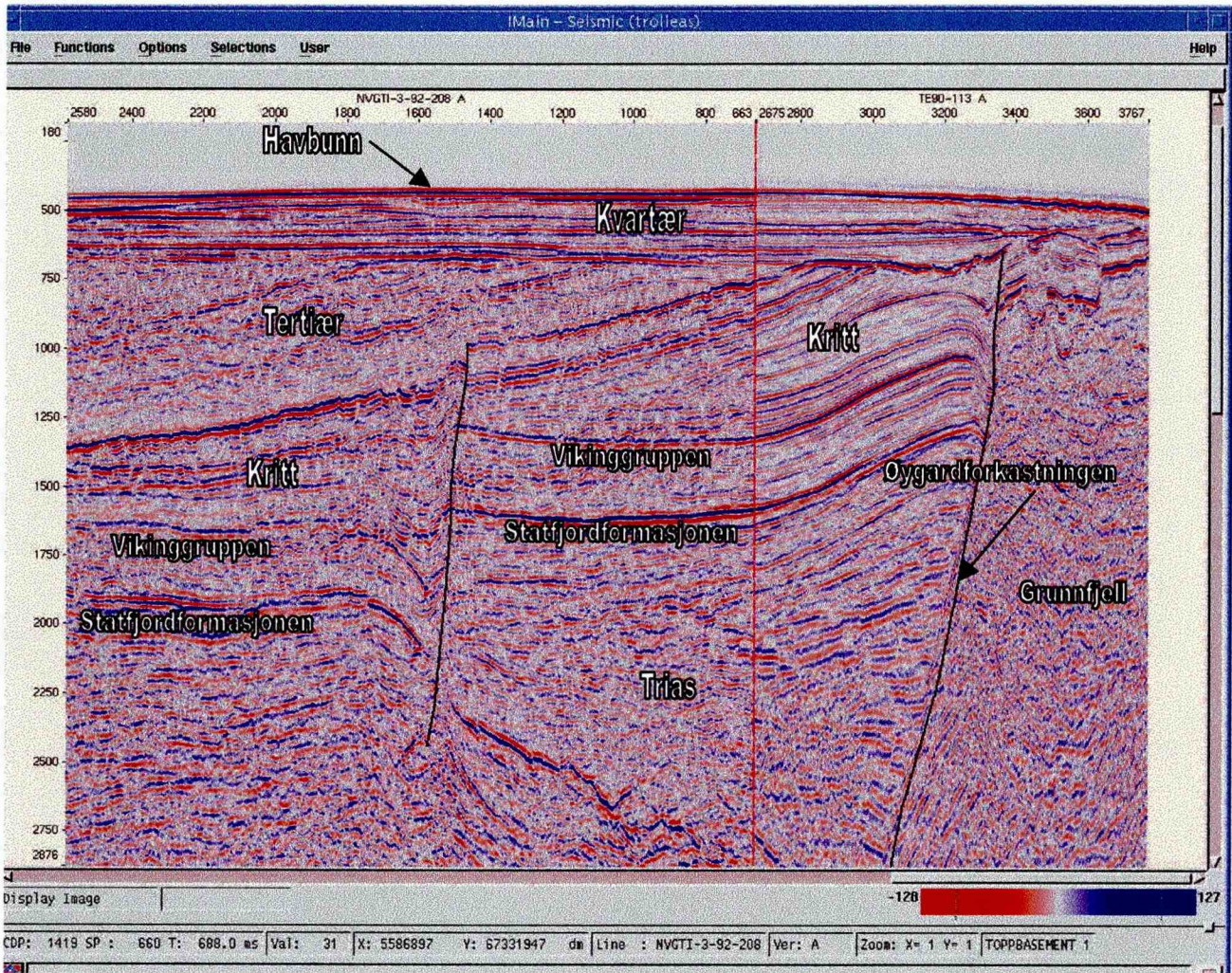


Fig. 9. Seismisk snitt over området fra Trollfeltet mot land. Se Fig. 2 for lokalisering av snittet.

Øst for forkastningssonene som avgrensner det Fennoskandiske skjold (Øygarden- og Hordaforkastningssonene) og utenfor Jæren finnes sedimenter vi antar er avsatt i mellomjura og senjura, mens underjuraiske sandsteiner (Statfjordformasjonen, Johansenformasjonen og Cookformasjonen) hovedsaklig stopper mot øst ved forkastningssonene (Vollset & Doré 1984). Sammensetningen av de midtjuraiske sedimentene er ukjent, men vi antar at sandsteiner er vanlige her, som ellers i Nordsjøen. Sedimenter fra senjura er vanligvis dominert av leirstein, men det finnes sannsynligvis flere sandsteinsenheter også fra denne perioden i dette området. Sandsteiner tilhørende Vestlandgruppen (Sleipnerformasjonen, Huginformasjonen og Ulaformasjonen) er hovedsaklig avsatt i og nær Centralgrabenen og Vikinggrabenen, mens sandsteinene i Dunlingruppen, Brentgruppen og Vikinggruppen også opptrer på Hordaplattformen (Vollset & Doré 1984).

På sokkelen vest for Sotra er det kartlagt små forkastningsbassenger med midtjuraiske sedimenter, ca. 15 km utenfor kysten (Fossen et al. 1997, Raghildstveit & Helliksen 1997, Fossen 1998, Fig. 10). Hvis disse inneholder sandsteiner overleiret av tette skifre, kan de ha et potensiale for CO<sub>2</sub>-deponering, men kun oppfølgende undersøkelser med innsamling av mer seismiske data og boringer vil kunne avgjøre dette. Bassengene ligger dypt nok til at CO<sub>2</sub> vil kunne lagres i en tett fase. Det er mulig at lignende forkastningsbassenger kan finnes både lenger sør og lenger nord. Det er usikkert hvilke sandsteinsformasjoner en kan forvente å finne øst for hovedforkastningssonene, men Etiveformasjonen, og laterale ekvivalenter til sandsteinsformasjonene på Trollfeltet (Krossfjord-, Fensfjord- og Sognefjordformasjonen) er alle mulige kandidater.

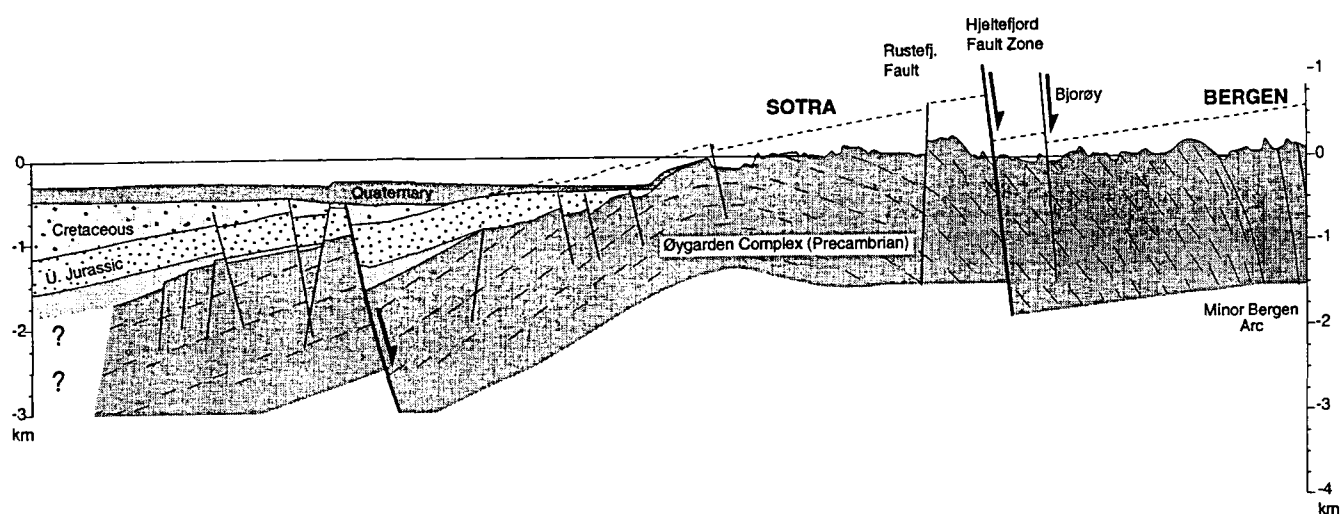


Fig. 10. Profil over de juraiske forkastningsbassengene vest for Sotra. Figuren er hentet fra Fossen (1998).

Langs kysten mellom Nordfjord og utløpet av Romsdalsfjorden ligger juraiske bergarter for dypt til at de vil være aktuelle for CO<sub>2</sub>-deponering. Fra Romsdalsfjorden og videre nordover til Vestfjorden kan de imidlertid være aktuelle for deponering. Når en ser bort fra de kystnære bassengene beskrevet i kapitlene over, ligger innergrensen for de juraiske sedimentene 10-50 km fra kysten. Nærmest land kommer de sørvest for Smøla, der de ligger nesten helt inntil de ytterste skjær (Smelror et al. 1994, Bøe & Skilbrei 1998), vest for Vikna (Gustavson & Bugge 1995, Solli et al. 1997), og ved Træna, der en også har permiske og triasiske sedimenter inn i skjærgården (Gustavson & Gjelle 1991, IKU 1995). Sørvest for Smøla, innenfor Griptarane, ligger de juraiske bergartene sannsynligvis for grunt til at de er aktuelle for CO<sub>2</sub>-deponering. Østgrensen for de sedimentære bergartene (trias og perm) langs kysten av Trøndelag og Nordland er generelt mangelfullt kartlagt, selv om enkelte unntak finnes (Gustavson & Gjelle 1991, Gustavson & Bugge 1995, IKU 1995, Thorsnes 1995, Solli et al. 1997).

De mest aktuelle bergartene for CO<sub>2</sub>-deponering vil være sandsteiner og konglomerater som kan korreleres med Åreformasjonen og Tiljefformasjonen (undre jura) og Ileformasjonen og Garnformasjonen (midtre jura) (Dalland et al. 1988). Bugge et al. (1984) har beskrevet laterale ekvivalenter til disse formasjonene i grunne boringer langs Trøndelagskysten. Ellers har de juraiske bergartene langs hele denne kyststrekningen en helning ut fra land som gjør at deponert gass vil bevege seg oppover, og en er derfor avhengig av å finne sandsteiner som er innekapslet i tette bergarter eller sandsteiner som lukkes mot tette forkastningsplan.

Juraiske bergarter opptrer relativt nær kysten utenfor Lofoten og Troms. På Tromsøflaket er Tubåenformasjonen, Nordmelaformasjonen og Støformasjonen (tidlig og midtjuraisk alder) sandige og/eller dominert av sandstein, og kystnære ekvivalenter til disse kan være aktuelle for CO<sub>2</sub>-deponering. Det mest aktuelle området er fra nordspissen av Senja og nordover til ca. 71°N (Grogan & Zwaan 1997, Zwaan et al. 1998). Kystnær deponering utenfor Finnmark vil sannsynligvis måtte skje i triasiske bergarter, som en finner ca. 30 km fra land. Sør for de triasiske sedimentene finnes også eldre sedimenter, blant annet sandstein avsatt i perm og karbon (påvist ved grunne boringer). Vi antar at permeabiliteten i disse gamle sedimentene er lav, men en letebrønn i området viser at det kan være relativt høy porøsitet også i disse bergartene. I og med at det er aktuelt å ilandføre naturgass med høyt CO<sub>2</sub>-innhold fra Snøhvitfeltet til Hammerfestområdet, må deponeringspotensialet i disse kystnære sedimentære bergartene undersøkes nøye.



## 8. OPPSUMMERING OG FORSLAG TIL VIDERE UNDERSØKELSER

### 8.1 Oppsummering av potensielle deponeringsområder

Det er usikkert hvor en vil få store CO<sub>2</sub>-utslipp langs norskekysten i framtida. I første omgang avhenger dette av hvor en bestemmer seg for å plassere eventuelle gasskraftverk og anlegg for ilandføring av naturgass med utseparering av naturlig CO<sub>2</sub>-innhold.

Når det gjelder bygging av gasskraftverk har flere områder vært nevnt, først og fremst Rogaland, Øygarden på Sotra, Tjeldbergodden i Møre og Romsdal og Skogn i Nord-Trøndelag. I nærheten av alle disse områdene har en forekomster av juraiske sedimentære bergarter, enten i avgrensede bassenger eller relativt nær kysten (Tabell 3). I Trøndelag bør en først og fremst nevne sedimentbassengene i Beitstadfjorden og Frohavet. I Møre og Romsdal bør en vurdere sedimentære bergarter avsatt i tidlig jura og midtjura utenfor kysten mellom Aukra og Frøya. Vest for Sotra har en de juraiske forkastningsbassengene øst for Øygardenforkastningen samt den juraiske-kretaiske lagpakken vest for Øygardenforkastningen. Langs kysten av sørvestlandet bør en kanskje først og fremst vurdere potensialet i Varnesgrabenen og Listabassenget.

Også i områder der det ennå ikke foreligger planer for bygging av gasskraftverk eller ilandføring av naturgass kan en tenke seg at det i framtida kan bli aktuelt å deponere CO<sub>2</sub>. Kystnære bergarter med deponeringspotensiale finnes først og fremst utenfor Troms og Vesterålen (jura, kritt og tertiær), Lofoten (jura og kritt), i Andfjorden og Vestfjorden (jura og kritt), vest for kyststrekningen Træna-Vikna (jura), og utenfor kysten mellom Kristiansand og Lista (jura). Innen de fleste av disse områdene finnes det begrenset geologisk informasjon. Mye av informasjonen er dessuten av relativt gammel dato. Mer seismiske data må samles inn før en kan foreta en noenlunde pålitelig reservoarsimulering. Dette gjelder først og fremst i Andfjorden, innerst i Vestfjorden, utenfor Troms, vest for Træna og Vikna, og langs kysten mellom Kristiansand og Lista. Både høyoppløselige grunnseismiske data og 3-sekunders seismiske data vil være til stor nytte for en grundigere kartlegging av områdene.

Diskusjoner med Statoil har vist at også Finnmarkskysten utenfor Hammerfest (Melkøya) er et meget aktuelt område for CO<sub>2</sub>-deponering. Gassen fra Snøhvitfeltet inneholder 5-7% CO<sub>2</sub>. Før nedkjøling til LNG (Liquid Natural Gas) må CO<sub>2</sub>-innholdet bringes ned til under 100 ppm. Hvis en går ut fra et sannsynlig produksjonsnivå på 5.4 milliarder standard kubikkmeter per år, innebærer det at en må deponere anslagsvis 300 millioner standard kubikkmeter CO<sub>2</sub> årlig (T. Torp, pers. medd. 1999). Kystnær deponering vil innebære at denne gassen må lagres i bergarter avsatt i karbon, perm eller trias. Omfattende undersøkelser må til for å kartlegge deponeringspotensialet i disse bergartene.

Område	Formasjon	Alder
--------	-----------	-------

### Nord-Norae

Vest-Finnmark	Tubåen-, Nordmela- og Stø- formasjonene	Tidlig jura/midtjura
	Havert-, Klappmys-, Kobbe-, Snadd- og Fruholmformasjonene	Trias
	?	Karbon og Perm
Lofoten-Vesterålen-Troms	?	Tertiær
	Kvitingformasjonen	Senkritt
	Tubåen-, Nordmela- og Stø- formasjonene	Tidlig jura/midtjura
Andfjorden	?	Tidlig kritt
	Ramsåformasjonen	Midtjura
Vestfjorden	?	Midtjura og tidlig kritt
Vikna-Vega-Træna	Ile- og Garnformasjonene	Midtjura
	Åre- og Tiljefformasjonene	Tidlig jura

### Midt-Norge

Beitstadfjorden	Ile- og Garnformasjonene	Midtjura
Frohavet	Ile- og Garnformasjonene	Midtjura
Romsdal-Nordmøre-Smøla-Hitra- Frøya-Froan-Vikna	Åre- og Tiljefformasjonene	Tidlig jura
	Ile- og Garnformasjonene	Midtjura

### Sør-Norge

Nord for Trollfeltet	?	Paleocen-eocen
Vestlandet (små forkastnings- basseng øst for Øygarden- og Hordaforkastningssonene)	Etive-, Krossfjord-, Fensfjord- og Sognefjordformasjonene	Midtjura-senjura
Bergen-Nordfjord (vest for Øygardenforkastningssonen)	Sognefjordformasjonen	Senjura
	Etive-, Krossfjord- og Fensfjord- formasjonene	Midtjura
	Statfjord-, Johansen- og Cook- formasjonene	Tidlig jura
Bergen-Nordfjord	Agatformasjonen	Tidlig kritt-senkritt
Sørvestlandet/Varnesgraben	?	Senkritt
	Bryne-/Sandnesformasjonene	Midtjura
	Gassumformasjonen	Tidlig jura
Skagerrak	Bryneformasjonen	Midtjura
	Gassumformasjonen	Tidlig jura

Tabell 3. Oppsummering av kystnære områder og formasjoner aktuelle for CO<sub>2</sub>-deponering. Formasjonene som er vurdert er yngre enn Trias, bortsett fra i Finnmark, der det ikke finnes så unge formasjoner nær kysten.



## 8.2 Forslag til videre undersøkelser og anbefalinger

I og med at de lagdelte bergartene innen de fleste av de omtalte områdene langs norskekysten har en helning og sannsynligvis ikke representerer lukkede akviferer, vil det være avgjørende å finne ut hvor raskt deponert karbondioksyd vil migrere opp mot overflaten. Første skritt i en eventuell oppfølgende undersøkelse bør være å utføre en preliminær reservoarsimulering for å få en ide om verst og best tenkelige scenario. Ved å ta utgangspunkt i størrelsen på områdene, dybde under overflaten, helning på lagene og antatt litologi, vil en kunne anslå om deponert karbondioksyd vil forbli i undergrunnen så lenge som ønsket. En slik preliminær reservoarsimulering vil kunne gi svar på om for eksempel sedimentbassengene i Beitstadfjorden, Frohavet og Varnesgraben er aktuelle for deponering, og om det har noe for seg å gå videre med oppfølgende undersøkelser.

Hvis simuleringene kommer ut med positivt resultat, bør en foreta mer detaljerte seismiske undersøkelser for å få et bedre bilde av lagrekkefølge og geologiske strukturer. En bør først og fremst samle inn mer grunnseismiske data, men det kan også være nødvendig å samle inn seismiske data til dypere nivå, f.eks. 3-sekunders seismikk. I noen områder er datagrunnlaget sannsynligvis for dårlig, slik at en må samle inn mer seismiske data før en kan foreta en preliminær reservoarsimulering. Dette gjelder særlig forkastningsbassengene øst for Øygardenforkastningssonen, Vestfjorden og Andfjorden.

Etter at en har supplert med nye seismiske data, bør en foreta en ny reservoarsimulering for å bestemme om områdene fortsatt er aktuelle for deponering. Ved positivt resultat er neste steg å bore gjennom lagpakken for å ta kjerneprøver. Kun boring kan gi svar på om en har reservoarbergarter som egner seg for deponering, og om en har takbergarter som vil hindre gassen i å stige mot overflaten. Ved injisering av CO<sub>2</sub> i en vannfylt bergart vil en del av karbondioksyden bli oppløst i det gjenværende porevannet, og en vil få kjemiske reaksjoner mellom porevannet og mineralene i bergartene. Over tid vil dette føre til utfelling av mineraler, f.eks. kalsitt. En vil derved få mindre mobilt CO<sub>2</sub> i porerommene. En sekundær effekt vil være at de utfelte mineralene tetter porerommene og reduserer permeabiliteten. Det er derfor viktig at en har gode beskrivelser av kjerneprøvene og at en har målinger og analyser av blant annet fysiske parametre (porøsitet og permeabilitet) og petrografi og mineralogi for å kunne forutsi hvordan reservoaret vil oppføre seg over tid.

Etter at kjernene er beskrevet og analysert må en, hvis det ser ut til at en har riktig type bergarter, på nytt utføre reservoarsimulering for å kunne fastslå om bergartene i området egner seg for deponering. Er resultatet fortsatt positivt og området er tilstrekkelig kartlagt, kan en gå videre med mer detaljert planlegging for å bestemme nøyaktig hvor deponering bør finne sted. Før en bestemmer seg for å starte deponering, kan det imidlertid være nødvendig å samle inn mer to-dimensjonal eller eventuelt tre-dimensjonal seismikk. Samtidig bør en undersøke

mulighetene for å legge rørledninger til deponeringsområdet. En slik undersøkelse bør blant annet inkludere kartlegging av batymetri og sedimenttyper på og under havbunnen. Det er viktig å vite hvor en har erosjon på havbunnen, hvor enkelt det vil være å grave ned en eventuell rørledning, og hvilke motstridende interesser som kan gjøre seg gjeldende ved plassering av rørledninger på havbunnen.

## 9. KONKLUSJONER

I dette forstudiet har vi foretatt en oppsummering og gjennomgang av geologiske data relevante for CO<sub>2</sub>-deponering i undergrunnen langs kysten av Norge. Under arbeidet har vi benyttet både publisert og upublisert materiale. Potensialet for kystnær CO<sub>2</sub>-deponering i Norge har tidligere ikke vært utredet, og det eksisterer derfor ikke skriftlig materiale om temaet, som vi har kunnet benytte. Rapporten er ment som en kortfattet oppsummering av relevante, eksisterende data, og mange hull i den geologiske kunnskapen må fylles før en kommer til et punkt der CO<sub>2</sub>-deponering kan bli aktuelt.

Om en ønsker å peke ut aktuelle deponeringssteder for CO<sub>2</sub> i undergrunnen, bør en starte et pilotprosjekt der en systematiserer eksisterende data og evaluerer disse, og samler inn nye data i områder der en har for liten kunnskap til å si noe om potensialet. På denne måten vil en kunne peke ut de mest aktuelle stedene, der en i neste omgang vil måtte utføre detaljerte studier for å finne ut hvor egnet bergartene eller sedimentene er for CO<sub>2</sub>-deponering.

Hovedkonklusjonene i denne rapporten er følgende:

- Bergartene på land i Norge er uegnet for undergrunnsdeponering av CO<sub>2</sub>.
- De beste forholdene for undergrunnsdeponering av karbondioksyd i kystnære områder finnes i sedimentære bergarter fra juratiden. Deponering i kretaiske og tertiære sedimenter er tenkelig, mens deponeringspotensialet i kvartære sedimenter og bergarter eldre enn jura er begrenset, med et mulig unntak for Finnmarkskysten.
- Et omfattende pilotprosjekt vil måtte gjennomføres for å kartlegge hvor en har akviferer som egner seg for deponering av karbondioksyd i undergrunnen. Følgende aktiviteter bør utføres i et slikt pilotprosjekt:
  - i) Preliminær reservoarsimulering der en benytter eksisterende data til å modellere forholdene for CO<sub>2</sub>-deponering (best og verst mulige forhold) i forskjellige områder.
  - ii) Innsamling av grunnseismikk (både rekognoserende og detaljert kartlegging) i utvalgte områder.
  - iii) Boring og kjerneprøvetaking for å fastslå hvilke bergartstyper som er tilstede.
  - iv) Analyser av kjerneprøvene for å bestemme viktige parametre som alder, porøsitet, permeabilitet, petrografi, mineralogi osv.
  - v) Ny reservoarsimulering der en benytter seg av alle gamle og nye data for å bestemme hvilke områder som egner seg for CO<sub>2</sub>-deponering.
  - vi) Valg av de mest lovende områdene, der en kan gå videre med mer detaljert planlegging av deponering, inkludert mulighetene for å legge rørledninger.

## 10. REFERANSER

Aanstad, K.M., Gabrielsen, R.H., Hagevang, T., Ramberg, I.B. & Torvanger, O. 1981: Correlation of offshore and onshore structural features between 62 N and 68 N, Norway. *In* Norwegian Petroleum Society (ed.): *Norwegian Symposium on Exploration, Proceedings NSE/III*, 1-25. Norsk Petroleumsforening, Bergen.

Askvik, H. & Rokoengen, K. 1985: Geologisk kart over Norge, berggrunnskart KRISTIANSUND - M. 1:250 000. *Norges geologiske undersøkelse*.

Brekke, H., Kalheim, J.E. Riis, F., Egeland, B., Blystad, P., Johnsen, S. & Ragnhildstveit, J. 1992: Two-way time map of the unconformity at the base of the Upper Jurassic (north of 69°N) and the unconformity at the base of the Cretaceous (south of 69°N), offshore Norway, including the main geological trends onshore. Scale 1:2 mill. NPD Continental Shelf Map No. 1. *The Norwegian Petroleum Directorate/The Geological Survey of Norway*.

Bugge, T., Knarud, R. & Mørk, A. 1984: Bedrock geology on the mid-Norwegian continental shelf. *In* Norwegian Petroleum Society (ed.): *Petroleum Geology of the North European Margin*. Graham & Trotman, London, 271-283.

Bøe, R. 1991: Structure and seismic stratigraphy of the innermost mid-Norwegian continental shelf: an example from the Frohavet area. *Marine and Petroleum Geology* 8, 140-151.

Bøe, R. & Bjerkli, K. 1989: Mesozoic sedimentary rocks in Edøyfjorden and Beitstadfjorden, central Norway: implications for the structural history of the Møre-Trøndelag Fault Zone. *Marine Geology* 87, 287-299.

Bøe, R., Sørensen, S. & Hovland, M. 1992a: The Karmsundet Basin, SW Norway: stratigraphy, structure and neotectonic activity. *Norsk Geologisk Tidsskrift* 72, 281-283.

Bøe, R., Nordgulen, Ø. & Solli, A. 1992b: NORD-FRØYA, bedrock map 1422 I, M 1:50 000, black and white edition. *Norges geologiske undersøkelse*.

Bøe, R., Nordgulen, Ø. & Solli, A. 1992c: HALTEN, bedrock map 1523 III, M 1:50 000, black and white edition. *Norges geologiske undersøkelse*.

Bøe, R. & Skilbrei, J.R. 1998: Structure and seismic stratigraphy of the Griptarane area, Møre Basin margin, mid-Norway continental shelf. *Marine Geology* 147, 85-107.

Bøe, R., Rise, L. & Brekke, H. 1999: Berggrunnsgeologisk kart over den norske delen av Skagerrak og Nordsjøen mellom Kristiansand og Karmøy. *NGU-Rapport 99.002*.

Christensen, N.P. 1998: Reducing carbon dioxide emissions - the European Upstream Oil Industry i taking the initiative. *GEO ENeRGY* 5, February 1998, 1-2.

Dalland, A. 1979: The Sedimentary Sequence of Andøy, Northern Norway - Depositional and Structural History. Proceedings, Norwegian Sea Symposium, Tromsø 1979. *Norwegian Petroleum Society NNS/26*, 1-31.

Dalland, A., Worsley, D. & Ofstad, K. 1988: A lithostratigraphic scheme for the Mesozoic and Cenozoic succession offshore mid- and northern Norway. *Norwegian Petroleum Directorate Bulletin No. 4*, 65 pp.

Fossen, H. 1998: Advances in understanding the post-Caledonian structural evolution of the Bergen area, West Norway. *Norsk Geologisk Tidsskrift* 78, 33-46.

Fossen, H., Mangerud, G., Hesthammer, J., Bugge, T. & Gabrielsen, R.H. 1997: The Bjorøy Formation: a newly discovered occurrence of Jurassic sediments in the Bergen Arc System. *Norsk Geologisk Tidsskrift* 77, 269-287.

Gabrielsen, R.H. & Ramberg, I.B. 1979: Fracture maps - Møre-Trøndelag. Tectonic analysis of satellite imagery. *University of Oslo, Report*, 32 pp.

Gregersen, U., Michelsen, O. & Sørensen, J.C. 1998: Stratigraphy and facies distribution of the Utsira Formation and Pliocene sequences in the northern North Sea. *Marine and Petroleum Geology* 14, 893-914.

Grogan, P. & Zwaan, K.B. 1997: Geologisk kart over Norge, berggrunnskart HELGØY, M 1:250 000. *Norges geologiske undersøkelse*.

Gustavson, M. & Gjelle, S.T. 1991: Geologisk kart over Norge. Berggrunnskart MO I RANA, M 1:250 000. *Norges geologiske undersøkelse*.

Gustavson, M. & Blystad, P. 1995: Geologisk kart over Norge, berggrunnskart BODØ, M 1:250 000. *Norges geologiske undersøkelse*.

Gustavson, M. & Bugge, T. 1995: Geologisk kart over Norge, berggrunnskart VEGA, M 1:250 000. *Norges geologiske undersøkelse*.

Henningesen, T. og Tveten, E. 1998: Geologisk kart over Norge. Berggrunnskart ANDØYA, M: 1:250 000. *Norges geologisk undersøkelse*.



Holliday, D.W., Williams, G.W., Holloway, S., Savage, D. & Bannon, P. 1991: A Preliminary Study of the Feasibility of Underground Disposal of Carbon Dioxide. *BGS Technical Report No. WE/91/20*.

Holloway, S. (editor) 1996: The underground disposal of carbon dioxide. Contract No JOU2 CT92-0031, Final Report. *British Geological Survey*, Keyworth, Nottingham, UK.

Holloway, S. & Savage, D. 1993: The potential for aquifer disposal of carbon dioxide in the UK. *Energy Conversion and Management* 34, 925-933.

Holloway, S., Heederik, J.P., van der Meer, L.G.H., Czernichowski-Lauriol, I., Harrison, R., Lindeberg, E., Summerfield, I.R., Rochelle, C., Schwarzkopf, T., Kaarstad, O. & Berger, B. 1996: The Underground Disposal of Carbon Dioxide, Summary Report. *British Geological Survey*, Keyworth, Nottingham, UK, 24 pp.

Holt, T., Jensen, T.I. & Lindeberg, E. 1994: Underground storage of CO<sub>2</sub> in aquifers and oil reservoirs. *Proceedings of the ICCDR-2 Conference*, Kyoto, Japan, October 1994.

Holtedahl, H. 1988: Bedrock geology and Quaternary sediments in the Lista basin, S. Norway. *Norsk Geologisk Tidsskrift* 68, 1-20.

IKU 1995: Shallow Drilling Helgeland 1992. *IKU Information sheet no.: 15, Project No. 23.1684.00*. Shallow Drilling, February 1995.

Isaksen, D. & Tonstad, K. 1989: A revised Cretaceous and Tertiary lithostratigraphic nomenclature for the Norwegian North Sea. *NPD-Bulletin no. 5*, 59 s.

Manum, S. 1964: Nytt om Verran-kullene. *Fossil-nytt* 3, 1-2.

Nordhagen, R. 1921: Fossilførende blokker fra Juratiden på Froøyene utenfor Trondheimsfjorden. *Naturen* 45, 110-115.

Oftedahl, C. 1972: A sideritic ironstone of Jurassic age in Beitstadfjorden, Trøndelag. *Norsk Geologisk Tidsskrift* 52, 123-134.

Oftedahl, C. 1975: Middle Jurassic graben tectonics in mid-Norway. *In Norwegian Petroleum Society (ed.): Jurassic Northern North Sea Symposium, Proceedings, 1-13*. Norwegian Petroleum Society, Stavanger.

Ragnhildstveit, J. & Helliksen, D. 1997: Geologisk kart over Norge, berggrunnskart Bergen - 1:250 000. *Norges geologisk undersøkelse*.

- Ragnhildsteveit, J., Naterstad, J., Jorde, K. og Egeland, B. 1998: Geologisk kart over Norge; berggrunnskart Haugesund - M 1:250 000. *Norges geologiske undersøkelse*.
- Rise, L., Sættem, J., Fanavoll, S., Thorsnes, T., Ottesen, D. & Bøe, R. 1999: Seabed pockmarks related to fluid migration from Mesozoic bedrock strata in Skagerrak offshore Norway (under arbeid).
- Rochelle, C. & Holloway, S.: CO<sub>2</sub> storage. *In* Underground storage of carbon dioxide, p. 22. British Geological Survey, Keyworth.
- Rokoengen, K. & Sørensen, S. 1990: Late Jurassic sedimentary bedrock north of Utsira, offshore western Norway. *Norsk Geologisk Tidsskrift* 70, 61-63.
- Sigmond, E.M.O. 1992: Bedrock map, Norway and adjacent ocean areas. M 1:3 000 000. *Norges geologiske undersøkelse*.
- Smelror, M., Jacobsen, T., Rise, L., Skarbø, O., Verdenius, J.G. & Vigran, J.O. 1994: Jurassic to Cretaceous stratigraphy of shallow cores on the Møre Basin Margin, Mid-Norway. *Norsk Geologisk Tidsskrift* 74, 89-107.
- Solli, A., Bugge, T. & Thorsnes, T. 1997: Geologisk kart over Norge, berggrunnskart NAMSOS, M 1:250 000. *Norges geologiske undersøkelse*.
- Thorsnes, T. 1995: Structural setting of two Mesozoic half-grabens off the coast of Trøndelag, Mid-Norwegian shelf. *Norges geologiske undersøkelse Bulletin* 427, 68-71.
- Torp, T. & Christensen, N.P. 1998: Capture and reinjection of CO<sub>2</sub> in a saline aquifer at Sleipner Field and the future potential of this technology. *Dinner-debate with the Foundation Européenne de l'Energie in Brussels on 2 June 1998*.
- Van der Meer, L.G.H. 1994: The CO<sub>2</sub> storage efficiency of Aquifers. *Proceedings of the ICCDR-2 Conference, Kyoto, Japan, October 1994*.
- Vigran, J.O. 1970: Fragments of a Middle Jurassic flora from northern Trøndelag, Norway. *Norsk Geologisk Tidsskrift* 50, 193-214.
- Vollset, J. & Doré, A.G. 1984. A revised Triassic and Jurassic lithostratigraphic nomenclature for the Norwegian North Sea. *Norwegian Petroleum Directorate Bulletin No. 3*, 53 pp.
- Vorren, T.O., Laberg, J.S., Blaumme, F., Dowdeswell, J.A., Kenyon, N.H., Mienert, J., Rumohr, J. & Werner, F. 1998: The Norwegian-Greenland Sea Continental Margins:

Morphology and Late Quaternary Sedimentary Processes and Environment. *Quaternary Science Reviews* 17, 273-302.

Zwaan, K.B., Fareth, E. og Grogan, P.W. 1998: Geologisk kart over Norge, berggrunnskart TROMSØ, M:1:250 000. *Norges geologiske undersøkelse*.



