

# Lagring av koldioxid i berggrunden

– krav, förutsättningar  
och möjligheter

Mikael Erlström, Dag Fredriksson,  
Niklas Juhojuntti, Ulf Sivhed & Linda Wickström



**SGU**

Sveriges geologiska undersökning  
Geological Survey of Sweden



# **Lagring av koldioxid i berggrunden**

## **– krav, förutsättningar och möjligheter**

Mikael Erlström, Dag Fredriksson,  
Niklas Juhojuntti, Ulf Sivhed & Linda Wickström

ISSN 1652-8336

ISBN 978-91-7403-098-3

Omslagsbild: Grovkornig, porös, kambrisk sandsten,  
Faluddensandsten. Borrkärneprov (5 × 8 cm stort)  
från 640 m i När-1-borrningen på södra Gotland.  
Foto: Mikael Erlström.

Layout: Rebecca Litzell, SGU 2011

Tryck: Elanders Sverige AB



## FÖRORD

Intresset för att minska koldioxidutsläppen till atmosfären samt för att lagra koldioxid i marken har ökat. På flera håll i Europa pågår stora projekt för att finna och bygga lämpliga lagringsplatser. Genom denna utredning har vi velat uppdatera och redovisa kunskapen om de geologiska förutsättningarna för att lagra koldioxid i Sverige. Syftet har även varit att förbättra det geovetenskapliga beslutsunderlaget för myndigheter och industri i samband med att EU-direktivet om geologisk lagring av koldioxid införs i Sverige.

På sikt kan lagring av koldioxid i porösa basalter och liknande bergarter bli en möjlighet. Koldioxiden binds då genom mineralisering. Denna metod har en stor potential men är ännu outvecklad och kräver fortsatt forskning och teknikutveckling för att kunna utnyttjas i större skala.

Tills vidare är utnyttjande av djupa akvifärer det lämpligaste lagringsalternativet för koldioxid. Tekniken är väl känd och prövad både i tömda olje- och gasfält och i naturliga formationer.

De översiktliga bedömningar som har gjorts visar att det i Sverige framför allt är två områden i södra Östersjön och sydvästra Skåne med omgivande havsområden, där det finns grundläggande förutsättningar för lagring av koldioxid. I dessa områden finns sedimentära bergarter med god porositet. Här finns också god kunskap genom de undersökningar av oljeförekomster som gjordes under 1970- och 1980-talen. SGU överför för närvarande data från de seismiska mätningar som då gjordes till nya lagringsmedia för att göra dem användbara för nya analyser. Innan lagringsmöjligheterna på dessa platser kan fastställas närmare krävs ytterligare behandling av material från tidigare borrhningar och – framför allt – kompletterande undersökningar genom borrhning. Med tanke på att dessa geologiska formationer berör flera Östersjöländer är det fördelaktigt om lagringsmöjligheterna kan undersökas och utvecklas i nära samarbete med dem.

Rapporten har utarbetats av en projektgrupp bestående av Mikael Erlström, Dag Fredriksson, Niklas Juhojuntti, Ulf Sivhed och Linda Wickström.

Det är vår förhoppning att den ska utgöra en grund för ett fortsatt arbete för att finna lämpliga lagringsplatser för koldioxid i Sverige.

Uppsala, januari 2011

**Jan Magnusson**  
Generaldirektör

## INNEHÅLL

|                                                                   |           |
|-------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Förord</b>                                                     | <b>3</b>  |
| <b>Allmän bakgrundsbeskrivning</b>                                | <b>7</b>  |
| Introduktion                                                      | 7         |
| CCS – en introduktion                                             | 10        |
| Svenska koldioxidkällor                                           | 12        |
| Pågående eller avslutade europeiska studier och forskningsprojekt | 13        |
| <b>Koldioxidlagring i djupa akvifärer</b>                         | <b>16</b> |
| Pågående försök med injektering av koldioxid                      | 17        |
| Koldioxidens egenskaper i djupa akvifärer                         | 18        |
| Bindning av koldioxid i akvifären                                 | 21        |
| <b>Förutsättningar för lagring av koldioxid i djupa akvifärer</b> | <b>21</b> |
| Generella geologiska krav och förutsättningar                     | 21        |
| Geometrisk och strukturella krav                                  | 22        |
| Spridning av koldioxid i lagret                                   | 24        |
| Avgränsad struktur eller inte                                     | 25        |
| Översikt över berggrundens lämplighet i Sverige                   | 26        |
| <b>Sammanfattande bedömning av lagringsmöjligheter i Sverige</b>  | <b>34</b> |
| Lagringsmöjligheter i sydvästra Skåne                             | 34        |
| Lagringsmöjligheter i södra Östersjön                             | 36        |
| <b>Lagringsmöjligheter i Polen</b>                                | <b>38</b> |
| <b>Lagringsmöjligheter i Estland, Lettland och Litauen</b>        | <b>39</b> |
| <b>Lagringsmöjligheter i Danmark</b>                              | <b>40</b> |
| <b>Diskussion</b>                                                 | <b>41</b> |
| <b>Referenser</b>                                                 | <b>42</b> |

|                                                                                                         |           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Bilaga 1. Geofysiskt underlagsmaterial .....</b>                                                     | <b>46</b> |
| <b>Bilaga 2. Den kambriska lagerföljden i södra Östersjön .....</b>                                     | <b>52</b> |
| <b>Bilaga 3. Sydöstra Kattegatt .....</b>                                                               | <b>65</b> |
| <b>Bilaga 4. Tänkbara lagringsakvifärer i sydvästra Skåne .....</b>                                     | <b>67</b> |
| <b>Bilaga 5. Koldioxidlagring i Danmark .....</b>                                                       | <b>71</b> |
| <b>Bilaga 6. Akvifärens fysikaliska och kemiska egenskaper .....</b>                                    | <b>77</b> |
| <b>Bilaga 7. Baskrav och börkrav för lagring av koldioxid i berggrunden .....</b>                       | <b>79</b> |
| <b>Bilaga 8. Övervakning .....</b>                                                                      | <b>81</b> |
| <b>Bilaga 9. Bedömning av miljö- och hälsorisker<br/>vid injektering och lagring av koldioxid .....</b> | <b>83</b> |
| <b>Bilaga 10. Undersökningar för bedömning av lagringsplatser .....</b>                                 | <b>85</b> |
| <b>Bilaga 11. Bedömning av lagringskapacitet .....</b>                                                  | <b>87</b> |
| <b>Bilaga 12. Tekniska system och drift .....</b>                                                       | <b>89</b> |
| <b>Bilaga 13. Lagring av koldioxid genom mineralisering .....</b>                                       | <b>92</b> |
| <b>Bilaga 14. Exempel på process från planering till lagring .....</b>                                  | <b>94</b> |



## ALLMÄN BAKGRUNDSBESKRIVNING

Det finns idag ett betydande intresse för avskiljning och lagring av koldioxid (*Carbon Capture and Storage, CCS*) inom svensk basindustri, främst från större företag inom cement-, metallurgi- och raffineringsindustrin, men även från delar av energi- och cellulosaindustrin. Flera olika studier av system och teknik för avskiljning och infångning av koldioxid pågår inom landet. De flesta är initierade av industrin. Myndigheter och näringsliv har bedömt att förutsättningarna för geologisk lagring inom svenskt territorium och inom svensk ekonomisk zon bör utredas ytterligare.

Denna utredning behandlar främst förutsättningarna för lagring av koldioxid i djupt liggande akvifärer i yngre sedimentär berggrund, vilket i dag bedöms som det mest intressanta alternativet. Potentialen i kända områden med sedimentär berggrund diskuteras med fokus på södra Östersjön. I mindre omfattning berörs även lagring under andra geologiska förutsättningar. I utredningen ges en kort presentation av ytterligare lagringsmöjligheter, bl.a. mineralisering i basalter. Vidare beskrivs urvalskriterier för lagring i djupa akvifärer som porositet och permeabilitet samt egenskaper och krav på tätande lager. I möjligaste mån har även omtolkningar av befintlig seismisk information och borrhålsdata genomförts utifrån de specifika krav som ställs för koldioxidlagring i denna typ av berggrund.

## Introduktion

Särskilt inom den industrialiserade världen görs stora ansträngningar för att minska utsläppen av koldioxid. Det anses dock inte möjligt att minska utsläppen till de nivåer som bedöms nödvändiga utan att introducera CCS-teknik och då i första hand från större punktutsläppskällor (Europeiska kommissionen 2008).

Stora punktutsläpp av fossil koldioxid finns internationellt främst inom storskalig elproduktion, där kol, naturgas eller olja används som bränsle. Även stål-, cement- och petroleumindustrin har stora punktutsläpp som kan vara intressanta för avskiljning och lagring. Utsläppssituationen i Sverige är i viss mån annorlunda då den svenska elproduktionen huvudsakligen kommer från koldioxidneutrala kraftkällor som vattenkraft, kärnkraft och biobränsleddad kraftvärme. I Sverige finns emellertid även en stor andel tung basindustri med betydande utsläpp av processrelaterad fossil koldioxid. Denna industri omfattas av EUs regelverk och styrmedel för minskning av koldioxidutsläppen varför den är intressant för CCS.

År 2006 var 41 % av världens elproduktion baserad på kol, medan oljeprodukter och naturgas svarade för 31 %. Trots stora ansträngningar att ersätta fossila bränslen bedöms kol inom överskådlig tid förbli det dominerande bränslet vid produktion av el i stora anläggningar. I relation till kol kommer användningen av oljeprodukter och naturgas att minska vid elproduktion i stora anläggningar (IEA 2008).

## Klimatmål

EU har angett som ett övergripande klimatmål att hindra den globala uppvärmningen från att öka med mer än två grader (jämfört med tiden före industrialiseringen) och att halten växthusgaser bör stabiliseras vid ca 450 miljonddelar per volym.

Liknande målbeskrivningar finns också från FN:s klimatpanel (*International Panel on Climate Change, IPCC*). Avskiljning och geologisk lagring av koldioxid är då en av flera strategiska teknologier som tillsammans med effektiviserings- och besparingsåtgärder anses kunna ge relevanta bidrag till den nödvändiga minskningen. I ett meddelande från Europeiska kommissionen uttalas att senast 2050 måste de globala utsläppen ha minskat med 50 % jämfört med nivåerna 1990, vilket kräver 60–80 % reduktion till 2050 i de utvecklade länderna (Europeiska kommissionen 2007).

IPCC har i en specialrapport (IPCC 2005) bedömt att CCS kan svara för 15–55 % av den nödvändiga koldioxidreduktionen till 2100. International Energy Agency (IEA) har i sin tur bedömt att CCS under vissa förutsättningar kan svara för 20–28 % av koldioxidreduktionen fram till 2050 (IEA 2006).

CCS-tekniken anses bli användbar i stor omfattning först efter 2020. Preliminära bedömningar inom EU pekar på att sju miljoner ton (Mt) koldioxid skulle kunna lagras fram till 2020 och upp till 160 miljoner ton koldioxid fram till 2030 (Europeiska kommissionen 2009). EU har också nyligen enats om fyra mer specifika bindande mål, vilka ska vara uppfyllda till 2020. Ett av dessa är att minska växthusgasutsläppen inom EU med minst 20 %, jämfört med 1990 års nivåer.

Även om både de geologiska och industriella förhållandena ser annorlunda ut i Sverige i förhållande till i övriga Europa finns ett stort intresse för CCS, främst från den svenska basindustrin. I energipropositionen 2009 (Prop. 2008/2009:163) anges följande:

Regeringen anser att avskiljning och lagring av koldioxid, CCS, är en teknik som behövs för att EU ska kunna nå uppsatta klimatmål. CCS kan bidra till att nå ytterligare emissionsbegränsningar utöver vad som uppnås genom energieffektivisering och hållbart brukande av förnybara energikällor. Regeringen avser också att verka för att en av de planerade EU-finansierade demonstrationsanläggningarna för CCS kopplas till svensk basindustri.

### ***Elforsk-studien***

Företrädare för sektorer inom svensk industri, främst från metallurgi-, cement-, kalk-, petrokemi- och energisektorerna har i Elforsks regi genomfört ett projekt (Hjalmarsson & Olvstam 2009) med syfte att studera effekterna för svensk industri vid genomförandet av EU-direktivet från 2009 om geologisk lagring av koldioxid (Europeiska kommissionen 2009). I studien föreslogs bland annat följande:

- Att SGU ges i uppdrag att närmare utreda möjligheten att lagra koldioxid i geologiska formationer under Östersjön.
- Att industrin snarast får indikationer på om lagring i geologiska formationer under Östersjön är möjlig.
- Att SGU får i uppdrag att fortsätta utreda andra lämpliga områden.
- Att det bör följas upp vad som händer i de andra länderna runt Östersjön.

En nyckelfråga både för industrins och berörda myndigheters del är bedömningen av de naturgivna förutsättningarna för att bygga större säkra lager i berggrunden inom svenskt territorium eller svensk ekonomisk zon. Även de geologiska förutsättningarna för gränsöverskridande samarbetsprojekt bör studeras. Detta kunskapsunderlag behöver snarast tas fram för att kunna utgöra en del av ett nödvändigt beslutsunderlag både för industrin och för myndigheterna.

### ***EU-parlamentets och EU-rådets direktiv om geologisk lagring av koldioxid***

2009 publicerades EU-parlamentets och EU-rådets direktiv om geologisk lagring av koldioxid (Europeiska kommissionen 2009). Det är ett viktigt initiativ för utvecklingen av CCS i Europa och utgör ett regelverk för hur en säker geologisk lagring av koldioxid ska genomföras.

Direktivet tar bland annat upp frågor som rör undersökningstillstånd, tillstånd för lagring, övervakning av ett koldioxidlager, rapportering, inspektioner, infrastruktur, ansvarsförhållanden mellan verksamhetsutövare och behörig myndighet, samt finansiella mekanismer. För närvarande pågår implementering av direktivet i EUs medlemsländer. Några viktiga grundläggande principer i direktivet är:

- Att medlemsländerna själva kan bestämma om CCS ska tillåtas inom sitt territorium.
- Att infångade och lagrade emissioner ska räknas som inte utsläppta i ETS (se nästa avsnitt).
- Att företagen själva kan bestämma om de ska använda sig av CCS eller inte.

För arbetet med implementeringen av direktivet i medlemsstaterna har kommissionen inrättat en speciell grupp för informationsutbyte (*Information Exchange Group*, IEG) under ordförandeskap av Europeiska kommissionen, där SGU har varit Sveriges representant. Gruppens huvuduppgift har hittills berört de handledningsdokument (*Guidance Documents*) för tolkning av direktivet. Handledningen består av fyra dokument:

- 1 Ramverk för riskhantering i ett livscykelperspektiv.
- 2 Beskrivning av lagringsplats, koldioxidströmmens sammansättning, övervakning och sanktioner.
- 3 Kriterier för överföring av ansvar till handhavande myndighet.
- 4 Ekonomiska säkerheter och ekonomi.

En arbetsgrupp sammansatt av geovetenskapliga specialister från EuroGeoSurveys (EGS) har också fått möjlighet att yttra sig i arbetet med att ta fram dessa dokument. EGS är en samarbetsorganisation mellan europeiska nationella geologiska undersökningar där SGU ingår.

Arbetet med implementeringen av direktivet i svensk lagstiftning pågår och ska vara klart den 25:e juni 2011.

## **Handelssystemet**

Handeln med utsläppsrätter inom Europa (EU-ETS) och prissättningen av dessa är viktig för utvecklingen och implementeringen av CCS-tekniken i Europa. Anledningen är att finansieringen av CCS är tänkt att i första hand ske via systemet med handel med utsläppsrätter. Handeln med utsläppsrätter är en av Kyotoprotokollets tre flexibla mekanismer för minskning av utsläpp av växthusgaser (*Emission Trading System*, ETS; *Joint Implementation*, JI; *Clean Development*, CD).

Principen för EU-ETS är att EU fördelar ett antal utsläppsrätter (en utsläppsrätt motsvarar utsläpp av 1 ton koldioxid) till de länder som ingår i systemet. De enskilda länderna fördelar sedan utsläppsrätterna inom sina respektive handlande sektorer. I den handlande sektorn i Sverige ingår energisektorn (kraft- och värmeverk) och energiintensiv industri som raffinaderier, cementindustri, järn- och stålindustri samt pappers- och massabruk (se faktaruta nedan). De enskilda anläggningarna i Sverige tilldelas gratis var och en ett antal utsläppsrätter enligt en nationell fördelningsplan som till stor del bygger på historiska utsläpp. Från 2013 kommer dock en del av utsläppsrätterna att auktioneras ut. Utsläppsrätterna kan köpas och säljas. Principen är att den totala tilldelningen ska vara mindre än behovet, av denna anledning får varje utsläppsrätt ett marknadspris. Tanken med systemet är att de

### **Anläggningar som berörs av ETS under andra handelsperioden 2008–2012**

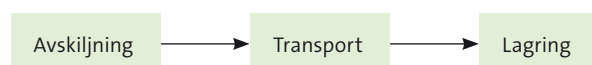
- Förbränningsanläggningar med en installerad kapacitet över 20 MW samt mindre anläggningar anslutna till fjärrvärmenät med en total kapacitet överstigande 20 MW.
- Mineraloljeraffinaderier.
- Koksverk.
- Järn- och stålindustri.
- Mineralindustri (cement, kalk, glas, keramik).
- Pappers- och massaindustri.



anläggningar som har lättast (billigast) att minska sina utsläpp kommer att göra det först, då kan de sälja sina oanvända tilldelade utsläppsrätter till andra verksamheter. På detta sätt fås inom systemet största möjliga utsläppsminskning till lägsta möjliga kostnad. Efter 2013 är planen att CCS ska innefattas i handelssystemet genom att kravet på utsläppsrätter upphör för koldioxid som lagras geologiskt.

## CCS – en introduktion

CCS-processen brukar beskrivas i tre steg: Avskiljning och infångning av koldioxid vid industri- eller förbränningsprocessen, transport till lagringsplatsen och själva lagringen.



### Avskiljning

Avskiljningen eller infångningen av koldioxiden är den mest kostnadskrävande delen av systemet. Enligt vissa bedömare kan denna del av processen uppgå till minst 75 % av den totala kostnaden (Gode & Hovsenius 2005). Teknikerna för infångning och avskiljning av koldioxid brukar delas in efter olika principer:

- Avskiljning före förbränning (*precombustion*) innebär förgasning av det ursprungliga bränslet till en gas som huvudsakligen består av kolmonoxid och vatten, kolmonoxiden får reagera med vatten, den bildade koldioxiden avskiljs och vätgasen förbränns.
- Avskiljning ur rökgaser (*postcombustion*) är avskiljning av koldioxid ur rökgaserna efter förbränningen med någon form av absorptionsteknik, ofta med någon form av aminer eller ammoniak.
- Syrgasförbränning (*oxyfuel*) bygger på förbränning i ren syrgasmiljö varvid rökgaserna huvudsakligen kommer att bestå av koldioxid.

Flera tekniker är under utveckling sedan många år både i Sverige och internationellt. På Chalmers tekniska högskola pågår t.ex. försök initierade av Vattenfall med en teknik som bygger på tvåstegsförbränning där metalloxid som kan regenereras används som syrebärare i förbränningsprocessen. På SSAB i Luleå studeras förbränning i ren syrgas. Samma teknik använder Vattenfall i sin tyska brunkolseldade pilotanläggning i Ketzin utanför Berlin (Schwarze Pumpe). Denna anläggning avser att i industriell skala testa hela systemet, från avskiljning till geologisk lagring. I Karlshamn testar E.ON en pilotanläggning där koldioxid avskiljs ur rökgaserna med hjälp av kyld ammoniak.

### Transport

När koldioxiden avskiljts ska den transporteras till en lagringsplats. Transporten sker i vätskeform för att minska transportvolymen. Detta betyder att transportsystemen måste tåla höga tryck (>73,9 bar). Transport av koldioxid med fartyg och via rörledningar är de huvudsakliga lösningar som diskuteras. Tekniksystem och lösningar finns redan och kommer att utvecklas över tiden, speciellt med hänsyn till den storskalighet som kommer att krävas. Man kan jämföra utvecklingen med de sammanlänkade rörledningssystem som utvecklats och anlagts för naturgasfälten i Nordsjön under de senaste 30 åren.

Transportsystem kommer sannolikt att utvecklas från enstaka rörledningar till komplexa system med sammankoppling av flera avskiljnings- och lagringsplatser både på land och till havs. Innan de storskaliga systemen utvecklats kan fartygstransport med hjälp av befintlig och beprövad teknologi vara ett alternativ. Fartygstransporter kräver i sin tur mer logistik för lastning och lossning med bl.a. mellanlager på land (cisterner). Transport av koldioxid i rörledningar ställer även stora krav på hållfastheten

eftersom den transporteras i flytande form och för att den kan bilda korrosiv kolsyra med vatten. Även halten svavel, syre, kväve och kolväten måste begränsas för att undvika bildning av korrosiva föreningar.

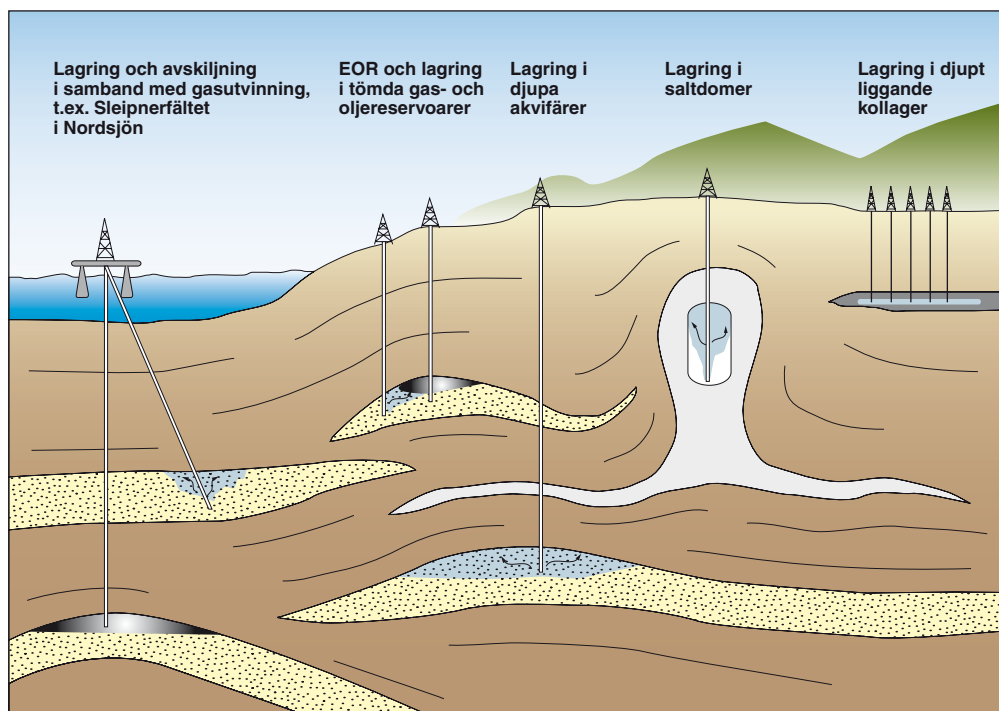
Vid anläggning av rörsystem kommer det att ställas krav på provning, sannolikt liknande de som idag gäller för rörledningar för transport av råolja eller annan vätska eller gas på land eller till havs.

## Lagring

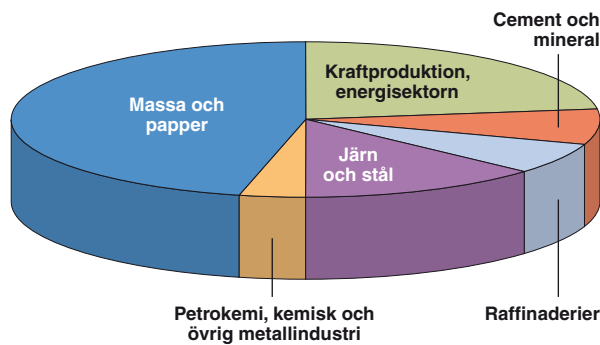
Lagringen av koldioxid kan ske enligt ett antal olika principer. Lagring kan exempelvis ske i porerna i djupa grundvattenförande lager av sedimentär berggrund (djupa akvifärer) eller i samband med injektering av koldioxid vilket numera är vanligt i slutfasen av utvinning av olja i äldre fält (*Enhanced Hydrocarbon Recovery*, EHR, fig. 1). Dessa två lagringssätt är de som anses mest intressanta i Europa. Andra metoder som studeras är att t.ex. låta koldioxiden reagera med lämpliga basiska bergarter eller mineral för att bilda stabila, fasta och lagringsbara mineralfaser. Även lagring i inte brytvärda kolförekomster, svarta organiska skiffrar eller saltdomer studeras. En annan metodik som diskuterats är möjligheten att lagra koldioxid under stort tryck på stora havsdjup.

Mer detaljerad information om lagring av koldioxid i berggrund går att läsa i bilagorna i denna rapport. Bilagorna 1–5 ger en allmän beskrivning av geofysiskt underlagsmaterial och lagringsmöjligheter i södra Sverige och Danmark. I bilaga 6 står det mer om akvifärers fysikaliska och kemiska egenskaper. Bilagorna 7–9 behandlar olika krav för lagring av koldioxid i berggrund, vikten av övervakning samt risker i samband med injektering och lagring. Bilagorna 10 och 11 omfattar vad en geologisk och geofysisk bedömning av lagringsplats innebär, samt metoder för beräkning av lagringskapacitet. Bilaga 12 är en kort beskrivning av borrning och brunnar. I bilaga 13 kan man läsa mer om industriell mineralisering av koldioxid, en eventuell framtida metod. Bilaga 14 beskriver hur det skulle kunna gå till att ta fram ett koldioxidlager.

I Sverige ställs förhoppningarna främst till lagring i djupt liggande, saltvattenförande geologiska formationer (*Deep Saline Aquifers*). EHR är inte aktuellt för svensk del då oljeutvinningen här har varit av liten omfattning. Från EHR finns internationell mångårig praktisk erfarenhet. Praktiska erfarenheter



Figur 1. Olika lagringsmöjligheter i sedimentär berggrund.



Figur 2. Fördelning av utsläppskällor över 100 000 ton koldioxid per år i Sverige, inklusive utsläpp från biobränslen. Data från år 2006 (Grönkvist 2008).

kan också dras från den likartade verksamhet som sedan 10 år tillbaka bedrivs utanför norska kusten i Sleipnerfältet, där koldioxid lagras i samband med naturgasutvinning.

För att underlätta och påskynda utvecklingen av ny teknik har EU under programmet European Energy Programme (EEPR) beslutat om ekonomiskt stöd till sex större europeiska demonstrationsprojekt inom CCS. Stödet uppgår sammantaget till cirka en miljard euro. Avsikten är att testa olika tekniska lösningar och förutsättningar i full kommersiell skala för hela kedjan, från avskiljning och infångning till transport och lagring. Finansieringen ska ske genom försäljning av utsläppsrätter.

### Kostnader

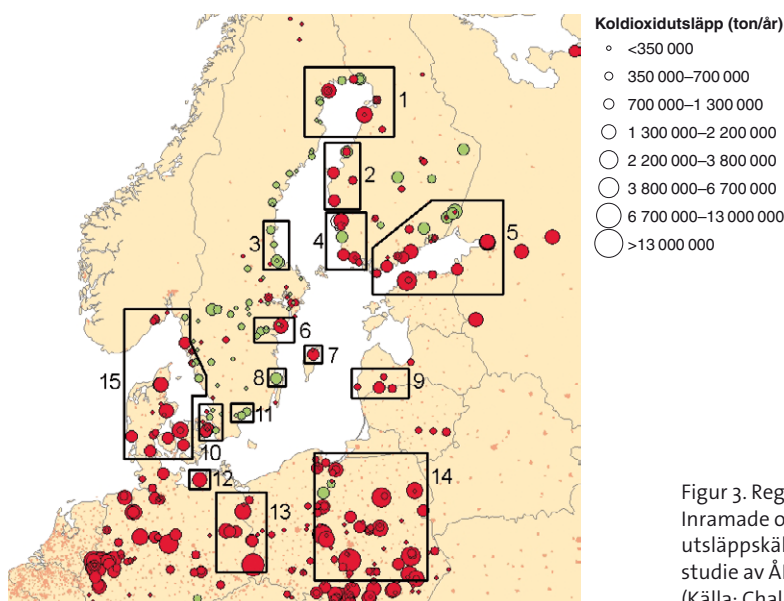
Beräkningar av kostnaden för hela CCS-kedjan varierar stort mellan olika utredningar som ett resultat av olika antaganden beträffande teknikförutsättningar, teknikutvecklingen, skalfördelar etc. Elforsk anger i sin studie från 2005 en kostnad på mellan 300 och 550 SEK (32–54 euro, jan 2010) per ton för lagrad koldioxid. För nivån 300 SEK per ton skulle detta innebära en ökning av elproduktionspriset på ca 12–25 öre per kWh (Gode & Hovsenius 2005).

Enligt ett i EUs energi- och klimatpaket presenterat utsläppshandelsscenario skulle CCS-tekniken vara lönsam att ta i bruk för naturgaskombikraftverk där värmen kan tillvaratas (*Combined Heat & Power*) när priset för utsläpp av koldioxid överskrider 40 euro per ton. Även för viss teknik inom stålindustrin skulle CCS vara lönsamt vid denna prisnivå. Vid 60 euro per ton skulle CCS vara lönsamt för stenkol- och torvkondenskraftverk. Under innevarande handelsperiod (2008–2012), fram till december 2010, har priset fluktuerat mellan 10 och 20 euro per ton.

### Svenska koldioxidkällor

Globalt är diskussionen om CCS främst inriktad på kraftproduktion baserad på fossila bränslen. Sådan produktion har i det närmaste upphört i Sverige. Det förekommer emellertid stora enskilda och processrelaterade utsläppskällor. Fördelningen mellan olika branscher ser annorlunda ut jämfört med övriga Europa. I Sverige kommer de största utsläppen från pappers- och massaindustrin, kraft- och energisektorerna samt järn- och stålindustrin (fig. 2). Dessa sektors utsläpp genereras till största delen av biobränslen, som inte omfattas av kravet på utsläppsrätter, då biobränslen har utsläppsfaktorn noll och räknas som klimatneutrala. Detta innebär att deras utsläpp av koldioxid inte omfattas av de finansieringsmodeller som enligt direktivet för geologisk lagring av koldioxid är tänkta för CCS.

I samband med en utredning av möjligheterna att utnyttja avskiljning och lagring av koldioxid i Sverige genomförde ÅF-Konsult AB (Grönkvist 2008) en kartläggning av större utsläppskällor inom landet. I kartläggningen inkluderades också utsläpp av klimatneutral koldioxid. Sverige har omkring ett dussin enskilda utsläppskällor med utsläpp motsvarande en miljon ton per år eller mer. De två största är SSAB i Luleå med 3,5–4 miljoner ton per år och SSAB i Oxelösund med 2,3 miljoner ton



Figur 3. Regional fördelning av stora punktutsläpp. Inramade områden representerar kluster med utsläppskällor som presenteras i en pågående systemstudie av ÅF-Konsult AB på uppdrag av Elforsk 2010. (Källa: Chalmers tekniska högskola.)

per år. Dessutom har nio pappersbruk, Preemraff i Lysekil, Cementa i Slite och Mälarenergi i Västerås utsläpp över en miljon ton per år. En betydande del av utsläppen är samlade i tio regionala kluster. Totalt omfattar utsläppen inom dessa områden ca 40 miljoner ton per år. I denna siffra inkluderas 23 miljoner ton från biomassa. En slutsats i utredningen är att det finns stora utsläppspunkter eller kluster av utsläppspunkter i Sverige, men att de största ligger långt från de möjliga lagringsplatser som hittills diskuterats, det vill säga sydvästra Skåne och utanför Gotland.

I länderna kring Östersjön, Bottenhavet och Bottenviken (fig. 3) har utsläppen uppskattats till 18 miljoner ton i Finland, 11,5 miljoner ton i Estland, 1,9 miljoner ton i Lettland och 5,6 miljoner ton i Litauen. I Litauen finns de större utsläppskällorna inne i landet i Kaunas- och Vilniusregionerna. De polska utsläppen angavs 2004 till 230 miljoner ton per år.

### Pågående eller avslutade europeiska studier och forskningsprojekt

Ett stort antal internationella projekt och studier, med relevans för svenska förhållanden, kring CCS pågår eller har avslutats under senare år. SGU har medverkat och medverkar i ett flertal av dessa.

#### **BASTOR**

BASTOR (*Baltic Storage of CO<sub>2</sub>*) är ett initiativ från främst svensk och finsk industri som syftar till detaljerade studier och akvifärmodellering i områden i Östersjön som redan nu identifierats som intressanta. Fördjupade och moderna tolkningar av seismikdata från både Sverige och andra relevanta Östersjöländer ska användas för att identifiera strukturer och lager lämpliga för lagring. Kostnaden är preliminärt beräknad till minst 15 miljoner euro. Ansökningsförfarandet pågår vid denna rapports tryckning.

#### **CASTOR**

CASTOR (*CO<sub>2</sub> from Capture to Storage*) var ett stort forsknings- och demonstrationsprojekt med en systemövergripande målsättning att studera processen från avskiljning till lagring. Målet var att genom teknikförbättringar visa på möjligheten att avskilja och lagra 30 % av bildad koldioxid från större europeiska utsläppskällor. Huvuddelen av projektet omfattade teknikutveckling och studier av framtida

teknik för avskiljning. Projektet omfattade även pilotförsök i stor skala med rökgasförbränning i ett kraftverk i Esbjerg i Danmark. Detaljerade fallstudier genomfördes även på fyra principiellt olika lagringsplatser i Europa. I projektet genomfördes också en utökning av de lagringspotentialstudier som gjordes i GESTCO-projektet avseende lagringspotential i södra och östra Europa. Partner i projektet var forskningsinstitutioner, kraftbolag, olje- och gasindustri och utrustningstillverkare. Budgeten var på 15,8 miljoner euro varav 8,5 miljoner kom från EU (FP6) under en fyraårsperiod fram till 2009.

### **CCS – Kattegat/Skagerrak**

CCS – Kattegat/Skagerrak (Skagerrakprojektet) är ett norsk-svenskt samarbetsprojekt koordinerat av Chalmers tekniska högskola som löper under två och ett halvt år med avslutning 2011. Partner är Chalmers tekniska högskola, Tel Tek, Høgskolen i Telemark, Universitetet i Oslo, Innovasjon Norge, Vestfold fylkeskommune, Telemark fylkeskommune, Göteborgs universitet, Västra Götalandsregionen och Energimyndigheten i Sverige. Projektet ska utreda förutsättningarna för en gemensam infrastruktur och gemensamma lösningar för infångning, transport och lagring av koldioxid från stora utsläppskällor i regionen. Vidare ska projektet studera ekonomiska och tekniska möjligheter för att industrin ska kunna utnyttja denna infrastruktur. Projektet har en samlad budget på 1,3 miljoner euro och är finansierat av bl.a. EUs strukturfonder och regionala myndigheter i de deltagande länderna. Mer information om projektet återfinns på [www.interreg-oks.eu](http://www.interreg-oks.eu).

### **CGS Europe**

CGS Europe (*Pan-European Coordination Action on CO<sub>2</sub> Geological Storage*) är ett fortsättningsprojekt på CO<sub>2</sub>GeoNet och startade den 1 november 2010. Projektet innefattar expertis från 28 europeiska länder, bl.a. alla länder kring Östersjön utom Ryssland. Det är ett kommunikationsprojekt med syfte att inrätta en gemensam plattform för kunskapsutbyte. Projektet har en budget på drygt två miljoner euro och koordineras av Frankrikes geologiska undersökning.

### **CO<sub>2</sub>GeoNet**

CO<sub>2</sub>GeoNet var ett nätverk för utbyte av kunskap och spetskompetens inom området geologisk lagring av koldioxid. Projektet, som innefattade forskare från 13 forskningsinstitut, representerande sju europeiska länder och avslutades 2009. Det koordinerades av brittiska geologiska undersökningen, var femårigt och hade en total budget om 9,18 miljoner euro varav sex miljoner kom från EU.

### **CO<sub>2</sub>SINK**

CO<sub>2</sub>SINK (*In-situ R&D Laboratory for Geological Storage of CO<sub>2</sub>*) var en del i ett större pilot- och demonstrationsprojekt för avskiljning och injektering av koldioxid i anslutning till Vattenfalls kraftverk Schwarze Pumpe utanför Berlin. CO<sub>2</sub>SINK är inriktat på studier av lagringssäkerhet och stabilitet i en salt grundvattenakvifär, med hjälp av geofysiska- och geokemiska mätmetoder, numerisk modellering och riskbedömningsstrategier. Projektet finansieras av industrin samt med 8,3 miljoner euro från EU (FP6). Koldioxidinjektering pågår sedan 2008. Mer information om projektet återfinns på [www.co2sink.org](http://www.co2sink.org).

### **CO<sub>2</sub>STORE**

CO<sub>2</sub>STORE (*CO<sub>2</sub> Capture and Storage*), ett projekt som koordinerades av Statoil, startade 2003 och avslutades 2006 (dock pågår fortfarande verksamhet på några platser). Det syftade till att visa hur kunskap från tidigare projekt som SACS, GESTCO m.fl. kan användas på land samt att ge vägledning

om planering, övervakning och flödessimuleringar. Erfarenheter från Sleipnerfältet användes på fyra olika lagringsplatser i Norge, England, Tyskland och Danmark. Total kostnad var 2,4 miljoner euro varav 1,2 miljoner kom från EU (FP5). Mer information om projektet återfinns på [www.co2store.net](http://www.co2store.net).

### **Energimyndigheten**

Energimyndigheten har ett fyraårigt program för koldioxidavskiljning och lagring som inleddes med en första etapp 2009-04-01–2010-11-30. Etappen avsåg en systemstudie vars främsta syfte var att ta fram en forskningsplan samt att granska förutsättningarna för tillämpning av CCS på svenska företag.

### **EU GeoCapacity**

EU GeoCapacity, som avslutades 2008, var en EU-övergripande studie av data om utsläpp, infrastruktur, potentiella lagringsplatser samt ekonomiska utvärderingar. Utvärderingar och matchningar av utsläppskällor mot lagringsplatser genomfördes för ekonomisk optimering på europeisk nivå. Projektet som leddes av GEUS i Danmark fokuserade också att skapa nätverk och tekniköverföring mellan länder och aktörer (FP6). Mer information om projektet återfinns på [www.geocapacity.eu](http://www.geocapacity.eu).

### **GESTCO**

GESTCO (*Geological Storage of CO<sub>2</sub> from Fossil Fuel Combustion*). Målet med detta projekt var att i utvalda områden av Europa kartlägga större koldioxidkällor och deras närhet till möjliga lagringsplatser samt lagringsplatsernas egenskaper och kapacitet. Kostnaderna för lagringen analyserades och resultaten ligger till grund för strategiska bedömningar av CCS-kapaciteten på europeisk nivå. Projektet, som var treårigt, avslutades 2003 och koordinerades av Danmarks och Grönlands geologiska undersökning med deltagande av andra geologiska undersökningar, energi- och oljebolag samt myndigheter. Total kostnad var 3,8 miljoner euro varav 1,9 miljoner kom från EU (FP5).

### **MUSTANG**

MUSTANG är ett fyraårigt (2009–2013) EU-finansierat projekt (FP7) koordinerat av Uppsala universitet. Konsortiet omfattar 19 institutioner med en budget på drygt 10 miljoner euro. Projektet syftar till att utveckla riktlinjer, metoder och verktyg för karaktärisering av djupa saltvattenakvifärer för långtidslagring av koldioxid. Dessa ska baseras på vetenskaplig förståelse för kemiska och fysikaliska processer i lagret, inflytande av inhomogeniteter i lagret, möjliga läckagevägar samt takbergarternas stabilitet och motståndskraft mot långtidspåverkan. Fältmetoder speciellt anpassade för koldioxidlagring ska förbättras och utvecklas. Projektet omfattar såväl teoretiska studier och laboratorietester som anpassade injekteringstester i fält. Mer information om projektet återfinns på [www.co2mustang.eu](http://www.co2mustang.eu).

### **SACS**

SACS (*Saline Aquifer CO<sub>2</sub> Storage*) är ett projekt som startade 1998 och använder Utsiraformationens akvifär i Nordsjön för storskalig demonstration samt för studier av migration, omvandling och kvarhållning av koldioxid i djupa saltvattenakvifärer. Ansatsen är multidisciplinär och omfattar bl.a. akvifärkartläggning, geokemi, porvattenflöden och problematiken med blandning av koldioxid och salt porvatten. Injektering av koldioxid från Sleipnerplattformen och studier av seismiska parametrar är en del av projektet. Målet är kunskapsuppbyggnad och råd baserade på praktiska experiment. Projektet leds av Statoils forskningscenter med deltagande av BP Amoco, Norsk Hydro, Exxon Mobil, Saga Petroleum, Vattenfall, Institut Francais du Petrol, norska SINTEF och Danmarks, Englands,



Hollands och Frankrikes geologiska undersökningar. Fas 2 av projektet avslutades 2002 till en kostnad av 2,1 miljoner euro varav 1,2 miljoner kommer från EU (FP5). För närvarande fortsätter projektet med Fas 3 med fortsatt injektering av koldioxid samt uppföljningar och mätningar.

## **SSAB**

SSAB deltar i projektet ULCOS (*Ultra Low Carbon-dioxide Steelmaking*) tillsammans med ett femtiotal andra europeiska företag och 15 organisationer, bland annat Statoil, Norsk Hydro och norska SINTEF. ULCOSs mål är att reducera utsläppen med 50 %. Projektet studerar främst möjligheterna att förbättra själva processerna vid stålverken.

## **Stiftelsen för miljöstrategisk forskning**

Stiftelsen för miljöstrategisk forskning (Mistra) är sedan 2008 involverade i ett CCS-program vars övergripande syfte är att undersöka barriärer, risker och fördelar med att utveckla koldioxidavskiljning och lagring. Tyngden ligger på politik samt reglering och styrning i ett globalt och nationellt perspektiv. Svenskt deltagande kommer från universiteten i Linköping och Lund.

## **KOLDIOXIDLAGRING I DJUPA AKVIFÄRER**

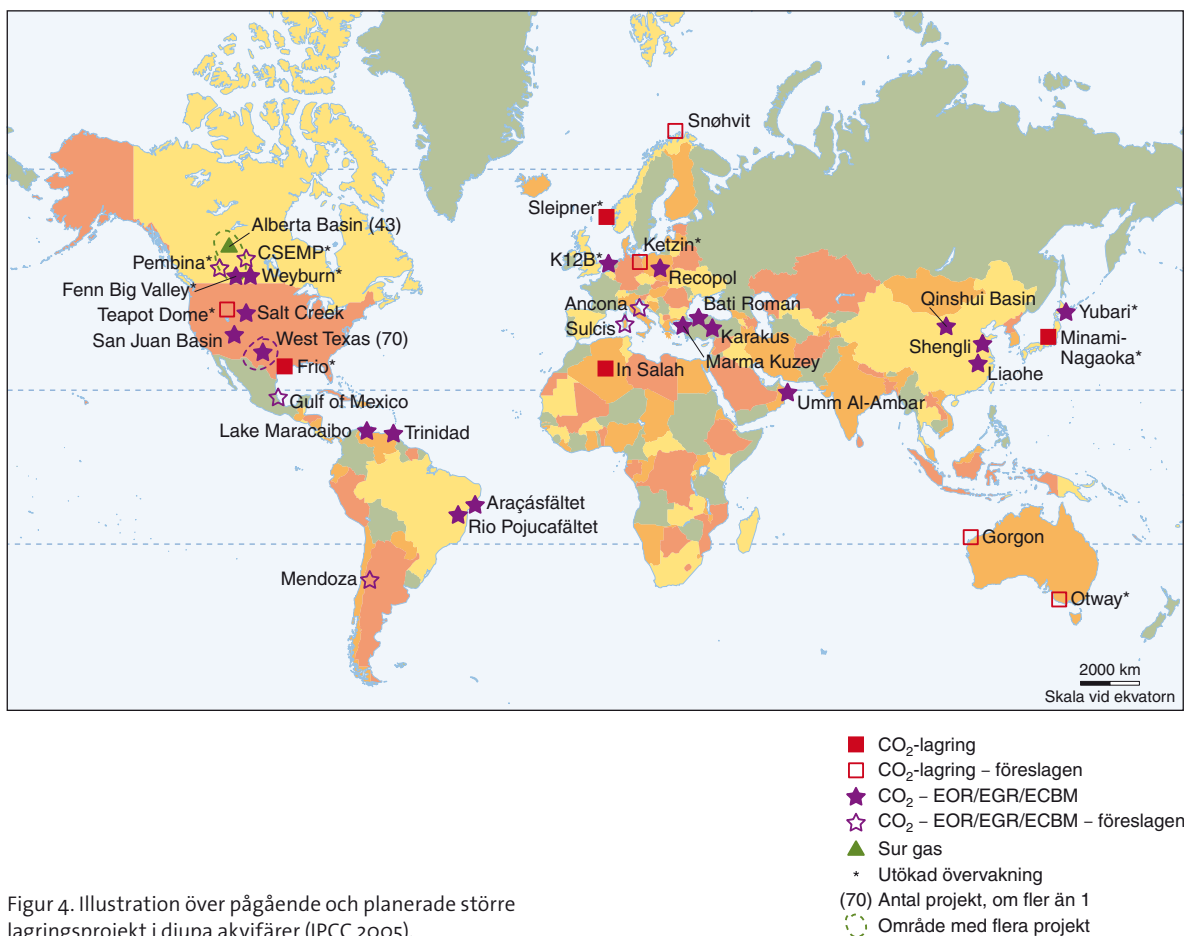
En akvifär definieras som en regionalt utbredd men ändå geometriskt och strukturellt avgränsad berggrundsstruktur som är tillräckligt permeabel för att kunna hålla stora volymer vatten. Akvifärer i sedimentär berggrund kan bestå av olika led, vilka i sin tur utgör litostratigrafiska delar av en formation.

Med djupa akvifärer menas sådana akvifärer som förekommer på tillräckligt stora djup för att möjliggöra lagring av koldioxid i superkritiskt tillstånd. I vissa sammanhang används även termen djupakvifär. Koldioxid övergår från gasfas till superkritiskt tillstånd när temperatur och tryck överstiger 31,1 °C vid 73,9 bar. Vid normala tryck och temperaturförhållanden i berggrunden betyder det att akvifären bör ligga på minst 800 m djup. Akvifärer på detta djup innehåller fossilt eller relict vatten vilket är grundvatten som varit instängt i akvifären under tusentals eller miljontals år. Fossilt grundvatten har ofta mycket höga salthalter. Salthalten i det fossila grundvattnet på 1000 m djup är normalt ca 10 %. Förutom salter kan ett fossilt grundvatten innehålla höga halter av t.ex. järn, svavel och mangan.

Man skiljer på sprick- och porakvifärer. I en sprickakvifär förekommer grundvattnet i sprickor och krosszoner medan det i en porakvifär är magasinerat i bergartens porer. En porakvifär (t.ex. sandsten) har generellt en mycket högre magasineringspotential än en sprickakvifär (t.ex. granit). Vanligtvis har sandstensakvifärer en porositet mellan 10 och 30 % medan en sprickig granit oftast har en porositet på bara någon procent.

Akvifärer kan antingen vara öppna eller slutna. I en sluten akvifär är grundvattnet, till skillnad från i en öppen akvifär, isolerat från omgivningen, dvs. det saknar kommunikation med andra akvifärer eller atmosfären och havet. Om en lagringsakvifär är sluten eller öppen har stor betydelse för vilka gränseffekter som uppstår när koldioxid förs in i akvifären och trycker undan befintligt porvatten. Är akvifären sluten (begränsad i sin utbredning) blir följden vid injektering att ett övertryck byggs upp genom att undanträngt porvatten endast kan förflytta sig till en viss gräns som bestäms av kompressibiliteten i vattnet och bergartens hållfasthet. Lagringspotentialen är i dessa fall mycket beroende av storleken på den slutna akvifären och vilka övertryck som akvifären och överlagrande takberg tål.

I öppna system är det lättare att injektera koldioxid eftersom mottrycket blir lägre. Det är dock större risk att det uppstår problem med att undanträngt fossilt grundvatten tränger upp och kontaminerar ytligare lager eller dricksvattenmagasin. Många slutna strukturer innehåller förutom fossilt grundvatten ofta även olja och gas. I de fall där oljan eller gasen har utvunnits har ett undertryck skapats



Figur 4. Illustration över pågående och planerade större lagringsprojekt i djupa akvifärer (IPCC 2005).

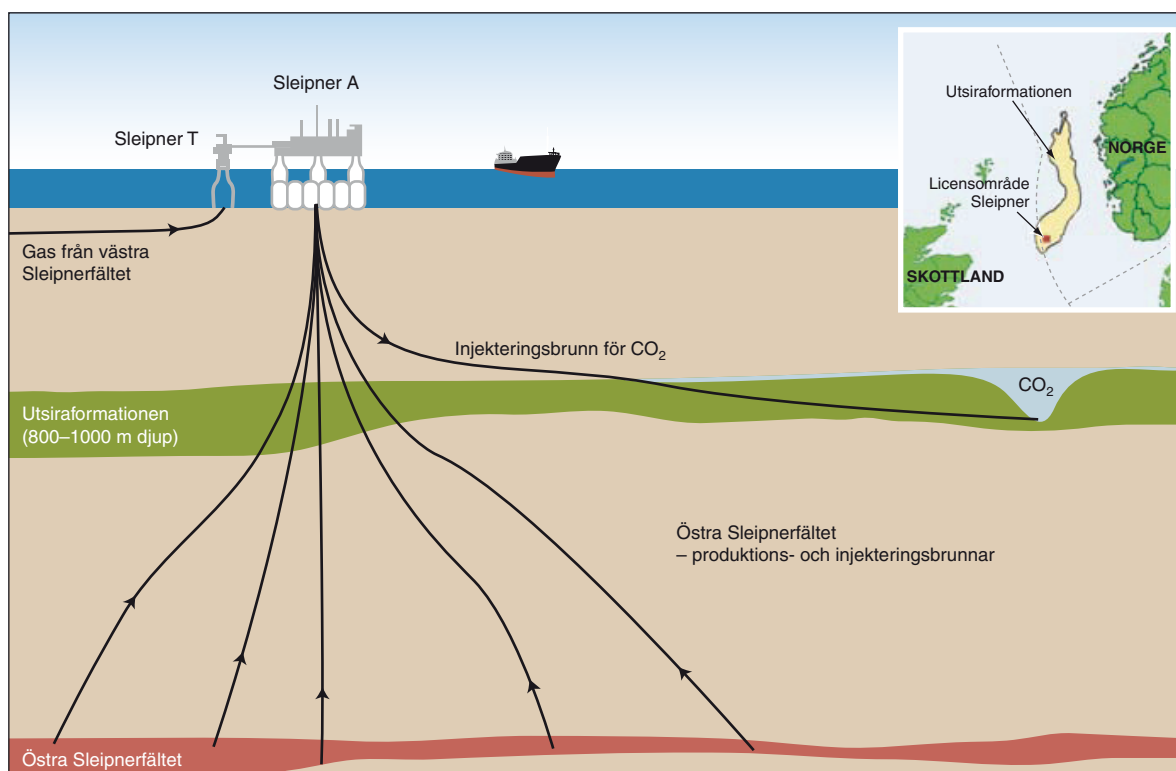
i akvifären vilket medför att större mängder koldioxid kan injekteras jämfört med en ostörd sluten grundvattenakvifär. Av de alternativ för geologisk lagring av koldioxid som utvärderats bedöms lagring i djupa sandstensakvifärer samt olje- och gasfält i sedimentär berggrund (t.ex. sandsten och kalksten) ha den största potentialen. Bedömningen baseras framför allt på akvifärernas tjocklek, utbredning och porositet samt att de ofta förekommer i nära anslutning till utsläppskällorna.

Globalt bedöms djupa akvifärer ha en total potential att kunna ta emot mer än 1 000 miljarder ton koldioxid. Tillsammans med lagring i tömda gas- och oljefält finns globalt en total bedömd lagringskapacitet på mer än 1 900 miljarder ton koldioxid i denna typ av berggrund. Som jämförelse kan nämnas att vid en global introduktion av CCS bedömdes att ett par miljarder ton koldioxid behöver lagras årligen (Gielen 2003). De energirelaterade utsläppen av koldioxid uppgick till 13,0 miljarder ton inom OECD-länderna år 2006 (IEA 2008). Den verkliga potentialen för CCS är mer en fråga om ekonomi, allmänhetens acceptans och lokala förutsättningar (dvs. lagringskapacitet inom rimligt avstånd från utsläppskällan) än den globala geologiska lagringspotentialen som snarare är en vetenskapligt beräknad maximal lagringsvolym.

### Pågående försök med injektering av koldioxid

I samband med utvinning av olja och gas har ett antal projekt initierats som går ut på att samtidigt lagra koldioxid i den producerande reservoaren. Hittills har i storleksordningen 40 miljoner ton koldioxid injekterats och lagrats i samband med olje- och gasutvinning. På årsbasis injekteras ca 4 miljoner ton koldioxid i olika saltvattenförande akvifärer. I världen pågår sammantaget ett fyrtiotal projekt med lagring av koldioxid varav ca 15 är i djupa akvifärer (fig. 4).





Figur 5. Schematisk skiss av projektet i Sleipnerfältet (Zweigel m.fl. 2004).

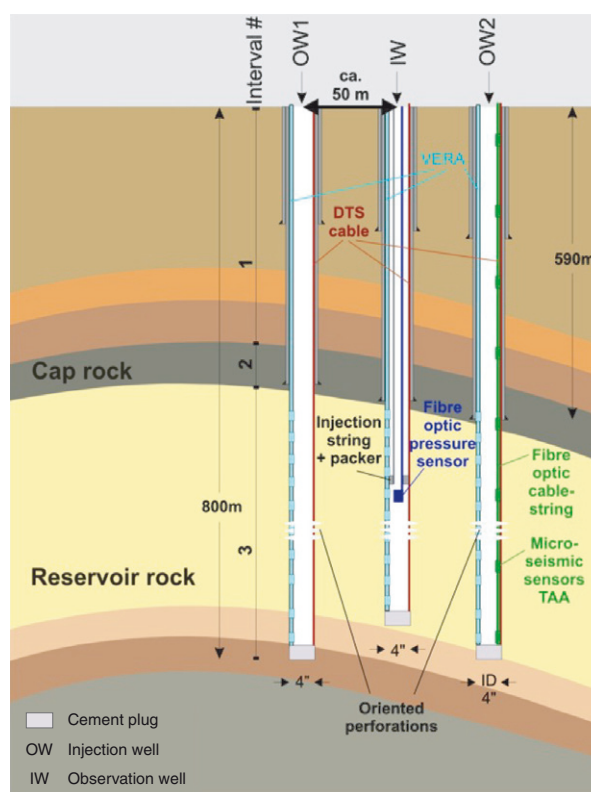
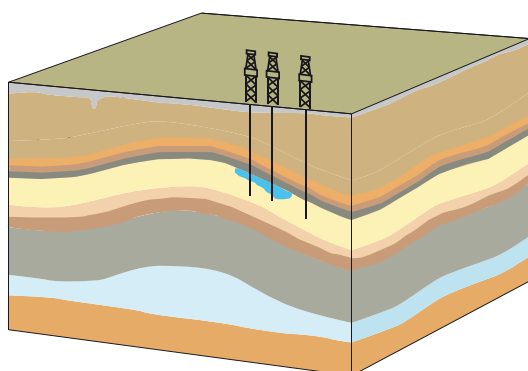
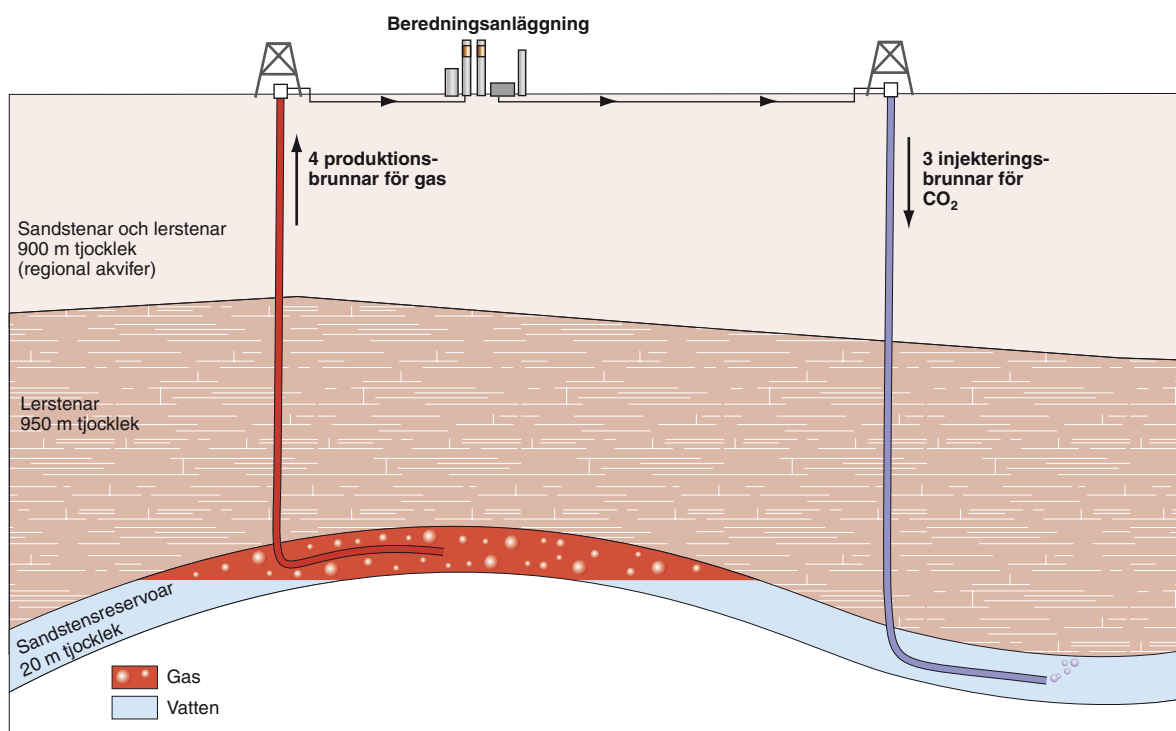
Ett av de större CCS-projekten i en saltvattenakvifär där lagring av avskild koldioxid i samband med naturgasproduktion pågår är i Sleipnerfältet i Nordsjön ([www.statoil.com](http://www.statoil.com), [www.iku.sintef.no/projects/IK23430000](http://www.iku.sintef.no/projects/IK23430000), fig. 5). Naturgasen i fältet innehåller relativt höga halter koldioxid (5–10 %). Gasen måste renas (uppgraderas) från koldioxid av såväl transportekonomiska som förbränningstekniska skäl. Utan avskiljning och injektering skulle stora mängder koldioxid ha släppts ut i atmosfären. I Sleipnerfältet har hittills ca 10 miljoner ton koldioxid avskiljts och återinjekterats. Lagring av koldioxid sker i en 50–250 m tjock saltvattenförande sandstensformation på 800–1000 m djup där temperaturen är ca 37 °C och formationstrycket 110 bar. Sandstenen har en mycket stor utbredning (400 × 70 km). I samband med exploateringen av nya naturgasfält, bl.a. ett i norra Nordsjön (Snövit) och ett utanför Australiens västkust (Gorgon), kommer avskild koldioxid att återföras till berggrunden på ett likartat sätt som i Sleipnerfältet. Ett annat exempel där avskild koldioxid återinjekterats i formationen är In Salah i Algeriet (fig. 6).

Ett exempel på där injektering av koldioxid kan öka utbytet av utvunna kolväten i en specifik geologisk formation (*Enhanced Hydrocarbon Recovery*, EHR) är Weyburnprojektet i Canada ([www.ieagreen.org.uk/weyburn1.htm](http://www.ieagreen.org.uk/weyburn1.htm)). Här bedöms att uppemot 20 miljoner ton koldioxid kan lagras samtidigt som utbytet av kolväten ökar med 25–35 %.

I Ketzin utanför Berlin (fig. 7) pågår ett pilotprojekt, CO<sub>2</sub>SINK, med injektering och lagring av uppemot 60 000 ton koldioxid i en ca 30 m tjock sandsten i en domliknande struktur på ca 600 m djup. Koldioxid injekteras med övertryck vilket gör att den, trots att djupet är mindre än vad som normalt krävs, befinner sig i superkritiskt tillstånd och inte i gasform på detta djup. Övertrycket överstiger dock inte det gränstryck som formationen tål. En kort sammanställning av några olika projekt ges i tabell 1.

### Koldioxidens egenskaper i djupa akvifärer

Koldioxidens fysikaliska och kemiska egenskaper varierar med tryck och temperatur. Under normala förhållanden är koldioxid en luktfri och färglös gas som inte är speciellt reaktiv med andra föreningar.



## CO2SINK-projektet i Ketzin

Figur 7. Schematisk skiss av pilotprojektet i Ketzin ([www.co2sink.org](http://www.co2sink.org)).

Tabell 1. Sammanställning av några större lagringsprojekt i djupa akvifärer.

| Projekt                          | Typ av lager (typ av koldioxid)                                                               | Mängd injekterad koldioxid (2010)                  |
|----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| Sleipner, Nordsjön, 1996–        | Sandstensakvifär, 50–250 m tjock på 800–1000 m djup (koldioxid från naturgasproduktion)       | 1 Mt/år, totalt 10 Mt                              |
| Snövit, Nordsjön, 2007–          | Gasfält och sandstensakvifär (koldioxid från naturgasproduktion)                              | 0,75 Mt/år                                         |
| In Salah, Algeriet, 2004–        | Tömt gasfält                                                                                  | 1 Mt/år                                            |
| Gorgon, Australien, 2008–        | Saltvattenakvifär, på ca 2500 m djup, antiklinal struktur (koldioxid från naturgasproduktion) | Totalt 129 Mt (planerat)                           |
| Frio Brine, USA, 2005–2006       | Saltvattenakvifär, Frio C-sandsten, ca 20 m tjock på ca 1700 m djup                           | 3 000 ton                                          |
| Nagoaka, Japan (RITE), 2004–2005 | Saltvattenakvifär                                                                             | 10 000 ton                                         |
| Ketzin, Tyskland, 2006–          | Saltvattenakvifär                                                                             | 60 Kt (planerat), 37 Kt injekterat t.o.m. dec 2010 |

Tabell 2. Sammanställning av några nyckelvärden för koldioxidens egenskaper.

| Egenskap                       | Värde                     | Anm                                                                                   |
|--------------------------------|---------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Kritisk temperatur             | 31,1 °C                   |                                                                                       |
| Kritiskt tryck                 | 73,9 bar                  |                                                                                       |
| Viskositet scCO <sub>2</sub> * | 0,025 centipoise          | 80 bar, 40 °C, jfr vatten 0,64 centipoise vid 0 % NaCl, 0,91 centipoise vid 16 % NaCl |
| Densitet                       | 600–700 kg/m <sup>3</sup> | 1000–2500 m djup                                                                      |
| Löslighet i vatten             | 2 000 mg/l 15 °C          |                                                                                       |

\*) sc: superkritiskt tillstånd

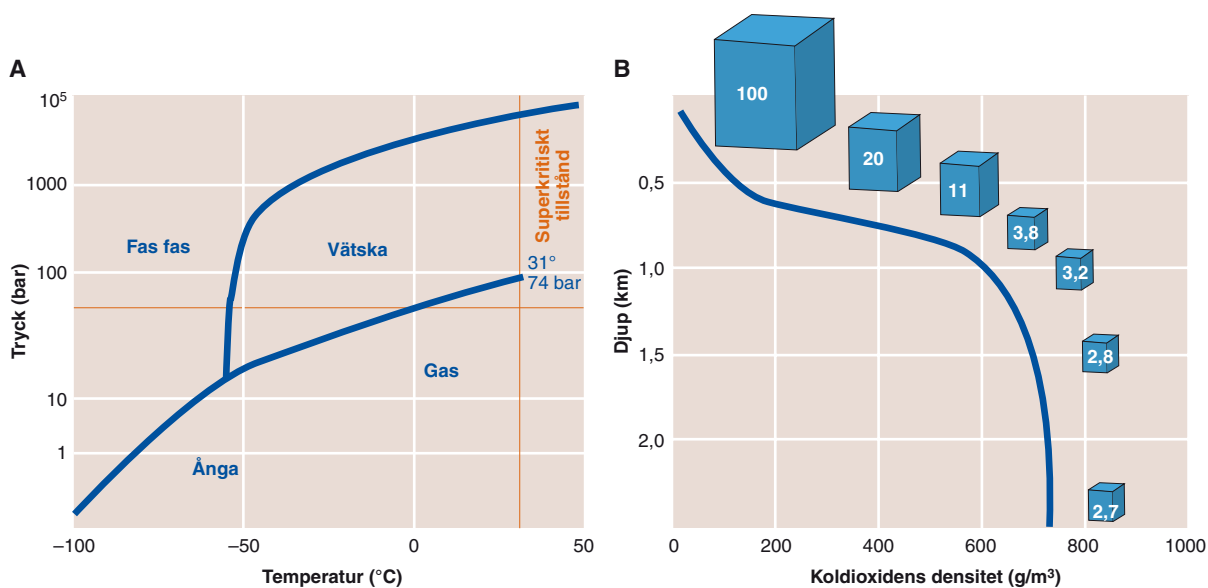
Normal koncentration i vår atmosfär är idag ca 375 ppm. Koldioxid är en växthusgas som bildas vid i stort sett all förbränning av kolföreningar i syre. Därigenom är den en av de största bidragsgivarna till växthuseffekten. Koncentrationen av koldioxid i atmosfären har ökat med 35 % jämfört med mitten av 1800-talet. I tabell 2 anges några värden för koldioxidens egenskaper.

## Geokemiska förhållanden

Koldioxid har hög löslighet i vatten. Vid ökat tryck ökar generellt lösligheten medan den minskar med ökad temperatur och salthalt. Exempelvis är lösligheten i vatten med en salthalt på 15 % (jämförbart med formationsvatten på ca 1500 m djup) endast en tredjedel av vad den är i färskvatten. Beroende på tryck, salthalt och temperatur kan mellan 20 och 60 kg koldioxid lösas i 1 m<sup>3</sup> formationsvatten. När koldioxid löses i formationsvattnet bildas en syra som sänker pH-värdet vilket kan leda till att metaller frigörs när mineralerna påverkas av det sura vattnet. En annan effekt är korrosion på metaller och cement i de brunnar som installerats för injektering. Densiteten för koldioxidmättat formationsvatten är något högre än formationsvatten utan koldioxid vilket medför att det sjunker mot akvifärens botten.

Vid normala tryck- och temperaturförhållanden uppträder koldioxiden i gasfas. Med ökat tryck och ökad temperatur förändras dess egenskaper (fig. 8). Vid 73,9 bars tryck och en temperatur på 31,1 °C övergår koldioxiden i superkritiskt tillstånd. Vid lagring i djupa akvifärer på mer än 800 m djup är koldioxid i superkritiskt tillstånd p.g.a. rådande förhållanden på dessa djup, densiteten är då ca 600 kg/m<sup>3</sup>.

Den kemiska sammansättningen av bergarter och formationsvätska är avgörande för hur koldioxiden kommer att reagera i en lagringsakvifär. Eftersom förhållandena varierar kraftigt mellan olika akvifärer är det helt platsspecifika förhållanden som avgör vilka reaktioner och kemiska förlopp som kommer att dominera. SACS-projektet (se sid. 15) poängterar vikten av referensdata, det vill säga beskrivning av ursprunglig kemisk sammansättning i akvifären samt tryck- och temperaturdata. Detta är nödvändigt för att kunna förutsäga de kemiska och fysikaliska processer som kommer att ske vid en eventuell injektering av koldioxid.



Figur 8. **A.** Fasdiagram med avseende på tryck och temperatur. **B.** Volym och densitetsförändring i förhållande till djup (indirekt tryck och temperatur, IPCC 2005).

## Bindning av koldioxid i akvifären

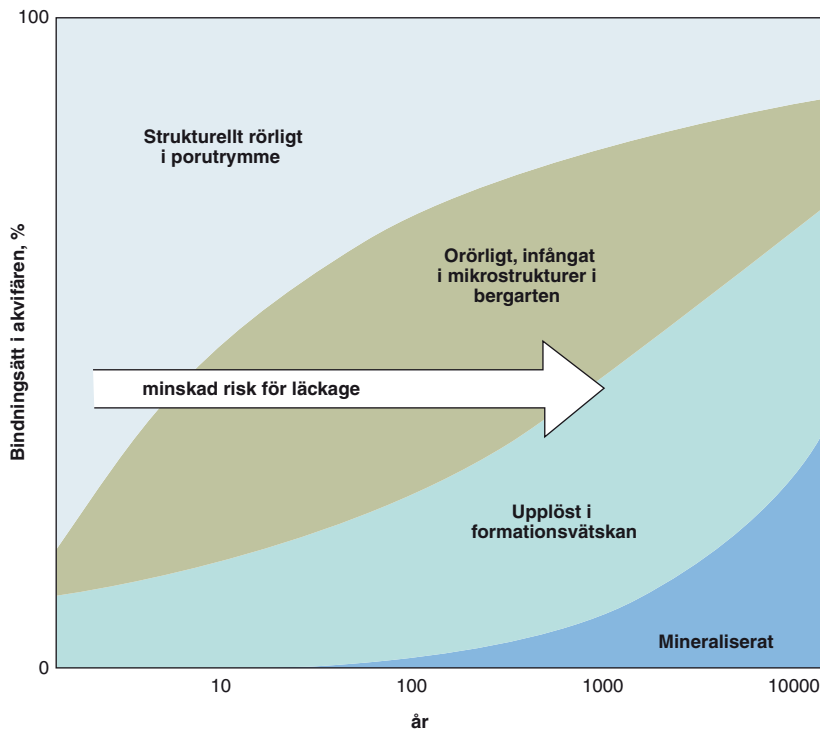
Koldioxid som injekteras i en geologisk formation och befinner sig i superkritiskt tillstånd kan bindas i akvifären på fyra olika sätt. Dessa varierar över tid och förekommer samtidigt i olika omfattning (fig. 9):

1. Ansamling i porutrymmen. Eftersom injekterad superkritisk koldioxid är 30–50 % lättare än formationsvattnet stiger det uppåt, tränger undan formationsvattnet och ansamlas i de högsta delarna av formationen närmast under takbergarten (*structural and stratigraphic trapping*). Denna process är relativt snabb och dominerar den första lagringsfasen. En stor andel koldioxid binds även kapillärt längre ner i formationen när kapillärkraften överstiger stigförmågan (*residual trapping*).
2. Successivt löser sig koldioxiden i formationsvattnet (*solubility trapping*) som då ökar i densitet (ca 1 %) vilket gör att det sker en långsam förflyttning av koldioxidmättat formationsvatten nedåt i formationen. Detta kan med tiden resultera i konvektionsrörelser av vatten med olika densitet inuti akvifären. Ungefär 20–60 kg koldioxid kan lösas i 1 m<sup>3</sup> formationsvatten beroende på tryck och salinitet. På 100 år kan uppemot 20–30 % av den ursprungliga mängden lagrad koldioxid ha lösts upp i formationsvattnet.
3. Koldioxiden reagerar med akvifärbergartens mineral (*mineral trapping*). I synnerhet silikater med hög halt av kalcium, magnesium och järn reagerar med koldioxid och nybildar olika karbonater. Sandstenar som innehåller glaukonit, klorit och kalciumrika fältspater som innehåller små mängder karbonat är mest gynnsamma i den här processen. Reaktionerna är mycket långsamma och först i hundraårsperspektiv är andelen mineralbunden koldioxid att räkna med.
4. Adsorption på kolpartiklar och organiskt material.

## FÖRUTSÄTTNINGAR FÖR LAGRING AV KOLDIOXID I DJUPA AKVIFÄRER

### Generella geologiska krav och förutsättningar

Ett grundläggande krav för koldioxidlagring i djupa akvifärer är en porös och permeabel (genomsläpplig) berggrund. Bäst lämpade är sandstensformationer ner till ca 2500 m djup. Därunder är



Figur 9. Förhållandet mellan olika typer av koldioxid i en akvifär och deras inbördes förändring med tiden (IPCC 2005).

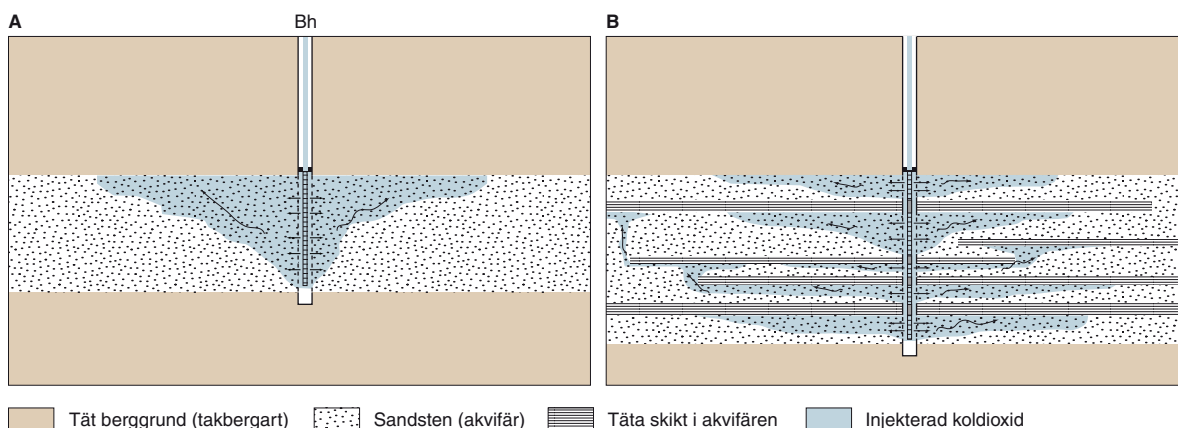
sandstenslagren i allmänhet för täta på grund av tryckförhållandet i berggrunden. Förutom en djupt liggande porös och permeabel berggrund är en tät överlagrande berggrund, en takbergart, nödvändig. Saknas denna finns inget som hindrar koldioxiden från att ta sig upp till markytan. Det finns ett antal egenskaper som ska uppfyllas för att lagringsformationen (akvifären) och överlagrande täta formationer ska kunna klassificeras som lämpliga för lagring av koldioxid. Dessa kan delas in i:

1. Akvifärens och takbergartens geometriska och strukturella egenskaper som innefattar utbredning, tjocklek och begränsningar samt vertikal och horisontell uppbyggnad.
2. Fysikaliska egenskaper innefattande porositet, permeabilitet, kapillärtryck och formationstryck.
3. Kemiska egenskaper och mineralogisk uppbyggnad (formationsvatten och bergarter).

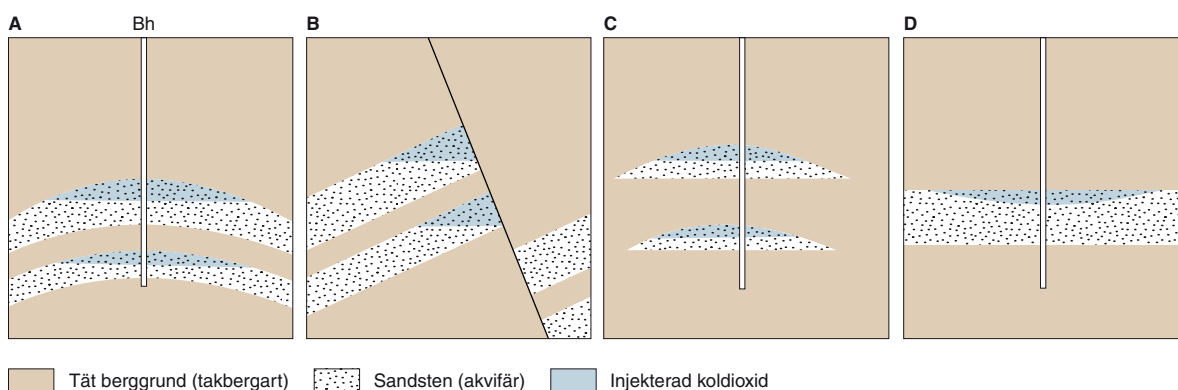
### Geometriska och strukturella krav

En djup akvifär kan definieras som en geologisk formation med hög porositet och permeabilitet och som innehåller fossilt grundvatten. Djupt liggande porösa sandstenslager med en tjocklek på minst 10 m anses som de mest intressanta alternativen för lagring. Det är vanligt att flera lager med sandsten som kan vara intressanta för koldioxidlagring förekommer inom ett specifikt djupintervall i berggrunden. Tillsammans med mellanliggande lager av andra bergarter (exempelvis lersten, skiffer och kalksten) bildar de ofta vad som geologiskt benämns en formation. Denna är definierad i sin helhet som en samling av bergartslager med likartade fysikaliska egenskaper, bergartsfördelning och bildningsförhållanden. Formationernas tjocklek är oftast betydande och flera nivåer (lager) kan vara lämpliga för lagring, exempelvis är Utsiraformationen i Nordsjön uppemot 250 m tjock. Likaså är sandstensformationen som används för naturgaslagring i Stenlille på Själland flera hundra meter tjock och uppdelad i flera sandstenslager med mellanliggande tätare bergarter.

En homogen formation med få sandstenslager med sammanlagd tillräcklig tjocklek och homogen uppbyggnad (såväl vertikal som lateral) är fördelaktigast för lagring. Detta beror på att det blir en



Figur 10. Schematisk skiss som visar hur injekterad koldioxid kan fördela sig i två olika sandstensformationer. **A.** Sandstensformation bestående av ett sandstenslager med homogen porositet och permeabilitet. **B.** Sandstensformation med flera sandstenslager åtskilda av tätare bergarter med varierande lateral utbredning.



Figur 11. Exempel på olika typer av slutna akvifärer som omges av täta bergarter. **A.** Antiklinal dom. **B.** Förkastningsbegränsad struktur. **C.** Stratigrafiskt begränsad struktur. **D.** Horisontell akvifär.

mer homogen strömningsbild kring injekteringsbrunnen och fördelningen av koldioxiden är mer förutsägbar (fig. 10a). Den injekterade koldioxiden stannar inom ett begränsat område på grund av att superkritisk koldioxid är lättare än formationsvatten och därmed relativt snabbt förflyttar sig uppåt i formationen (sandstensakvifären) tills den når takbergarten. En homogent uppbyggd lagringsformation möjliggör också en bättre övervakning av den lagrade koldioxiden.

Ett koldioxidlager fördelat på flera sandstensnivåer inom samma formation bedöms ge en mer heterogen fördelning av den lagrade koldioxiden och därigenom sämre möjlighet till övervakning. Den injekterade koldioxiden migrerar ut i de olika sandstenslagren och förflyttar sig längre från brunnen jämfört med i en tjockare och homogenare formation utan några större variationer i vertikal permeabilitet (fig. 10b). Andelen koldioxid som binds mikrostrukturellt anses däremot vara något högre vid lagring på flera nivåer.

Lagring i slutna strukturer ger bäst kontroll av koldioxidens utbredning. En sådan struktur kan utgöras av antiklinala, förkastningsavgränsade eller stratigrafiska strukturer (fig. 11a–c). De sistnämnda kan utgöras av isolerade porösa sandlinser (akvifärer) omgivna av täta bergarter, exempelvis lersten.

Helt slutna akvifärer är ovanliga. Däremot finns det stora områden med mer eller mindre horisontellt liggande djupa akvifärer (fig. 11d). Dessa har med ökad kunskap om koldioxidlagring trots allt bedömts som lämpliga lagringsplatser, speciellt i de fall de har en större utbredning och där koldioxiden injekteras centralt i akvifären, långt från dess gränser. Ett exempel på horisontellt liggande djupa

akvifärer är Utsiraformationen i Sleipnerfältet i Nordsjön (fig. 5). Försöken med lagring i Sleipnerfältet har påvisat att koldioxiden stannar inom en relativt begränsad del av akvifären i nära anslutning till injekteringsbrunnen. Utbredningen av injekterad koldioxid (hittills ca 10 miljoner ton koldioxid) i Utsiraformationen är i storleksordningen 5 km<sup>2</sup>.

Förutom akvifärens strukturella egenskaper måste överlagrande berggrund vara tillräckligt tät för att undvika läckage av lagrad koldioxid. En typisk takbergart består oftast av lera, lersten, lerskiffer eller lerig kalksten. En takbergarts huvudegenskaper är att vara tät, homogen och tillräckligt tjock för att undvika kapillär migration samt läckage via förändringar av bergartens homogenitet eller sprickor och förkastningar. En takbergart kan vara tät men spröd vilket gör att sprickor sannolikt är vanligt förekommande. Sprickor i karbonathaltiga takbergarter kan också vara mer benägna att vidgas på grund av kemisk upplösning av berggrunden (koldioxid löser upp karbonater) och därigenom leda till migration av koldioxid. En semiplastisk lera eller lersten är den bästa typen av takbergart eftersom sådana lager har en förmåga att vara självläkande, dvs. sprickor och förkastningar återsluts av den semiplastiska leran.

### **Spridning av koldioxid i lagret**

Koldioxid söker sig uppåt i akvifären och ackumuleras i dess övre del. Har akvifären en domformad övre del blir utbredningen i horisontalled liten. Är akvifären däremot horisontell i sin övre del kan spridningen bli omfattande. Transport av koldioxid i akvifären uppstår antingen på grund av att akvifärens övre del lutar och koldioxiden söker sig uppåt, eller på grund av att formationsvätskan rör sig.

### **Övervakning av koldioxidspridning**

Det pågår en kontinuerlig utveckling av olika geofysiska metoder för att övervaka koldioxidspridning (se t.ex. Sayers & Wilson 2010). Vanligast är att använda någon typ av seismisk mätning, men övervakning kan även utföras t.ex. genom mätning av tyngdkraft eller elektrisk ledningsförmåga. Valet av övervakningsmetod är till stor del en kostnadsfråga, men styrs även av andra faktorer, exempelvis tillgång till borrhål.

Genom seismiska mätningar har SACS-projektet (se sid. 15) lyckats mycket väl i sin strävan att övervaka koldioxidens spridning i akvifären. Spridning av koldioxid i superkritiskt tillstånd i metertjocka skikt har kunnat följas med seismiska mätningar. Normalt är upplösningen med denna mätmetod ca 10 m. Med denna metod bör spridningen kunna detekteras såväl inom akvifären som uppåt i ytligare skikt. Detta är en mycket väsentlig mätning för att säkerställa att koldioxiden inte sprids oönskat till andra akvifärer eller till markytan.

Att mäta förändringar i tyngdkraften med gravimetriska metoder kan vara en lämplig kompletterande övervakningsmetod till seismik. Metoden kan användas för massa- och volymberäkningar för koldioxid i akvifären, och enligt SACS-projektet skulle den kunna användas som varningssystem, om exempelvis stora mängder koldioxid bryter genom takbergarten, vilket skulle leda till förändringar i tyngdkraftsmönstret. Gravimetriska mätningar utförs normalt på markytan men kan även utföras på havsbotten, vilket exempelvis är fallet vid Sleipnerfältet. Metoden är generellt billig jämfört med andra tillgängliga metoder.

Koldioxidinjektering orsakar förändringar i berggrundens elektriska ledningsförmåga, något som kan mätas med flera olika metoder. I samband med projektet CO<sub>2</sub>SINK användes såväl sensorer i borrhål som på markytan för att kontinuerligt följa den injekterade koldioxidens utbredning. Kostnaden var relativt låg. Det är generellt både lättare och betydligt billigare att genomföra övervakning på land än till havs. Däremot är seismiska mätningar över stora områden till havs billigare att genomföra än motsvarande mätningar på land.

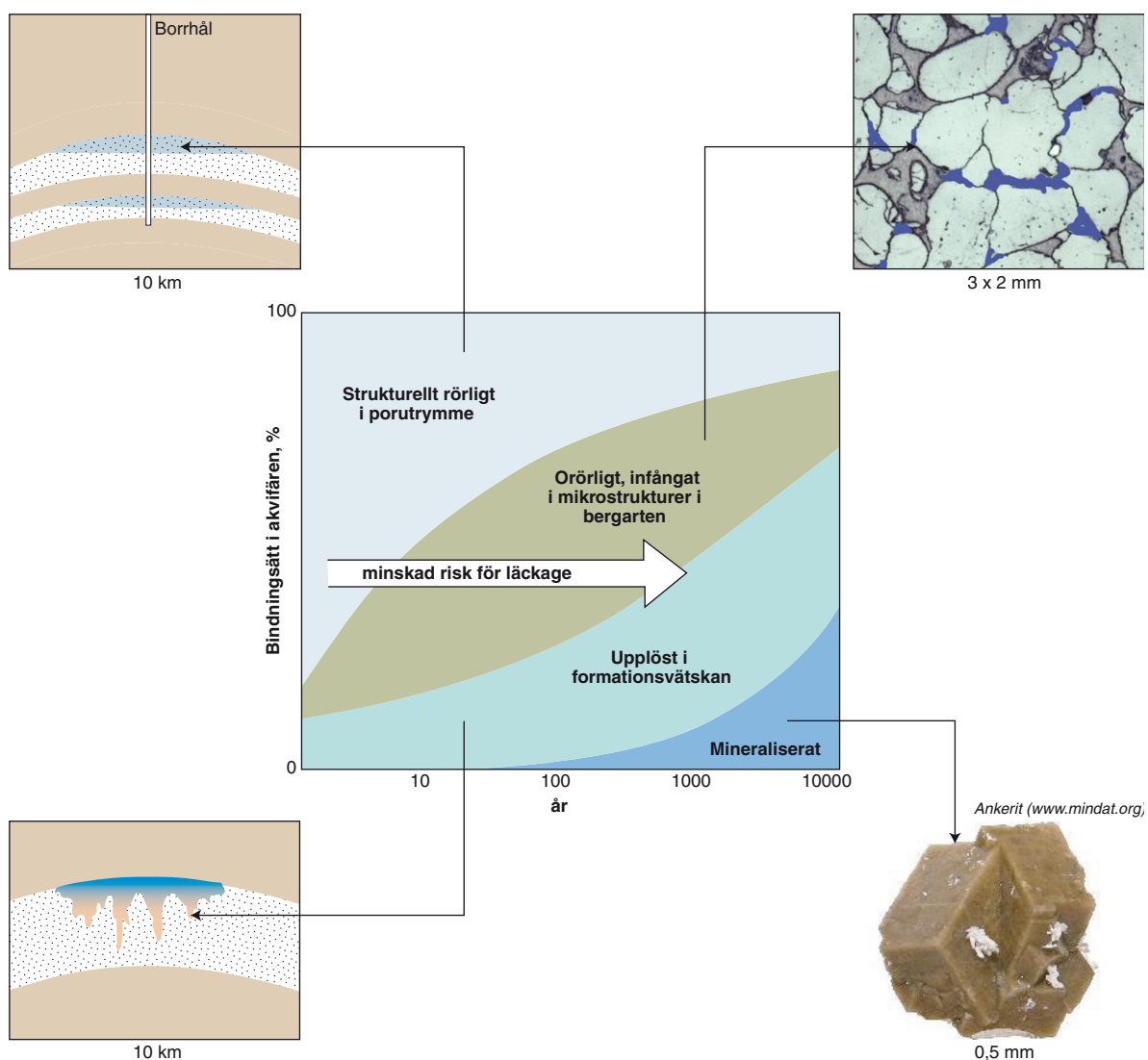


## Avgränsad struktur eller inte

Förutom tidigare angivna parametrar förespråkas idag att lagring bör ske i väl avgränsade strukturer (fällor) i berggrunden. En typisk fälla består av omböjda berggrundslager (akvifärer) som bildar en domformad struktur som överlagras av tät berggrund (takberg).

Motiveringen till att förorda lagring i avgränsade fällor är att dessa gör det möjligt att lättare kontrollera koldioxidens utbredning i akvifären. Eftersom superkritisk koldioxid har en lägre densitet än formationsvätskan i akvifären stiger den initialt uppåt. På lång sikt löses dock allt mer av koldioxiden i formationsvätskan som då blir tyngre och sjunker nedåt i akvifären. Mängden koldioxid i superkritiskt tillstånd under kupolens topp minskar därmed med tiden. Med tiden avtar också den strukturella fällans betydelse när koldioxiden reagerar med berggrunden och mineraliseras i akvifären (fig. 12).

Det finns flera studier (t.ex. Akervoll m.fl. 2006, Fang m.fl. 2010) som pekar på möjligheten till lagring även i lutande öppna akvifärer med en stor regional utbredning (tusentals kvadratkilometer). På grund av lutningen kommer injekterad koldioxid att fördela sig och förflytta sig en längre sträcka i akvifären jämfört med om transporten i huvudsak sker i vertikalled. Detta medför att större andel koldioxid kan



Figur 12. Generell beskrivning av koldioxidens olika bindningssätt över en tidsperiod på 10 000 år. Över tiden kommer allt mer koldioxid att mineraliseras och mängden rörlig koldioxid minskar i porutrymmena.

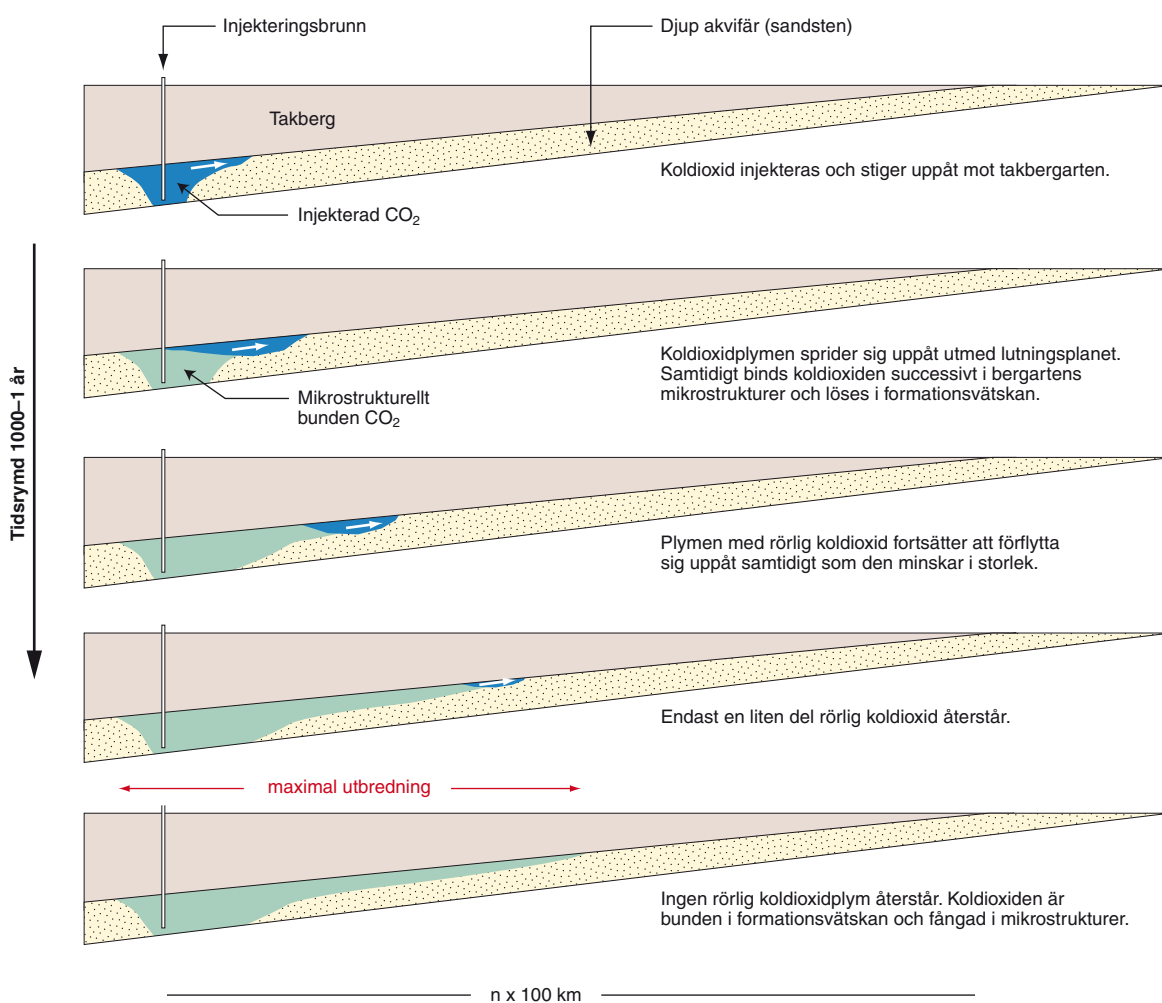
bindas mikrostrukturellt i akvifären jämfört med i en horisontell eller domliknande lagringsakvifär (jfr fig. 12 & 13). En annan fördel är att den vertikala permeabiliteten, som ofta är lägre än den horisontella, inte har lika stor betydelse för koldioxidplymens spridning som vid en strukturell fälla där koldioxiden huvudsakligen stiger vertikalt uppåt (Hesse m.fl. 2006). Koldioxidens maximala utbredning i lutande akvifärer beror främst på lutningsvinkeln och permeabiliteten. Hög permeabilitet och kraftigt lutande lager gör att koldioxidplymen rör sig en längre sträcka än under motsatta förhållanden.

För beräkning av koldioxidens maximala utbredning i en lutande akvifär krävs fyrdimensionella modeller som beskriver spridnings- och bindningsförlopp (fig. 13).

## Översikt över berggrundens lämplighet i Sverige

Geologisk lagring av koldioxid kräver att berggrunden är porös och permeabel för att stora volymer med koldioxid ska kunna lagras. Den svenska berggrundens uppbyggnad medför att det finns begränsade möjligheter till geologisk lagring utifrån de lagringsalternativ som diskuterats. I tabell 3 ges en sammanställning av de olika geologiska lagringsalternativ som finns omnämnda i litteraturen och vilka möjligheter som finns i Sverige. Sveriges berggrundsgelogiska uppbyggnad beskrivs kortfattat i faktarutan på nästa sida.

Lagringspotentialen i det svenska urberget bedöms som i stort sett obefintlig utifrån de krav på kapacitet, täthet och djup som föreligger. Inte heller finns förutsättningar för lagring i saltdomer, gruvor



Figur 13. Schematisk illustration av spridningsförloppet vid injektering och lagring av koldioxid i en lutande akvifär.

eller djupa kollager. Förutsättningar för EHR (*Enhanced Hydrocarbon Recovery*) finns inte i Sverige eftersom vi inte har några aktiva gas- eller oljefält. Det är dock möjligt att det i bl.a. södra Östersjön finns fyndigheter på svenskt territorium som skulle kunna kombineras med EHR-teknik i framtiden.

För svenskt vidkommande återstår därför endast möjligheten att lagra koldioxid i någon av de förekommande djupa akvifärer som finns i södra Östersjön och i sydvästra Skåne samt ev. södra Kattegatt.

På följande sidor ges en översiktlig presentation av de olika berggrundsområden (fig. 14) som i den här utredningen ingått i bedömningen av möjligheten till geologisk lagring av koldioxid i Sverige. För en del av områdena ges en mer detaljerad beskrivning i bilageavsnitten. En sammanställning av bedömningarna och en återkoppling till börkraven presenterade i bilaga 7 ges i tabell 4. Bedömningarna i det följande är gjorda efter dagens kunskapsläge.

## Område 1. Fjällkedjan

Den sedimentära berggrunden i fjällkedjan består av bl.a. kambriska, ordoviciska och siluriska kalkstenar, sandstenar och skifferar (tabell 5) som är mer eller mindre påverkade av tektoniska bergskedjebildningsprocesser. Av denna anledning är bergarterna i många fall kraftigt omvandlade, vilket resulterat

Tabell 3. Sammanställning av olika geologiska lagringsalternativ och möjligheter i Sverige.

| Geologisk lagringsmetod                              | Möjlighet i Sverige                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Mineralisering i basalt                              | Det finns inte tillräckligt stora områden med lämplig basalt som ligger tillräckligt djupt och som har en lämplig takbergart.                                                                                                                                                       |
| Lagring i uppsprucken kristallin berggrund           | Områden med kraftigt uppsprucken kristallin berggrund finns på flera platser men då utan takbergart som garanterar säker lagring. Sprickvolymen i uppspruckna impaktstrukturer med takbergart är troligtvis för liten för att klara kapacitetskraven.                               |
| Gamla gruvor                                         | Gruvor går inte tillräckligt djupt för att koldioxid ska kunna lagras i superkritiskt tillstånd. Dessutom bedöms lagringen som mycket osäkert p.g.a. risken för läckage genom schakt och för att det saknas tillförlitligt täta takbergarter.                                       |
| Injektering av koldioxid i djupt liggande kolflötsar | Enstaka kollager finns på lämpligt djup i sydvästra Skåne men de är för tunna för att vara lämpliga.                                                                                                                                                                                |
| Lagring i saltdomer                                  | Inga saltdomar finns i Sverige.                                                                                                                                                                                                                                                     |
| EHR (se sid. 11)                                     | Ingen potential eftersom det inte föregår någon gas- eller oljeutvinning i Sverige.                                                                                                                                                                                                 |
| Djupa akvifärer                                      | I södra Östersjön, sydvästra Skåne och södra Kattegatt finns sedimentär berggrund med akvifärer och takbergarter på lämpligt djup. Väl markerade slutna strukturer som tillåter tillräckligt stora lagringsvolymerna saknas dock i Sverige. Lagring i utbredda akvifärer är möjlig. |

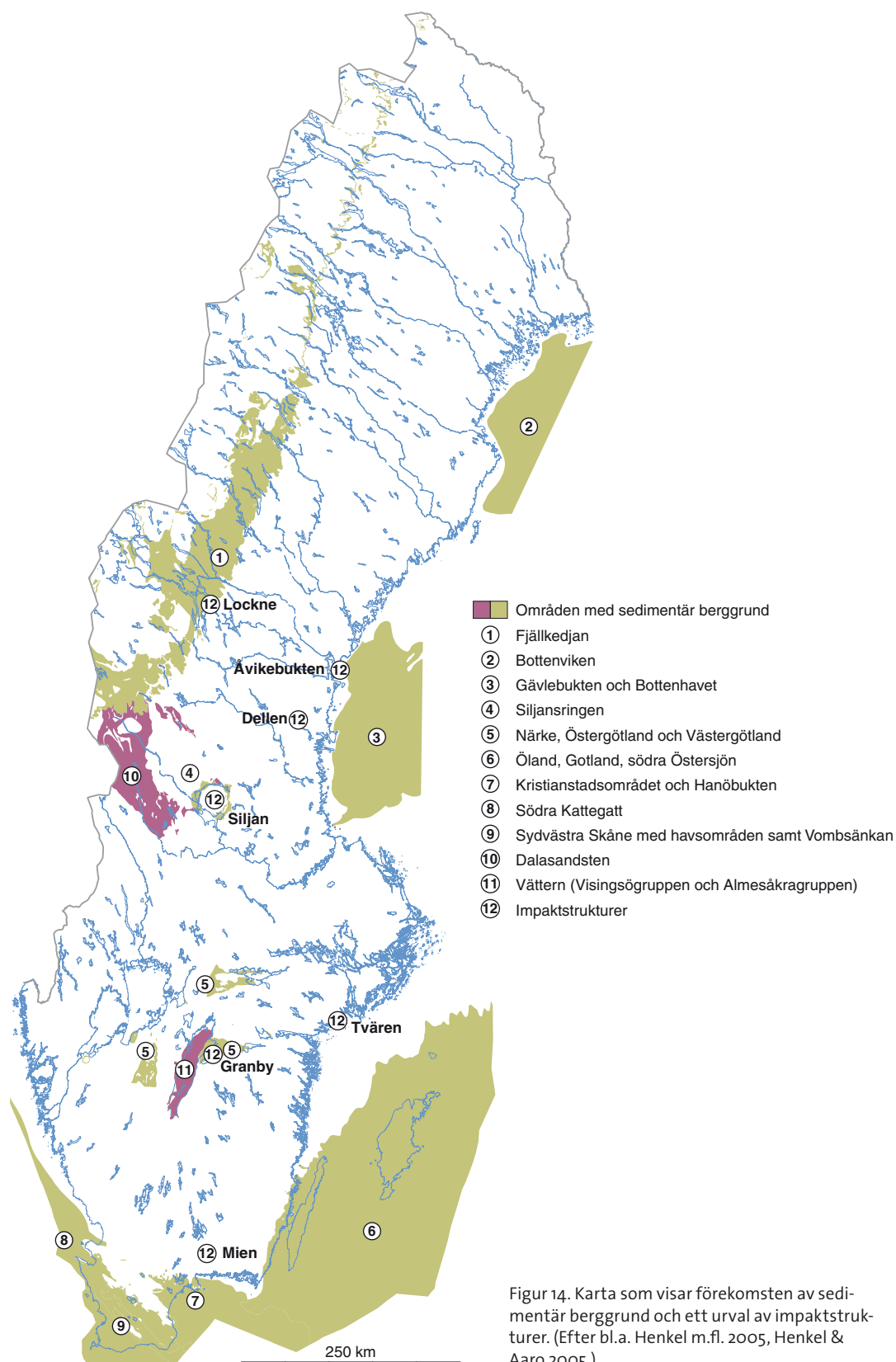
### Sveriges berggrund

Sveriges berggrund kan grovt delas in i tre delar: urberget, fanerozoiska sedimentära bergarter och fjällberggrunden. Det svenska urberget är en del av den fennoskandiska urbergsskölden. Den består främst av kristallina och metamorft omvandlade bergarter som är äldre än ca 542 miljoner år.

De äldsta bergarterna i Sverige är arkeiska och har en ålder som varierar mellan ca 2 800 och 2 600 miljoner år. Dessa bergarter förekommer i begränsad omfattning i nordligaste Sverige.

I övriga delar av norra, östra och sydöstra Sverige har urberget en ålder som oftast varierar mellan ca 2 000 och 1 650 miljoner år. Berggrunden i sydvästra Sverige är mellan 1 700 och 1 550 miljoner år gammal och har i ett senare skede omvandlats under den svekonorvegiska bergskedjebildningen för ca 1 100–900 miljoner år sedan. I södra Västsverige och Blekinge finns även spår av omfattande omvandlingar av berggrunden för omkring 1 450–1 400 miljoner år sedan.

På urbergsskölden förekommer fanerozoiska sedimentära bergarter som är yngre än ca 542 miljoner år. Dessa täcker idag urberget i stora delar av Skåne, Öland och Gotland, Östgöta- och Närke-slätten och Västgötabergen samt trakten kring Siljan i Dalarna och längs fjällranden. Bergarterna i fjällkedjan bildades i samband med den kaledonska bergskedjebildningen och är som yngst 420 miljoner år. De yngsta sedimentära bergarterna i Sverige utgörs av paleogena, ca 55 miljoner år gamla bildningar, vilka förekommer i sydligaste och sydvästligaste Skåne.



Figur 14. Karta som visar förekomsten av sedimentär berggrund och ett urval av impaktstrukturer. (Efter bl.a. Henkel m.fl. 2005, Henkel & Aaro 2005.)

Tabell 4. Tabellen visar en sammanställning av tänkbara områden för koldioxidlagring i svensk berggrund. Färgerna markerar om förutsättningar för lagring uppfylls (grönt) eller att förutsättningar saknas (rött). Med gult menas att osäkerhet föreligger och att data saknas för en bedömning av området och strukturen. Bökraven i tabellhuvudet definieras i bilaga 7.

| Område                         | Akvifär                     | Börkrav<br>Lagringskapacitet >100 Mt | Djup 800–2500 m  | Tjocklek akvifären >20 m | Porositet f>10 % | Permeabilitet >100 mD | Temp. >31,1° | Tryck >73,9 bar | Salinitet Cl>100 mg/l | Takberg >100 m | Fälla | Kommentar                                                                                                       | Bedömning       |
|--------------------------------|-----------------------------|--------------------------------------|------------------|--------------------------|------------------|-----------------------|--------------|-----------------|-----------------------|----------------|-------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| Fjällkedjan                    | Kambrisk –silurisk sandsten |                                      |                  |                          |                  |                       |              |                 |                       |                |       | Kraftigt tektoniserad berggrund = läckagerisk.                                                                  |                 |
| Bottenviken                    | Prekambrisk sandsten        |                                      | Osäkra uppgifter |                          |                  |                       |              |                 |                       |                |       | Heterogen berggrund, låg geotermisk gradient ger borrhjup >2000 m bedömd låg permeabilitet, osäkra data.        | Mer data behövs |
| Bottenhavet                    | Prekambrisk sandsten        |                                      | Osäkra uppgifter |                          |                  |                       |              |                 |                       |                |       | ”-                                                                                                              | ”-              |
| Siljansringen                  | Orsasandsten                |                                      |                  |                          |                  |                       |              |                 |                       |                |       | För grunt, tektoniserad berggrund ger läckagerisk, för liten volym.                                             |                 |
| Siljan-strukturen              | Urberg                      |                                      |                  |                          |                  |                       |              |                 |                       |                |       | Låg geotermisk gradient ger borrhjup >2000 m, låg porositet, sprickakvifär, inte verifierad tät takbergart.     |                 |
| Björkö-strukturen              | Urberg                      |                                      |                  |                          |                  |                       |              |                 |                       |                |       | ”-                                                                                                              | ”-              |
| Närke                          | Kambrisk sandsten           |                                      |                  |                          |                  |                       |              |                 |                       |                |       | Många diskriminerande faktorer, bl.a. djup.                                                                     |                 |
| Västergötland                  | Kambrisk sandsten           |                                      |                  |                          |                  |                       |              |                 |                       |                |       | ”-                                                                                                              |                 |
| Östergötland                   | Kambrisk sandsten           |                                      |                  |                          |                  |                       |              |                 |                       |                |       | ”-                                                                                                              |                 |
| Vättern                        | Prekambrisk sandsten        |                                      |                  |                          |                  |                       |              |                 |                       |                |       | Heterogen berggrund, låg geotermisk gradient ger borrhjup >2000 m, bedömd låg permeabilitet, många osäkra data. | Mer data behövs |
| Gotland                        | Kambrisk sandsten           |                                      |                  |                          |                  |                       |              |                 |                       |                |       | Under Gotland ligger sandstenen för grunt.                                                                      |                 |
| Södra Östersjön                | Kambrisk sandsten           |                                      |                  |                          |                  |                       |              |                 |                       |                |       | Mindre fällor finns. Om lagring i lutande akvifär tillämpas är kapaciteten >500 Mt.                             |                 |
| Öland                          | Kambrisk sandsten           |                                      |                  |                          |                  |                       |              |                 |                       |                |       | För grunt.                                                                                                      |                 |
| Hanöbukten                     | Mesozoisk sandsten          |                                      |                  |                          |                  |                       |              |                 |                       |                |       | Endast ett mindre område på lämpligt djup.                                                                      |                 |
| Vombsänkan                     | Mesozoisk sandsten          |                                      |                  |                          |                  |                       |              |                 |                       |                |       | ”-                                                                                                              |                 |
| Sydvästra Skåne med havsområde | Mesozoisk sandsten          |                                      |                  |                          |                  |                       |              |                 |                       |                |       | Många fördelaktiga faktorer, fälla saknas. Lagring endast möjlig i utbredda akvifäravsnitt.                     |                 |
| Södra Kattegatt                | Mesozoisk sandsten          |                                      |                  |                          |                  |                       |              |                 |                       |                |       | Gränsar och går in på dansk zon. Danmark anser att området saknar potential.                                    |                 |

Tabell 5. Åldersställning för sedimentära bergarter och impaktstrukturer i bedömda områden.

|                                          | prekambrium | kambrium | ordovicium | silur | devon | karbon | perm | trias | jura | krita | paleogen |
|------------------------------------------|-------------|----------|------------|-------|-------|--------|------|-------|------|-------|----------|
| 1. Fjällkedjan                           |             |          |            |       |       |        |      |       |      |       |          |
| 2. Bottenviken                           |             |          |            |       |       |        |      |       |      |       |          |
| 3. Gävlebukten och Bottenhavet           |             |          |            |       |       |        |      |       |      |       |          |
| 4. Siljansringen                         |             |          |            |       |       |        |      |       |      |       |          |
| 5. Närke, Östergötland och Västergötland |             |          |            |       |       |        |      |       |      |       |          |
| 6. Öland, Gotland och södra Östersjön    |             |          |            |       |       |        |      |       |      |       |          |
| 7. Kristianstadsområdet och Hanöbukten   |             |          |            |       |       |        |      |       |      |       |          |
| 8. Södra Kattegat                        |             |          |            |       |       |        |      |       |      |       |          |
| 9. Sydvästra Skåne                       |             |          |            |       |       |        |      |       |      |       |          |
| 10. Dalasandstenen                       |             |          |            |       |       |        |      |       |      |       |          |
| 11. Vättern                              |             |          |            |       |       |        |      |       |      |       |          |
| 12. Impaktstrukturer                     |             |          |            |       |       |        |      |       |      |       |          |

i en låg porositet. Fjällkedjans berggrund är även uppsprucken vilket medför att risken för läckage är stor. I de områden av fjällkedjan där berget är mindre uppsprucket förekommer akvifärerna för ytligt.

**Bedömning:** Området bedöms sakna förutsättningar för koldioxidlagring.

### Område 2 och 3. Sandstenar i Bottenviken, Gävlebukten och Bottenhavet

Berggrunden i Bottenviken och Bottenhavet är nästan enbart känd från geofysiska undersökningar (se bilaga 1). Tolkningen av berggrunden på kontinentalsockeln baseras därför på geofysisk information som är jämförd med känd landgeologi, från borrhningar i havet och blockfynd längs med kusten.

Bottenviken och Bottenhavet är två sedimentationsbassänger, bildade inom en kontinentalplatta, där kusternas utseende bestäms av deformationszoner och förkastningar (van Balen & Heermans 1998). Berggrunden i Bottenviken och Bottenhavet utgörs till största delen av sedimentära bergarter som är avsatta på ett äldre kristallint underlag. Geofysisk information från seismiska undersökningar i havsområdet (t.ex. Ignatius & Tulkki 1970, Flodén m.fl. 1979, Axberg 1980, Wannäs 1989) och magnetiska anomalikartor visar att berggrunden korsas av flera deformationszoner och förkastningar (se t.ex. Korhonen m.fl. 2002a). Zonerna har två huvudriktningar: nordost–sydväst och nordväst–sydost. Längs med kusten består berggrunden huvudsakligen av kristallint urberg medan yngre sedimentära bergarter dominerar till havs. Ett undantag är Kvarkenområdet där sedimentära bergarter inte har kunnat urskiljas i det tillgängliga geofysiska underlaget eller i borrhålsdata (Winterhalter 2000).

#### Område 2. Bottenviken

Det kristallina urberget överlagras av den prekambiska Muhosformationen. På land är den enbart känd på det finska fastlandet och på ön Hailuoto. Kunskapen om dess utbredning är baserad på geofysisk information. Wannäs (1989) inkluderade, baserat på seismisk information, den kambriska sandstenen som en separat enhet inom Muhosgruppen. Överst i den sedimentära lagerföljden finns en enhet som har uppskattats ha en tjocklek av 90 m (Flodén m.fl. 1979). Den har geofysiska egenskaper som påminner om kambrisk sandsten utanför Gotland och har därför antagits vara en sandsten med kambrisk ålder (Flodén m.fl. 1979). Block av sandsten med kambriska spårfossil har påträffats på den finska ön Hailuoto (Veltheim 1969) vilket styrker detta antagande. Den sedimentära berggrundens tjocklek är starkt påverkad av Bottenvikens tektoniska utveckling och kan därför variera kraftigt. Medeltjockleken har uppskattats till ca 200 m med undantag för norra delen av Bottenviken där

tjockleken bedöms vara 700 m (Wannäs 1989). Tillgängligt underlagsmaterial indikerar att den sedimentära lagerföljden inte förekommer på tillräckligt stort djup för att vara lämplig för koldioxidlagring. Fördjupade undersökningar av den potentiella akvifärens fysikaliska egenskaper krävs för att kunna göra en mer kvalificerad bedömning.

**Bedömning:** Området bedöms sakna förutsättningar för lagring.

### **Område 3. Gävlebukten och Bottenhavet**

Den sedimentära berggrunden i Bottenhavet består av en äldre, prekambrisk del uppbyggd av kambriska sandstenar och kvartsareniter. Ovanpå denna följer en yngre, paleozoisk del, dominerad av kambriska sandstenar, siltstenar och lerstenar och ordoviciska kalkstenar.

Kunskapen om de prekambrisk sedimentära bergarternas egenskaper är begränsade och baseras i huvudsak på kända förekomster på fastlandet runt Gävle och Nordingrå. Preliminära undersökningar indikerar att bergarterna har en mycket låg porositet.

Tolkningen av den ordoviciska lagerföljdens sammansättning baseras helt på seismiska undersökningar och har inte, till skillnad från den kambriska, bekräftats genom borrhningar (Axberg 1980).

Tolkningen av den sedimentära berggrundens utbredning är baserad på geofysiska undersökningar, (t.ex. Axberg 1980, BABEL Working Group 1993a), blockförekomster, samt kunskap från de fyra borrhningarna Finngrundet, Västra Banken (Thorslund & Axberg 1979), Holmudden (Sandgren m.fl. 1939) och Bönan (Bergman m.fl. 2001). Axberg (1980, sid. 193) uppskattar att sedimentbergarterna förekommer ner till ca 1 000 m djup. Enligt uppskattningar av Korja m.fl. (2001) kan det finnas en sedimentär bassäng med en tjocklek av 3–4 km nära Vasa. Vidare tyder tyngdkraftens variationer inom Bottenhavet (Korhonen m.fl. 2002b) på att det kan förekomma flera områden med större sedimenttjocklekar.

Den paleozoiska berggrunden underlagras inte alltid av prekambrisk sandstenar och areniter. Vid t.ex. Finngrundet är den paleozoiska lagerföljden avsatt direkt på ett vittrat kristallint underlag. Seismiska undersökningar visar att berggrunden i närheten är förkastad 70 m i vertikal riktning vilket kan vara en orsak till att äldre sedimentär berggrund saknas i det området. Detta är ett exempel på hur berggrunden i Bottenhavet har blockförkastats vilket har medfört att lagerföljdens tjocklek och sammansättning är mycket varierande. Information från de ovan nämnda borrhningarna visar att det finns flera stratigrafiska luckor i den drygt 375 m tjocka paleozoiska lagerföljden. I en finsk utredning om koldioxidlagring (Teir m.fl. 2009) anses bergarterna i området för täta och därför olämpliga för lagring.

**Bedömning:** En samlad bedömning är att berggrunden är för tät för att vara lämplig för lagring. Tillräckligt med underlag saknas dock för en mer detaljerad bedömning.

### **Område 4. Siljansringen**

Ett meteoritnedslag i Siljansområdet har kraftigt påverkat det ursprungliga täcket med ordoviciska och siluriska bergarter och bildat en s.k. impaktstruktur. Kambriska bergarter är inte kända i området. Vid meteoritnedslaget bildades en krater. Resterna av denna är bl.a. en ringformig struktur med ordoviciska och siluriska bergarter i de perifera delarna, i flera fall som gigantiska block. De ordoviciska och siluriska bergarterna är uppbyggda av bl.a. kalkstenar, skifferar och sandstenar med en sammanlagd tjocklek på uppemot 400 m. Detta djup är för grunt för koldioxidlagring. Sprickor som bildats vid meteoritnedslaget i de prekambrisk bergarterna diskuteras under avsnittet om impaktstrukturer, sid. 34.

**Bedömning:** De ordoviciska och siluriska bergarterna bedöms sakna förutsättning för koldioxidlagring.

### **Område 5. Närke, Östergötland och Västergötland**

Kambriska, ordoviciska och siluriska bergarter förekommer som relativt flacka och grunda strukturer i Närke, Östergötland och Västergötland. Bergarterna utgörs bl.a. av sandstenar, kalkstenar, slamstenar



och skiffrar. Den maximala tjockleken för dessa bergarter är ca 200 m vilket också är det största djup på vilka de påträffats. Detta är för grunt för koldioxidlagring.

**Bedömning:** Området bedöms sakna förutsättning för koldioxidlagring.

### ***Område 6. Öland, Gotland och södra Östersjön***

På Öland, Gotland och i södra Östersjön finns ett sammanhängande område med kambriska, ordoviciska och siluriska bergarter. Längst i sydost finns även devoniska bergarter. Berggrunden stupar svagt åt sydost vilket medför att lagrens sammanlagda tjocklek ökar i samma riktning. I den undre, kambriska delen av lagerföljden finns sandstensintervall med hög porositet och permeabilitet. Ett sådant intervall är den kambriska Faluddensandstenen som har en tjocklek på uppemot 50 m i den sydostligaste delen av den svenska ekonomiska zonen. I sydöstra delen av den svenska ekonomiska zonen förekommer Faluddensandstenen på djup större än 800 m. Detta indikerar att den kan vara lämpligt för lagring av koldioxid. Det finns även andra nivåer med kambrisk sandsten under Faluddensandstenen som kan vara lämpade för koldioxidlagring.

Det finns endast ett mindre antal slutna akvifärer i den kambriska lagerföljden. En är Dalderstrukturen, belägen i den sydostligaste delen av svensk ekonomisk zon. Sandstensintervallet överlagras av flera hundra meter tjocka lager med leriga kalkstenar och lerstenar som sannolikt har utmärkta egenskaper som takbergart. På den baltiska sidan av Östersjön finns flera oljefyndigheter i den kambriska sandstenen. På den svenska sidan har tolv djupa borrhål utförts. Information från dessa tillsammans med seismiska data ger en generell bild av berggrundens uppbyggnad i området. Geologin beskrivs mer ingående i bilaga 2. I figur 15 framgår det område där Faluddensandstenen påträffas på ett djup som överstiger 800 m.

**Bedömning:** De kambriska sandstensintervallen bedöms ha goda förutsättningar för koldioxidlagring om lagringen kan ske i flacka eller svagt lutande strukturer.

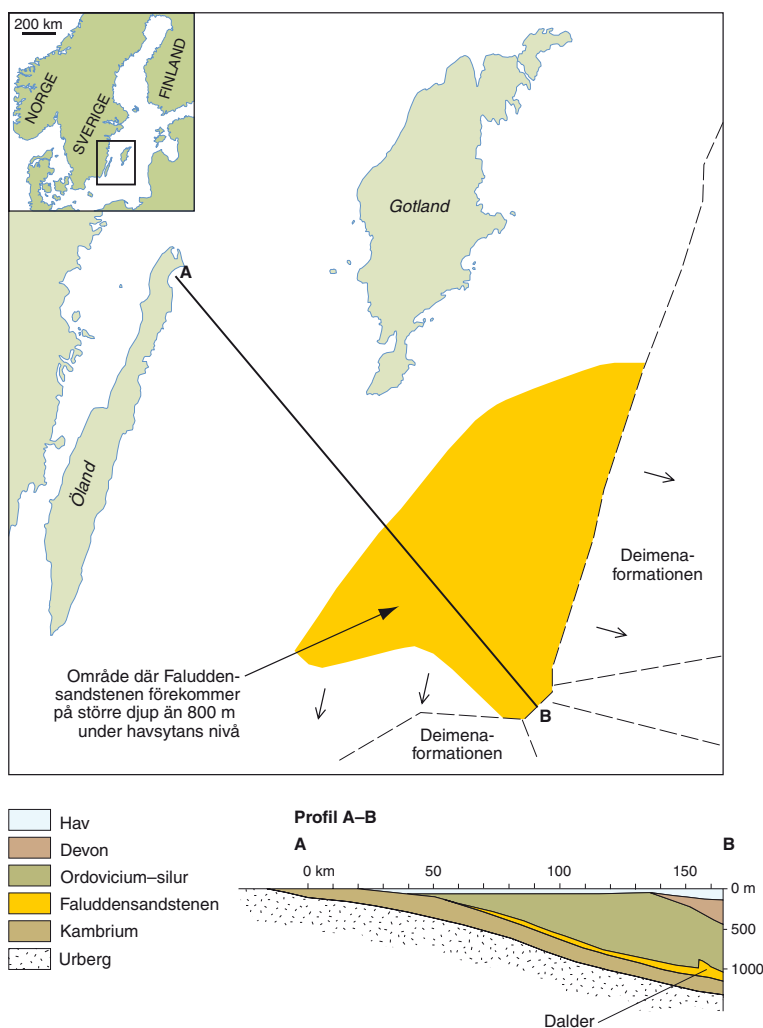
### ***Område 7. Kristianstadsområdet och Hanöbukten***

I Kristianstadsområdet och i dess förlängning ut i Hanöbukten finns en uppemot 1300 m tjock sekvens med kretaceisk sedimentär berggrund som domineras av karbonatbergarter, som överlagras av en tunn sekvens med leriga och finsandiga lager avsatta under trias och jura. Underst finns lokalt erosionsrester av kambrisk sandsten som överlagras av urberget. Lagerföljden stupar svagt söderut och är som tjockast rakt öster om Simrishamn. Två djupa borrhål utförda av OPAB under 1970-talet samt seismiska undersökningar ger en god bild av berggrundens uppbyggnad. I berggrundsavsnitt med bergarter från mellersta jura till äldre krita finns tjocka sandstensavsnitt som bedöms ha goda lagringsegenskaper. Antalet områden med sådana egenskaper, som befinner sig på djup större än 800 m, är emellertid mycket begränsat och täcker för små områden för att storskalig lagring ska vara möjlig. Eftersom berggrunden stupar kraftigt och området söderut begränsas av stora förkastningszoner görs bedömningen att området inte lämpar sig för lagring.

**Bedömning:** Området bedöms sakna förutsättning för koldioxidlagring.

### ***Område 8. Södra Kattegatt***

Utanför Kullen finns, vid gränsen mot dansk ekonomisk zon, tjocka lager med sedimentär berggrund. På danskt område finns en djupborrning (Hans-1) som tillsammans med geofysiska undersökningar gjort det möjligt att kartlägga området relativt noggrant. Resultaten från denna kartläggning beskrivs i Erlström & Sivhed (2001). Lagerföljden består bland annat av Skagerrakformationens (trias) och Gassumformationens (trias–jura) sandstenslager som i GEUS (Danmarks och Grönlands geologiska undersökning) förstudier ansetts som intressanta kandidater för koldioxidlagring. Det finns en dom-



Figur 15. Kartan visar det område där Faluddensandstenen påträffas på större djup än 800 m. Området med pilar indikerar att Faluddensandstenen även förekommer inom detta område med en eventuell ökande tjocklek i pilarnas riktning. Deimenaformationen är ekvivalent med Faluddensandstenen.

formad struktur i berggrunden precis på gränsen mot dansk ekonomisk zon som kan vara lämpad för koldioxidlagring. I denna struktur har Skagerrakformationen en tjocklek på ca 1 100 m och den förekommer på ett djup av ca 600–1 700 m. Formationen är uppbyggd av alternerande lager med sandsten, siltsten och lersten med enstaka kalkstens- och anhydritlager. I samma område har Gassumformationen en tjocklek som uppgår till ca 350 m och förekommer på ca 250–600 m djup. Gassumformationen är uppbyggd av sandsten och lersten med siltstens- och kollager, området beskrivs i mer detalj i bilaga 3.

**Bedömning:** Området bedöms ha förutsättning för koldioxidlagring även om den totala volymen kan vara mindre än 100 miljoner ton koldioxid.

### Område 9. Sydvästra Skåne med havsområden samt Vombsänkan

I sydvästra Skåne med havsområden samt Vombsänkan finns en 2–4 km tjock sekvens med sedimentär berggrund som innehåller flera akvifärer på 1 200–2 500 m djup som är intressanta för koldioxidlagring. Större slutna strukturer är inte kända. Akvifärerna överlagras av täta och leriga kalkstens-, lerstens- och siltstenslager. Inom akvifärformationerna finns även täta sekundära takbergartsformationer. Akvifärerna har en ålder som sträcker sig från äldsta trias till äldre krita. Berggrunden tillhör Danska bassängen och har i många fall en likartad geologisk uppbyggnad som den danska berggrunden. De för koldioxidlagring intressanta avsnitten är underkritan, den övertriassiska till underjurassiska Högnäsformationen samt de undertriassiska Bunt- och Ljunghusensandstenarna.

I sydöstra delen av Vombsänkan finns underkretaceiska lager med en upp till 250 m tjock sandstensdominerad lagerföljd. Merparten av sandstenen ligger ytligare än 800 m. Områden med akvifärer på tillräckligt stort djup är begränsade till den allra sydostligaste delen av Vombsänkan. Här finns information från Köpingsberg-1 och Köpingsberg-3 som är två djupborrningar genom hela lagerföljden. Det är emellertid tveksamt om det finns någon lämplig takbergart, området beskrivs i mer detalj i bilaga 4.

**Bedömning:** i sydvästra Skåne är det påvisat att det finns lämpliga akvifärer och takbergarter som uppfyller baskraven för lagring. Det finns däremot inga påvisade slutna strukturer.

### **Område 10. Dalasandsten**

De mesoproterozoiska sandstenarna i västra Dalarna täcker en yta som är ca 7 500 km<sup>2</sup>. Lagerföljden brukar jämföras med de sandstenar som finns i Gävleområdet, Bottenviken och Bottenhavet. Sandstenen delas in i en undre och en övre enhet som separeras av ett omkring 100 m tjockt basalttäck. Hjelmqvist (1966) uppskattade hela sandstensenhetsens tjocklek (inklusive basalten) till maximalt 800 m. Seismiska mätningar tyder dock på en tjocklek som överstiger 1000 m (Juhlin m.fl. 1991). Sandstensens tjocklek avtar norrut. Aldahan (1985) beskriver den undre sandstenen som bestående av konglomerat och breccior överlagrade av kvarts- eller fältspatrik sandsten. I sandstenen finns tunnare lager av skiffer och siltsten. Ripa m.fl. (2008) beskriver sandstenen som jämnkornig och tät. Den bedöms därför ha låg porositet. Seismiska borrhålsmätningar visar även en ganska hög seismisk hastighet för sandstenen, vilket även det tyder på låg porositet.

**Bedömning:** På grund av sandstenslagrens täthet bedöms lagringskapaciteten vara för låg. Det är även osäkert om lämpliga takbergarter förekommer och djupet verkar inte vara tillräckligt stort.

### **Område 11. Vättern (Visingsögruppen och Almesåkrgruppen)**

De ca 700 miljoner år gamla bergarterna i Visingsögruppen förekommer huvudsakligen i den sänka som bildar Vättern. Visingsögruppen indelas i tre enheter (undre, mellersta och övre). Den undre enheten (ca 100 m tjock), som vilar på den kristallina berggrunden, består av vita till rödbruna kvartsitiska sandstenar. Den mellersta enheten består av sandstenar, siltstenar, konglomerat och breccior och den övre enheten består av växellagrande siltstenar och dolomitiska kalkstenar med inslag av stromatoliter. Refraktionsseismiska mätningar i södra delen av Vättern visar att djupet till den kristallina berggrunden är uppemot 1 200 m (Flodén m.fl. 1984).

Sandstenen i den undre Visingsögruppen beskrivs som porös (Månsson 1996) och dåligt konsoliderad (Wikman m.fl. 1982). Det finns inga kända mätningar av porositet och permeabilitet, uppgifterna bygger endast på okulär bedömning.

Almesåkrgruppen i Småland består främst av prekambrika fältspatsrika areniter, med inslag av konglomerat och argillit. Den totala tjockleken uppskattas till ca 1 600 m. Berggrundens komplexa tektoniska uppbyggnad medför att Almesåkrgruppen inte påträffas på större djup än ca 150 m (Rhode 1987).

**Bedömning:** Endast den undre delen av Visingsögruppen kan vara intressant för lagring. Djupet är mestadels inte tillräckligt för storskalig lagring och takbergarten bedöms inte vara tillräckligt tät. Almesåkrgruppens bergarter i Småland bedöms sakna förutsättning för koldioxidlagring.

### **Område 12. Impaktstrukturer**

Impaktstrukturer med sprickrik berggrund har uppkommit i samband med meteoritnedslag. Större impaktstrukturer är ganska vanliga i den svenska berggrunden (fig. 14). De kan dock inte alltid upptäckas utan geofysiska undersökningsmetoder. Orsaken är att spåren ofta döljs av erosion och yngre geologiska avlagringar. Nedslaget har resulterat i en struktur med kraftigt tektoniserad och

uppsprucken berggrund. Uppsmältning och sekundära mineraliseringar i den övre delen av impakten anses kunna skapa förutsättningar för en tät takbergart.

Sprickigheten förekommer i en halvsfär runt nedslagsplatsen och omges vanligen av urberg med normal sprickighet. Impaktstrukturerna varierar i storlek från någon kilometer till över 50 km i diameter. Det saknas i dagsläget tillräcklig information om porositet, permeabilitet och förekomst av tillräckligt tät takbergart för att avgöra om dessa strukturer är lämpade för koldioxidlagring. Sprickfrekvensen kan vara betydande, upp till 40 gånger den som finns i det omgivande urberget (Henkel 2006). En krater med 10 km diameter skulle ge en sprickpåverkad volym på ca 750 km<sup>3</sup>. En porositet på 1 % skulle ge en teoretisk lagringsvolym för flera miljarder ton koldioxid. Med stor sannolikhet saknas tätande takbergarter och strukturerna har inte tillräcklig hög hydraulisk konduktivitet för att vara intressanta för lagring av koldioxid.

**Bedömning:** Strukturerna bedöms med nuvarande kunskap sakna förutsättningar för koldioxidlagring.

## SAMMANFATTANDE BEDÖMNING AV LAGRINGSMÖJLIGHETER I SVERIGE

Av de områden som presenterats i figur 14 finns endast tre som uppfyller de grundläggande kraven (sammanfattade i tabell 4) för en akvifär lämpad för koldioxidlagring.

I södra Östersjön, sydvästra Skåne och möjligtvis även i södra Kattegatt finns djupa akvifärer som kan vara lämpade för lagring av koldioxid. I dessa områden ligger akvifärerna tillräckligt djupt och har tillräcklig tjocklek och utbredning för att uppfylla kriterierna för koldioxidlagring. I södra Östersjön är den kambriska sandstenen en tänkbar kandidat. I sydvästra Skåne kan sandstenarna från äldre krita, Höganäsformationen från rät-äldre jura och sandstenformationerna från äldre trias, dvs. Ljunghusen- och Buntsandstenarna, vara lämpade för koldioxidlagring. I södra Kattegatt finns sandstenslager i Skagerrak- och Gassumformationerna (yngre trias-äldre jura) vilka utgör tänkbara lagringsalternativ.

Akvifärernas tjocklek och utbredning i dessa tre områden är relativt väl dokumenterade. Däremot är deras fysikaliska egenskaper inte lika väl undersökta. Det saknas också kunskap om takbergarternas täthet och uppbyggnad. I bilagorna 2–4 sammanfattas det rådande kunskapsläget om berggrunden och de djupa akvifärerna inom de tre områdena.

### Lagringsmöjligheter i sydvästra Skåne

De geologiska baskraven för koldioxidlagring i de djupa akvifärerna i sydvästra Skåne är till merparten uppfyllda. De identifierade akvifäravsnitten ligger på lämpligt djup, har tillräcklig tjocklek, uppvisar tillräckligt bra akvifäreenskaper (porositet, permeabilitet) och har en stor utbredning. De har i samband med olika borrhningar och tester för geotermisk energiproduktion visat sig ha stor kapacitet att producera vatten vilket bevisar deras goda akvifäreenskaper.

Eftersom det intressanta akvifäravsnittet i sydvästra Skåne är en flerlagrad sekvens där de fysikaliska egenskaperna i många fall uppvisar en stor lateral variation, är det svårt att med tillgängliga mätdata identifiera de enskilda lager eller avsnitt som har bäst förutsättningar för koldioxidlagring. I naturgaslagret i Stenlille i Danmark används sandstensakvifärer tillhörande Höganäsformationens motsvarighet, Gassumformationen, för lagring. Denna är på samma sätt som de djupa akvifärerna i sydvästra Skåne uppbyggd av flera sandstenslager. Detta visar att lagring är möjlig i en flerlagrad akvifär. Det finns ingen sammanställning av tydliga slutna strukturer eller fällor i Skåne. Detta utesluter inte att det kan finnas sådana strukturer inom den triassiska lagerföljden i Höllvikengravsänkan eller att en del av de strukturer som Swedegas AB identifierade i kretaceiska lager under 1980-talet kan vara sådana. Det är inte heller klarlagt om det finns stratigrafiskt begränsade strukturer som kan användas för lagring.

Den teoretiskt möjliga lagringskapaciteten är relativt hög. Det är dock idag, med nuvarande information, mycket svårt att bedöma områdets potential med tanke på att det inte finns tydligt avgränsade

strukturer och att det rör sig om en heterogen akvifär både lateralt och vertikalt med flera oregelbundet förkommande sandstensnivåer. För en bättre bedömning krävs i första skedet simuleringar och modelleringar av injektering i en sådan geologisk miljö. En del av detta arbete pågår inom ramen för EU-projektet MUSTANG (se sid. 15).

## Lagringsmöjligheter i södra Östersjön

Den paleozoiska berggrunden inklusive de kambriska sandstensakvifärerna lutar svagt ( $<1^\circ$ ) åt ostsydost vilket gör att yngre berggrund successivt bildar berggrundsytan i riktning mot den baltiska delen av Östersjön. I samma riktning finner man också de kambriska sandstensakvifärerna på allt större djup. En sammanställning av underlagsdata finns redovisad i Erlström (2008).

De kambriska sandstensakvifärerna förs litostratigrafiskt till tre tydliga sandstensenheter: Viklausandsten, Närsandsten och Faluddensandsten. Dessa sandstensakvifärers tjocklek varierar i området men har en sammanlagd tjocklek på ca 80 m i den svenska delen av utbredningsområdet i Östersjön. Sandlagren avsattes ursprungligen i en kustnära miljö med förändringar i avsättningsmiljön såsom vattendjup, strömmar, vågor och, inte minst, stormar. Avstånd till kusten och närhet till t.ex. flodmynningar och deltan påverkar också de bildade sandstenarnas uppbyggnad. Detta återspeglas tydligt i sandstenarnas varierande kornstorlek, sortering samt kvarts- och lerhalt. Fin-korniga kvartssandstenar med relativt hög andel finmaterial (lera och silt) dominerar, speciellt i de yttre delarna av södra Östersjön. Vissa avsnitt består av medel- eller grovkorniga sandstenslager med liten andel finmaterial.

Bland de kambriska lagren bedöms Faluddensandstenen som det mest intressanta avsnittet för koldioxidlagring. Borrningar visar på en homogen, porös och permeabel sandstensakvifär med regional utbredning och där baskraven och börkraven enligt preliminära bedömningar uppfylls (tabell 6). Faluddensandstenen förekommer i ett område som sträcker sig från mellersta Gotland till Baltikum och Polen i sydsydost. Den tilltar i tjocklek successivt och är i de centrala delarna av Östersjön ca 50 m tjock. Sandstenen lutar svagt åt sydsydost. I de baltiska staterna kallas Faluddensandstenen för Deimenasandsten.

Tabell 6. Sammanställning av bedömningsgrunder för Faluddensandstenen.

| Faktor                     | Kommentar                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Förekomstens karaktär      | Ren kvartssandsten som i borrningar söder om Gotland uppvisar mycket goda akvifäreegenskaper. Homogent uppbyggd. Kilar ut mot nordväst samt har en hydraulisk gräns i samma riktning. Svagt lutande akvifär, ca $1-2^\circ$ mot sydost. Övervägande plan överyta med små kupolartade fällor med en amplitud på 20–50 m. Enstaka fällor 100–200 km <sup>2</sup> . Relativt ostörd av förkastningar.                       |
| Djup                       | 450–1200 m                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| Tjocklek                   | 0–50 m, medeltjocklek på djup >800 m är 35 m.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| Porositet                  | Medelvärde 15,7 % (n=30, SGU data). Underlaget är inte tillräckligt omfattande för en bra bedömning.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| Permeabilitet              | Medelvärde 220 mD (n=30, SGU data). Underlaget är inte tillräckligt omfattande för en bra bedömning.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| Utbredning                 | 13 500 km <sup>2</sup> för området djupare än 800 m (svenskt område).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Takberg                    | Alunskiffer, bentonitisk kalksten samt flera hundra meter med ordovicisk och silurisk lerig kalksten och mangelsten.                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| Regional lagringspotential | Mycket svår att bedöma. Med en 10–15 % porositet och en lagringsfaktor på 1–10 % blir lagringspotentialen från 450 miljoner ton till 4,5 miljarder ton koldioxid för hela Faluddensandstenen på svensk del av Östersjön. Av siffrorna framgår att osäkerheten är mycket stor. Lagringsfaktorn har här en mycket stor betydelse. Om sandstensens utbredning på den baltiska sidan kan inräknas ökar potentialen avsevärt. |
| Slutna strukturer, fällor  | I det svenska området finns endast några mindre strukturer som bedöms kunna lagra uppemot 100 miljoner ton.                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| Osäkerheter                | Den största osäkerheten är porositeten och permeabiliteten i akvifären. På den baltiska sidan har motsvarande sandstenslager lokalt mycket låg porositet och permeabilitet, speciellt under 1000 m djup. Takbergarternas täthet är inte undersökt. Bedömningarna av lagringspotentialen är mycket preliminära. För en säkrare bedömning behövs förutom nya indata även simuleringar av injektering göras.                |

Faluddensandstenen påträffas inom svenskt område på ett djup som varierar mellan 450 och 1 200 m. Området där sandstenen ligger djupare än 800 m har en yta på ca 13 500 km<sup>2</sup>. Den teoretiskt möjliga lagringskapaciteten för hela området, beräknat utifrån en medeltjocklek på 35 m, en medelporositet på 15 % samt lagringsfaktorer på 1 %, 2 % och 10 %, blir mellan 450 miljoner ton och 4,5 miljarder ton i den svenska delen av Faluddensandstensens utbredningsområde. Eftersom sandstenen även finns på den baltiska och polska sidan är den teoretiskt möjliga lagringsvolymen avsevärt större. Det förutsätter dock lagring inom avsnitt utan strukturella fällor (lagring i svagt lutande akvifärer).

Slutna strukturer i den kambriska sandstenen är inte vanliga på den svenska sidan av Östersjön. Förutom ett tiotal obetydliga strukturer finns några större som angränsar och även går över i polsk, rysk, litauisk och lettisk del av Östersjön (fig. 16). I likartade strukturer på den baltiska sidan av Östersjön förekommer olja. Detta bekräftar sandstensens goda akvifäreegenskaper. Strukturerna är dock inte stora vilket begränsar lagringspotentialen. På svensk sida kan en tänkbar kapacitet röra sig kring 100 miljoner ton i dessa strukturer. På den baltiska sidan är antalet strukturer avsevärt fler. Förutom några få som är 100–200 km<sup>2</sup> stora har det stora flertalet en area som är mindre än 20 km<sup>2</sup>. Totalt bedöms maximalt ett par hundra miljoner ton koldioxid lagras i dessa strukturer i södra Östersjön. Förutom Faluddenakvifären finns det ytterligare sandstensnivåer i den kambriska lagerföljden i södra Östersjön som kan vara tänkbara för lagring (tabell 7). De har tillsammans en tjocklek på 30–70 m och påträffas något djupare (När- och Viklausandsten). Nivåerna mellanlagras av siltsten och lersten. Dessa sandstenslager har en betydande regional utbredning och påträffas även som ytberggrund i ett stråk från Kalmarsund upp över norra Gotland mot Finska viken. De kilar inte ut som Faluddensandstenen utan påträffas i hela det kambriska utbredningsområdet.

Det finns en hel del osäkerheter om lagringskapaciteterna i de kambriska akvifärerna. Med utgångspunkt från de utredningar som gjorts kan lagringskapaciteten uppgå till ca 500 miljoner ton koldioxid i strukturella fällor på land och till havs. Några enskilda fällor med lagringskapaciteter på mer än 100 miljoner ton verkar inte finnas. De största kan möjligtvis lagra uppemot 100 miljoner ton. Dessa strukturer som finns till havs i gränsområdet mellan svenskt, lettiskt och litauiskt territorium är dessutom intressanta för kolväteprospektering.

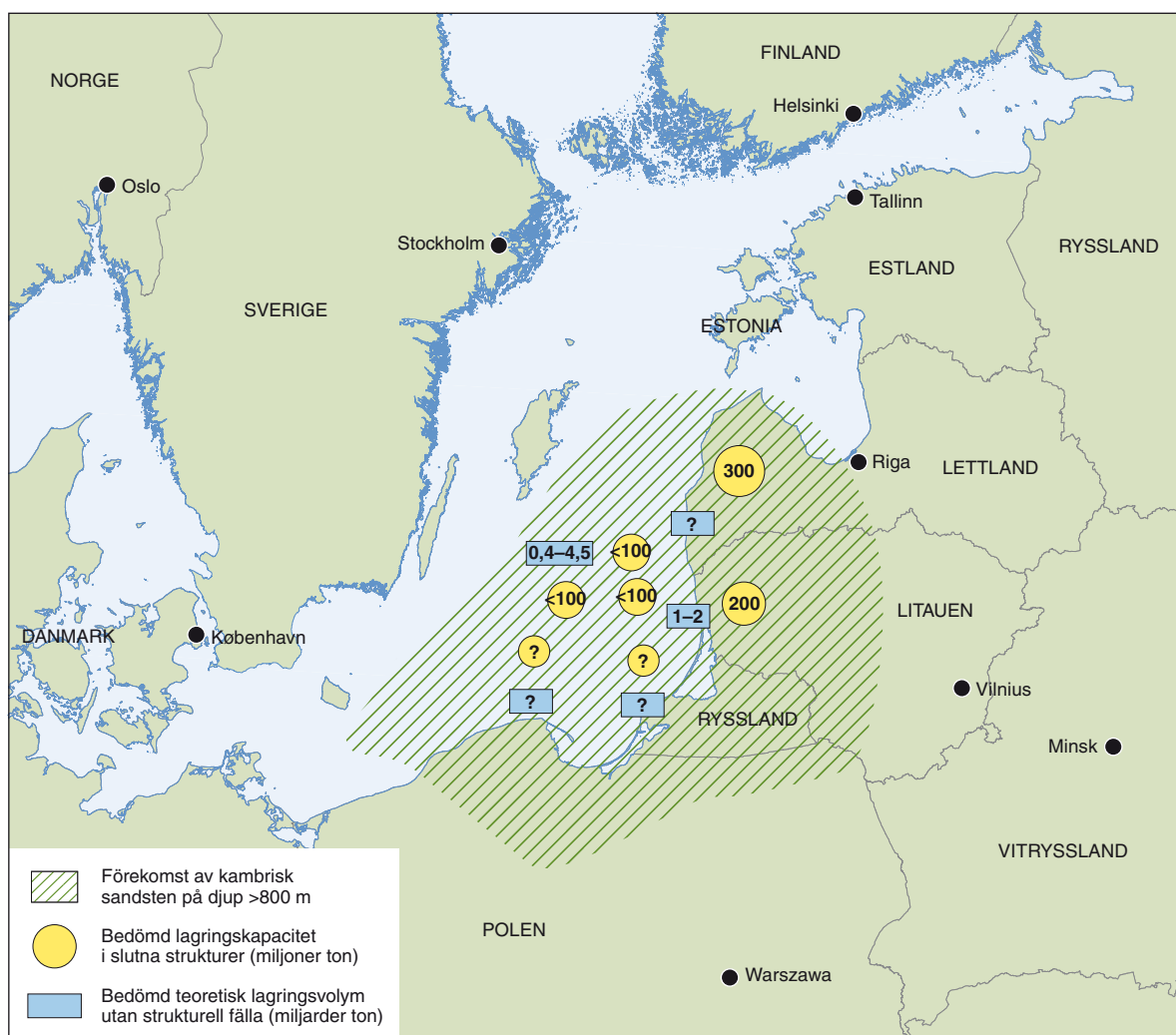
För polskt och ryskt område finns inte några tillförlitliga siffror på lagringskapaciteter i vare sig slutna eller regionala akvifärer i den kambriska sandstenen.

Vid bedömning av lagringskapaciteten i de kambriska sandstensakvifärerna tas inte hänsyn till slutna strukturer. Teoretiska bedömningar ger en total regional lagringskapacitet på flera miljarder ton. För en vidare bedömning av denna möjlighet krävs omfattande modelleringar av spridningsförloppet i akvifären.

Tabell 7. Sammanställning av bedömningsgrunder för kambriska sandstensakvifärer undantaget Faluddensandstenen.

| Faktor            | Kommentar                                                                                                                                                                                                                                   |
|-------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Karaktär          | Underkambriska kvartsrika sandstenslager. Två dominerande sandstensnivåer (När- och Viklausandsten). Den undre enheten är bäst utvecklad och lateralt korrelerbar i området. Strukturellt uppbyggd på likartat sätt som Faluddensandstenen. |
| Djup              | 0–1200 m                                                                                                                                                                                                                                    |
| Tjocklek          | 30–70 m fördelat på två nivåer                                                                                                                                                                                                              |
| Porositet         | <10 %                                                                                                                                                                                                                                       |
| Permeabilitet     | <50 mD                                                                                                                                                                                                                                      |
| Utbredning        | Regional                                                                                                                                                                                                                                    |
| Takberg           | Samma som Faluddensandstenen samt mellanliggande lerstensintervall.                                                                                                                                                                         |
| Lagringspotential | Mycket svårbedömd. Sandstenslagren varierar lateralt i sin uppbyggnad och är ofta täta p.g.a. kisel-mineraliseringar.                                                                                                                       |
| Osäkerheter       | Den största osäkerheten är porositeten och permeabiliteten i akvifären. Endast ett fåtal prov finns med mätdata. Bedömningar och observation i Baltikum indikerar en förhållandevis tät akvifär med övervägande låg permeabilitet.          |





Figur 16. Schematisk sammanställning av bedömda lagringskapaciteter i de kambriska sandstensakvifärerna i södra Östersjön.

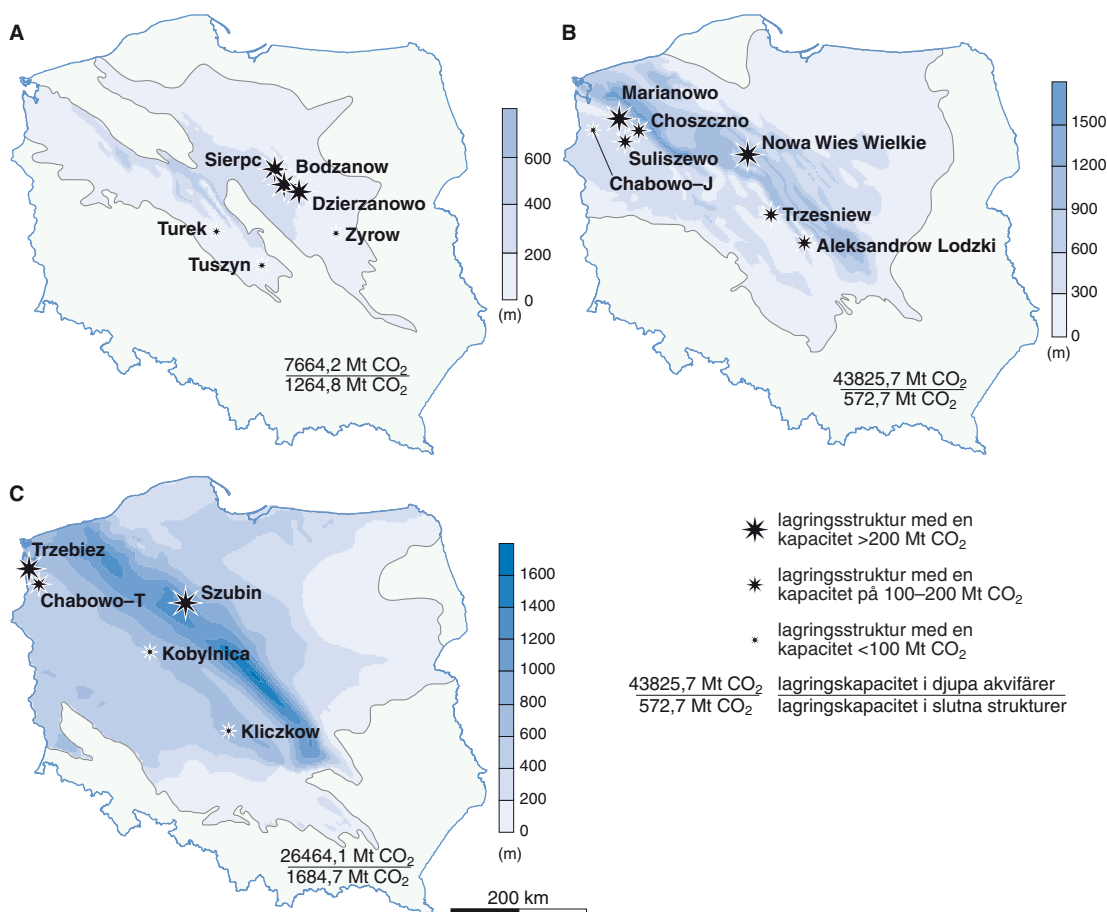
## LAGRINGSMÖJLIGHETER I POLEN

Inom det av EU finansierade projektet GeoCapacity (sid. 15) har en inventering och potentialstudie av lagringsmöjligheterna i regionala akvifärer, strukturella fällor och olje- och gasfält genomförts i Polen (Tarkowski m.fl. 2009, Wójcicki 2009).

Polens berggrund domineras av sedimentär berggrund med akvifärer på olika djup. De bästa akvifäravsnitten förekommer i den underkretaceiska, underjurassiska och undertriassiska berggrunden i de centrala och norra delarna av landet (fig. 17). En regional bedömning av dessa akvifärer ger en möjlig teoretisk lagringskapacitet på uppemot 90 miljarder ton koldioxid (Tarkowski m.fl. 2009). Denna bedömning görs utifrån tillgänglig total porvolym och en parameter som anger lagringseffektiviteten (dvs. hur stor andel av porvolymen som kan utnyttjas). Med utgångspunkt i andra regionala bedömningar av lagringskapacitet i regionala akvifärer är angivna siffror mycket osäkra och ofta för optimistiska. Mer konservativa siffror anger 3,7–4,7 miljarder ton koldioxid inkluderande lagring i 18 strukturella fällor som möjliga platser för lagring. I dessa lokala fällor varierar lagringskapaciteten mellan ca 60 och 575 miljoner ton koldioxid.

Förutom dessa tänkbara lagringsmöjligheter finns det i Polen en möjlighet att utnyttja olje- och gasfält för lagring (fig. 18). Dessa finns företrädesvis i de sydöstra och centrala västra delarna av Polen





Figur 17. Kartor som schematiskt visar tänkbara lagringsplatser och lagringskapaciteter i Polen. Skalan visar tjockleken för respektive lager. Kartorna visar lagringsmöjligheter i berggrund som bildats under **A.** krita, **B.** jura och **C.** trias. (Modifierad efter Tarkowski m.fl. 2009.)

med en bedömd lagringskapacitet på drygt 750 miljoner ton koldioxid. I södra Östersjön pågår kol-väteprospektering och produktion i den kambriska sandstenen och i framtiden bedöms det möjligt att även kunna använda dessa strukturer för lagring. Kapaciteten bedöms som liten i förhållande till andra möjligheter i Polen (7 miljoner ton, Tarkowski m.fl. 2009).

## LAGRINGSMÖJLIGHETER I ESTLAND, LETTLAND OCH LITAUEN

Lagringspotential för de baltiska länderna finns bl.a. redovisad i en publikation av Sliampa m.fl. (2009). I denna framgår att lagringsmöjligheterna i Estland är i stort sett obefintliga eftersom de tänkbara akvifärerna ligger för ytligt.

I Lettland anses den kambriska sandstensakvifären vara den mest lämpade för lagring. Sliampa m.fl. (2009) anger att det finns 15 strukturella fällor på lämpligt djup som är tänkbara för lagring av koldioxid. I dessa bedöms den sammanlagda lagringskapaciteten vara 300 miljoner ton koldioxid. Under havsbotten finns även ett antal strukturer som är intressanta för kolväteprospektering men som även kan vara tänkbara för koldioxid lagring. Kapaciteten i dessa strukturer är osäker, sannolikt är den mindre än 100 miljoner ton.

I Litauen har en omfattande kartläggning av tänkbara akvifärer och deras lämplighet som koldioxid-lager genomförts. Två akvifärer i avlagringar från kambrium och devon är identifierade som lämpliga. Den teoretiskt möjliga regionala lagringskapaciteten för de båda akvifärerna är mycket stor (1–2 miljar-



Figur 18. Lagringspotential i olje- och gasfält i Polen (Tarkowski m.fl. 2009).

der ton), men bedömningarna är fokuserade på slutna strukturer (Sliupa m.fl. 2009). Ett antal strukturella fällor som teoretiskt kan lagra uppemot 200 miljoner ton koldioxid har identifierats. Ett mycket lägre kapacitetstal, 30 miljoner ton, anges emellertid för den praktiskt genomförbara lagringskapaciteten.

## LAGRINGSMÖJLIGHETER I DANMARK

Danmark har generellt mycket goda förutsättningar för koldioxidlagring i djupa akvifärer. Danmark har via internationellt samarbete målmedvetet undersökt berggrundens uppbyggnad. Ett antal mycket intressanta platser med slutna strukturer har identifierats i nära anslutning till utsläppskällor. De är därigenom intressanta objekt för pilotstudier och framtida lagringsprojekt. Den totala bedömda lagringsvolymen i de danska strukturerna bedöms vara så stor att den skulle kunna klara av en lagring motsvarande årsproduktionen från större punktkällor (år 1999 uppgick produktionen till 29 miljoner ton koldioxid) under flera hundra år. En presentation av möjliga akvifärer i strukturer i Danmark ges i bilaga 5.

Förutom koldioxidlagring är de identifierade akvifärerna även intressanta för geotermisk energi-produktion, kolväteprospektering samt energilagring. Det gör att det i vissa fall finns intressekonflikter att ta hänsyn till vid etablering av ett lager. Sannolikt behöver det i flertalet fall inte föreligga något hinder för det ena eller andra.

I Danmark finns, till skillnad från i Sverige, en tydlig lagstiftning rörande marken under markytan där koncessionsrättigheter för undersökningar och exploatering är noga reglerade inte bara för olja och gas utan även för geotermi och koldioxidlagring. Detta möjliggör en reglerad hantering av intressekon-

flikterna på myndighetsnivå och är sannolikt till stor fördel genom en tydligare lagstiftning rörande etableringen av ett koldioxidlager i berggrunden.

I Danmark finns också en mångårig erfarenhet från naturgaslagret i Stenlille rörande olika problem med tillstånd, acceptans, tekniska lösningar, uppföljning och övervakning som är värdefulla i samband med projektering av ett koldioxidlager.

## DISKUSSION

FNs klimatpanel uttryckte 2007 i sin sammanfattningsrapport (AR4) över det vetenskapliga kunskapsläget att det mesta av den höjning av den globala medeltemperaturen som observerats sedan mitten 1900-talet beror sannolikt på den observerade ökningen av antropogena utsläpp av växthusgaser och att utsläppen måste minskas. EUs mål är att minska koldioxidutsläppen med 20 % till år 2020.

Flera olika åtgärder behövs för att bryta trenden med ökande koldioxidhalt i atmosfären. Förutom effektivisering av befintlig energianvändning och omställning till förnybar energi anses tekniken för koldioxidlagring vara ett av de mest intressanta alternativen. Tanken att återföra koldioxiden till berggrunden, där den har haft sitt ursprung i form av olja, kol och gas, förefaller attraktiv.

EU har som mål att det i Europa ska finnas 12 demonstrationsanläggningar i drift före år 2015. Detta är ett mål som sätter press på geovetenskapliga underlag för bedömning om var det går att lagra koldioxid.

Det finns stora osäkerheter i totalkostnaderna för hela koldioxidlagringskedjan. Kostnaderna för transportkedjan är kanske den som går att påverka lättast genom att välja en lagringsplats som finns nära utläppskällan och avskiljningsanläggningen.

Behovet av information om lämpliga lagringsplatser är mycket stort. Tekniken att återföra koldioxiden till djupa akvifärer är känd och den baseras på erfarenheter från bl.a. Sleipnerprojektet i Nordsjön. Det finns även kunskap om naturligt förekommande koldioxidakvifärer som är tusentals till flera miljoner år gamla, bl.a. i södra Frankrike. Dessa förekomster och erfarenheter visar att det finns geologiska formationer som kan lagra koldioxid effektivt och säkert över mycket långa tidsperioder. Lagring av koldioxid i djupa akvifärer har sedan länge ansetts som det mesta lämpliga lagringsalternativet.

På senare tid har ett antal publikationer och pilotprojekt (t.ex. Carbfix program, Oelkers m.fl. 2008) framfört och redovisat att det även finns en stor potential i mineralisering av koldioxid som injekteras i porösa basalter och ultramafiska bergarter (O'Connor m.fl. 2003). Den teoretiska lagringskapaciteten i enbart Columbiabasalterna i USA uppskattas till mindre än 100 miljarder ton koldioxid (McGrail m.fl. 2006). Det kvarstår mycket forskning och teknikutveckling för att kunna lösa de problemställningar som finns med mineralisering och lagring i basalter och ultramafiska bergarter. En preliminär bedömning av det svenska urberget visar inte på några lämpliga basiska bergartsområden som skulle kunna användas för mineralisering av koldioxid. Det kan dock bli ett attraktivt alternativ i framtiden, men för den närmaste framtiden framstår lagring i djupa akvifärer som det mest realistiska alternativet.

Det är en stor geovetenskaplig utmaning att finna lämpliga lagringsakvifärer som uppfyller kraven på kapacitet och säkerhet. EUs direktiv om geologisk lagring av koldioxid och dess implementering i den nationella lagstiftningen, speciellt med hänseende till miljö och säkerhet, utgör en viktig bas för detta arbete. I flera medlemsstater har man redan utfört eller håller på med nationella inventeringar av möjliga lagringsplatser. I förhållande till övriga Europa finns det i Sverige små möjligheter att hitta lämpliga lagringsplatser för koldioxid i djupa akvifärer, eftersom vår berggrund domineras av kristallint urberg. Till skillnad från våra grannländer Norge, Danmark, Tyskland och Polen är kunskapen om berggrundens uppbyggnad på djupet begränsad eftersom vi inte haft någon större olje- och gasutvinning i våra sedimentära berggrundsområden. Erfarenheter från naturgaslagring i t.ex. Danmark har bidragit till ökad kunskap genom utförliga analyser och bedömning av olika alternativ för lagring av gas i sedimentära bergartsformationer.

I Sverige har hittills översiktliga bedömningar, varav merparten presenteras i den här utredningen, pekat ut två huvudsakliga områden där det finns förutsättningar för geologisk lagring av koldioxid: södra Östersjön och sydvästra Skåne med omgivande havsområden. Ett tredje mindre område i södra Kattegatt kan eventuellt också vara intressant men lagringskapaciteten bedöms som liten. I andra områden med sedimentär berggrund ligger tänkbar akvifär antingen för ytligt, saknar takbergart, har för låg porositet eller är genomslagen av förkastningar och sprickor vilket gör att börkraven inte uppfylls (jfr tabell 4). Det ska poängteras att det saknas tillräckliga bakgrundsdata, speciellt borrhålsinformation, från vissa områden, bl.a. från de äldre sandstensformationerna i Bottenviken och Bottenhavet. Bedömningen att lagring inte är möjlig i dessa områden baseras därför på information från borrhningar i Finland genom samma formationer. Lagerföljden domineras där av finkorning tät och omvandlad sandsten samt lersten med mycket låg porositet och permeabilitet. Det är också oklart om formationerna ligger på tillräckligt stort djup för lagring samt om där finns en lämplig takbergart. För att komma längre i bedömningen beträffande Bottenviken och Bottenhavet krävs information från borrhningar och detaljerade seismiska mätprofiler.

Det finns en allmän kunskap om djupförhållanden, tjocklek och geologisk uppbyggnad av de formationer som finns i södra Östersjön och i Skåne. Mycket av kunskapen kommer från de undersökningar som OPAB genomfört under 1970- och 80-talen. SGU genomför för närvarande en överföring av data från OPABs seismiska mätningar i bl.a. Östersjön till nya datalagringsmedia. Allt material kommer av tekniska skäl inte att kunna överföras, men bedömningen är att stora delar av materialet kommer att finnas tillgängligt digitalt under 2011. Detta medför att seismiska data kan omprocesseras och användas för regionala bedömningar och värderingar av potentiella områden lämpade för mer detaljerade studier. SGU förvaltar även material från borrhningarna i form av borrhkärnor, borrhkax och borrhprotokoll. I nuläget är det i huvudsak ett analogt material som delvis har en mycket låg grad av tillgänglighet. Digitalisering av materialet (skanning av dokument, registrering av information om borrhålen och prov från borrhålen i databaser) skulle underlätta framtida sammanställningar av geologisk information och öka dess tillgänglighet och användbarhet.

OPABs borrhningar i Skåne och i Östersjön gällde möjligheterna att finna olja och gas vilket gjort att det saknas en hel del information som är viktig för bedömningen av lagringspotentialen för koldioxid. Genomgående saknas värdefull information om takbergarternas egenskaper. För att kunna göra bättre värderingar krävs kompletterande undersökningar (borrning) och analys av kärnprover från takbergart och akvifärbergart för bedömning av fysikaliska egenskaper och mätvärden från pump- och injekteringstester för bedömning av hydraulisk konduktivitet, hydrauliska gränsvillkor och allmänna akvifäregenskaper.

En annan aspekt som bör beaktas i samband med fortsatta utvärderingar av södra Östersjön, sydvästra Skåne och Kattegatt är att utpekade geologiska formationer är gränsöverskridande. Det finns därför starka skäl till att etablera ett samarbete med våra grannländer rörande lagring av koldioxid.

## REFERENSER

- Akervoll, I., Zweigel, P. & Lindeberg, E., 2006: *CO<sub>2</sub> storage in open dipping aquifers. Extended abstract.* 8th Conference on Greenhouse gas Control Technologies (GHGT-8), June 2006, Trondheim. 1–6.
- Aldahan, A.A., 1985: Mineral diagenesis and petrology of the Dala sandstone, central Sweden. *Bulletin of the Geological Institutions of the University of Uppsala* 12, 1–48.
- Axberg, S., 1980: Seismic stratigraphy and bedrock geology of the Bothnian Sea, northern Baltic. *Stockholm Contributions in Geology* 36, 153–213.
- BABEL Working Group, 1993a: Integrated seismic studies of the Baltic shield using data in the Gulf of Bothnia region. *Geophysical Journal International* 112, 305–24.
- BABEL Working Group, 1993b: Deep seismic reflection/refraction interpretation of crustal structure along BABEL profiles A and B in the southern Baltic Sea. *Geophysical Journal International* 112, 325–343.

- Bergman, S., Dehlin, H., Karis, L., Kübler, L., Ripa, M. & Söderman, J., 2001: Projekt Svealand. I H. Delin (red.): Regional berggrundsundersökning – Sammanfattning av pågående undersökningar. *Sveriges geologiska undersökning Rapporter och Meddelanden 110*, 10–40.
- Chadwick, A., Arts, R., Bernstone, C., May, F., Thibeau, S. & Zweigel, P., 2008: Best practice for the storage of CO<sub>2</sub> in saline aquifers – observations and guidelines from the SACS and CO<sub>2</sub>STORE projects. *British Geological Survey Occasional Publication 14*, 267 s.
- Chadwick, A., Williams, G., Delepine, N., Clochard, V., Labat, K., Sturton, S., Buddensiek, M.-L., Dillen, M., Nickel, M., Lima, A.L., Arts, R., Neele, F. & Rossi, G., 2010: Quantitative analysis of time-lapse seismic monitoring data at the Sleipner CO<sub>2</sub> storage operation. *Leading Edge* 29, 170–177.
- Christensen, N.P. & Larsen, M., 2004: Assessing European potential for geological storage of CO<sub>2</sub> – The GESTOCO project. *Geological Survey of Denmark and Greenland Bulletin 4*, 13–16.
- Erlström, M., 2008: Lagring av koldioxid i djupa akvifärer. Lagringsmöjligheter i Sverige och Danmark. *Elforsk rapport 08:84*, 1–54.
- Erlström, M. & Sivhed, U., 2001: Intra-cratonic dextral transtension and inversion of the southern Kattegat on the southwest margin of Baltica – Seismostratigraphy and structural development. *Sveriges geologiska undersökning C 832*, 1–33.
- Europeiska kommissionen, 2007: *Meddelande från kommissionen till rådet, europaparlamentet, europeiska och sociala kommittén och regionkommittén om att begränsa den globala klimatförändringen till 2 grader Celsius vägen framåt mot 2020 och därefter*. KOM (2007) 2 slutlig.
- Europeiska kommissionen, 2008: *Förslag till europaparlamentets och rådets direktiv om geologisk lagring av koldioxid och ändring av rådets direktiv 85/337/EEG, 96/61 EG, direktiv 2000/60 EG, 2001/80/EG, 2004/35/EG, 2006/12/EG och förordning (EG) nr 1013/2006*. KOM (2008) 18 slutlig.
- Europeiska kommissionen, 2009: *Europaparlamentets och rådets direktiv 2009/31/EG av den 23 april 2009 om geologisk lagring av koldioxid och ändring av rådets direktiv 85/337/EEG, Europaparlamentets och rådets direktiv 2000/60/EG, 2001/80/EG, 2004/35/EG, 2006/12/EG, 2008/1/EG samt förordning (EG) nr 1013/2006*. KOM, 2009.
- Fang, Y., Baojoun B., Dazhen T., Dunn-Norman S. & Wronkiewicz, D., 2010: Characteristics of CO<sub>2</sub> sequestration in saline aquifers. *Petroleum Science* 7, 83–92.
- Flodén, T., 1980: Seismic stratigraphy and bedrock geology of the Central Baltic. *Stockholm Contributions in Geology* 35, 1–240.
- Flodén, T., Jacobsson, R., Kumpas, M., Wadstein, P. & Wannäs, K., 1979: Geophysical investigations of western Bothnian Bay. *Geologiska Föreningens i Stockholms Förhandlingar* 101, 321–327.
- Flodén, T., Wannäs, K. & Lundström, E., 1984: Refraktionsseismisk uppmätning av en geologisk sektion söder om Visingsö, Vättern. I The Swedish State Power Board: *Deep gas. Swedish premises*. Pilot study Appendix, gas project G. 2, Report 3, 1–17.
- Gielen, D., 2003: *The future role of CO<sub>2</sub> capture and storage results of the IEA-ETP model*. IEA/EET Working Paper EET/2003/04, Paris.
- Gode, J. & Hovsenius, G., 2005: Avskiljning och lagring av koldioxid i ett nordiskt systemperspektiv – en studie baserad på arbete inom IEAs FoU-program kring växthusgaser. *Elforsk rapport 05:27*.
- Grönkvist, S.G., 2008: *CO<sub>2</sub>-avskiljning i Sverige*. ÅF-Konsult AB. Stockholm. Dnr 237-5846-07.
- Henkel, H., 2006: Geotermisk energi en vitbok. *Kungliga Tekniska högskolan TRITA-LWR.REPORT 3014*.
- Henkel, H. & Aaro, S., 2005: Geophysical investigations of the Siljan impact structure – a short review. I C. Koeberl & H. Henkel (red.): *Impact Tectonics*. Springer Verlag, 247–283.
- Henkel, H., Puura, V., Flodén, T., Kirs, J., Konsa, M., Preeden, U., Liljequist, R. & Fernlund, J., 2005: Arike bay – a 10 km diameter possible impact structure at the Bothnian sea coast of central Sweden. I C. Koeberl & H. Henkel (red.): *Impact Tectonics*. Springer Verlag, 323–340.
- Hesse, M.A., Tchepeli, H.A. & Orr, F.M., 2006: *Scaling analysis of the migration of CO<sub>2</sub> in saline aquifers*. Paper SPE 102796 presented at SPE Annual Technical conference and Exhibition, San Antonio, Texas.
- Hjalmarsson, A.K. & Olvstam, M.L., 2009: CCS-direktivet, Slutdokumentation. *Elforsk projekt 2534*.
- Hjelmqvist, S., 1966: Beskrivning till berggrundskartan över Kopparbergs län. *Sveriges geologiska undersökning Ca 40*, 1–217.



- Holloway, S., Heederik, L.G.H. van der Meer, Czernichowski-Lauriol, I., Harrison, R., Lindeberg, E., Summerfield, I.R., Rochelle, C., Schwartzkopf, T., Kaarstad, O. & Berger, B. 1996: *The underground disposal of Carbon Dioxide. Joule II project No. CT92-0031, summary report*. British Geological Survey, Keyworth, Nottingham, UK.
- IEA, 2006: *Energy technology perspectives 2006*. Scenarios and strategies to 2050, OECD/IEA, Paris.
- IEA, 2008: *World Energy Outlook 2008*. International Energy Agency, OECD/IEA, Paris.
- Ignatius, H. & Tulkki, P., 1970: Perameri, Kvartäärkerrostumat. *Merigeologinen kartta. Geologinen tutkimuslaitos*. Espoo.
- IPCC, 2005: *IPCC special report on carbon dioxide capture and storage*. Prepared by Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Summary for Policymakers. Cambridge University Press, Cambridge.
- Juhlin, C., Lindgren, J. & Collini, B., 1991: Interpretation of seismic reflection and borehole data from Precambrian rocks in the Dala Sandstone area, central Sweden. *First Break* 9, 24–36.
- Juhlin, C., Giese, R., Zinck-Jørgensen, K., Cosma, C., Kazemeini, H., Juhojuntti, N., Lüth, S., Norden, B. & Förster, A., 2007: 3D baseline seismics at Ketzin, Germany: The CO<sub>2</sub>SINK project. *Geophysics* 72, B121–132.
- Korhonen, J.V., Aaro, S., All, T., Nevanlinna, H., Skilbrei, J.R., Säävuori, H., Vaher, R., Zhdanova, L. & Koistinen, T., 2002a: Magnetic anomaly map of the Fennoscandian shield 1:2 000 000. *The Geological Surveys of Finland, Norway and Sweden and Ministry of Natural Resources of the Russian Federation*
- Korhonen, J.V., Aaro, S., All, T., Elo, S., Haller, L.Å., Kääriäinen, J., Kulinich, A., Skilbrei, J.R., Solheim, D., Säävuori, H., Vaher, R., Zhdanova, L. & Koistinen, T., 2002b: Bouguer anomaly map of the Fennoscandian shield 1:2 000 000. *The Geological Surveys of Finland, Norway and Sweden and Ministry of Natural Resources of the Russian Federation*.
- Korja, A., Heikkinen, P. & Aaro, S., 2001: Crustal structure of the Baltic Sea paleorift. *Tectonophysics* 331, 341–358.
- McGrail, B.P., Schaef, H.T., Ho, A.M., Chien, Y.J., Dooley, J.J. & Davidson, C.L., 2006: Potential for carbon dioxide sequestration in flood basalts. *Journal of Geophysical Research* 111, 1–13.
- Månsson A.G.M., 1996: Brittle reactivation of ductile basement structures; a tectonic model for the Lake Vättern basin, southern Sweden. *GFF* 118, A19.
- O'Connor, W.K., Rush, G.E. & Dahlin, D.C., 2003: Laboratory studies on the carbonation potential of basalt; applications to geological sequestration of CO<sub>2</sub> in the Columbia River Basalt Group. *AAPG Annual Meeting Expanded Abstracts* 12, 129.
- Oelkers, E.H., Gislason, S.R. & Matter, J., 2008: Mineral carbonation of CO<sub>2</sub>. *Elements* 4, 333–337.
- Ripa, M., Ahl, M., Bastani, M., Delin, H., Kübler, L., Nysten, P., Persson, L. & Thelander, T., 2008: Västra Dalarna. / H. Delin (red.): Berggrundsgeologisk undersökning – sammanfattning av pågående verksamhet 2007. *SGU-rapport* 2008:24, 143–191.
- Rodhe, A., 1987: Depositional environments and lithostratigraphy of the Middle Proterozoic Almesåkra group, southern Sweden. *Sveriges geologiska undersökning Ca* 69, 1–80.
- Sandgren, R., Asklund, B. & Westergård A.H., 1939: Beskrivning till kartbladet Gävle. *Sveriges geologiska undersökning Aa* 178, 1–143.
- Sayers, C. & Wilson, T., 2010: An introduction to this special section: CO<sub>2</sub> sequestration. *Leading Edge* 29, 148–149.
- Sliaupa, S., Shogenova, A., Shogenov K., Sliaupienne, R., Zabele, A. & Vaher R., 2009: Industrial carbon dioxide emissions and potential geological sinks in the Baltic states. *Oil Shale* 25, 465–484.
- Tarkowski R., Uliasz-Misiak B. & Wójcicki A., 2009: CO<sub>2</sub> storage capacity of deep aquifers and hydrocarbon fields in Poland – EU GeoCapacity Project results. *Energy Procedia* 1, 2671–2677.
- Teir, S., Tsupari, E., Koljonen, T., Arasto, A. & Nieminen, M., 2009: Översikt över avskiljning och lagring av koldioxid (CCS). *Svenska Tekniska Vetenskapsakademien i Finland*, 1–41.
- Thorslund, P. & Axberg, S., 1979: Geology of the southern Bothnian Sea. Part 1. *Bulletin of the Geological Institutions of the University of Uppsala, N.S.* 8, 35–62.
- van Balen, R.T. & Heermans, M., 1998: Middle Proterozoic evolution of central Baltoscandian intracratonic

- basins: evidence for asthenospheric diapirs. *Tectonophysics* 300, 131–142.
- Wannäs, K., 1989: Seismic stratigraphy and tectonic development of the Upper Proterozoic to Lower Paleozoic of the Bothnian Bay, Baltic Sea. *Stockholm Contributions in Geology* 40, 83–168.
- Veltheim, V., 1969: On the Pre-Quaternary geology of the Bothnian Bay area in the Baltic Sea. *Bulletin de la Commission Géologique de Finlande* 229, 1–56.
- Wikman, H., Bruun, Å., Dahlman, B. & Vidal, G., 1982: Beskrivning till berggrundskartan Hjo NO. *Sveriges geologiska undersökning Af* 120, 1–112.
- Winterhalter, B., 2000: Sedimentary rocks underlying the Gulf of Botnia. I T. Lundqvist & S. Autio (red.): Description to the bedrock map of central Fennoscandia (Mid-Norden). *Geological Survey of Finland Special Paper* 28, 1–176.
- Wójcicki, A., 2009: *CO<sub>2</sub> geological storage potential in Poland*. Ministry of Environment presentation.
- Zweigel, P., Arts, P., Lothe, A.E. & Lindeberg, E.B.G., 2004: Reservoir geology of the Utsira Formation at the first industrial-scale underground CO<sub>2</sub> storage site (Sleipner area, North Sea). I R.H. Worden & S. Baines (red.): Geological storage for CO<sub>2</sub> emissions reduction. *Geological Society, London, Special Publications*, 233, 165–180.



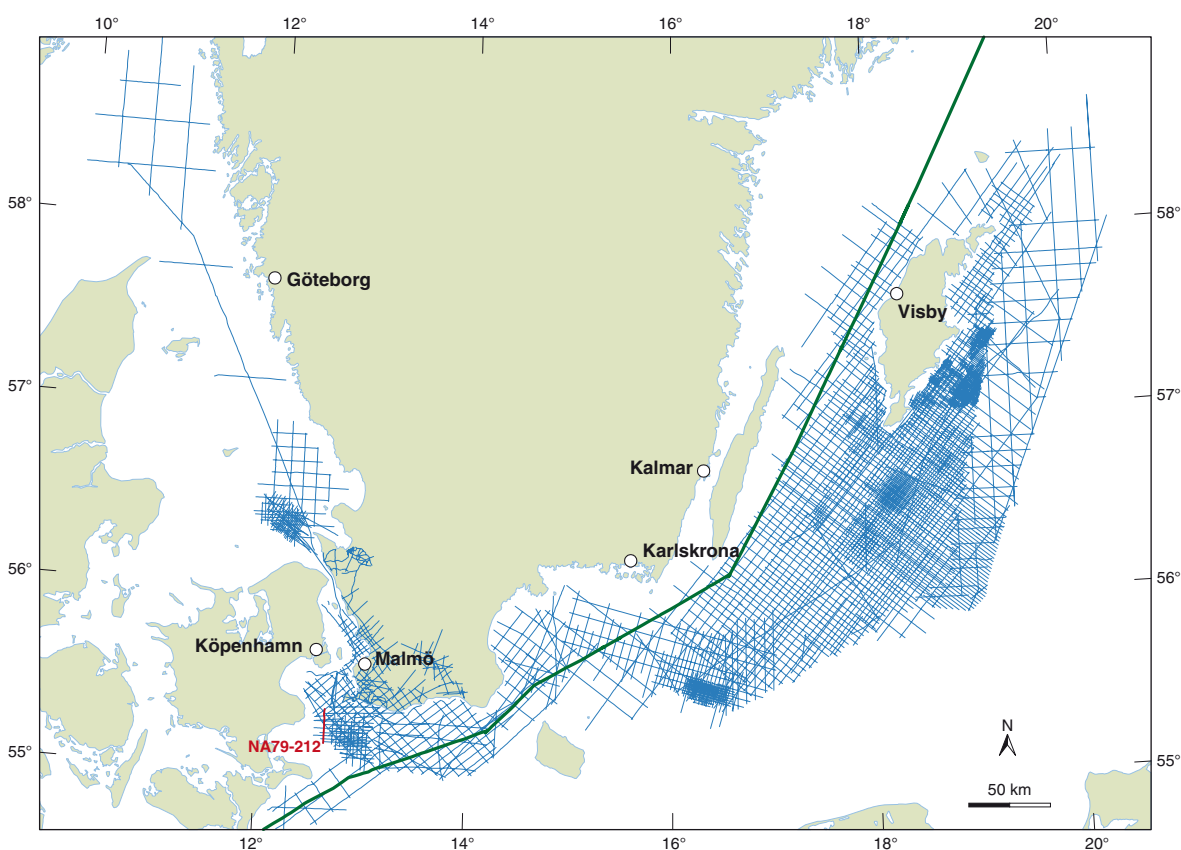
## BILAGA 1. GEOFYSISKT UNDERLAGSMATERIAL

Reflexionsseismiska mätningar är den vanligaste geofysiska metoden vid undersökningar av sedimentär berggrund och den används i stor utsträckning av olje- och naturgasindustrin. Här beskrivs tidigare utförda seismiska mätningar inom svenska land- och havsområden som bedöms vara av intresse vid undersökningar för koldioxidlagring i sedimentär berggrund. Beskrivningen är mycket översiktlig, exempelvis finns det sannolikt mätningar utförda i samband med kolväteprospektering under senare år som SGU inte har information om. Där det bedöms relevant diskuteras även tyngdkrafts- och magnetfältdata. Observera att för övervakning av koldioxidinjektering samt för mer detaljerade förundersökningar krävs nya mätningar.

De seismiska mätningar som beskrivs nedan är 2D-mätningar, dvs. mätningar utförda längs linjer, vilka resulterar i ett slags vertikala tvärsnitt genom berggrunden. Numera är det vanligt att använda 3D-mätningar, vilka täcker en yta och resulterar i att en volym av berggrunden avbildas. Vid seismisk övervakning av injekterad koldioxid skulle det sannolikt vara aktuellt att använda 3D-mätningar, som vid Sleipnerfältet utanför Norge (Chadwick m.fl. 2010).

### Seismiska mätningar

Oljeprospekteringsbolaget Oljeprospektering AB (OPAB) utförde huvudsakligen under perioden 1970–1990 omfattande reflexionsseismiska mätningar för att undersöka den sedimentära berggrunden under Östersjön, Kattegatt och Skagerrak samt på land i Skåne och på Gotland (fig. A1:1). Inom vissa områden är mätlinjerna mycket tätt placerade, exempelvis sydost om Gotland samt i yttre delen



Figur A1:1. Karta som visar ett urval av seismiska mätningar längs södra Sveriges kuster. De blå linjerna markerar OPABs mätningar, den kraftigare gröna linjen markerar en BABEL-mätning (BABEL Working Group 1993a, b).

av Hanöbukten. Enstaka mätprofiler insamlades även bl.a. i Bottenhavet samt i Siljansområdet. Mätningarna har normalt fullt tillräcklig djupkänning för att vara användbara i samband med koldioxidlagring. Data från OPABs seismiska mätningar förvaltas nu av SGU. I denna bilaga visas data från en mätning (fig. A1:2) och i bilaga 2–4 diskuteras resultaten från OPABs undersökningar. Liknande mätningar har även utförts av andra bolag, exempelvis de mätningar som utfördes av SECAB i södra Kattegatt under slutet av 1980-talet.

I slutet av 1980-talet utfördes djupseismiska mätningar inom BABEL-projektet (BABEL Working Group 1993a, b) längs några långa profiler längs hela den svenska ostkusten. Mätningarna var huvudsakligen inriktade på djupa strukturer (ned till övre manteln) och ny databearbetning krävs för att göra dem användbara i samband med koldioxidlagring. Uppsala universitet har utfört många seismiska landmätningar i Sverige, men nästan uteslutande inom områden med kristallin berggrund. Ett undantag är mätningen över Dalasandstenen som nämns i avsnittet Översikt över berggrundens lämplighet i Sverige, sid 26.

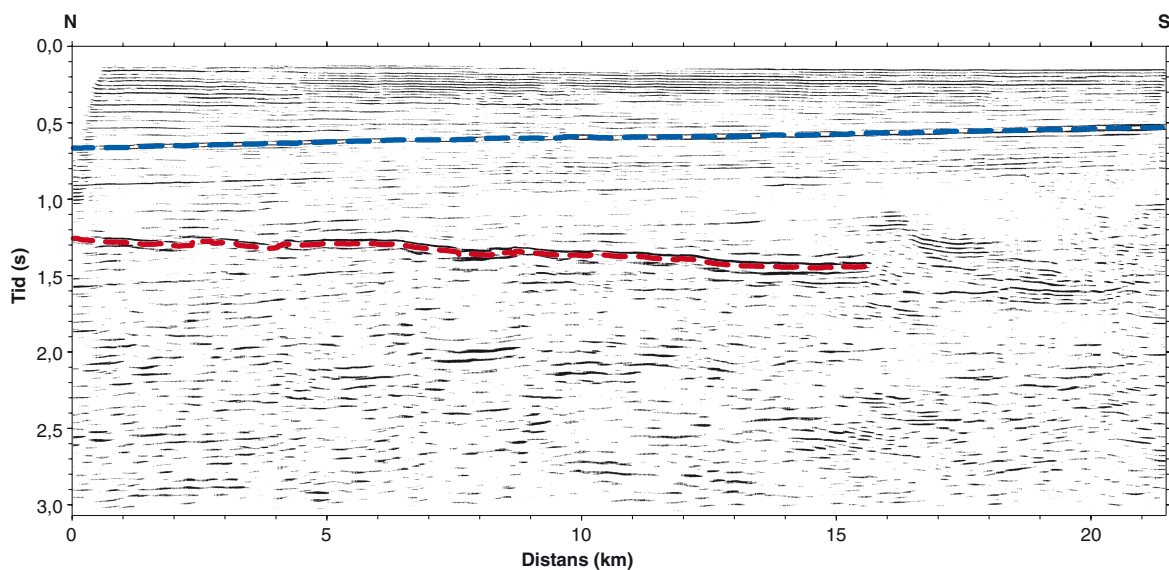
Som komplement till de i föregående stycken nämnda mätningarna har även omfattande seismiska mätningar utförts till havs med inriktning på hög upplösning av mer ytnära strukturer i den sedimentära berggrunden. Kännedomen om den sedimentära berggrunden i Bottenhavet och Bottenviken är till stor del baserad på mätningar av det här slaget. Reflexionsseismiska mätningar med hög upplösning har utförts av Stockholms universitet i Östersjön, Bottenhavet och Bottenviken. Djupkänningen är normalt några hundratal meter, vilket inte är tillräckligt i samband med koldioxidlagring (t.ex. Flodén m.fl. 1979, Axberg 1980, Flodén 1980, Bjerkeus & Eriksson 2001). I samband med dessa mätningar (eller ibland fristående från dessa) utfördes ofta även refraktionsseismiska mätningar. Dessa mätningar kan ha tillräcklig djupkänning för att vara användbara i samband med koldioxidlagring, men upplösningen är sämre än för de reflexionsseismiska mätningarna. Refraktionsseismiska mätningar visar den seismiska hastigheten i berggrunden. Denna metod kan användas för att särskilja kristallin och sedimentär berggrund och är mycket värdefull vid tolkningen av de reflexionsseismiska mätningarna. I Bottenviken har ett stort antal refraktionsseismiska mätningar utförts för att undersöka den sedimentära berggrundens tjocklek (Wannäs 1989), liknande mätningar har även utförts i Östersjön (Flodén 1980) samt i Vättern (Flodén m.fl. 1984), se även avsnittet Översikt över berggrundens lämplighet i Sverige sid 26. SGU utför kontinuerligt seismiska mätningar till havs primärt med inriktning på de kvartära avlagringarna. Mätningarna används även för att avgränsa den sedimentära berggrundens utbredning direkt under de lösa avlagringarna samt för att avbilda strukturer inom den översta delen av den sedimentära berggrunden. Djupkänningen är emellertid inte tillräcklig för koldioxidlagringssammanhang.

### Exempel på seismisk profil från OPABs mätningar

I figur A1:2 visas en typisk seismisk sektion från en av OPABs mätningar, i detta fall den ca 21 km långa mätprofilen NA79-212 uppmätt inom havsområdet sydväst om Skåne (fig. A1:1). En seismisk sektion är resultatet av omfattande databearbetning och normalt utförs all tolkning baserat på seismiska sektioner. Databearbetningen har utförts vid SGU.

På den seismiska sektionens horisontella axel visas avstånd från profilens startpunkt. Den vertikala axeln visar tvåvägstim (two-way time), vilket motsvarar tiden som krävs för den seismiska vågen att färdas från havsytan till en reflekterande struktur i berggrunden (t.ex. en bergartskontakt) och tillbaka till havsytan. För att konvertera den seismiska sektionen från tid till djup krävs information om den seismiska hastigheten i berggrunden. Vid den här mätningen är den maximala tiden 3 sekunder, vilket troligen motsvarar ett djup av minst 5 km.

De nästan horisontella eller svagt lutande reflektionerna i den övre delen av sektionen, inom tidsintervallet 0–1 s, är orsakade av lager inom den sedimentära berggrunden. Vid 0,5–0,7 s uppträder en kontinuerlig reflektion som stupar svagt mot norr (blå streckad linje i fig. A1:2). Reflektionen här-



Figur A1:2. Seismisk sektion från OPABs mätprofil NA79-212, lokaliserad i havet sydväst om Malmö (se fig. A1:1 för läge). Reflektionerna från överytan av Arnagergrönsanden samt från den kristallina berggrundens överyta har markerats med blå respektive röda streckade linjer (se text för beskrivning). Djupskalan är överdriven i förhållande till den horisontella skalan, tiden 3 s motsvarar troligen ett djup av ungefär 5 km.

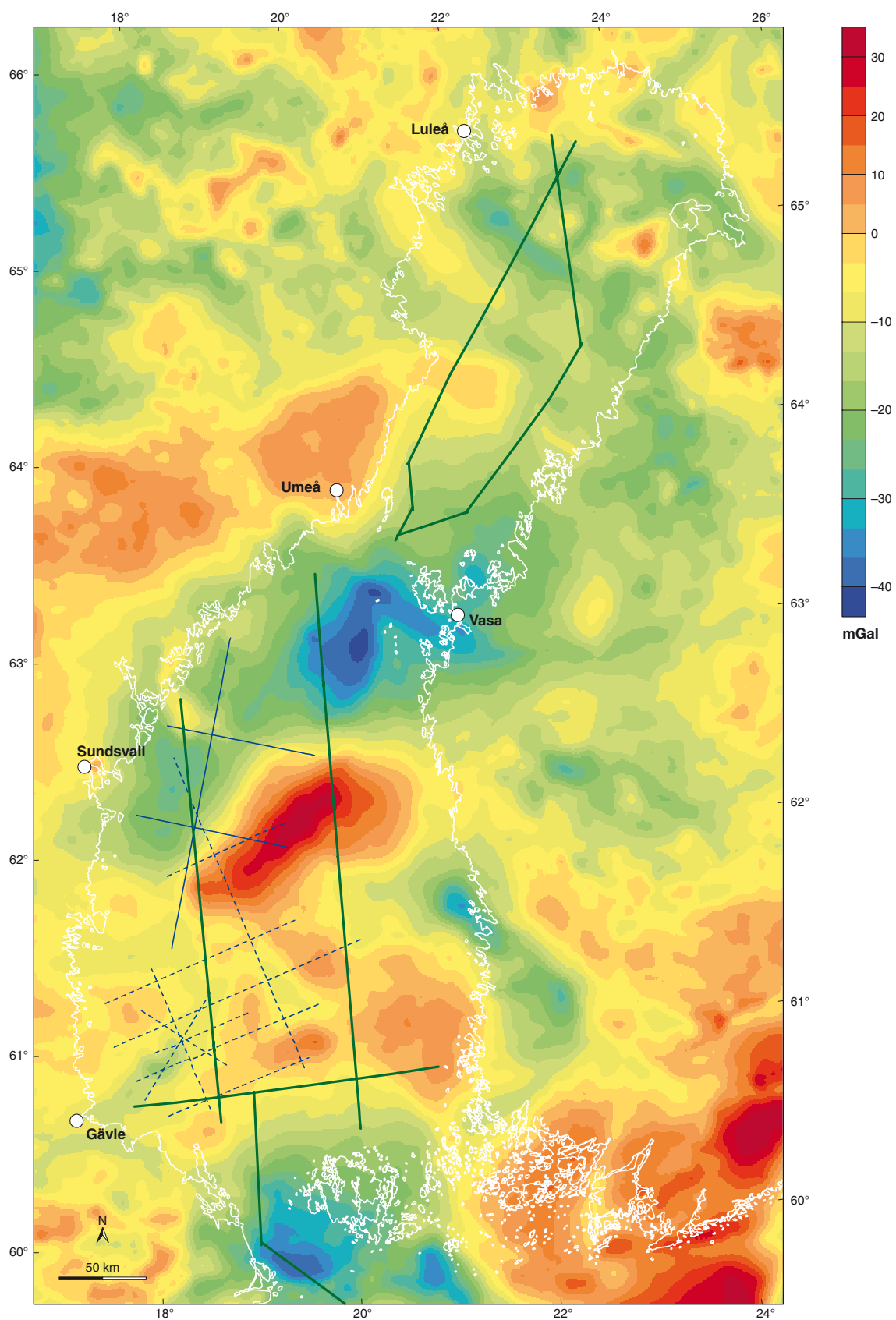
rör från kontakten mellan den för koldioxidlagring intressanta Arnagergrönsanden (se bilaga 4) och en överliggande tät kalksten. Vid 1,2–1,5 s, ungefärligen motsvarande ett djup av 2 km, syns en mer oregelbunden, undulerande reflexion från den kristallina berggrundens överyta (röd streckad linje i fig. A1:2), vilken dock är svår att följa vid profilens södra ände. Flera tydliga förkastningar framträder, i synnerhet vid profilens södra ände. Vid databearbetningen har migration använts, vilket är en viktig metod när reflexionsytorna lutar eller är störda av förkastningar.

Vid havsmätningar uppträder ofta multipla reflektioner, vilka är en slags störningar i de seismiska sektionerna som kan leda till felaktiga tolkningar. I sektionen från NA79-212 är dock multiplerna inte särskilt framträdande.

## Mätningar av magnetfält och tyngdkraft

Mätningar av magnetfält och tyngdkraft kan i de här sammanhangen exempelvis användas för att uppskatta djupet till den kristallina berggrunden samt för att lokalisera större deformationszoner. Vid mätningar av magnetfältet över större områden används normalt flygplan, vilket gör metoden mycket billig i jämförelse med de seismiska mätningarna. SGU utför systematiskt flygburna mätningar av magnetfält, gammastrålning och elektromagnetiskt fält, samt tyngdkraftsmätningar över land (Aaro & Byström 2001). Över havsområden har tyngdkraften mätts i samverkan med nordiska och baltiska institutioner. Mätningarna görs med båt och flygplan, eller på vintern på tjock havsis.

Mätningarna av magnetfält och tyngdkraft över de svenska havsområdena är betydligt glesare än motsvarande landmätningar, i synnerhet beträffande magnetfältet. Genom att studera variationerna i tyngdkraften är det dock möjligt att få en uppfattning om den sedimentära berggrundens tjocklek. Inom Bottenhavet förekommer områden med massunderskott (negativa tyngdkraftsanomalier) exempelvis utanför Sundsvall och finska Vasa (fig. A1:3). En trolig förklaring till dessa tyngdkraftsunderskott är förekomst av lätta sedimentära bergarter. För att kunna beräkna tjockleken på de sedimentära lager som orsakar tyngdkraftsunderskotten krävs information om berggrundens densitet, vilket kan vara besvärligt att erhålla, särskilt när berggrunden täcks av hav. Uppskattningar av Korja m.fl. (2001) visar att den sedimentära bassängen nära Vasa kan ha ett djup av 3–4 km.



Figur A1.3: Tyngdkraftskarta med ett urval av seismiska mätningar inom Bottenhavet och Bottenviken. De blå linjerna visar seismiska mätningar utförda i prospekterings syfte, varav de heldragna markerar OPABs mätningar och de streckade markerar mätningar utförda av andra prospekteringsbolag. SGU har digitala data från OPABs mätningar och utskriften av seismiska sektioner för de övriga mätningarna. De kraftiga gröna linjerna markerar BABEL-mätningarna (se texten). I bakgrunden visas tyngdkraftsfältet (Korhonen m.fl. 2002b).

## Möjligheter till förbättrad analys

Den följande diskussionen är huvudsakligen inriktad på OPABs seismiska data, eftersom dessa är relativt enkelt tillgängliga samt anpassade för de djup som avses för koldioxidlagring. En möjlighet vore också att använda de ovan nämnda BABEL-profilerna (BABEL Working group 1993a, b) efter ny databearbetning.

SGU förvaltar materialet från OPABs seismiska undersökningar, bestående av digitala obearbetade data på magnetband samt utskrifter av seismiska sektioner på papper eller plastfilm, sektioner som är resultatet av OPABs databearbetning i samband med mätningarna. Den kvarvarande överföringen av data från magnetband till moderna lagringsmedia har pågått under 2010 och förväntas snart vara avslutad (viss överföring gjordes under 1990-talet). Därefter är det möjligt att göra förnyad databearbetning för att få ut mer information från mätningarna. Utskrifterna av seismiska sektioner (på papper eller plastfilm) som finns arkiverade i Lund har till viss del sorterats och katalogiserats. Det är angeläget att fortsätta detta arbete samt att skanna dessa utskrifter för att göra dem tillgängliga.

Vi bedömer att OPABs seismiska mätningar, samt andra liknande seismiska mätningar, huvudsakligen är användbara för att bestämma lämpliga kandidatområden för ett eventuellt framtida koldioxidlager. Moderna mätningar har bättre upplösning, men att utföra seismiska mätningar över stora ytor är kostsamt. För mer detaljerade platsundersökningar kommer det dock sannolikt att bli nödvändigt att utföra moderna seismiska 3D-mätningar för att exempelvis lokalisera förkastningar. Här kan nämnas projektet CO<sub>2</sub>SINK, där berggrundens ungefärliga uppbyggnad var känd från tidigare 2D-mätningar (samt borrhningar) men där det inför koldioxidinjekteringen utfördes en ny 3D-mätning (Juhlin m.fl. 2007), vilken även tjänade som en referensmätning för den senare övervakningen av injekteringen av koldioxid.

Som framgår av bilagorna 2–4 har ett omfattande arbete lagts ned på att tolka OPABs seismiska mätningar i Östersjön och Kattegatt, vilket bl.a. resulterat i kartor över den sedimentära lagerföljdens tjocklek. Den tolkningen baserades på de utskrifter av seismiska sektioner som finns i SGUs arkiv. Möjligen skulle det vara möjligt att förbättra tolkningen inom vissa områden efter att förnyad databearbetning utförts för att ta fram nya seismiska sektioner. Exempelvis skulle det vara möjligt att utföra migration för att förbättra de seismiska sektionerna i de fall där lagerföljderna är mer komplicerade eller störda av förkastningar. Det vore även lämpligt att utföra speciell databearbetning för att uppskatta vissa berggrundsegenskaper av intresse för koldioxidlagring, exempelvis porositet.

Det verkar finnas osäkerhet om den äldre sedimentära berggrundens tjocklek i Bottenhavet. De tre OPAB-mätningarna från projekt S71B i havsområdet utanför Sundsvall korsar delvis det markanta tyngdkraftsunderskottet som nämns ovan (fig. A1:3) och som möjligen orsakas av en djupare sedimentbassäng. För dessa profiler saknas utskrifter av seismiska sektioner i SGUs arkiv och det är oklart om fullständig databearbetning utfördes. Mätningarna inom projekt GGB86 omfattar också tyngdkraftsunderskottet utanför Sundsvall. För dessa mätningar finns seismiska sektioner på plastfilm. Vi har inte kännedom om någon tolkning baserad på dessa profiler. En sådan borde vara värdefull för att mer detaljerat kartlägga den sedimentära berggrunden i området, vilket avser både den yngre och den äldre sedimentära berggrunden. Här bör också nämnas att de djupseismiska BABEL-profilerna (BABEL Working Group 1993a, b) korsar området.

## Referenser

- Aaro, S. & Byström, S., 2001: Tyngdkraften och magnetfältet – två viktiga nycklar till Jordens inre. *Geologiskt forum* 32, 21–28.
- BABEL Working Group, 1993a: Integrated seismic studies of the Baltic shield using data in the Gulf of Bothnia region. *Geophysical Journal International* 112, 305–24.
- BABEL Working Group, 1993b: Deep seismic reflection/refraction interpretation of crustal structure along BABEL profiles A and B in the southern Baltic Sea. *Geophysical Journal International* 112, 325–343.



- Bjerkéus, M. & Eriksson, M., 2001: Late Silurian reef development in the Baltic Sea. *GFF* 123, 169–179.
- Chadwick, A., Williams, G., Delepine, N., Clochard, V., Labat, K., Sturton, S., Buddensiek, M.-L., Dillen, M., Nickel, M., Lima, A.L., Arts, R., Neele, F. & Rossi, G., 2010: Quantitative analysis of time-lapse seismic monitoring data at the Sleipner CO<sub>2</sub> storage operation. *Leading Edge* 29, 170–177.
- Flodén, T., 1980: Seismic stratigraphy and bedrock geology of the Central Baltic. *Stockholm Contributions in Geology* 35, 1–240.
- Flodén, T., Jacobsson, R., Kumpas, M., Wadstein, P. & Wannäs, K., 1979: Geophysical investigations of western Bothnian Bay. *Geologiska Föreningens i Stockholms Förhandlingar* 101, 321–327.
- Flodén, T., Wannäs, K. & Lundström, E., 1984: Refraktionsseismisk uppmätning av en geologisk sektion söder om Visingsö, Vättern. / The Swedish State Power Board: *Deep gas. Swedish premises*. Pilot study Appendix, gas project G. 2, Report No. 3, 1–17.
- Korhonen, J.V., Aaro, S., All, T., Elo, S., Haller, L.Å., Kääriäinen, J., Kulinich, A., Skilbrei, J.R., Solheim, D., Säävuori, H., Vaher, R., Zhdanova, L. & Koistinen, T., 2002b: Bouguer anomaly map of the Fennoscandian shield 1:2 000 000. *The Geological Surveys of Finland, Norway and Sweden and Ministry of Natural Resources of the Russian Federation*.
- Korja, A., Heikkinen, P. & Aaro, S., 2001: Crustal structure of the Baltic Sea paleorift. *Tectonophysics* 331, 341–358.
- Wannäs, K., 1989: Seismic stratigraphy and tectonic development of the Upper Proterozoic to Lower Paleozoic of the Bothnian Bay, Baltic Sea. *Stockholm Contributions in Geology* 40, 83–168.



## BILAGA 2. DEN KAMBRISKA LAGERFÖLJDEN I SÖDRA ÖSTERSJÖN

Kunskapen om den kambriska lagerföljden i södra Östersjön samt på Öland och Gotland grundas i stor utsträckning på information från den kolväteprospektering som pågått sedan 1970-talet av OPAB (Oljeprospektering AB), delvis tillsammans med andra intressenter. I samband med dessa undersökningar har material i form av seismiska profiler och information från borrhningar analyserats. Detta material har sedan, i enlighet med kontinentalsockellagen lämnats över till SGU.

På Öland och Gotland har även andra, bland annat SGU, utfört borrhningar för att utreda de geologiska förhållandena på djupet. På Öland är delar av den kambriska lagerföljden känd från berggrundsblottningar, medan den kambriska lagerföljden på Gotland endast är känd från borrhningar och förekommer på djup större än 250 m. Den kambriska sandstenen i södra Östersjön, som på grund av goda reservoaregenskaper varit föremål för kolväteprospektering, kan också vara lämplig för lagring av koldioxid. En reviderad beskrivning av den kambriska lagerföljdens indelning publicerades 2007 av Nielsen & Schovsbo. Det är den som ligger till grund för beskrivningen av den kambriska lagerföljden.

I figur A2:1 redovisas delar av de seismiska undersökningarna och borrhningarna till havs samt ett urval av borrhningar på Öland och Gotland.

Den underkambriska till ordoviciska lagerföljden i södra Östersjön avsattes under stabila tektoniska förhållanden, vilket bland annat har medfört en relativt långsam och likformig sedimentation. Detta innebär att flertalet berggrundsenheter kan följas över stora delar av området. Variationer i den litologiska uppbyggnaden har sitt ursprung i förändringar i avsättningsmiljö, till exempel avståndet till kusten, utseendet på flodmynningar och deltan, vattendjup, vattenströmmar och vågor.

Berggrunden lutar svagt ( $<1^\circ$ ) åt ostsydost vilket medför att successivt yngre berggrund bildar berggrundsytta i riktning mot den baltiska delen av Östersjön (fig. A2:2). I samma riktning finner man också den kambriska sandstenen på allt större djup (fig. A2:3). Av den geologiska kartan (fig. A2:2) framgår att kambriska bergarter bildar berggrundsytta i västligaste delen av Östersjön (Öland) medan bergarter avsatta under devon bildar berggrundsytta i sydöstra delen av södra Östersjön. Det vill säga, berggrundsytan blir yngre ju längre mot sydost man rör sig, från den svenska kusten. Tjockleken på hela den sedimentära lagerföljden är i storleksordningen 1 000–1 500 m i den östra delen av området medan den i borrhningar på Öland endast uppgår till 140 m.

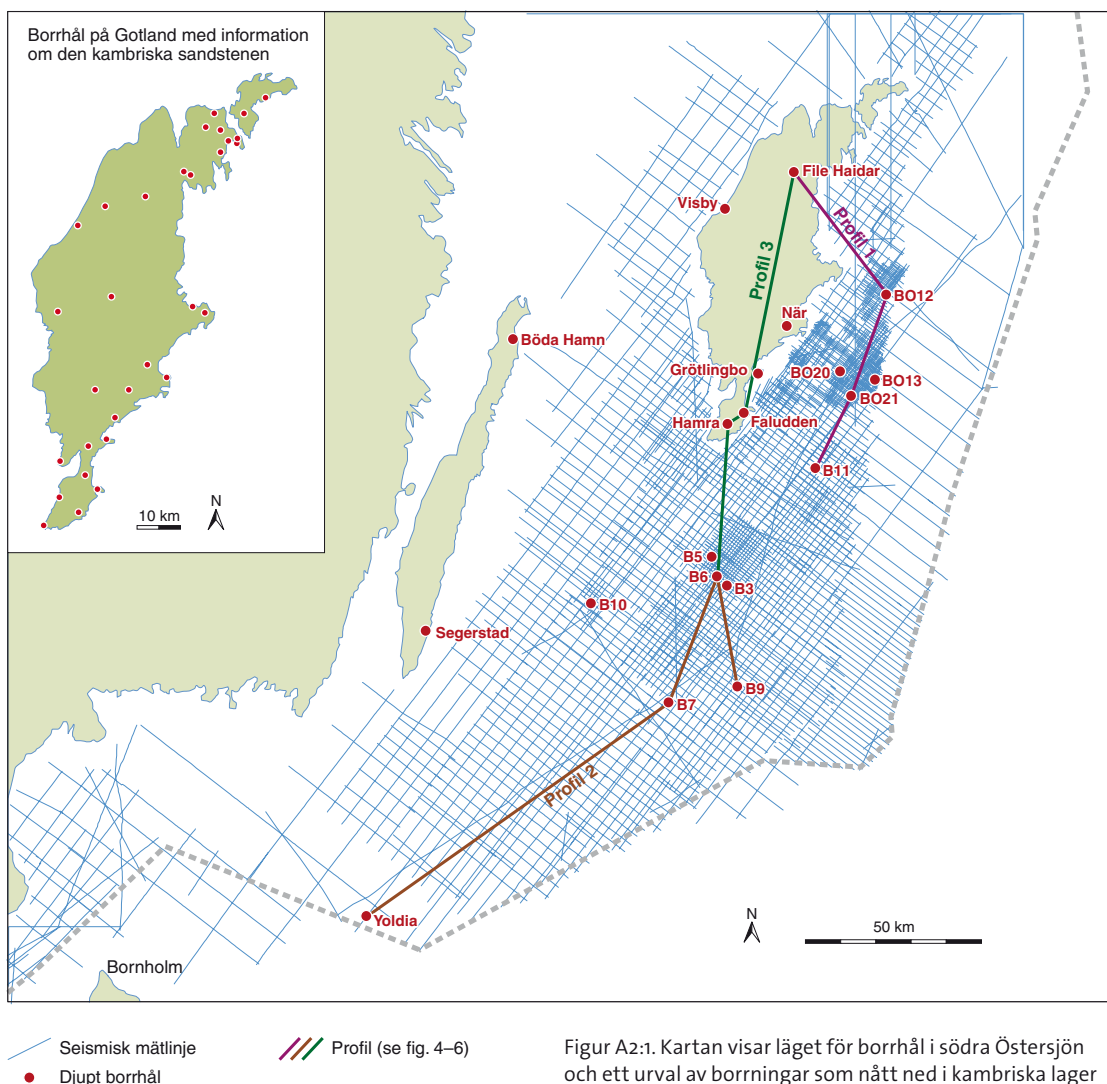
Den kambriska berggrunden har dokumenterats i ett antal borrhningar, både på land och till havs. I figurerna A2:4–6 visas ett antal borrhål och hur den kambriska lagerföljden korreleras mellan dessa. Korrelationerna är gjorda genom bergartsbestämning av borrhkärnor och borrhkax, samt geofysiska mätningar som utförts i borrhålen. Sandstenshorisonterna går att identifiera med hjälp av den naturliga gammastrålningen (GR i figurerna) eftersom de uppvisar lägre mätvärden än andra bergartshorisonter.

Faluddensandstenen tillsammans med Närsandstenen bedöms vara de geologiska enheter som har bäst förutsättningar för geologisk lagring av koldioxid. Av denna anledning har en karta som visar Faluddensandstenens tjocklek tagits fram (fig. A2:7). I figur A2:8 redovisas summan av tjocklekarna för de sandstenar som är äldre än Faluddensandstenen, dvs. huvudsakligen När- och Viklausandstenarna.

En viktig förutsättning för koldioxidlagring är att djupet överstiger 800 m. I figur A2:9 visas de områden inom svenskt territorium eller ekonomisk zon där Faluddensandstenen påträffas på ett djup som beräknas överstiga 800 m.

### Kambriska akvifärer

I den svenska delen av södra Östersjön består den kambriska lagerföljden av File Haidarformationen (undre kambrium), Borgholmformationen (undre kambrium till mellersta kambrium) och Alunskifferformationen (övre kambrium, fig. A2:10). File Haidarformationen och Borgholmformationen domine-



Figur A2:1. Kartan visar läget för borrhål i södra Östersjön och ett urval av borrhål som nått ned i kambriska lager på Öland och Gotland samt läget för ett urval av seismiska mätlinjer till havs.

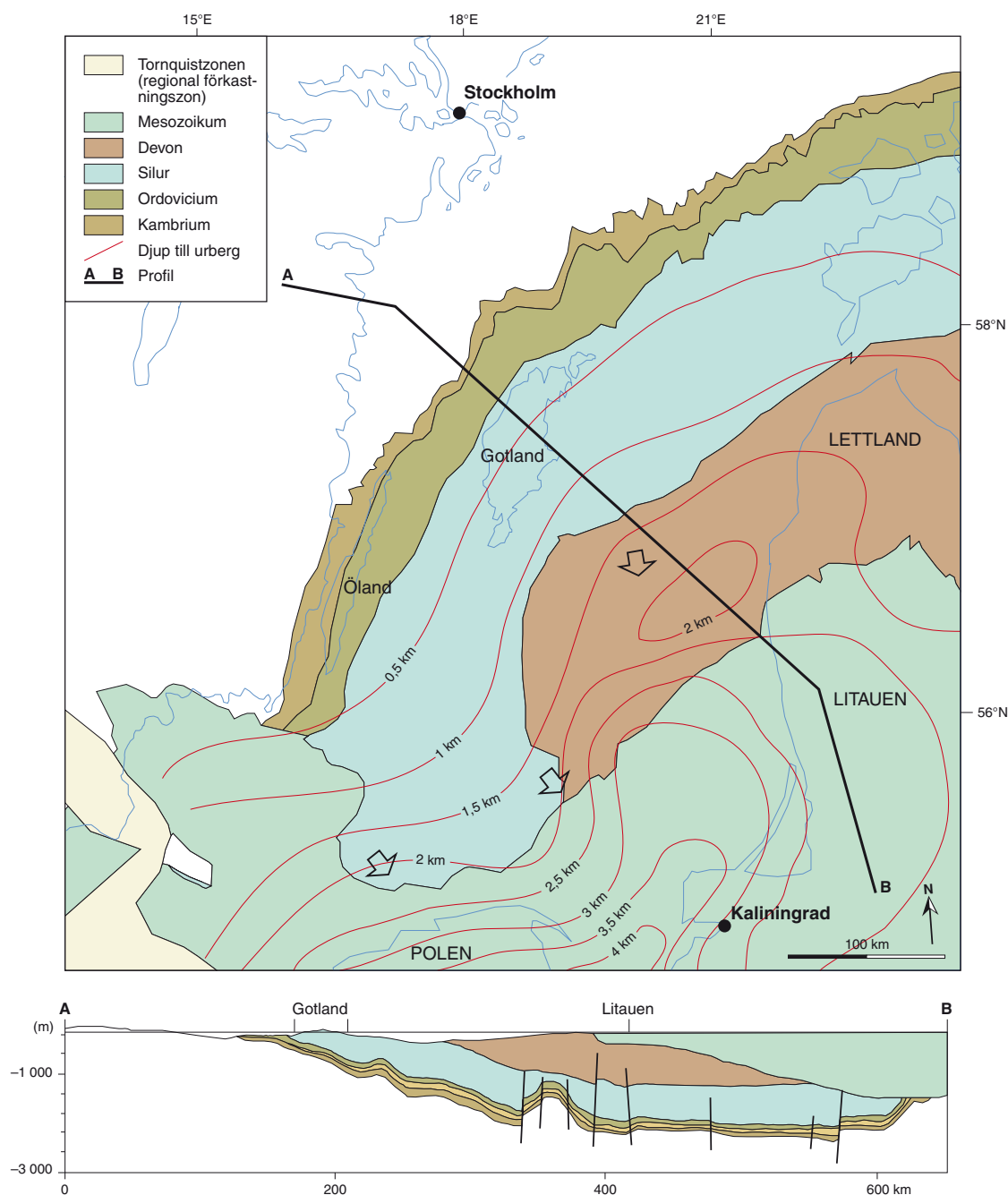
ras av lerstenar, slamstenar och siltstenar. I denna lagerföljd förekommer också ett antal sandstensnivåer, oftast med stor lateral utbredning. Inom File Haidarformationen finns huvudsakligen två sandstenshorisonter, Viklaudet och Närsandsten, och inom Borgholmformationen en sandstenshorisont, Faluddensandstenen. Dessa tre sandstenshorisonter har en stor lateral utbredning i södra Östersjön. Det förekommer även andra sandstenshorisonter i den undre till mellankambriska lagerföljden med varierande lateral utbredning, men dessa bedöms ha mindre betydelse i detta sammanhang.

### File Haidarformationen

File Haidarformationen består av tre led: Viklaudet (äldst), Närskiffer och Närsandsten (yngst). Formationens tjocklek varierar mellan 88 m i File Haidarborrningen och 127 m i borrhningen B3. Formationen saknas i borrhningen B10. På Öland varierar tjockleken mellan 72 och 112 m.

### Viklaudet

Den undre och övre delen av Viklaudet består av fin- till medelkornig kvartssand (s.k. Viklausandsten) och den mellersta delen av Viklaudet består av av bioturberad siltsten (även kallad kråksten)



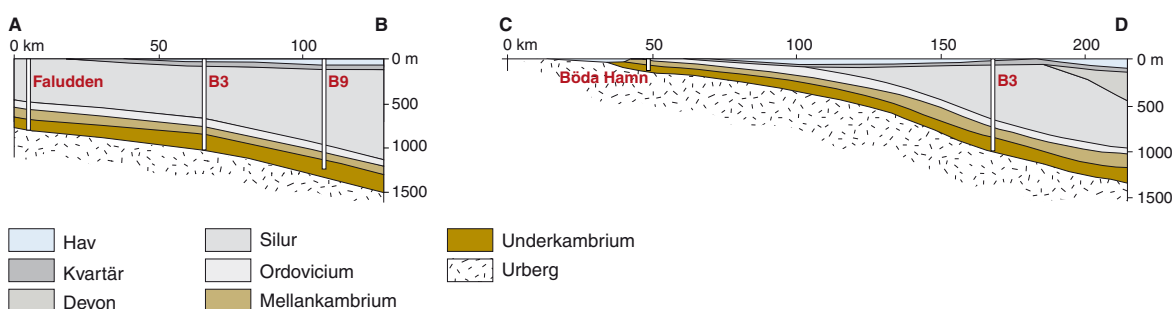
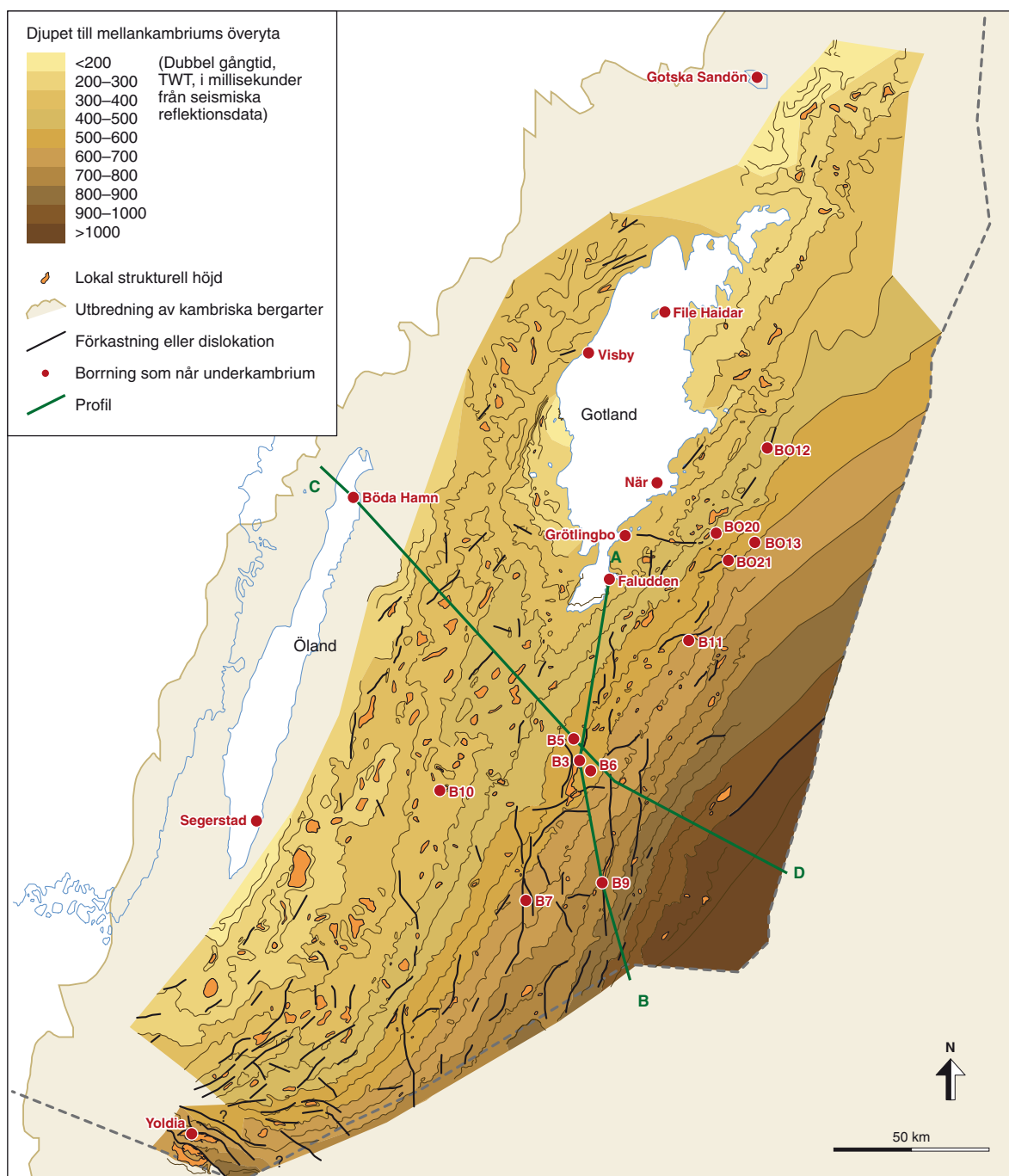
Figur A2:2. Karta som översiktligt visar berggrundsytans ålder i södra Östersjön. Profilen i undre delen av figuren visar ett snitt genom berggrunden från nordväst till sydöst.

eller laminerad mörkgrön skiffer. Den undre delen av ledet är delvis arkosisk och konglomeratförande. Bergarten är generellt välcementerad med låg porositet och permeabilitet.

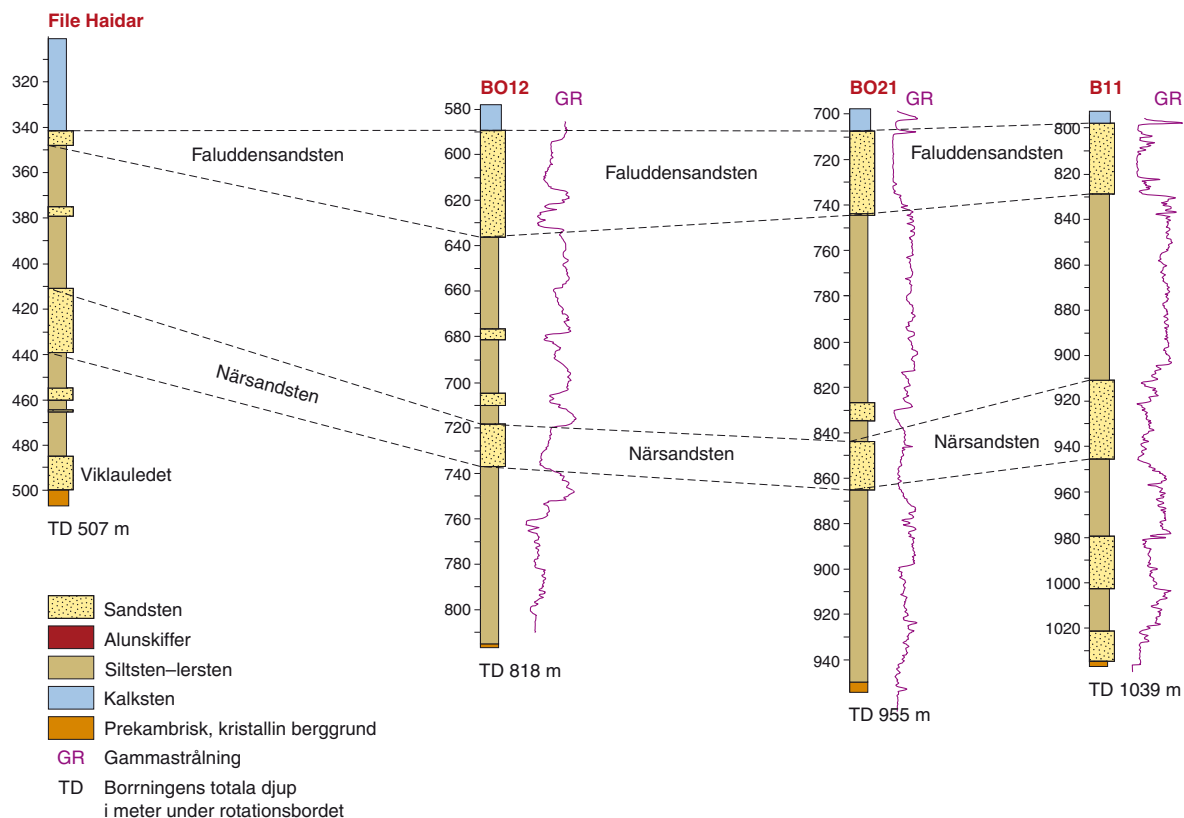
Enhetens tjocklek varierar från 5 till 57 m på Gotland och från 40 till 74 m på Öland där den även saknas lokalt. I borrhningen B3 är den 56 m tjock och i Yoldiaborrningen 27 m.

### Närsandsten

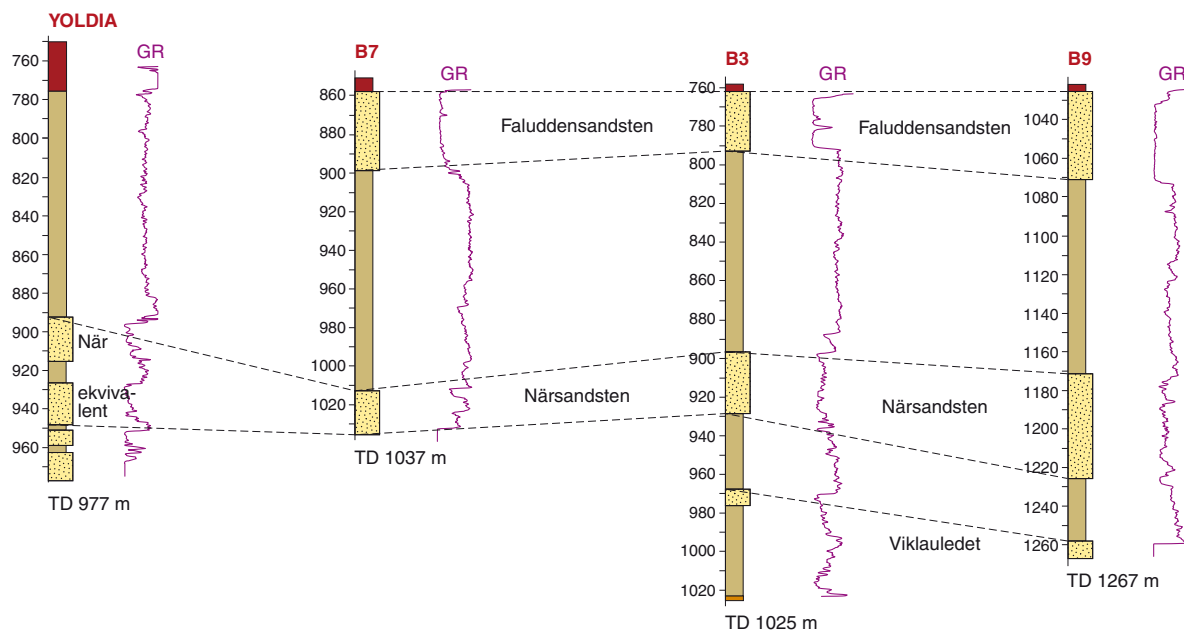
Närsandstenen domineras av fin- till medelkorniga sandstenar med slam- och siltstenslager. Den har en stor lateral utbredning och förekommer i såväl Yoldiaborrningen som i östra delen av södra Östersjön samt på Öland och Gotland. I dessa områden har Närsandstenen en god porositet. I borrhningarna B3



Figur A2:3. Karta som visar djupet till mellankambriums överyta samt två profiler som visar ett snitt genom berggrunden från norr till söder (A–B) samt från nordväst till sydöst (C–D). Mellankambriums överyta sammanfaller i stora delar av området med Faluddensandstenens överyta.

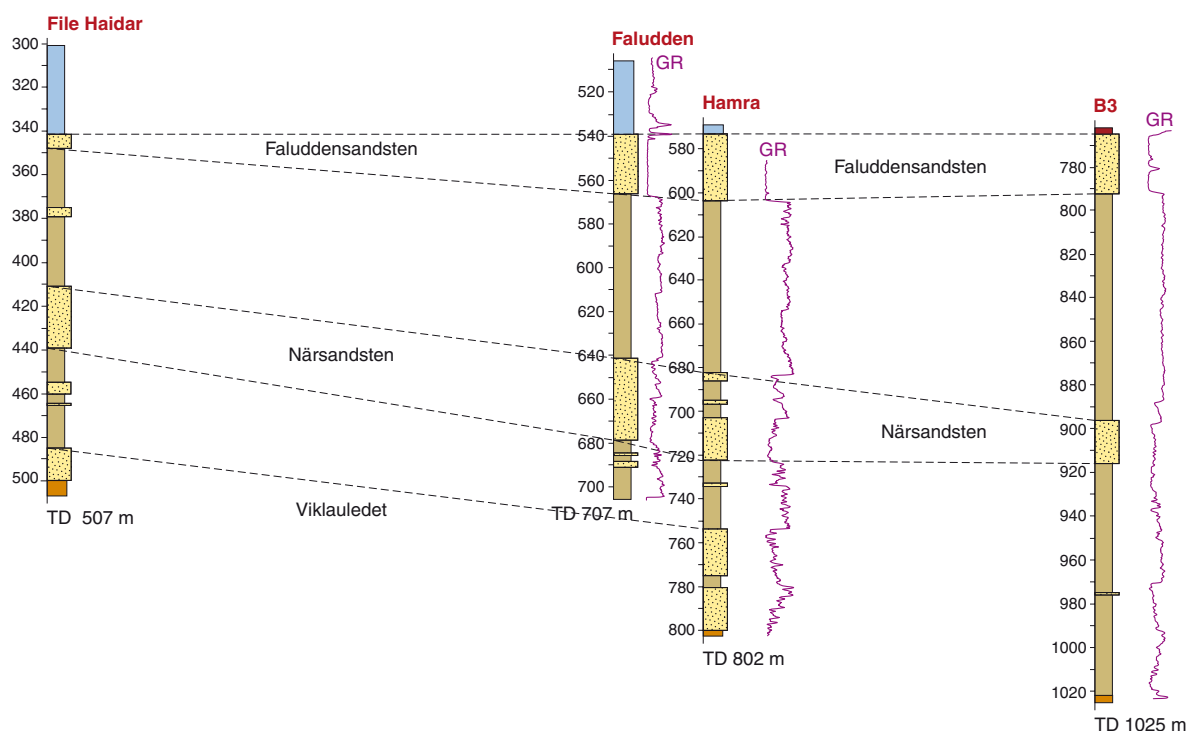


Figur A2:4. Profil 1 från södra Östersjön. Profilens sträcker sig från norra Gotland till havsområdet öster om Gotland. Profilens läge visas i figur A2:1.



Figur A2:5. Profil 2 från södra Östersjön. Profilens sträcker sig från Yoldiaborrningen i väster till borringen B9 i öster, söder om Gotland. Profilens läge visas i figur A2:1 och teckenförklaringen visas i figur A2:4.

och B9 uppgår den genomsnittliga porositeten till 13–14 %. På Gotland varierar tjockleken mellan 10 och 39 m, på Öland mellan 7 och 32 m och i borringarna B3 och B9 är tjockleken 32 m respektive 52 m. Närsandstenen saknas i borringen B10. I Yoldiaborrningen kan Närsandstenen delas in i två enheter. Den undre är ca 24 m tjock och uppbyggd av mycket finkorniga, välcementerade, glaukonitiska, kaolinitiska och kvartsitiska sandstenar med obetydlig porositet. Den övre delen utgörs i



Figur A2:6. Profil 3 från södra Östersjön. Profilen sträcker sig från norra Gotland till havsområdet öster om Gotland. Profilens läge visas i figur A2:1 och teckenförklaringen visas i figur A2:4.

Yoldiaborrningen av en 33 m tjock lagerföljd, uppbyggd av medel- till grovkorniga, välcementerade sandstenar vilka uppvisar låga porositetsvärden.

### **Borgholmformationen**

Borgholmformationen består av fem led (äldst till yngst): Grötlingbo-, Mossberga-, Bårstad-, Faludden- och Äleklintaleden. Formationen har en tjocklek på 70 m i File Haidarborrningen, 127 m på södra Gotland, 49–114 m på Öland, 50 m i Yoldiaborrningen och 147–152 m i borrhningarna B3, B11, B9 och B7.

#### **Grötlingbo-, Mossberga- och Bårstadledet**

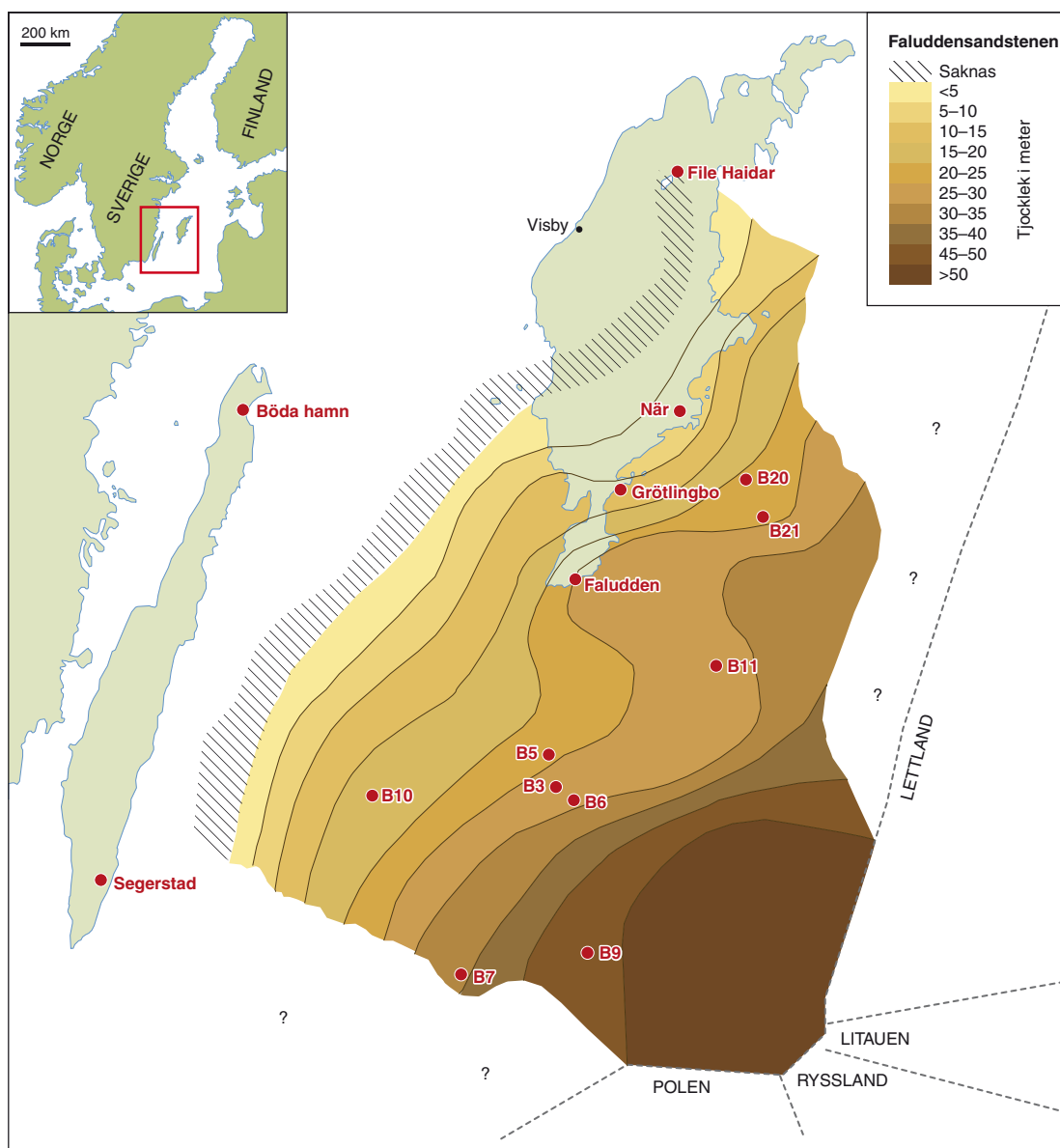
De tre leden Grötlingbo, Mossberga och Bårstad är uppbyggda av siltstenar, slamstenar och skiffrar med varierande tjocklek. Det är svårt att urskilja de olika enheterna utan biostratigrafiska dateringar. Av denna anledning förs dessa tre enheter samman i denna rapport. På Gotland förekommer stundtals även sandstenslager med varierande tjocklek, maximalt 45 m. De uppvisar oftast låga porositetsvärden. De tre ledens sammanlagda tjocklek uppgår till 100–120 m på svenskt territorium eller ekonomisk zon, 60–100 m på Gotland och uppemot ca 40–44 m på Öland.

#### **Faluddenledet (Faluddensandsten)**

Faluddensandstenen tillhör stratigrafiskt Faluddenledet som är den sandstenshorisont som har störst utbredning och även största tjocklek i södra Östersjön. I figur A2:7 visas sandstenens utbredning och tjocklek i Östersjöområdet. I figur A2:3 visas djupet till mellankambriums överyta vilken i stort sett sammanfaller med djupet till Faluddensandstenen i de områden där den förekommer.

Faluddensandstenen kan beskrivas som en vit, fin- till medelkornig, väl sorterad kvartssandsten. På Gotland har Faluddensandstenen en genomsnittsporositet på 17 % och en permeabilitet som



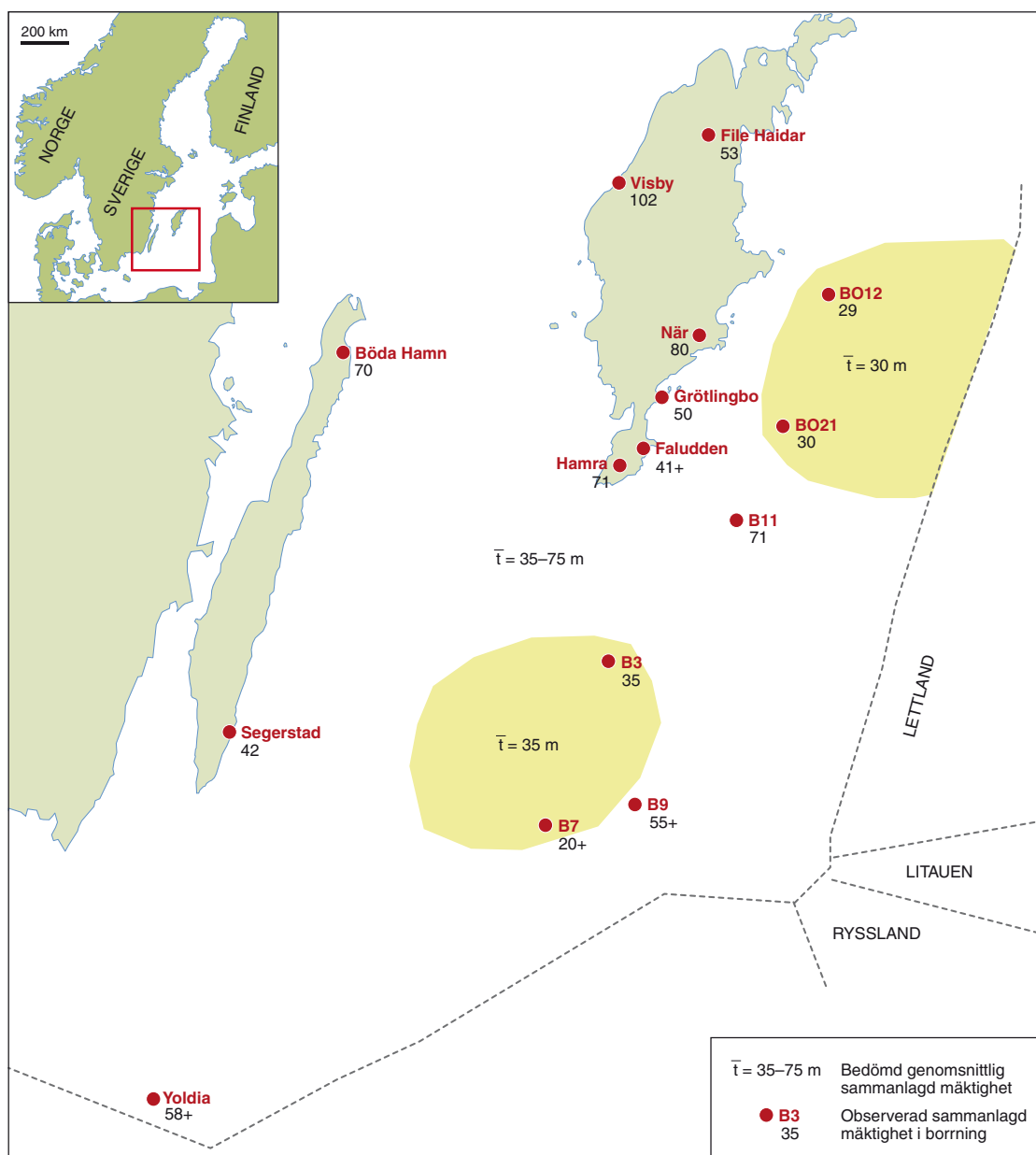


Figur A2:7. Faluddensandstenens utbredning och tjocklek i södra Östersjön.

varierar mellan 300 och 1300 mD. Ett exempel på sandstenens uppbyggnad från borrhningen B7 visas i figur A2:11. I borrhningen B7 har en porositet på 13,9 % uppmäts med en permeabilitet på 124 mD och i borrhningen B9 är den genomsnittliga porositeten 16,0 %. Faluddensandstenen saknas på Öland, i Yoldiaborrningen och på nordvästra Gotland. Faluddensandstenen har en maximal tjocklek på ca 50 m i sydostligaste delen av den svenska ekonomiska zonen i södra Östersjön. Den breder ut sig från nordöstra Gotland längs en zon som löper från File Haidar till ca 20 km öster om Ölands södra udde och vidare åt söder.

### Äleklintaledet

Äleklintaledet är det yngsta ledet i Borgholmformationen och förekommer på Öland och troligtvis även i Yoldiaborrningen. Ledet är huvudsakligen uppbyggt av siltstenar och i vissa intervall förekommer tunna sandstenslager. Äleklintaledet är 1 m tjockt på norra Öland, 70 m på södra och ca 75 m i Yoldiaborrningen.

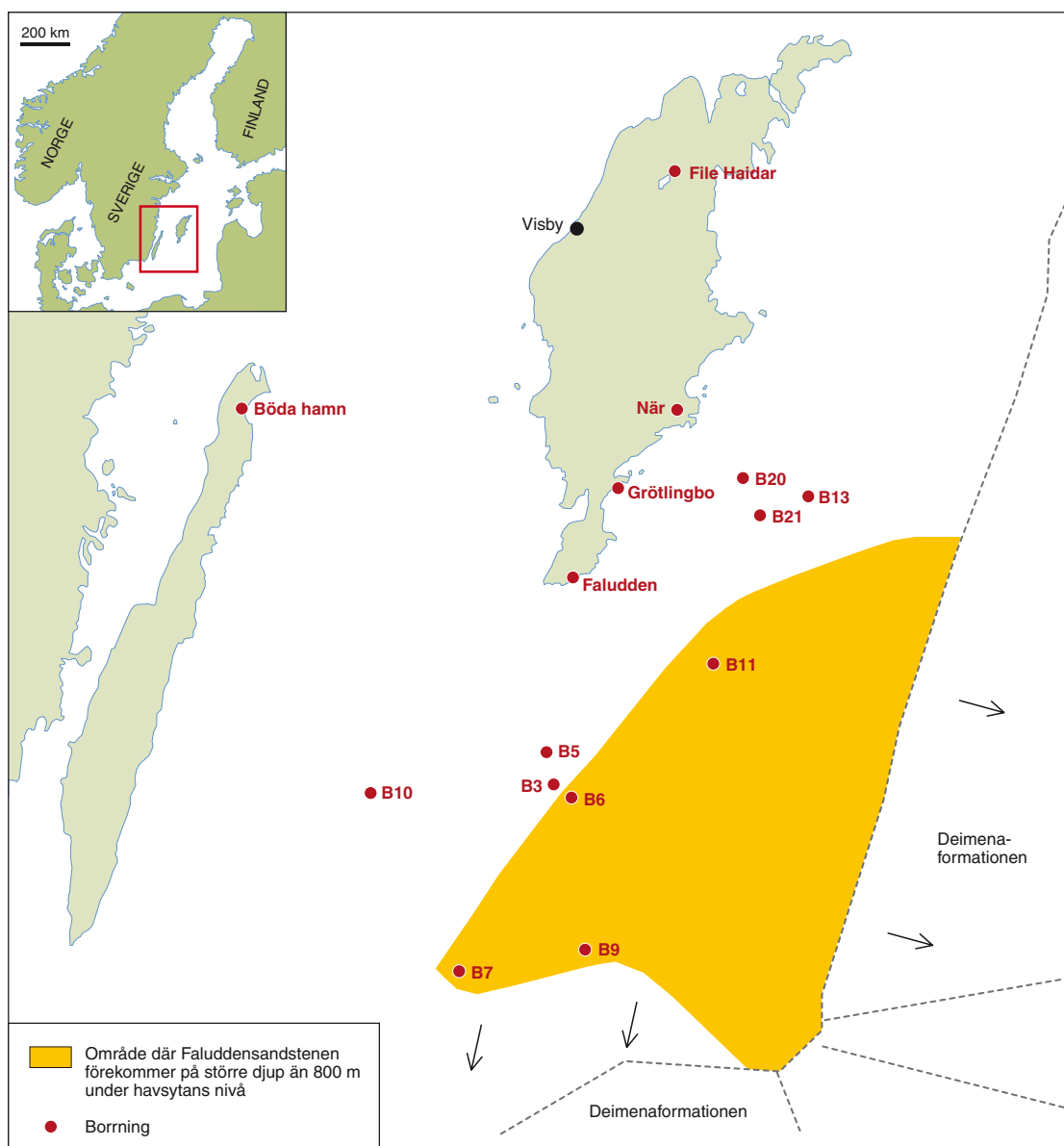


Figur A2:8. Kartan visar den sammanlagda tjockleken för kambriska sandstenar äldre än Faluddensandstenen.

## Sandstenarnas porositet, permeabilitet och litogeokemi

Sandstensenheter i den kambriska lagerföljden har varierande litologiska egenskaper som en följd av variationer i den ursprungliga avsättningsmiljön. Detta återspeglas i varierande kornstorlekar, sorteringsgrad samt kvarts- och lerhalt. Finkorniga kvartssandstenar med relativt hög andel finmaterial (lera och silt) dominerar. Detta gäller särskilt i de yttre delarna av södra Östersjön. Vissa avsnitt består av medel- eller grovkorniga sandstenslager med liten andel finmaterial. Dessa lager påträffas företrädesvis i de undre sandstensenheter (Viklau och När).

Resultat från ett trettiotal porositets- och permeabilitetsmätningar på Faluddensandsten från borrhälsar (SGU, pågående forskningsstudie) visar på en medelporositet av 15,6 %. Maxvärdet var 24,5 % och minimivärdet var 6,5 %. För gaspermeabiliteten är medelvärdet 220 mD på motsvarande prover. Resultaten från 25 kemiska analyser på Faluddensandsten från borrhälsar i södra Östersjön (SGU, pågående forskningsstudie) visar att sandstenen består av ren kvartssand. Kisloxidhalterna



Figur A2:9. Kartan visar området där Faluddensandstenen bedöms förekomma på ett djup som överstiger 800 m. Området mot söder (polsk ekonomisk zon) är osäkert men troligtvis överstiger tjockleken även här 800 m.

varierar mellan 84,7 och 97,8 % i de analyserade proven. Förutom kisel finns aluminium, järn, kalcium och kalium i halter mellan 1 och 3 % (uttryckt som oxider). Den kemiska uppbyggnaden kan kopplas till förekomsten av lermineral, fältspat och pyrit. I vissa prov finns även spår av olja i porutrymmena.

## Temperatur och vattenkemi

I borrhningarna B7 och B9 söder om Gotland har temperaturer på 43–49 °C uppmätts på 1 000–1 100 m djup. Detta ger en temperaturgradient i området på ca 4 °C per 100 m. Detta är ett för svenska förhållanden högt värde. I kristallin berggrund är gradienten oftast kring eller strax under 2 °C per 100 m.

Kemiska analyser på formationsvattnet från den kambriska sandstenen i ett 486 m djupt borrhål från Klintehamn visar på en salt, fossil formationsvätska med lågt pH. Uppmätt salthalt är 7 % och pH är 5,5.

|                    | Litostratigrafi  | Öland   | Norra Gotland | Södra Gotland | B-9   | Litauen-Polen       |
|--------------------|------------------|---------|---------------|---------------|-------|---------------------|
| Mellersta kambrium | Älekintaledet    | 18–70 m |               |               |       |                     |
|                    | Faludden-ledet   |         |               | 10 m          | 48 m  | Deimena-formationen |
|                    | Bårstadledet     |         | 40 m          | 55 m          | 100 m | Tebr-formationen    |
|                    | Mossberga-ledet  | 44 m    | 5 m           | 15 m          |       |                     |
|                    | Grötlingbo-ledet |         | 20 m          | 5 m           |       |                     |
| Undre kambrium     | Närsandsten      | 7–32 m  | 30 m          | 25 m          | 52 m  | Ventava-formationen |
|                    | Närskiffer       | 13–30 m | 10 m          | 25 m          | 36 m  |                     |
|                    | Viklau-ledet     | 5–57 m  | 50 m          | 50 m          | 9+ m  |                     |

 Sandsten  
 Lersten, slamsten och siltsten

Figur A2:10. Stratigrafiskt schema för undre och mellersta kambrium.

## Förekomst av slutna strukturer

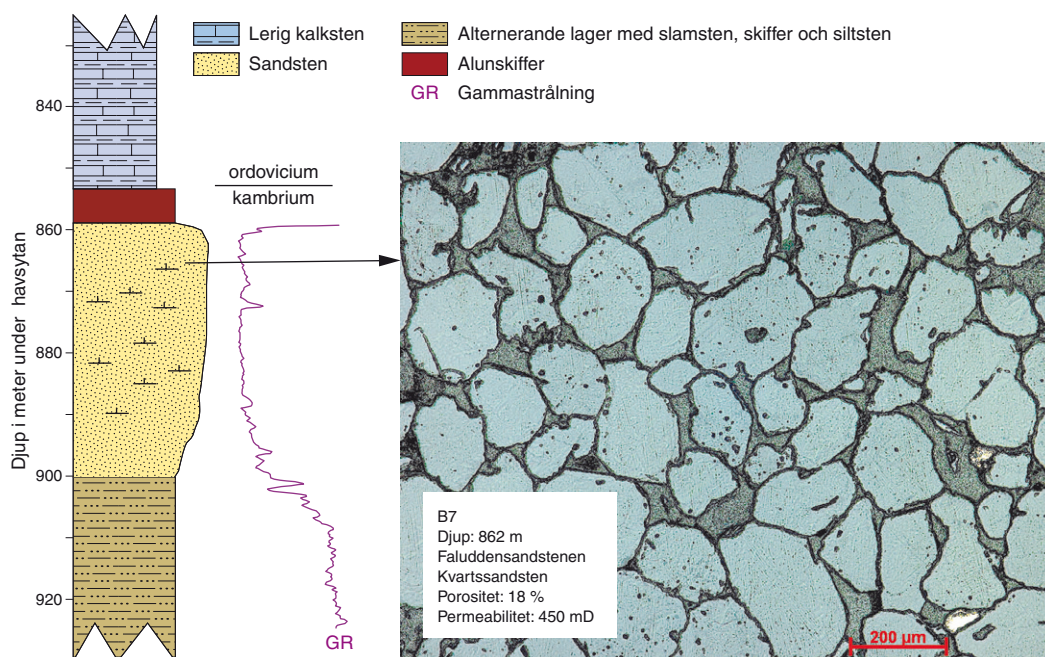
Den paleozoiska berggrunden är relativt opåverkad av förkastningar. På den baltiska sidan av Östersjön förekommer antiklinaler (små domer) med kambrisk sandsten som utgör slutna strukturer i berggrunden i vilka det förekommer olja. Inom svenskt territorium eller ekonomisk zon finns indikationer på mindre, likartade strukturer. Inom området där sandstenen ligger på större djup än 800 m (fig. A2:3) finns ett femtontal strukturer som är 5 till 25 km<sup>2</sup> stora. Ett exempel på en större struktur är Dalderstrukturen belägen i sydostligaste delen av Östersjön vid gränsen mot Polen, Ryssland, Litauen och Lettland. Den har en storlek på ca 200 km<sup>2</sup>.

## Takbergarter

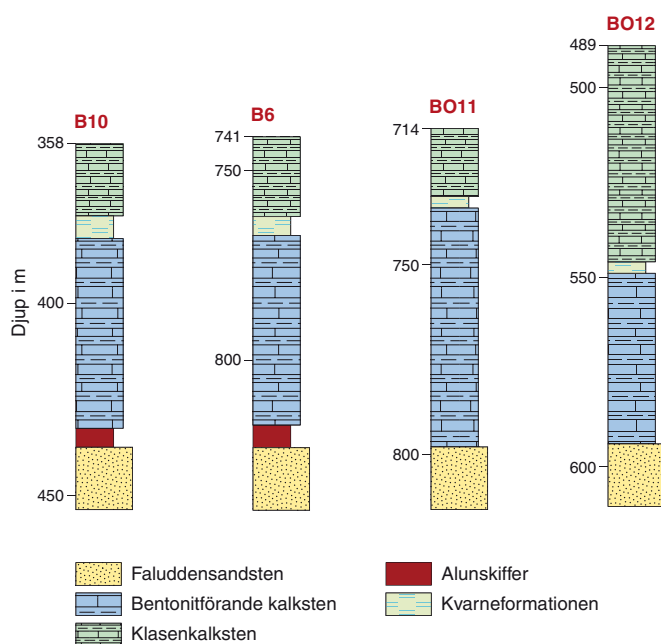
Den kambriska sandstenssekvensen överlagras av en tjock sekvens med mellankambriska, ordoviciska och siluriska bergarter. I den sydostligaste delen av Östersjön överlagras de siluriska bergarterna av devoniska sandstenar.

I delar av södra Östersjön överlagras Faluddensandstenen av Alunskifferformationen som har en ganska blygsam tjocklek (ca 6 m). Alunskifferformationen, eller Faluddensandstenen i de fall då Alunskifferformationen saknas, överlagras av ordoviciska kalkstenar. De senare är mer eller mindre lerhaltiga och har en tjocklek som varierar mellan 65 och 125 m (fig. A2:12). I figur A2:13 visas Alunskifferformationens tjocklek. I samma figur visas även den sammanlagda tjockleken av den bentonitförande kalkstenen och Kvarneformationen.

De fysikaliska egenskaperna hos takbergarterna är dåligt undersökta. Det finns mycket få porositets-, permeabilitets- eller mineralogiska undersökningar utförda. En första bedömning är att de enheter som överlagrar det kambriska Faluddensandstenen har egenskaper som gör att de bör kunna uppfylla kraven för en god takbergart. Förekomsten av innesluten olja och gas i den kambriska sandsten på den baltiska sidan av Östersjön är en god indikation på att de överliggande lagren åtminstone i dessa delar av Östersjön är tillräckligt täta.



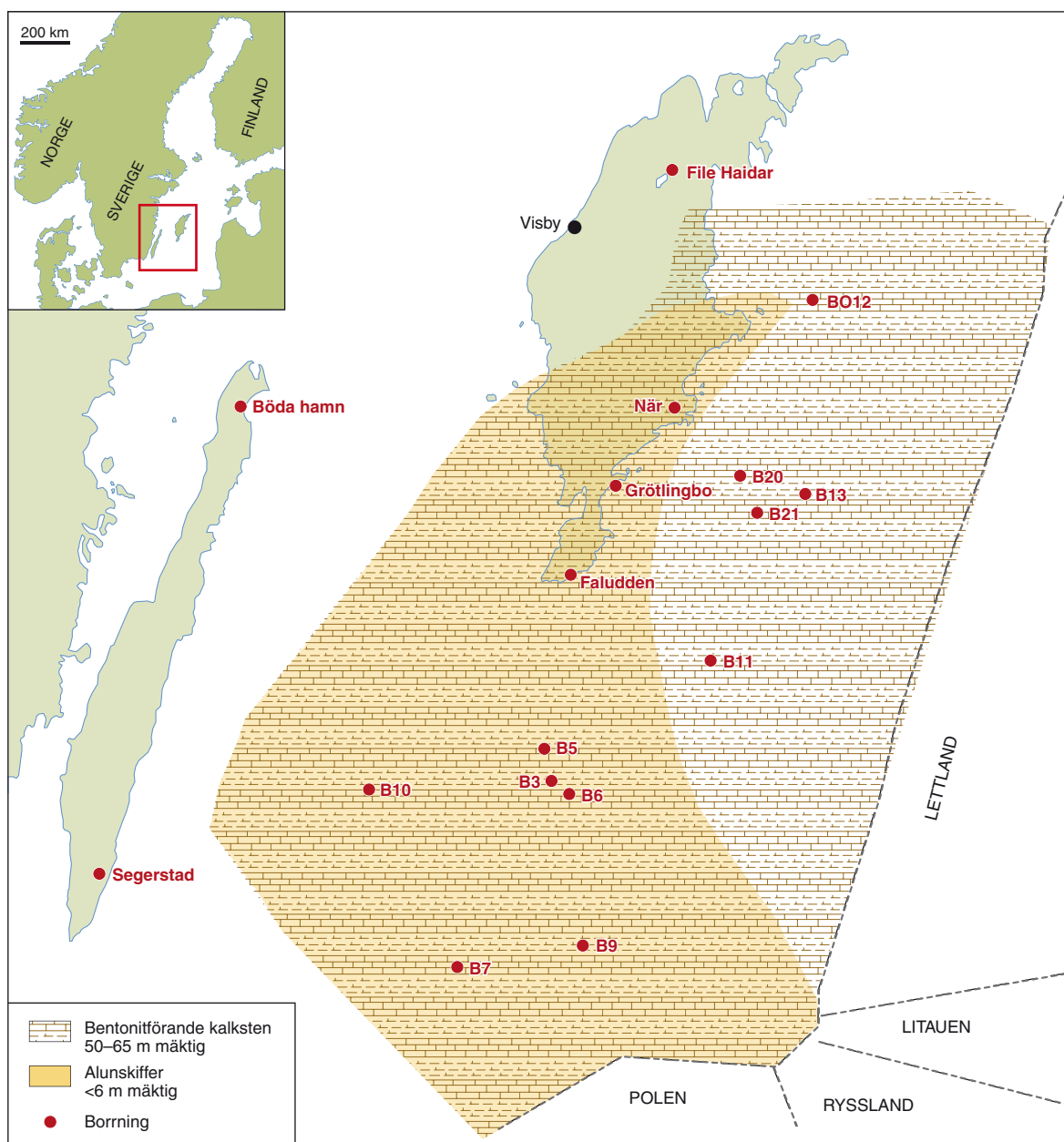
Figur A2:11. Exempel på Faluddensandstenens litologiska uppbyggnad. Provet är hämtat från borrhningen B7.



Figur A2:12. Takbergarternas uppbyggnad och tjocklek i borrhningar från södra Östersjön.

## Alunskifferformationen

Alunskifferformationen består av slamsten med hög halt av organiskt material. Den är oftast laminerad och mörkbrun till svart. Enstaka tunna kalkstenshorisonter och glaukonitiska lager förekommer. Den markanta skifferighet som alunskiffern uppvisar i prov från blottningar är ett resultat av vittring och förekommer inte i opåverkade borrhprov där den är sammanhängande och homogen. Uppgifter om Alunskifferformationens porositet och permeabilitet i södra Östersjön saknas.



Figur A2:13. Utbredning och tjocklek för alunskeffer och bentonitförande kalksten i södra Östersjön.

## Ordovicium

På Gotland och i södra Östersjön finns en informell indelning av den ordoviciska lagerföljden som införts av OPAB. Den undre enheten benämns bentonitförande kalksten. Den överlagras av Kvarneformationen och överst Klasenkalksten. På Gotland varierar dessa tre enheters sammanlagda tjocklek mellan 80 och 125 m och till havs mellan 65 och 125 m.

### Bentonitförande kalksten

Den bentonitförande kalkstenen har en tjocklek som i allmänhet varierar mellan 40 och 50 m på Gotland och mellan 45 och 60 m på svenskt territorium eller ekonomisk zon. Den är uppbyggd av en vit till gråvit mikrokristallin kalksten med grågröna band. Rödbruna lerlager är vanligt förekommande.



Bentonitleror påträffas i enhetens övre del. Dessa kan antas ha en tätande funktion i lagerföljden. Porositeter på maximalt 2 till 3 % har uppmätts.

### **Kvarneformationen**

Kvarneformationen har en tjocklek som varierar mellan 2 och 10 m på Gotland och i den svenska ekonomiska zonen. Enheten består av grå till ljusgrå lera med gråvita mikrokristallina kalkstenslager. Bergarten är tät och ingen porositet har uppmätts i densamma.

### **Klasenkalksten**

Klasenkalkstenens tjocklek varierar mellan 5 och 25 m på Gotland och 11 och 60 m i havsområdet. Klasenkalkstenen delas in i två delar: en revliknande kalksten och en lerigare tunnlagrad kalksten. Ur de ordoviciska reven på Gotland har olja utvunnits under slutet av 1900-talet.

### **Silur–devon**

Ovanpå den ordoviciska lagerföljden följer siluriska bergarter vars ytnära del är väl dokumenterad på Gotland. De siluriska lagren är 600 respektive 850 m tjocka i borrhningarna B3 och B9 söder om Gotland. På Gotland varierar tjockleken mellan 150 och 500 m.

Den siluriska lagerföljden återspeglar avsättningsförhållanden i en relativt grund havsbassäng där havet successivt drog sig tillbaka åt söder och sydost. I de grunda delarna av bassängen bildades karbonatrika bergarter (kalksten och mörgel) med inslag av revbildningar. Längre ut i bassängen dominerar lerigare sedimentbergarter som skiffer med varierande karbonatinnehåll och tunna kalkstenslager. Merparten av siluren i B3 och B9 består av mycket lerig kalksten, mörgelsten och lerskiffer.

Sydsydost om Gotland och i den östra delen av södra Östersjön förekommer devonisk berggrund, som inom svenskt område har en tjocklek på uppemot 200 m. Kunskapen om dessa lager baseras på information från den lettiska delen av Östersjön.

### **Referenser**

Nielsen, A.T. & Schovsbo, N.H., 2007: Cambrian to basal Ordovician lithostratigraphy in southern Scandinavia. *Geological Society of Denmark* 53, 47–92.

### BILAGA 3. SYDÖSTRA KATTEGATT

I sydligaste Kattegatt, på gränsen mot Danmark, finns djupt liggande akvifärer som hör till Gassumformationen och Skagerrakformationen. På de platser där dessa förekommer tillräckligt djupt har de på danskt område av GEUS klassats som potentiella lagringsakvifärer.

Den del av området som ligger på svenskt territorium är endast ca 100 km<sup>2</sup> stort men uppvisar lagerföljder och strukturella förhållanden som gör att området bör nämnas i denna rapport.

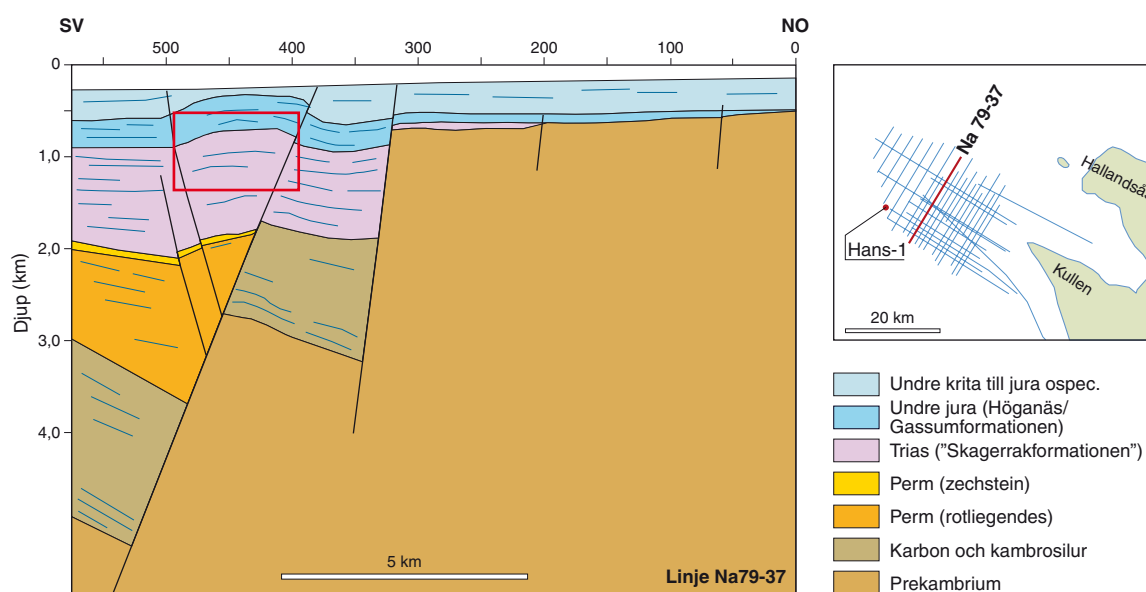
#### Underlagsdata

Områdets strukturella och geologiska uppbyggnad har beskrivits i detalj av Erlström & Sivhed (2001). De redovisar tolkningar av ett relativt omfattande linjenät med seismiska mätningar som är utförda på 1970- och 1980-talen av bl.a. OPAB och SECAB. I samband med kolväteprospektering borrade Dansk Undergrund Consortium år 1983 ett djupt borrhål, Hans-1, nära den svensk–danska gränsen (fig. A3:1). Man fann ingen olja men borrhningen resulterade i en geologisk dokumentation som medförde en bättre tolkning av de seismiska profilerna.

#### Tänkbara lagringsakvifärer

Gassumformationen är i borrhningen Hans-1 drygt 350 m tjock och består av en växellagrad sekvens med sandsten, lersten och siltsten. Fysikaliska tester är inte utförda men data från geofysiska loggar indikerar en porositet kring 25 % för sandstensavsnitten. Inom svenskt område ligger formationen sannolikt för ytligt för koldioxidlagring. Toppen på formationen ligger på ca 500 m djup och botten på ca 1000 m djup.

Den underliggande Skagerrakformationen är drygt 1000 m tjock och ligger på djup mellan 1000 och 2000 m vilket gör den mer intressant som lagringsakvifär. Lagerföljden är mycket varierande men där finns grova, fältspatrika sandstenslager med potentiellt goda akvifäreegenskaper. Lagren är dock inte undersökta i detalj.



Figur A3:1 Tolkad tvärsnitt från södra Kattegatt, baserad på OPABs seismiska mätningar samt information från borrhning. (Källa: Erlström & Sivhed 2004.) Inramat område i rött markerar den intressanta, antiklinala lagringsstruktur som nämns i texten.

Det som gör berggrunden i den svenska delen av södra Kattegatt intressant är förekomsten av en antiklinalstruktur som kan vara lämplig som lagringsplats ifall denna är sluten och tät. Strukturen är orsakad av kompression i berggrunden under yngre krita. För att bedöma strukturens täthet behövs omfattande undersökningar. Utifrån befintliga data är det möjligt att göra en bättre bedömning av dess strukturella utseende och därigenom volymbedömningar av lagringskapaciteten.

En preliminär bedömning är att ytan är 25–50 km<sup>2</sup>. Med 50 m sammanlagd sandtjocklek och en porositet på 25 % skulle det medföra en lagringskapacitet på ca 80–150 miljoner ton koldioxid.

### Takbergarter

I Gassumformationen och Skagerrakformationen finns flera intervall med täta lerstenslager. För Skagerrakformationen kan de jurassiska lerstenslagren i Gassumformationen utgöra tänkbara alternativ till takbergart. I toppen av Skagerrakformationen förekommer det även 20–50 m tjocka lager med lera och lersten, men det saknas information om dessa har tillräckligt täta egenskaper för att kunna utgöra en bra takbergart. Det är också osäkert om takbergarterna i den antiklina strukturen i området är påverkade av mindre förkastningar och sprickzoner som inte framträder i befintlig seismik.

### Bedömning

Eftersom södra Östersjön ligger i gränsområdet mellan Danmark och Sverige krävs det att länderna kan samarbeta för vidare undersökningar. Gassumformationens sandstensakvifärer ligger sannolikt för ytligt för att vara lämpliga som lagringsakvifärer. Den största potentialen för geologisk koldioxidlagring i området har Skagerrakformationen.

### Referenser

Erlström, M. & Sivhed, U., 2001: Intra-cratonic dextral transtension and inversion of the southern Kattegat on the southwest margin of Baltica – Seismostratigraphy and structural development. *Sveriges geologiska undersökning C 832*, 1–33.

## BILAGA 4. TÄNKBARA LAGRINGSAKVIFÄRER I SYDVÄSTRA SKÅNE

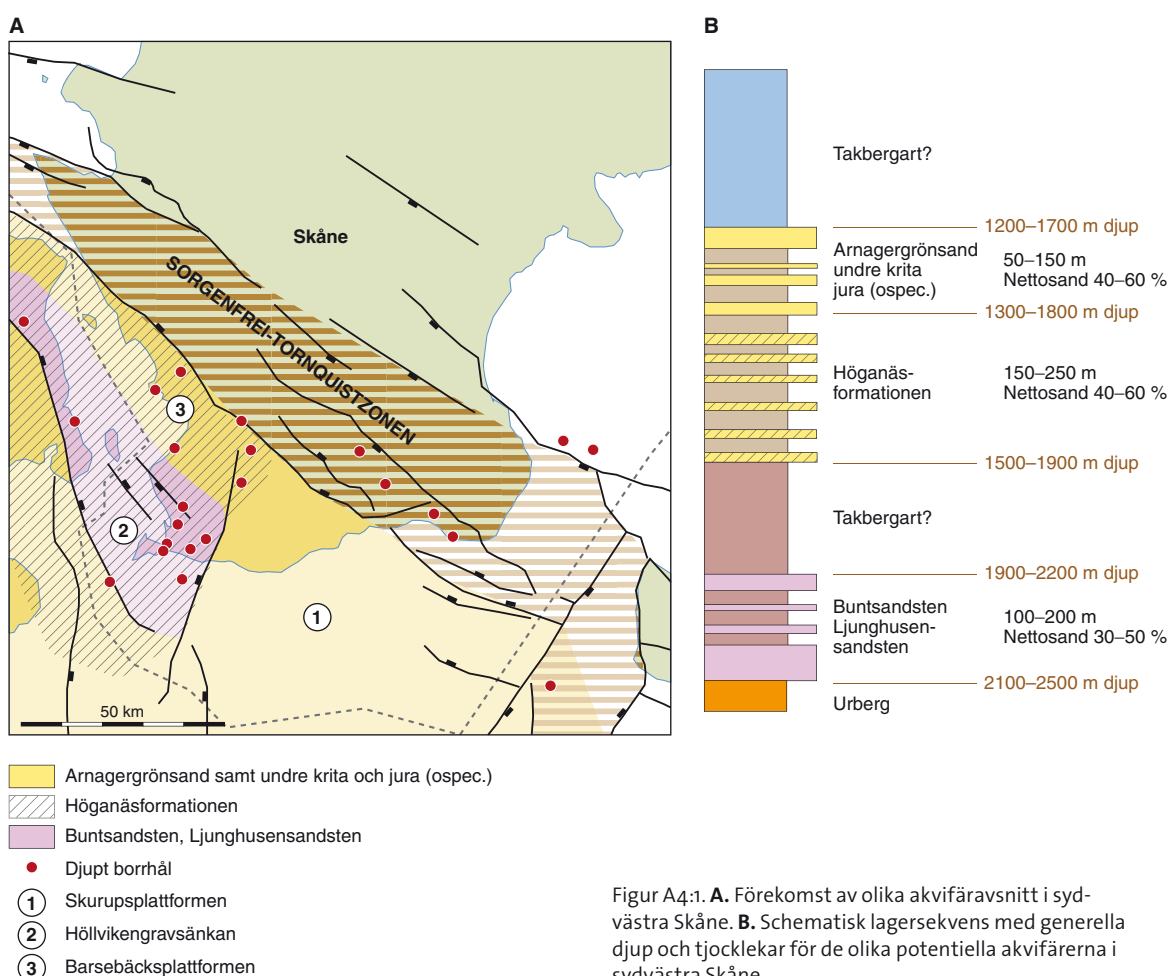
Berggrundens uppbyggnad i sydvästra delen av Skåne överensstämmer mycket med den i Danmark. Den sedimentära berggrunden är uppemot 4 km tjock i de djupaste delarna av den skånska delen av Danska bassängen. Sydvästra Skånes berggrund avgränsas i nordost av Romeleåsens förkastningszon som utgör Sorgenfrei-Tornquistzonens (STZ) sydvästra begränsning. STZ är en regional stor tektonisk förkastningszon utmed vilken rörelser i jordskorpan skett vid upprepade tillfällen sedan paleozoisk tid. I STZ och nordost om denna zon förekommer akvifärer med lämpliga fysikaliska egenskaper alldeles för ytligt för att de ska kunna vara intressanta för lagring.

Sydvästra Skånes berggrund kan delas in i tre delområden: Barsebäcksplattformen, Höllvikengravsänkan och Skurupsplattformen med olika förekomst av akvifärer som kan var lämpliga för koldioxidlagring (fig. A4:1a).

Med utgångspunkt från baskraven och börkraven (se bilaga 7) finns det huvudsakligen tre potentiella akvifärer som kan var lämpliga för koldioxidlagring (fig. A4:1b):

- Arnagergrönsand (undre krita–jura).
- Höganäsformationen (rät–undre jura).
- Buntsandsten och Ljunghusensandsten (undre trias).

Arnagergrönsanden, Höganäsformationen, Buntsandsten och Ljunghusensandsten påträffas i Höllvikengravsänkan och på delar av Barsebäcksplattformen medan endast undre krita och Arnagergrön-



Figur A4:1. **A.** Förekomst av olika akvifäravsnitt i sydvästra Skåne. **B.** Schematisk lagersekvens med generella djup och tjocklekar för de olika potentiella akvifärerna i sydvästra Skåne.

sanden finns på Skurupsplattformen. I tabell A4:1 ges en sammanfattning av de tre akvifärerna och deras potential för lagring av koldioxid. Förekomst av slutna strukturer har inte påvisats i någon del av lagerföljden. Lagren lutar svagt mot nordost. Koldioxidlagring kan således bara ske i de fall det är möjligt att påvisa säker lagring i de regionalt utbredda och svagt lutande akvifärerna.

## Arnagergrönsand

Arnagergrönsanden har en relativt homogen och regional uppbyggnad med generellt goda akvifäregenskaper. Den förekommer i ett stort område och har en tjocklek mellan 20 och 60 m. Sandstenen överlagras av en tät och hård kalksten vilket gör att intervallet är lätt att identifiera i de seismiska profilerna. Sandstenen påträffas i borrhningarna på djup mellan 1 200 och 1 700 m. Arnagergrönsanden har mycket varierande fysikaliska egenskaper. I gynnsamma partier är gaspermeabiliteten större än 1 D och porositeten 27–30 % vilket gör Arnagergrönsanden lokalt till en mycket god akvifär. Inom andra delar av utbredningsområdet, speciellt på Barsebäcksplattformen, är sanden finkornigare och innehåller karbonatcementeringar i porerna vilket gör att permeabiliteten generellt är lägre här (ca 100–200 mD). På Skurupsplattformen framträder sandstenen tydligt på de seismiska profilerna men där finns inte tillräckligt med borrhålsinformation för att bekräfta dess egenskaper och uppbyggnad.

Under Arnagergrönsanden följer ett varierande tjockt intervall med täta lerstenar avsatta vid tiden för äldre krita. I detta intervall förekommer även mycket permeabla och porösa sandstenslager som har likartade fysikaliska egenskaper som Arnagergrönsanden. Tjockleken på dessa varierar kraftigt och den laterala utbredningen är mer osäker jämfört med den mer homogent utbredda Arnagergrönsanden. Avlagringarna i undre krita, exklusive Arnagergrönsanden, har en tjocklek på 40–80 m.

Mellan typisk underkretaceisk och underjurassisk berggrund (Höganäsformationen motsvarande Gassumformationen i Danmark) finns ett avsnitt som består av mellan- och överjurassisk berggrund. Lagerföljden är mycket svår att datera i detta intervall. Det är ännu inte klarlagt till vilken del av jura den ska föras. I intervallet finns 1–3 mycket goda sandstensakvifärer med hög porositet och permeabilitet. Det är möjligt att någon av dessa motsvarar Haldagersanden i Danska bassängen. Porositeter på 30–

Tabell A4:1. Sammanställning av bedömningsgrunder för de sydvästskånska akvifärerna.

|                                      | Arnagergrönsand, krita                                                                                                                                            | Jura                                                                                                             | Trias, Ljunghusensandsten                                                                                                                        |
|--------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Karaktär                             | Grönsand med regional och homogen utbredning i området. Förekommer även söder om Skåne och på Själland. Goda akvifäregenskaper. Svagt lutande. Djupast i nordost. | Flerlagrad sekvens med en netto-sand på ca 100 m. Finkorniga sand-avsnitt dominerar.                             | Rödbrun och homogen, finkornig till medelkornig sandsten. Jämförbar med avsnitt i Polen och Tyskland som bedöms ha en hög potential för lagring. |
| Djup                                 | 1 200–1 700 m                                                                                                                                                     | 1 300–1 900                                                                                                      | 1 950–2 400 m                                                                                                                                    |
| Tjocklek                             | 20–60 m                                                                                                                                                           | 100 m (5–10 sandstensnivåer)                                                                                     | 40–100 m                                                                                                                                         |
| Porositet                            | 20–30 %                                                                                                                                                           | 20–35 %                                                                                                          | 20–25 %                                                                                                                                          |
| Permeabilitet                        | 100 mD–1D                                                                                                                                                         | 100–3 D                                                                                                          | 200–400 mD bedömd                                                                                                                                |
| Utbredning                           | 9 500 km <sup>2</sup> (svensk del)                                                                                                                                | 2 900 km <sup>2</sup> (svensk del)                                                                               | 850 km <sup>2</sup> (svensk del)                                                                                                                 |
| Takberg                              | Arnagerkalksten och leriga kalkstenar 350 m.                                                                                                                      | Underkretaceisk lersten 50–150 m tjock samt samma takberg som föregående.                                        | Triassisk lersten.                                                                                                                               |
| Regional teoretisk lagringspotential | Med en lagringsfaktor på 10 % ca 5 Gt.                                                                                                                            | 4, 5 Gt                                                                                                          | 750 Mt                                                                                                                                           |
| Slutna strukturer, fällor            | Inga slutna strukturer (fällor).                                                                                                                                  | Inga slutna strukturer (fällor).                                                                                 | Inga slutna strukturer (fällor).                                                                                                                 |
| Osäkerheter                          | Den laterala variationen i permeabilitet. Verkar vara tätare på Barsebäcksplattformen.                                                                            | Flerlagrad sekvens med stor lateral variation i enskilda sandnivåers utbredning. Komplex hydrogeologisk avsnitt. | Permeabiliteten. Kan även ligga något för djupt.                                                                                                 |

35 % och permeabiliteter på flera darcy har uppmätts. De enskilda sandstenslagrens tjocklek varierar men de bästa sandstenslagren för koldioxidlagring är i storleksordningen 10–20 m tjocka. Den laterala utbredningen för hela avsnittet är stor; åtminstone finns lagerföljden i hela Höllvikengravsänkan och på Barsebäcksplattformen. På Skurupsplattformen saknas den sannolikt. Enskilda lagers utbredning är mer osäker. Hela det ospecificerade avsnitt som är avsatt under jura är mellan 20 och 50 m tjockt.

Totalt är intervallet från toppen av Arnagergrönsanden ner till basen av de ospecificerade över- och mellanjurassiska sandstenslagren maximalt ca 150 m tjockt på Barsebäcksplattformen och i Höllvikengravsänkan. På Skurupsplattformen är tjockleken sannolikt under 100 m. Uppskattningsvis utgörs hälften av tjockleken av sandstenslager.

## Höganäsformationen

Höganäsformationen (rät–hettang) är väl undersökt och känd från nordvästra Skåne där den utgör berggrundsytan inom ett stort område. Formationen är i storleksordningen 150–250 m tjock och består av bergarter som bildats i en kustnära avsättningsmiljö med deltan, laguner och flodslätter. Lagerföljden består av en växellagrad sekvens med sandsten, siltsten, lersten och kol. Formationen påträffas i alla borrhningar i Höllvikengravsänkan och på Barsebäcksplattformen. Andelen sandstenslager utgör mellan 40 och 70 % av lagerföljden. Tjockleken och de fysikaliska egenskaperna på enskilda sandstenslager varierar. De enskilda sandstenslagren är uppemot 20 m tjocka och har genomgående en lokal utbredning. Utbredningar på några tiotals kvadratkilometer är sannolikt för de tjockare sandstenslagren. I de undre delarna av formationen verkar enskilda sandstenslager ha en större lateral utbredning.

Höganäsformationens sandstenslager består till merparten av finkornig, ren kvartssand. Lager med medelsand och grovsand utgör ca 10 % av den sammanlagda sandtjockleken i formationen. Dessa lager har ofta en mycket hög permeabilitet. Trots en god porositet har finsandlagren en relativt dålig genomsläpplighet. I mätningar är permeabiliteterna ofta mindre än 100 mD för finsand medan motsvarande värden för mellansand är 1–3 D.

Höganäsformationen ska ses som en flerlagrad sandstensakvifär. Enskilda, linsformade sandstenslager kan vara strukturellt slutna akvifärer eftersom de omsluts av täta lerstenar.

## Buntsandsten och Ljunghusensandsten

Den triassiska berggrundens tjocklek ökar markant söderut i Höllvikengravsänkan. Lagerföljden är uppemot 700 m tjock. Berggrund från äldsta trias (bunt) påträffas enbart i de djupaste delarna av Höllvikengravsänkan. I Tyskland och i Danmark utgör sandstenar ett dominerande inslag i berggrunden från denna tid. I Sverige är berggrunden likartat uppbyggd även om området med berggrund från äldre trias är mycket mindre. Borrhningar på Falsterbohalvön och i Köpenhamn har bekräftat en berggrund som till stor del består av rödgrön, medelkornig till grovkornig, fältspatsrik kvartssandsten. Lerstenslager förekommer frekvent inom den uppemot 100–200 m tjocka sandstensdominerade sekvensen. Buntsandstenen överlagras även av tjocka täta lerstenar (takbergart) avsatta under mellersta trias.

Mineralogiskt är Buntsandstenen mer heterogent uppbyggd jämfört med Höganäsformationen. Porositetsvärden från geofysiska loggar visar på sandstensintervall med en porositet på 20–25 %. I Köpenhamn produceras stora mängder varmt vatten (ca 70 °C) för geotermisk energiproduktion ur Buntsandstenen vilket bevisar att sandstenslagren är goda akvifärer med hög permeabilitet.

Underst i den triassiska lagerföljden påträffas Ljunghusensandstenen som är en mycket väl sorterad, uppemot 50 m tjock och homogen kvartssandsten med mycket goda akvifäreegenskaper.



## Takbergarter

Ovanför de tre beskrivna akvifärerna finns en mycket tjock lagersekvens med lerig kalksten, siltsten, lersten och skrivkrita. Andelen lera och finmaterial är stor. Mellan de olika akvifäravnitten förekommer också leriga lager som kan fungera som sekundära takbergarter. Detta rör speciellt Buntsandstenen och Ljunghusensandsten som överlagras av täta lerstenar. Det saknas dock tyvärr information om takbergarternas fysikaliska egenskaper vilket gör det svårt att bedöma deras täthet.

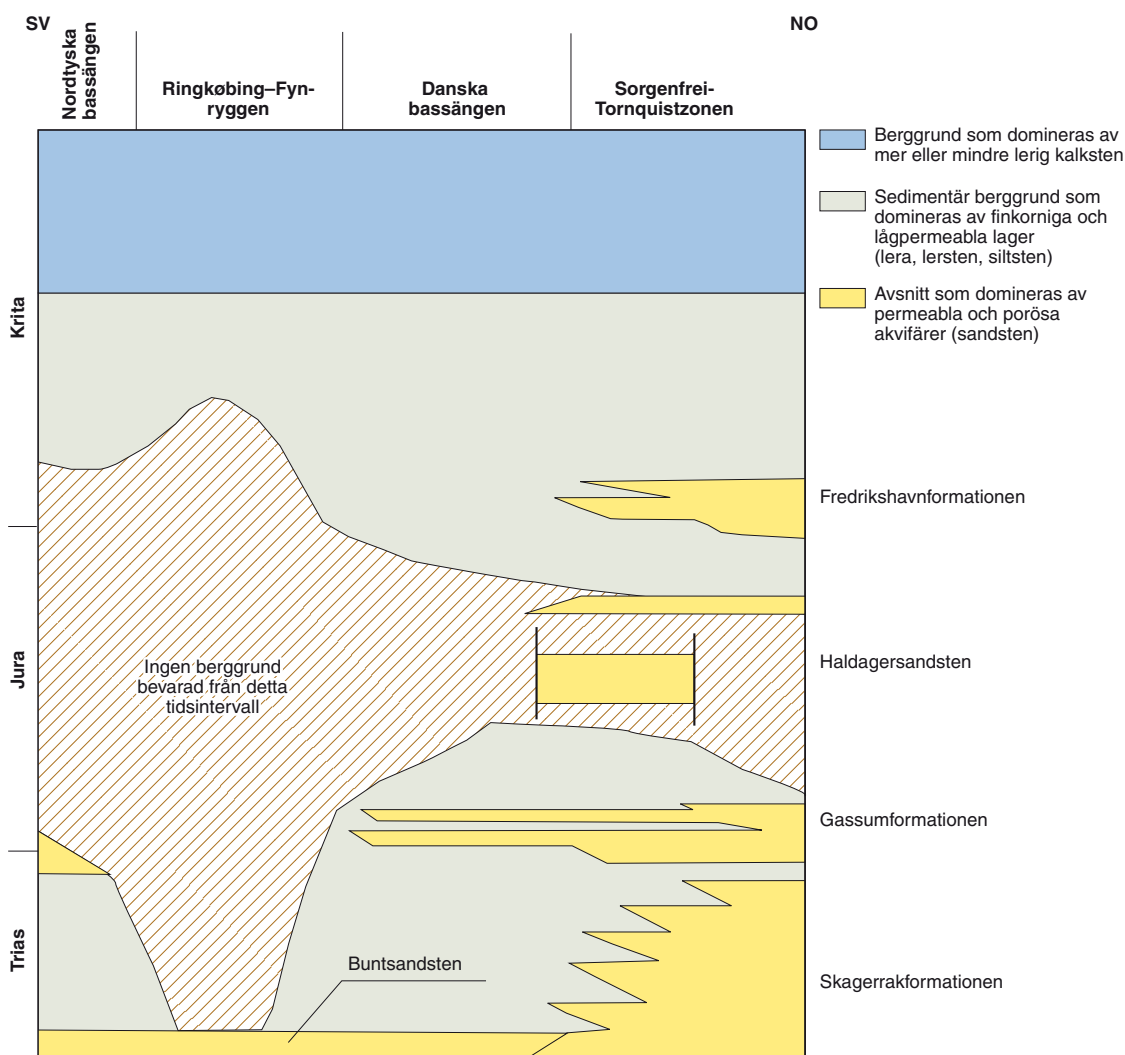
## BILAGA 5. KOLDIOXIDLAGRING I DANMARK

### Allmänna förutsättningar

Berggrundsförhållandena i Danmark erbjuder helt andra förutsättningar för lagring av koldioxid i djupa akvifärer, jämfört med i Sverige. Danmark domineras, med undantag för delar av Bornholm, av kilometertjocka lager med sedimentär berggrund som överlagrar urberget. Strukturellt kan berggrunden delas in i ett antal delområden med olika förutsättningar och förekomst av akvifärer lämpliga för koldioxidlagring. Dessa är från nordost mot sydväst: Sorgenfrei-Tornquistzonen, Danska bassängen, Ringkøbing-Fynryggen och Nordtyska bassängen (fig. A5:1).

Danmark har till skillnad från Sverige erfarenheter från omfattande kolväteprospektering vilket medfört att de har mycket bättre dataunderlag, kompetens och resurser för bedömning och identifiering av potentiella akvifärer. Danmark har också aktivt deltagit i ett flertal internationella forskningsprojekt vilket gjort att de ligger långt framme rörande bedömningarna av koldioxidlagring i den danska berggrunden.

Dessutom finns trettioårig erfarenhet från ett naturgaslager på Själland (Stenlille). I dag finns i Europa ca 100 naturgaslager i djupa akvifärer. Erfarenheter från dessa utgör ett mycket viktigt underlag rörande framför allt uppföljning av gasens utbredning i akvifären, säkerhetsfrågor, injektering, akvifär-



Figur A5:1. Schematisk stratigrafisk illustration som visar olika potentiella sandstensakvifärers ålder och förekomst i Danmark. (Källa: GEUS.)

karaktäristik m.m. Många av dessa frågor som berör ett naturgaslager är i väsentlig grad desamma som för ett koldioxidlager. Följande urvalskriterier har använts i Danmark:

- Akvifären ska ligga djupt för att koldioxiden ska kunna lagras i superkritiskt tillstånd.
- Akvifären ska inte ligga djupare än 2 500 m eftersom porositet och permeabiliteten minskar kraftigt under detta djup.
- En sluten struktur som är tillräckligt stor för att kunna lagra ca 100 miljoner ton koldioxid ska finnas.
- Det ska finnas en tät takbergart.
- Den slutna strukturen ska inte vara genomslagen av förkastningar.
- Lagringsplatsen ska finnas i närhet till koldioxidkällan.

### **Tänkbara lagringsakvifärer**

I Danmark finns ett antal geologiska formationer som, ur lagringshänseende, innehåller intressanta akvifärer. Dessa är:

- Buntsandsten (äldsta trias).
- Skagerrakformationen (yngsta trias).
- Gassumformationen (yngre trias–äldre jura).
- Haldagersandsten (mellersta jura).
- Fredrikshavnformationen (yngre jura–äldre krita).

Kunskap om dessa akvifäravsnitt härrör från äldre kolväteprospektering och från undersökningar avseende geotermisk energiproduktion (GEUS, muntlig kommunikation, november 2010). Resultaten från de inledande studierna har identifierat Buntsandstenen och Gassumformationen som de lämpligaste ur lagringshänseende. Haldagersanden och Fredrikshavnformationen (fig. A5:2) har lokalt även de goda akvifäreegenskaper, men några slutna strukturer i dessa har inte påvisats varför de inte anses som lämpliga.

### **Gassumformationen**

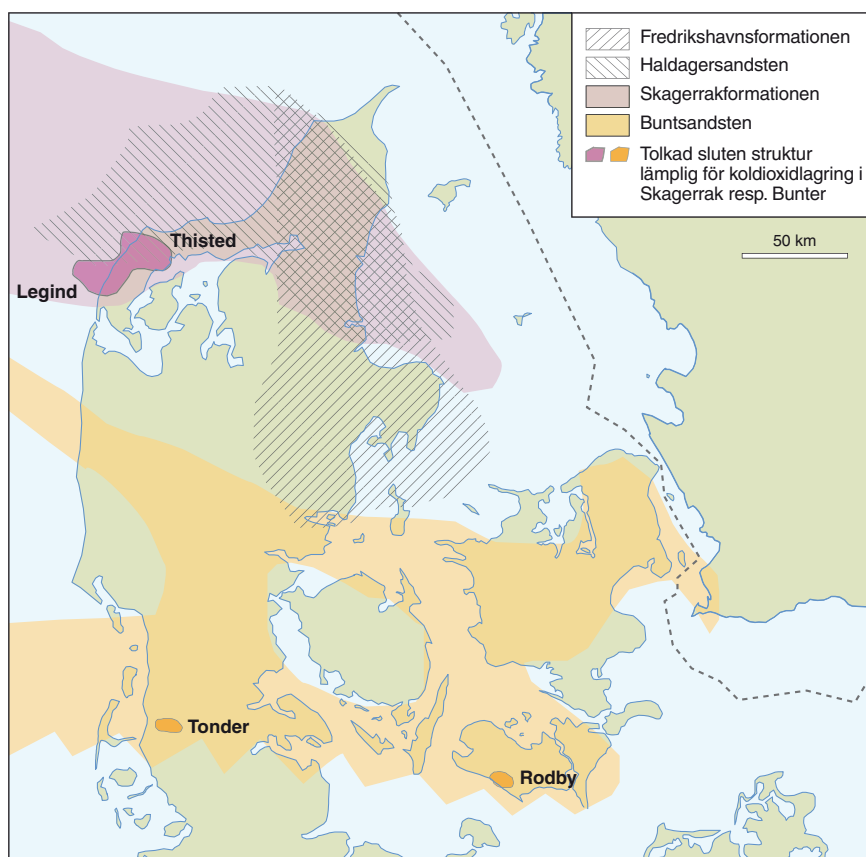
Gassumformationen består av fin- och medelkornig sandsten som växellagrar med silt- och lerstenar samt tunna kollager. Vissa sandstenslager är grovkorniga och då mycket permeabla. Gassumformationen förekommer över i stort sett hela Danmark och är vanligtvis i storleksordningen 100–150 m tjock (fig. A5:3). I de nordostligaste delarna, t.ex. norra Jylland, är den uppemot 300 m tjock. Gassumformationen motsvaras i sydvästra Skåne av Höganäsformationen.

Porositeten och permeabiliteten är känd från en mängd djupborrningar. Flertalet av sandstenslagren uppvisar mycket goda akvifäreegenskaper med en porositet som ligger mellan 20 och 30 % och en permeabilitet på uppemot 2 D. I Danmark har nio förmodat slutna strukturer identifierats i Gassumformationen (fig. A5:3).

Över Gassumformationen förekommer en uppemot 1 000 m tjock lerstenssekvens som utgör takbergart. I naturgaslagret i Stenlille utnyttjas Gassumformationen som lagringsakvifär och Fjerritslev-formationen lerstenar som takbergart. Erfarenheter från detta lager har visat att lerstenarna har utmärkta egenskaper som takbergart.

### **Buntsandsten**

Söder om Ringkøbing–Fynryggen dominerar finkorniga sandstenar. Mot nordost blir sandstenslagren successivt grovkornigare och övergår i det som benämns Skagerrakformationen. De båda formationerna är mellan 300 och 900 m tjocka.



Figur A5:2. Områden med Buntsandsten, Haldagersandsten och Fredrikshavsformationen inom lämpligt djupintervall för koldioxidlagring samt identifierade potentiella lagringsplatser. (Källa: GEUS.)

Buntsandstenen bildades under trias då klimatet vart torrt och tidvis ökenliknande. Periodvis bildades saltrika indunstningsbassänger som resulterade i avsättning av saltlager. Sandstenslagren är ofta dåligt sorterade och rika på mineralutfällningar som har en negativ effekt på porositet och permeabilitet. Ett par sandstensnivåer består av renare sand och mindre mängd lera och är goda akvifärer. I Köpenhamn har borrhningar för geotermi påvisat sandstenslager med mycket goda akvifäreegenskaper. I Danmark har två slutna strukturer med Buntsandsten lokaliserats (fig. A5:2).

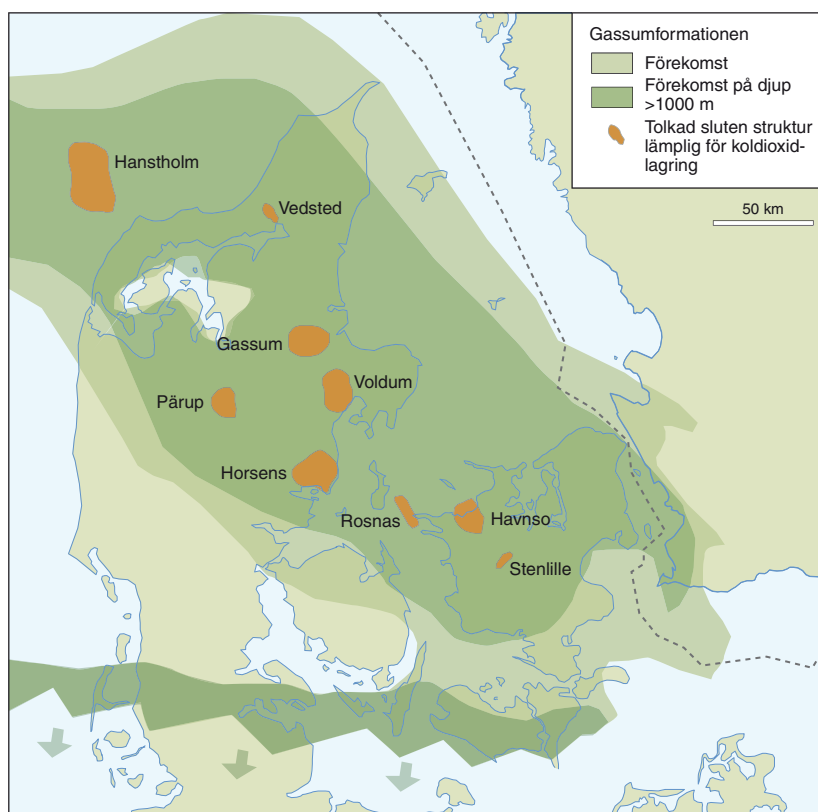
Den mineralogiska och fysikaliska uppbyggnaden av Buntsandstenen är mer heterogen jämfört med den i Gassumformationen vilket gör bedömningarna av lagringspotentialen mer osäker.

## Genomförda förstudier

Sedan början av 1990-talet har Danmark genomfört olika undersökningar och potentialstudier rörande möjligheterna till lagring av koldioxid i berggrunden. GEUS har haft en central roll i detta arbete genom sitt engagemang i olika nationella och internationella projekt. En stor del av den information som presenteras härrör från olika EU-finansierade samarbetsprojekt med andra länders geologiska undersökningar. Övergripande presentation av geologisk lagring av koldioxid ges i en GEUS-publikation från 2004 (Christensen & Larsen 2004). Två större studier har genomförts: Joule II och GESTCO. Under senare år har även en omfattande fallstudie gjorts för en potentiell lagringsplats vid Kalundborg.

### Joule II

Under mitten av 1990-talet genomfördes en övergripande inventering av lagringspotentialen i de danska akvifärerna. I Joule II rapporten (Holloway m.fl. 1996) gjordes bedömning att uppemot 47 miljarder ton koldioxid skulle kunna lagras i öppna, djupa akvifärer i Danmark. Bedömningen grundades på



Figur A5:3. Förekomst av Gassum-formationen i djupintervallet 1 000–2 000 m samt identifierade förmodat slutna lagrings-strukturer. (Källa: GEUS.)

att 2 % av den totala kartlagda formationsvolymen kan utnyttjas för lagring. Lagringsmöjligheten i enbart slutna strukturer uppgår till 5,6 miljarder ton koldioxid.

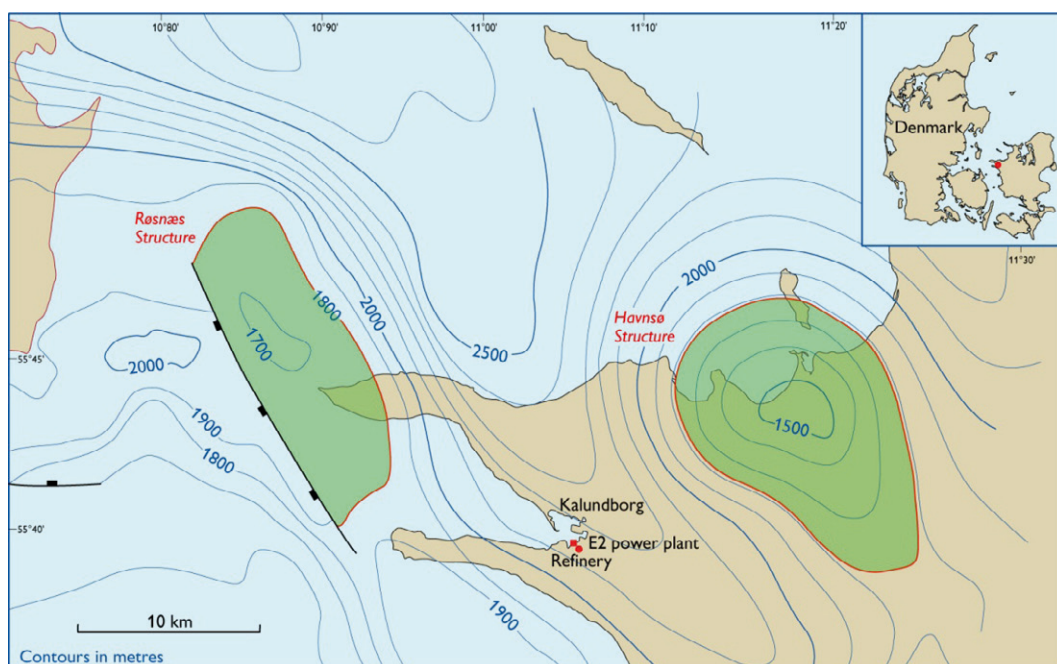
### GESTCO

I samarbete med sju andra geologiska undersökningar deltog GEUS i det EU-finansierade projektet GESTCO (*Geological Storage of CO<sub>2</sub> from Combustion of Fossil Fuel*) med syfte att inventera möjligheterna till lagring av koldioxid i närheten till större, industriella koldioxidpunktkällor. Som ett första led i projektet ingick en övergripande beskrivning av respektive lands geologiska förutsättningar. I Danmark var arbetet fokuserat på att lokalisera sandstensakvifärer i djupintervallet 900–2 500 m. Under 2 500 m anses permeabiliteten och porositeten i sandstenen var otillräcklig p.g.a. det tryck som råder under detta djup.

Djupintervallets övre gräns är satt med utgångspunkt från koldioxidens fysikaliska egenskaper där den övergår i superkritiskt tillstånd kring detta djup. Arbetet resulterade i en rapport där 11 intressanta strukturer och porösa sandstenslager (djupa akvifärer) identifierades i Danmark (fig. A5:2–3). I rapporten beräknas att uppemot 16 miljarder ton koldioxid kan lagras i dessa (Christensen & Larsen 2004). Nästan två tredjedelar av denna mängd har bedömts kunna lagras i en struktur vid Thisted på norra Jylland. Skillnaderna i lagringsmängder som angivits i de olika studierna är stora och åskådliggör tydligt problemen med bedömningarna. Sannolikt beror detta på den stora osäkerhet som finns och att det är många faktorer som inverkar. Generellt verkar det dock som att bedömningstalen för den mängd koldioxid som kan lagras minskar när man får mer kunskap om berggrunden.

### CO<sub>2</sub>STORE

I samband med projektet CO<sub>2</sub>STORE (*On-land and Long-term Saline Aquifer CO<sub>2</sub> Storage*) gjorde GEUS en omfattande studie rörande potentialen för lagring av koldioxid i två strukturer (Havnsø och



Figur A5:4. Havnsø- och Røsnæsstrukturerna med djupkurvor och området med sluten struktur markerad. (Källa: GEUS.)

Tabell A5:1. Sammanställning av olika parameterdata för strukturerna vid Kalundborg. (Källa: GEUS.)

|                      | Havnsø              | Røsnæs             |
|----------------------|---------------------|--------------------|
| Djup, topp           | 1500 m              | 1700 m             |
| Tjocklek             | 150 m               | 100 m              |
| Varav sandstenslager | 100 m               | 50 m               |
| Porositet            | 22 %                | 20 %               |
| Permeabilitet        | 500 mD              | 200 mD             |
| Tryck                | 150 bar             | 170 bar            |
| Temperatur           | 50                  | 55                 |
| Area                 | 166 km <sup>2</sup> | 90 km <sup>2</sup> |
| Lagringsfaktor       | 0,4                 | 0,4                |
| Lagringskapacitet    | 923 Mt              | 227 Mt             |

Røsnæs) i Gassumformationen vid Kalundborg på Själland (fig. A5:4). Strukturerna med den porösa sandstenen ligger på ca 1 500 m djup och identifierades i samband med GESTCO-projektet under slutet av 1990-talet. Syftet med studien var att se om det var möjligt att lagra koldioxid från två närliggande kraftverk. I tabell A5:1 ges sammanfattande parametrar för de båda strukturerna. Resultat från studien är redovisade i en GEUS-rapport (Christensen & Larsen 2004), vilken omfattar en övergripande undersökning av olika frågeställningar rörande transport och lagring. I studien presenteras även modelleringar och simuleringar av lagrets funktion rörande akvifärbeteende, geokemisk påverkan m.m.

Sammanfattningsvis anser GEUS att Havnsøstrukturen uppfyller de grundläggande kraven på ett lager. De anser att strukturen är en av de bästa i Danmark. För att gå vidare krävs dock seismiska undersökningar och borrhning till ca 2 000 m djup. I samband med undersökningsborrningen utförs tester av akvifären och integriteten på takbergarten, och geokemiska egenskaper för berggrunden och formationsvätskan undersöks.



## Vedsted

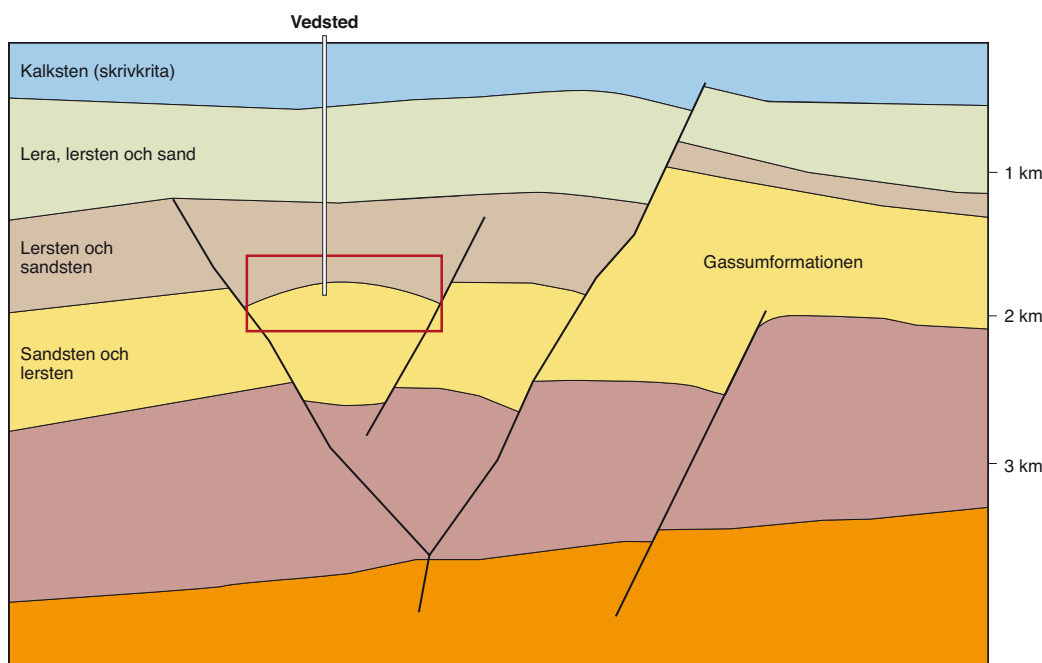
Vattenfall har som målsättning att etablera en till tre demonstrationsanläggningar för avskiljning och lagring av koldioxid i Danmark och Tyskland fram till 2015 ([www.vattenfall.se](http://www.vattenfall.se)). En av de möjliga anläggningsplatserna finns i anslutning till Nordjyllandsverket utanför Ålborg. Här har geologiska undersökningar utförda av bl.a. GEUS visat förekomsten av intressanta porösa och permeabla akvifärer på djup mellan 1000 och 2000 m. Vid Vedsted finns även en sannolikt sluten struktur i berggrunden som kan vara lämplig för lagring. Strukturen är en antiklinal domstruktur som bildats genom kompression i berggrunden under yngre krita. Strukturen, som har en avlång utbredning i plan (10 × 5 km), begränsas av nordväst–sydöstligt riktade förkastningar (fig. A5:5).

Vedstedstrukturen ligger på ca 2000 m djup och har tidigare varit känd från bl.a. kolväteprospektering på 1950-talet. Man fann ingen olja eller gas men information från borrhningarna har stor betydelse för fortsatta undersökningar avseende lagring av koldioxid. Berggrunden som är potentiellt lämplig består av en växellagrad sekvens med sandsten och lersten tillhörande Gassumformationen. Sandstenslagren överlagras av lerstenar som bedöms ha en tillräckligt tät funktion som takbergart.

Preliminära beräkningar visar att strukturen kan ha en total lagringspotential på 40–80 miljoner ton koldioxid. Under 2008–2009 genomfördes kompletterande seismiska undersökningar i området för att få mer information om strukturens geometriska uppbyggnad. Provborrhningar var planerade till slutet av 2009. På grund av kraftigt motstånd från befolkningen i området har vidare undersökningar tills vidare avbrutits.

## Referenser

- Christensen, N.P. & Larsen, M. 2004: Assessing European potential for geological storage of CO<sub>2</sub> – The GESTOCO project. *Geological Survey of Denmark and Greenland Bulletin 4*, 13–16.
- Holloway, S., Heederik, L.G.H. van der Meer, Czernichowski-Lauriol, I., Harrison, R., Lindeberg, E., Summerfield, I.R., Rochelle, C., Schwartzkopf, T., Kaarstad, O. & Berger, B. 1996: *The underground disposal of Carbon Dioxide. Joule II project No. CT92-0031, summary report*. British Geological Survey, Keyworth, Nottingham, UK.



Figur A5:5. Schematisk figur som visar Vedstedstrukturen. (Källa: GEUS.)

## BILAGA 6. AKVIFÄRENS FYSIKALISKA OCH KEMISKA EGENSKAPER

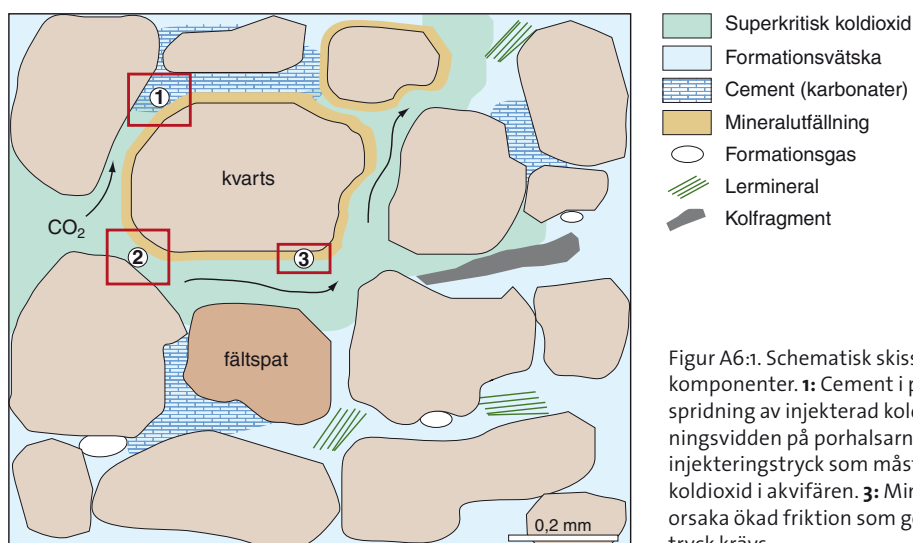
### Mineralkorn och övriga komponenter

En akvifärbergart är uppbyggd av mineralkorn, cement, formationsvätska och gas (fig. A6:1). Mineral-kornen i en vanlig sandsten (arenit, kvartssandsten) består till merparten av kvarts och fältspat. Glimmer, tungmineral och bergartsfragment (kalksten, sandsten, gnejs, granit m.m.) utgör vanligtvis en mindre andel. Undantag är arkosiska sandstenar där mer än 25 % av bergarten kan bestå av fältspater och bergartsfragment. Som exempel kan nämnas att sandstenen i Utsiraformationen (Sleipnerfältet i Nordsjön) består av 75 % kvarts, 16 % fältspat, 3 % calcit (kalciumkarbonat) samt glimmer, lermineral och bergartsfragment. Sandstenar med hög kvartshalt är mindre känsliga för kemiska reaktioner i samband med lagring av koldioxid.

I de flesta sandstentyper finns ofta kemiskt utfällda mineraliseringar. Dessa kallas cement och består oftast av karbonat, kisel syra eller järnföreningar. Cementen har bildats som sekundära utfällningar i bergarten i samband med förändringar av kemisk jämvikt, temperatur och tryck när bergarten överlagrats av yngre bergarter. Utfällningarna ökar bergartens hållfasthet samtidigt som porvolymen minskar vilket leder till lägre porositet och permeabilitet. Det förekommer även sekundära mineralutfällningar med lermineral som t.ex. klorit, smektit och kaolinit. Dessa kan sitta som små kristaller på kornen eller helt fylla ut porutrymmena. När utfällningarna bildar sträva hinnor på kornens yta ökar tryckmotståndet kraftigt i bergarten vilket i sin tur minskar permeabiliteten. Kornformen och mängden finmaterial i bergarten har också stor betydelse för hur lätt en vätska eller gas kan förflytta sig. Stor andel kantiga och finkorniga partiklar gör att permeabiliteten minskar.

### Formationsvätska och gas

Porvattnet (formationsvätskan) i djupa akvifärer med marint ursprung hade ursprungligen ungefär samma sammansättning som havsvattnet där sedimentet avsattes. I samband med att formationen överlagras av yngre sediment och kompakteras, koncentreras havsvattnets salthalt genom kemiska reaktioner och osmos till en kraftigt salthaltig formationsvätska. Mängden lösta ämnen, dvs. salthalten, ökar med ökat tryck och ökad temperatur. Normala salthalter i formationsvätskan är ca 100 000 mg/l (10 %) på 1000 m djup.



Figur A6:1. Schematisk skiss av en akvifärbergarts olika komponenter. 1: Cement i porutrymmena förhindrar spridning av injikerad koldioxid i akvifären. 2: Öppningsvidden på porhalsarna är avgörande för hur stort injekteringsstryck som måste appliceras för att få in koldioxid i akvifären. 3: Mineralisering på kornytan kan orsaka ökad friktion som gör att ett högre injekteringsstryck krävs.

## Kemisk uppbyggnad

Avgörande för mineralisering av koldioxiden är akvifärbergartens sorteringsgrad och textur (t.ex. kornstorlek). En stor mängd rundade kvartskorn ger låg kemisk reaktivitet medan fältspater, glimmer, karbonatkorn, kantiga korn och leror leder till större benägenhet för kemiska reaktioner och sekundära mineraliseringar. Kornstorleken har också betydelse. Mindre kornstorlek ger större, tillgänglig, reaktiv, specifik kornyta. Ett vanligt mått på reaktiviteten är katjonbyteskapaciteten (CEC, *cation exchange capacity*).

## Porositet, permeabilitet, hydraulisk konduktivitet och transmissivitet

Porositet och permeabilitet är två viktiga parametrar för bedömning av en akvifärs lagringspotential. Porositet mäts i procent och anger hur stor andel av akvifärbergarten som utgörs av porer. Man skiljer dessutom den totala porositeten från den effektiva porositeten (kinematiska porositeten), som är den kommunicerande porvolymen och som gör att formationsvatten och gas kan strömma genom bergarten. Den effektiva porositeten är alltid lägre än den totala beroende på att det finns inneslutna porer och sprickor som inte kommunicerar med varandra. Pimpsten är ett exempel på en bergart med hög total porositet men liten effektiv porositet. Porositeten beror på kornstorleksfördelning, kornform och packning samt graden av konsolidering och förekomst av cement.

Permeabilitet (ofta kallad hydraulisk konduktivitet) är ett relativt mått på en bergarts specifika förmåga att släppa igenom gas eller vätska per area, tid och gradient. Vanligtvis anges permeabiliteten inom olje- och gasindustrin i darcy (cm/s) eller millidarcy (mD). Permeabiliteten beror på bergartens porositet, lagring, skiktning och textur. Värden på 100–1 000 mD motsvarar väl sorterade (jämnkorniga, rundade korn) sandstenar med hög permeabilitet och som sannolikt är väl lämpade för lagring av koldioxid. Även sandstenar med en permeabilitet mellan 10 och 100 mD kan i vissa fall också vara lämpliga kandidater. Det krävs i dessa sämre sandstenar högre injekteringstryck och längre tid för att få in motsvarande volymer koldioxid. Permeabiliteter på flera darcy, som i fallet för sandstenarna i Utsiraformationen i Nordsjön, ger mycket goda förutsättningar för injektering och gaslagring.

I en sandstensakvifär är det vanligt att den horisontella och vertikala permeabiliteten skiljer sig åt beroende på förekomst av horisontella skikt med lägre permeabilitet (t.ex. skikt med finkornig sand, silt och lera). Man talar då om anisotropa förhållanden.

Kapillärtrycket i bergarten är bl.a. en funktion av ytspänningen, porernas storlek och porhalsarnas radie. Kapillärtrycket i bergarten ökar när porhalsarnas öppningsvidd minskar. Takbergarterna har alltid mycket små porer och porhalsar vilket leder till högt kapillärtryck medan akvifärbergarterna har ett lågt kapillärtryck. Takbergarten hindrar genomströmning av gas eller vätska från underliggande akvifär när kapillärtrycket är högre än uppdrivningstrycket från gasen eller vätskan. Högt kapillärtryck är i stort sett korrelerbart med låg permeabilitet. En takbergart med låg permeabilitet hindrar inte genomströmning men flödes hastigheten blir låg.

Hur mycket vatten som kan transporteras genom en akvifär vid en viss gradient, t.ex. via en brunn, anges med transmissiviteten. Denna beror på vätskans egenskaper, så som densitet, temperatur och viskositet, samt akvifärens porositet, permeabilitet och tjocklek. Transmissiviteten är lika med permeabiliteten multiplicerad med akvifärens tjocklek. Sammantaget utgör dessa parametrar viktiga data för bedömningen av lagringsmöjligheterna i en akvifär.

## BILAGA 7. BASKRAV OCH BÖRKRAV FÖR LAGRING AV KOLDIOXID I BERGGRUNDEN

Vid ett urval av lämpliga områden och platser för lagring av koldioxid finns ett antal börkrav och baskrav som måste uppfyllas. Dessa finns sammanställda i tabell A7:1.

Ett grundläggande krav för lagring är att den sker under sådana förhållanden att koldioxiden är i ett superkritiskt tillstånd. Det sker vid tryck över 73,9 bar och en temperatur på minst 31,1 °C. Att lagra i superkritiskt tillstånd är en förutsättning för att kunna optimera mängden koldioxid som kan lagras. Samma mängd koldioxid har betydligt mindre volym i superkritiskt tillstånd än i gasfas. För att uppnå superkritiskt tillstånd krävs i regel att lagringsakvifären ligger på minst 800 m djup.

Vid värderingen av lagringspotentialen i djupa akvifärer måste hänsyn tas till några grundläggande faktorer. Först och främst ska ett lager ha kapacitet att ta emot stora mängder koldioxid, helst mer än vad koldioxidkällan till lagret genererar under sin livslängd. Som exempel kan nämnas att ett större koleldat kraftverk i Tyskland genererar 5–10 miljoner ton koldioxid per år vilket motsvarar 200–400 miljoner ton koldioxid under en driftperiod på 40 år. Motsvarande mängder för de större koldioxidkällorna i Sverige är ca 100 miljoner ton koldioxid.

Den teoretiska mängd koldioxid som kan lagras i berggrunden är, förutom lagringsakvifärens totala volym, beroende på mängden porer, dvs. porositeten. Porositetsvärden på minst 15–20 % har angetts som börkrav av bl.a. CO<sub>2</sub>STORE-projektet (Chadwick m.fl. 2008). Andra hänvisar till att porositeten ska överstiga 10 % (British Geological Survey, muntlig kommunikation). Den faktiska lagringskapaciteten är generellt sett avsevärt mindre än den teoretiska vilket beror på en mängd andra faktorer. Dessa kan vara förekomsten av förkastningar, heterogen berggrund, kemiska förhållanden, temperatur, formationstryck, bergspänningar m.m.

En annan viktig faktor vid bedömningen är hur lätt det är att få ner koldioxiden i berggrunden, dvs. injekterbarheten. Genomsläppligheten (permeabiliteten) är en mätbar parameter som ger en indikation på hur lätt vätskor och gaser kan transporteras genom bergarten. Börkrav på minst 300 mD har angetts (Chadwick m.fl. 2008) men även avsevärt lägre börkrav på har nämnts i lagringssammanhang.

Tätheten är en tredje avgörande faktor som måste bedömas vid utvärderingen av möjliga lagringsplatser. Takbergarten måste vara tillräckligt tät för att garantera säkerheten och förhindra läckage av koldioxid till markytan och atmosfären. Ett läckage medför oönskade effekter på miljön och ekosystemen i anslutning till ett lager.

Tabell A7:1. Sammanställning av olika börkrav för utvärdering av möjliga lagringsalternativ.

| Parameter                     | Börkrav           | Kommentar                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|-------------------------------|-------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Lagringskapacitet             | >100 Mt koldioxid | Motsvarar produktion av ca 2 Mt koldioxid per år från en källa under 50 år. Lagringskapaciteten ska generellt sett vara mycket större än vad närliggande källa producerar under sin livslängd.                                                                                                                                                                                   |
| Djup                          | 800–2 500 m       | Kring 800 m djup övergår koldioxiden i superkritiskt tillstånd. Under 2 500 m djup är berggrunden (akvifären) i allmänhet för tät. Ytligare liggande akvifärer kan vara intressanta om koldioxiden kan injekteras med övertryck och då fortfarande vara i superkritiskt tillstånd. I CO <sub>2</sub> SINK projektet i Ketzin injekteras koldioxiden med övertryck på 650 m djup. |
| Tjocklek på akvifären         | 20–50 m           | Nettotjocklek. Kan således vara uppdelad på ett eller flera akvifäravsnitt (sandstensnivåer) med mellanliggande täta bergarter.                                                                                                                                                                                                                                                  |
| Porositet                     | >10 %             | Helst över 15 %.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Temperatur                    | >31,1 °C          | För att koldioxiden ska vara i superkritiskt tillstånd.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| Salinitet i formationsvätskan | >30 g/l           | Helst över 100 g/l.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| Tryck                         | >73,9 bar         | För att koldioxiden ska vara i superkritiskt tillstånd.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| Permeabilitet                 | >(10)–300 mD      | Olika uppgifter finns rapporterade.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| Tjocklek på takbergarten      | >100 m            | Minimikrav för att garantera täthet.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |

Förutom dessa börkrav har akvifärens gränsvillkor stor betydelse för bedömning av risken för upptryckning av formationsvatten till ytligare liggande berggrund. De hydrauliska gränserna kan vara en förkastnings- eller sprickzon. De kan också vara knutna till akvifärens geometri (t.ex. linsformad slut, lutande öppen m.m.). Den hydrauliska påverkan är vanligtvis påvisbar långt utanför koldioxidens utbredning i lagret. Dess effekter är avgörande för bedömningen av lagringspotentialen på en specifik plats.

Koldioxidinjektering i en akvifär medför tryckhöjning när formationsvätskan i bergartens porer trängs undan. Denna tryckhöjning får maximalt vara så hög att den inte leder till sprickbildning och läckage genom taklagret. En viss del av tryckhöjningen tas upp genom kompressibiliteten i formationen (bergarter och formationsvätska), men i akvifärens öppna gränser (t.ex. förkastningszon) kan formationsvätskor tränga upp om tryckhöjningen är tillräckligt stor.

En fördel vid lagring i tömda olje- och gasfält är att produktionen av kolväten resulterat i en trycksänkning i formationen vilket minskar risken för tryckpåverkan vid koldioxidinjektering. Även lagring i stora öppna akvifärer är fördelaktig eftersom det sker en regional fördelning av tryckhöjningen som också minskar risken för påverkan i akvifärens randområden.

Vid lagring i slutna, mindre akvifärer krävs ofta stora injekteringsstryck vilket begränsar lagringspotentialen. Detta beror på att formationsvattnet inte kan tryckas undan mer än vad kompressibiliteten och formationsintegriteten tillåter.

## Referenser

Chadwick, A., Arts, R., Bernstone, C., May, F., Thibeu, S. & Zweigel, P.R, 2008: Best practice for the storage of CO<sub>2</sub> in saline aquifers – observations and guidelines from the SACS and CO<sub>2</sub>STORE projects. *British Geological Survey Occasional Publication 14*, 267 s.

## BILAGA 8. ÖVERVAKNING

Det är mycket viktigt att ett koldioxidlager övervakas på ett betryggande sätt. Detta är en förutsättning för att geologisk lagring av koldioxid ska bli en säker, effektiv och accepterad metod. Hur övervakningen ska gå till finns beskrivet i EU-direktivet om geologisk lagring av koldioxid (Europeiska kommissionen 2009) där det framgår att medlemsstaten ska se till att verksamhetsutövaren övervakar injekteringsanläggningen, lagringskomplexet och, när så är möjligt, även omgivningen.

Enligt direktivet ska en övervakningsplan som utarbetas av verksamhetsutövaren enligt de krav som fastställs i direktivets bilaga 2. I bilagan framgår bland annat att en övervakningsplan ska upprättas enligt den riskbedömning som tidigare gjorts i samband med beskrivning och bedömning av det potentiella lagringskomplexet och omgivande områden. Övervakningsplanen ska uppdateras åtminstone vart femte år för att ta hänsyn till förändringar som berör bedömda läckagerisker, risker för miljö och hälsa, nya vetenskapliga rön samt förbättringar av tillgänglig teknik.

Genom successiv lösning av koldioxid i formationsvattnet, kapillär bindning samt mineralisering av koldioxid minskar risken för läckage med tiden. Därigenom kommer också behovet av övervakning successivt att bli mindre på längre sikt.

### Syfte med övervakning

En övervakningsplan har till huvudsyfte att övervaka och kontrollera lagringskomplexet och koldioxidplymens utbredning och egenskaper över tid.

I injekteringsbrunnar kontrolleras injekteringsförloppet med avseende på trycksituationen nere i brunnen och vid brunnshuvudet. Vidare ska eventuella läckage i eller kring brunnen detekteras eftersom sådana enligt oljebranschen är den vanligaste felkällan vid injektering.

Vid ett eventuellt läckage ska övervakningen kunna visa på omfattning, plats och typ av läckage från den primära akvifären till markytan och atmosfären. Det är därför nödvändigt att övervaka var koldioxidplymen befinner sig, oavsett om koldioxiden befinner sig i superkritiskt tillstånd eller i gasfas. Vid läckage av koldioxid ska koldioxidvariationen kunna mätas på markytan. De parametrar som enligt direktivet måste ingå i övervakningsplanen är:

1. Läckage av koldioxid vid injekteringsanläggningen.
2. Flöde av koldioxid (volym per tid) vid toppen av injekteringsbrunnarna.
3. Koldioxidens tryck och temperatur vid toppen av injekteringsbrunnarna (för att bestämma massflödet).
4. Kemisk analys av det injekterade materialet.
5. Akvifärens temperatur och tryck (för att avgöra koldioxidens tillstånd och egenskaper).

Andra parametrar som kan övervakas är:

1. Andelen löst koldioxid och andelen mineraliseringar i akvifären.
2. Sprickzoner eller förkastningar som uppkommit efter den första beskrivningen och bedömningen av lagringskomplexet.
3. Grundvattenkvalitet med avseende på kemisk sammansättning.
4. Koldioxidkoncentrationer i ytliga jordlager.
5. Påverkan på omgivande ekosystem.
6. Mikroseismiska mätningar i borrhål, kopplat till koldioxidinjektering.



## Övervakningsmetoder för koldioxidlager

Enligt EU-direktivet om geologisk lagring av koldioxid ska valet av övervakningsteknik grundas på bästa tillgängliga metoder vid tidpunkten för utformandet. Metoder för att mäta förekomst, volym, hastighet, tryck etc. finns idag i första hand inom olje- och gasindustrin, men även inom andra industriella verksamheter. Tabell A8:1 beskriver kortfattat olika övervakningsmetoder.

För flertalet av de genomförda och planerade koldioxidlagringsprojekten ingår demonstration och verifiering av övervakning som en av huvuduppgifterna. Projekten har visat att de testade övervakningsmetoderna kan verifiera en säker och effektiv lagring av koldioxid. I Sleipner- och Weyburnprojekten har en god uppföljning av koldioxidplymens spridning samt uppskattning av volymer i akvifären kunnat påvisas.

Även om det finns mycket erfarenhet och kunskap om övervakning från främst olje- och gasindustrin, samt från genomförda demonstrations-, pilot- och EHR-projekt (*Enhanced Hydrocarbon Recovery*), så kvarstår flera väsentliga frågor. Ett exempel är metoder för bokföringen av lagrad volym koldioxid i ett lager för att verifiera kvantiteter och spridning i lagret.

Tabell A8:1. Möjliga metoder för övervakning av olika parametrar.

| Parameter                                                                              | Övervakningsmetod                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|----------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Lokalisering av koldioxidplym                                                          | Reflektionsseismik i 2D och 3D<br>Borrhålsseismik<br>Elektriska och elektromagnetiska metoder<br>Satellitmätning av ytläge och marklutning<br>Tyngskraftsmätning<br>Akvifärtryck<br>Provtagning vid brunnshuvud och i akvifär<br>Spårämnen, naturliga och tillsatta                                              |
| Tidig varning av fel i lager                                                           | Reflektionsseismik i 2D och 3D<br>Borrhålsseismik<br>Satellitmätning av ytläge och lutning<br>Tryckmätning i injekteringsbrunn och akvifär                                                                                                                                                                       |
| Koldioxidkoncentration och dess variation på markytan                                  | IR-mätning av koldioxidkoncentration<br>Luftprovtagning och analys med gaskromatograf eller masspektrometer<br>Övervakning av naturliga eller tillsatta spårämnen                                                                                                                                                |
| Injekteringsbrunnars skick, flöden och tryck                                           | Borrhålsloggar inkl. korrosionslogg, ljudlogg, temperaturlogg<br>Tryckmätning vid brunnshuvud och i akvifär<br>Tryckmätning i utrymme mellan foderrör och injekteringstub<br>Flödesmätning av typen strypfläns eller annan tryckfallsmätning<br>Koncentration av koldioxid vid markytan nära injekteringsbrunnen |
| Löst koldioxid i formationsvattnet eller mineraliserat                                 | Provtagning av formationsvattnet och analys av koldioxid (joner, isotoper)<br>Övervakning av naturliga och tillsatta spårämnen                                                                                                                                                                                   |
| Läckage i förkastningar eller sprickzoner                                              | Reflektionsseismik i 2D och 3D<br>Borrhålsseismik<br>Elektrisk och elektromagnetisk metod<br>Satellitmätning av ytläge och marklutning<br>Tryckmätning i akvifär<br>Provtagning i grundvatten och jorden (omättade zonen)                                                                                        |
| Grundvattenkvalitet                                                                    | Provtagning och geokemisk analys av grundvatten<br>Övervakning av naturliga/tillsatta spårämnen                                                                                                                                                                                                                  |
| Koncentration av koldioxid i marken (omättade zonen) och påverkan på jordens ekosystem | Provtagning av gas i ytliga jordskikt och gasanalys<br>Provtagning av gas i marken (omättade zonen) och gasanalys<br>Provtagning för geobotanisk analys<br>Undersökning av biologiskt liv                                                                                                                        |
| Mikroseismisk aktivitet                                                                | Passiv seismisk mätning                                                                                                                                                                                                                                                                                          |

## BILAGA 9. BEDÖMNING AV MILJÖ- OCH HÄLSORISKER VID INJEKTERING OCH LAGRING AV KOLDIOXID

Säker hantering och bedömning av miljö- och hälsorisker är en nyckelfråga vid införandet av koldioxidlagring i större skala. Mycket arbete har därför lagts ner för att lösa dessa frågor. Det är även mycket viktigt att dessa frågor är grundligt genomarbetade för att allmänheten ska acceptera tekniken.

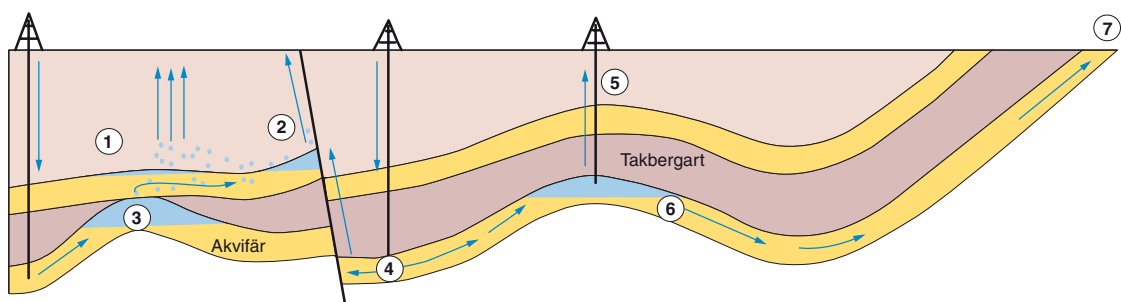
I artikel 4 i EUs direktiv för geologisk lagring av koldioxid (Europeiska kommissionen 2009) kan man läsa att ”En geologisk formation får endast väljas som lagringsplats om det med de planerade användningsförhållandena inte finns någon betydande risk för läckage, och om ingen betydande risk för miljön eller människors hälsa föreligger”.

I bilaga 1 i direktivet anges de omfattande uppgifter och egenskaper hos formationen som ska samlas in och utgöra underlag för en volymetrisk och dynamisk tredimensionell geologisk modell. Denna modell ska inte bara omfatta lagringsplatsen utan hela lagringskomplexet som även inkluderar takbergarter och hydrogeologiskt kopplade områden. Vidare ska ett stort antal egenskaper hos komplexets omgivningar dokumenteras. Med dessa uppgifter ska en eller flera statiska, tredimensionella, geologiska modeller byggas upp. Beskrivningen av lagrets säkerhet grundas sedan på en dynamisk modellering i flera tidssteg. Simuleringar ska genomföras för bedömning av modelleringens känslighet för olika antaganden, risker och säkerheter. Den resulterande riskbedömningen ska omfatta exponeringsbedömningar, effektbedömningar och riskbeskrivning. Huvuddelen av den information som krävs för dess arbeten saknas för de svenska kandidatområdena. Det har gjorts bedömningar av de hälsorisker som förknippas med lagring och tester med koldioxid i underjordiska saltvattenakvifärer, för att få en förståelse för vad som är viktigast att fokusera på i det kommande arbetet. I enlighet med direktivet ska en riskbedömning baseras på dynamisk modellering av lagringskomplexet och omfatta beskrivning av koldioxidens dynamiska beteende i samband med lagring, beskrivning av känslighet samt utvärdering av riskerna. I riskbedömningen ska hänsyn tas till alla tänkbara driftsförhållanden. Där ingår:

- Potentiella läckagevägar.
- Potentiell omfattning av läckage från identifierade läckagevägar.
- Kritiska parametrar som kan påverka läckage.
- Sekundära effekter av koldioxidlagring (t.ex. undanträngning av formationsvätskor, bildning av nya substanser i samband med koldioxidlagring).
- Andra faktorer som skulle kunna innebära fara för miljö eller människors hälsa.

Riskbedömningarna har utgått från ett antal fall som bland annat presenteras i figurerna A9:1 och A9:2 avseende geologi och brunnar. I riskbedömningen ingår såväl identifiering av oönskade händelser som analys och värdering av deras konsekvenser i anslutning till lagersystemet, det vill säga akvifär, takbergart och brunnar. Följande oönskade konsekvenser för miljö- och hälsa utgör en bakgrund för den generella bedömningen i samband med koldioxidlagring enligt tabell A9:1:

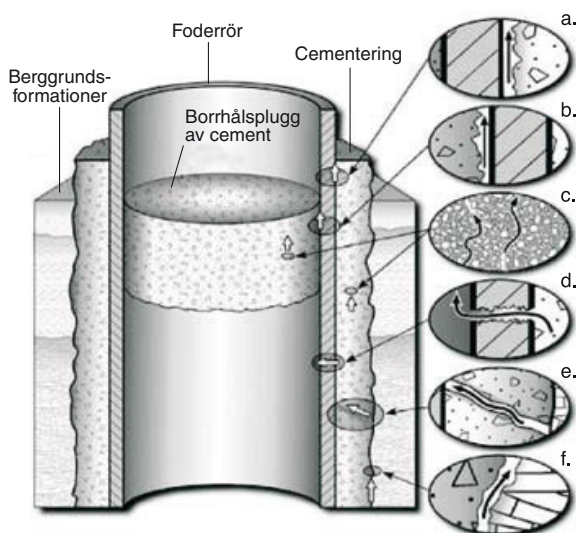
1. Gasformig koldioxid letar sig upp till ytliga jordlager eller till markytan. Gasen kan påverka såväl människor och djur som växter. När halterna koldioxid i luften överstiger 5 % leder det till akuta cirkulationsrubbnings- och andningsbesvär (kvävning). Eftersom gasen är tyngre än luft samlas den i lågt liggande terräng, källare m.m. Där ökar risken för kvävning. Även lägre halter leder till cirkulationssvikt hos barn och äldre. En längre tids exponering för halter över 1000–2000 ppm leder allmänt till huvudvärk och illamående.
2. Gasformig koldioxid löses i ytligt grundvatten (färskvatten). Då sänks grundvattnets pH vilket kan innebära utfällning av olika metallföreningar och leda till grumling, missfärgning och smakförändring.
3. Salint formationsvatten från stort djup tränger upp till marknära lager, vilket bland annat kan leda till förorening av grundvatten.



#### Möjliga läckagevägar och orsaker

|                                                                                                                         |                                                                  |                                                                                                        |                                                                                                                                             |                                                                     |                                                                                                            |                                                 |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| 1.<br>När gränstrycket för berggrundens hållfasthet överskrids tränger CO <sub>2</sub> upp genom överliggande berggrund | 2.<br>CO <sub>2</sub> läcker via förkastningar eller sprickzoner | 3.<br>CO <sub>2</sub> läcker upp i andra lager p.g.a. otät takbergart eller avsaknad av tät takbergart | 4.<br>Injekterad CO <sub>2</sub> transporteras uppåt, vilket ökar formationstrycket och risken för att läckagevägar uppstår i förkastningar | 5.<br>CO <sub>2</sub> läcker via gamla brunnar som är dåligt tätade | 6.<br>Strömningar i akvifären gör att löst CO <sub>2</sub> kan transporteras ut från den slutna strukturen | 7.<br>CO <sub>2</sub> läcker ut till atmosfären |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|

Figur A9:1. Potentiella läckagevägar i ett koldioxidlager (IPCC 2005).



Figur A9:2. Potentiella läckagevägar i anslutning till brunnar (IPCC 2005).

Tabell A9:1. Exempel på händelser och konsekvenser i samband med koldioxidlagring. Förklaring av konsekvens 1–3 ges i huvudtexten till denna bilaga.

| Händelse<br>Nr                                                                                                              | Skede       | Konsekvens |   |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|------------|---|-----|
|                                                                                                                             | Injektering | Lagring    | 1 | 2 3 |
| Geologiskt system (jfr fig. A9:1 och A9:2)                                                                                  |             |            |   |     |
| 1 Takbergart läcker koldioxid p.g.a. överskridet kapillärt tryck                                                            | X           | X          | 1 | 2   |
| 2 Takbergart läcker koldioxid p.g.a. överskriden mekanisk hållfasthet (uppsprickning)                                       | X           | X          | 1 | 2   |
| 3 Takbergart läcker koldioxid p.g.a. kemiskt betingad vittring eller sprickutvidgning                                       | (X)         | X          | 1 | 2   |
| 4 Koldioxid läcker p.g.a. att takbergart är inhomogen eller saknas i vissa delar                                            | X           | X          | 1 | 2   |
| 5 Koldioxid läcker p.g.a. att takbergart korsas av förkastning eller sprickzon                                              | X           | X          | 1 | 2   |
| 6 Rörligt salint formationsvatten transporterar löst koldioxid till andra platser                                           |             | X          | 1 | 2   |
| 7 Koldioxid tränger undan salint formationsvatten                                                                           | X           |            |   | 3   |
| Brunnssystem (fig. A9:2)                                                                                                    |             |            |   |     |
| 1 Koldioxid läcker p.g.a. otät cementplugg inuti brunn (2 fall: otät cement och passage i spalt mellan cement och foderrör) | X**)        | X          | 1 |     |
| 2 Koldioxid läcker p.g.a. otät cementering mellan foderrör och brunn (4 olika fall)                                         | X           | X          | 1 | 2   |
| 3 Koldioxid läcker p.g.a. otäta foderrör p.g.a. korrosion som leder till skada                                              | X           | X          | 1 |     |

\*\* ) Avser inaktiv tätad brunn.

## BILAGA 10. UNDERSÖKNINGAR FÖR BEDÖMNING AV LAGRINGSPLATSER

### Förundersökningar

Ett förundersökningsprogram ingår inledningsvis i regionala bedömningar av lagringspotentialen i de sedimentära berggrundsbassängerna. Dessa förundersökningar bör omfatta övergripande beskrivningar av berggrundens allmänna uppbyggnad med hänsyn till förekomst av lämpliga takbergarter och akvifärer. Arbetet omfattar inledningsvis inventering av befintlig data från borrhningar och borrhålsgeofysiska undersökningar med avseende på berggrundens uppbyggnad med information om bl.a. lagring, homogenitet, tjocklek, porositet, permeabilitet, temperatur, mineralogisk uppbyggnad, porstorlek, kapillär förmåga, formationsvätskor och gaser. Vad som ska ingå i en förundersökning regleras av EUs direktiv för geologisk lagring av koldioxid (bilaga 1), och i enlighet med direktivets 5:e artikel krävs det undersökningstillstånd om nya förundersökningar ska utföras (t.ex. borrhning och geofysiska mätningar). Nedan presenteras en kortfattad beskrivning av viktiga underlagsdata och information som ska ingå i en förundersökning.

För beskrivning och vidare bedömning av de regionala områdena görs en strukturell kartläggning med hjälp av befintliga geofysiska mätningar (seismik) och borrhningar. Syftet är att med en inledande geologisk modell som underlag värdera områdets potential och även avgränsa delområden som är speciellt lämpade för fortsatta undersökningar. I bedömningsarbetet ingår inledande beräkningar och bedömningar av lagringskapacitet och säkerhet.

För flertalet av EUs medlemsstater finns idag någon form av regional bedömning av lagringspotentialen. Förundersökningar och inventeringar har i många fall gjorts inom ramen för EU-finansierade forsknings- och samarbetsprojekt. I vissa fall har ett antal delområden och slutna strukturella fällor utpekats som speciellt lämpliga och där rekommenderas att det görs kompletterande plats- och områdesspecifika undersökningar. Sverige har hittills endast gjort mycket övergripande förstudier (Erlström 2008) och merparten av dessa redovisas i den här utredningen.

### Områdesspecifika undersökningar

I EUs direktiv för geologisk lagring av koldioxid finns en instruktion för hur en beskrivning och bedömning av ett potentiellt lagringskomplex ska genomföras. Instruktionen omfattar två steg.

#### **Steg 1: Insamling av basininformation**

De uppgifter som ska samlas in syftar till att klarlägga de geologiska, hydrogeologiska, geokemiska och fysikaliska egenskaperna hos lagringskomplexet och dess omgivningar. Då ingår även takbergarternas egenskaper och hydrologiskt sammanlänkade områden. Många av dessa egenskaper samlas in genom information från nya, kompletterande kärnborrhningar och geofysiska undersökningar, inklusive seismiska mätningar. Egenskaper hos lagringskomplexet som enligt direktivet ska beaktas är:

- Geologisk och geofysisk uppbyggnad och karaktär.
- Hydrogeologiska egenskaper (speciellt med avseende på grundvatten som är avsett för dricksvatten).
- Akvifärgeologiska egenskaper (permeabilitet, hydrauliska gränsvillkor m.m.).
- Geokemiska egenskaper (upplösningshastighet, mineraliseringstakt).
- Geomekaniska egenskaper (permeabilitet, sprickbildningstryck och bergspänning).
- Seismiska egenskaper.
- Förekomst av naturliga och tillverkade sprickor och kanaler (t.ex. borrhål) som kan utgöra läckagevägar och deras karaktär.
- Områden kring lagringskomplexet som kan påverkas av lagringen av koldioxid.
- Befolkningsfördelning i den region som ligger ovanför lagringsplatsen.

- Närhet till värdefulla naturresurser, t.ex. Natura 2000-områden, kolväten och drickbart grundvatten.
- Befintliga verksamheter kring lagringskomplexet och eventuell inverkan på dessa.

### ***Steg 2: Geologisk och hydrogeologisk modellering i rum och tid***

Med hjälp av indata från insamlad basinformation framställs en serie med tredimensionella och fyrdimensionella modeller över lagringskomplexet för att visa:

- Den fysiska fällans geologiska struktur.
- Akvifärens geomekaniska, geokemiska och flödesmässiga egenskaper, täckande lager och omgivande formationer.
- Spricksystem och eventuell förekomst av tillverkade sprickor och kanaler.
- Komplexets utbredning.
- Porvolym.
- Injekterings- och spridningsförlopp i tid och rum.

### **Referenser**

Erlström, M., 2008: Lagring av koldioxid i djupa akvifärer. Lagringsmöjligheter i Sverige och Danmark. *Elforsk rapport 08:84*, 1–54.

## BILAGA 11. BEDÖMNING AV LAGRINGSKAPACITET

Flertalet utredningar som gjorts de senaste åren har påtalat osäkerheten i att värdera lagringskapaciteten. Detta beror på att många variabler påverkar en sådan värdering. Bedömningarna grundas enbart på hur mycket koldioxid som går att få in i en porös och permeabel akvifär. Tryckförhållanden och kemiska reaktioner i formationen beaktas oftast inte i dessa grova, teoretiska kapacitetsberäkningar. För mer precisa bedömningar behövs platsspecifika parameterdata och ofta även resultat från hydrotester och injektering.

Inom EU-projektet GeoCapacity (sid. 15) har en teoretisk beräkning av kapacitet som baseras på den totala porvolymen i akvifären använts, och en praktisk beräkning som utgår från hur effektivt denna porvolym kan utnyttjas för lagringen. I dessa beräkningar, som bl.a. gjorts på danska, polska och baltiska akvifärer, har en sådan faktor ett värde mellan 1 och 10 %. Vid beräkning av lagringskapacitet har lagringsfaktorn getts ett högre värde i identifierade strukturella fällor jämfört med i flacka strukturer. Detta beror på att strukturella fällor ofta är bättre undersökta med mer omfattande mätdata. Lagringsfaktorn bedöms till uppemot 40 % i en sådan struktur vilket också stöds av resultat från naturgaslagring i fällor med motsvarande karaktär. För att kunna jämföra de kapacitetsbedömningar som anges i projektet GeoCapacity och i våra grannländer har samma beräkningsgrund använts här (se faktaruta nedan).

Från teoretiskt beräknade lagringskapaciteter och förhållanden framgår av beräkningarna i tabell A11:1 och figur A11:1, att det krävs att akvifären har en area på minst 100 km<sup>2</sup> och en tjocklek på minst 50 m samt en porositet på 15 % för att lagra 100 miljoner ton koldioxid. Med en tjocklek på 10 m blir motsvarande area ca 500 km<sup>2</sup>. Den teoretiska bedömningen tar dock inte hänsyn till övertryck, vilket kan vara en begränsande faktor, speciellt i slutna akvifärer.

Av beräkningarna framgår också att varje fall måste bedömas utifrån sina geologiska förutsättningar. Akvifärens porositet, tjocklek, laterala och vertikala utbredning samt homogenitet är avgörande för den grundläggande volymberäkningen. Akvifärens permeabilitet och hydrauliska egenskaper samt dess kemiska egenskaper och tryckförhållanden är avgörande för injekterbarheten och hur mycket av porvolymen som är tillgänglig för lagring.

### Den teoretiska lagringskapaciteten enligt GeoCapacity ser ut som följer:

$$M_{\text{CO}_2} = A \times T \times \varnothing \times \partial_{\text{eff}} \times P_{\text{scCO}_2}$$

$M_{\text{CO}_2}$  = lagringskapaciteten, mängden CO<sub>2</sub> i ton i superkritiskt tillstånd

A = area, m<sup>2</sup>

T = akvifärens medeltjocklek, m

$\varnothing$  = medelporositeten, %

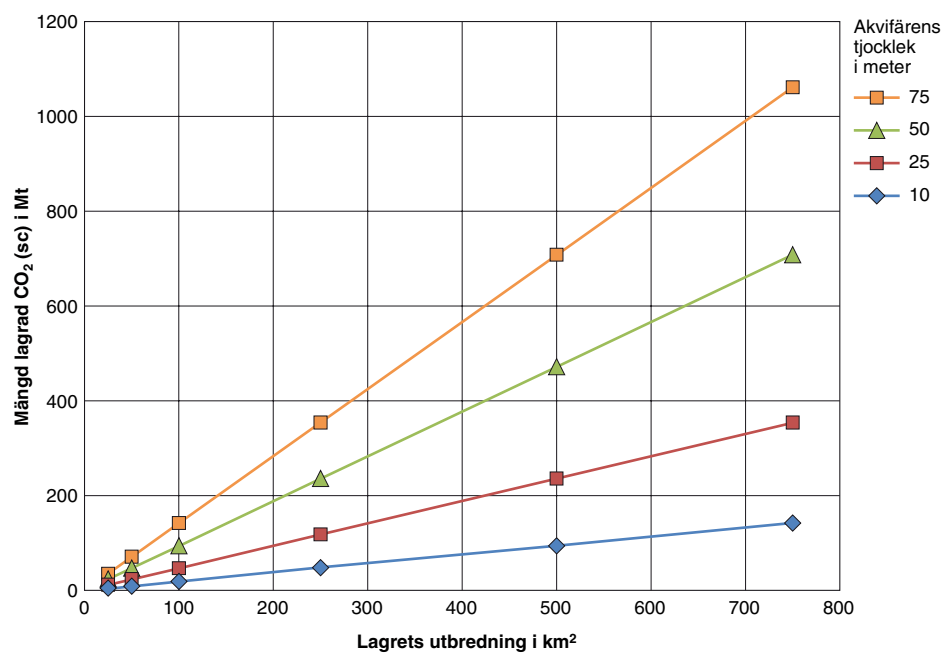
$\partial_{\text{eff}}$  = lagringsfaktor (storage efficiency factor)

$P_{\text{scCO}_2}$  = densiteten för superkritiskt CO<sub>2</sub> på aktuellt djup

Tabell A11:1. Sammanställning och exemplifiering av hur stor mängd koldioxid som kan lagras beroende på akvifärens utbredning, tjocklek, porositet och lagringsfaktor. Beräknad på lagring under 800 m djup och att koldioxidens densitet är ca 630 kg/m<sup>3</sup> på detta djup.

| Utbredning (km <sup>2</sup> ) | Akvifärens tjocklek (m) | Porositet (%) | Lagringsfaktor | Miljoner ton koldioxid |
|-------------------------------|-------------------------|---------------|----------------|------------------------|
| 50                            | 10                      | 15            | 0,4            | 19                     |
| 50                            | 25                      | 15            | 0,2            | 24                     |
| 50                            | 50                      | 15            | 0,4            | 94                     |
| 100                           | 10                      | 15            | 0,1            | 9                      |
| 100                           | 25                      | 15            | 0,2            | 47                     |
| 100                           | 50                      | 15            | 0,4            | 189                    |
| 250                           | 50                      | 15            | 0,2            | 236                    |





Figur A11:1. Förhållandet mellan lagringskapacitet, lagringsakvifärens tjocklek och utbredning. Kapaciteten är beräknad på att lagringsfaktorn är 0,2.

## BILAGA 12. TEKNISKA SYSTEM OCH DRIFT

### Brunnar

Vid geologisk lagring av koldioxid används samma teknik vad gäller borrhning och utformning av brunnar som inom olje- och gasindustrin. Av denna anledning finns det mycket erfarenhet att hämta från dessa industrier. Brunnsdjupet bör som tidigare nämnts vara minst 800 m för att koldioxiden inte ska vara i gasfas utan i superkritiskt tillstånd och därigenom ge en effektivare lagring (mindre volym).

Den borrhningsteknik som används är normalt rotationsborrning med direktspolning av borrhväska. Borrhväska är en central del i processen då den transporterar upp det bortborrade materialet till markytan, den stabiliserar borrhållsväggen samt smörjer och kyler borrhväska. Borrhningstekniken har utvecklats mycket och det finns idag möjlighet att borra såväl vertikala som horisontella brunnar till stora djup. Kunskapen som används idag är modifierad för att borra, injektera och förbättra (stimulera) brunnar i samband med koldioxidlagring. Huvudsakliga överväganden för en injekteringsbrunn är tryck, kapaciteter för injektering, eventuell produktion samt materialfrågor med framför allt korrosionsresistent material.

Det finns stora likheter mellan utformningen av en injekteringsbrunn för koldioxid och gasinjekteringsbrunnar i oljefält eller gaslager. Brunnarna behöver dock förbättras för högre tryck och bättre korrosionsskydd, något som redan tillämpats vid EHR-operationer (*Enhanced Hydrocarbon Recovery*) t.ex. i det kanadensiska oljefältet Weyburn. Ett alternativ för att få hög kapacitet är att anlägga horisontella brunnar, som har betydligt längre kontakt med akvifären än vertikala brunnar. Antalet brunnar kan reduceras med horisontell borrhning. Detta gäller också om akvifären är tjock och högpermeabel. Som exempel kan nämnas Sleipnerprojektet med injektering av en miljon ton koldioxid per år i en uppmot 250 m tjock högpermeabel akvifär (permeabilitet 800–3 000 mD) genom endast en brunn. Ett projekt med helt andra förutsättningar är In Salahprojektet i Algeriet. Där har lika mycket koldioxid injekterats som i Sleipnerprojektet men i en akvifär med betydligt lägre permeabilitet (mindre än 10 mD) och en tjocklek på endast 20 m. För att uppnå dessa kapaciteter behövs tre horisontella brunnar med över 1 km öppet intervall mot akvifären för varje brunn.

### Utformning av injekteringsbrunn

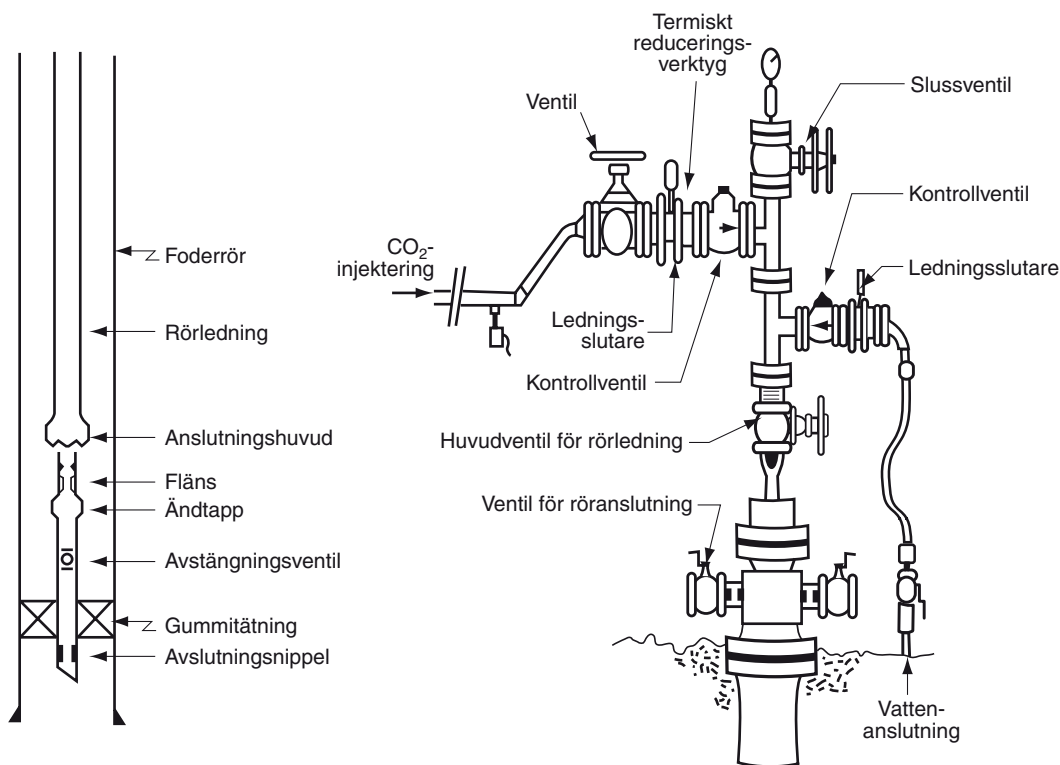
En brunn har ett teleskopformat utseende, med stor dimension vid markytan och successivt mindre dimension på djupet. På det aktuella akvifärdjupet är brunnen öppen via perforeringar av foderröret eller genom ett filterrör.

Om brunnen ska användas för injektering används ett tunnare injekteringsrör som går igenom en nedre tätning strax ovanför öppningen mot akvifären (fig. A12:1). I samma figur visas brunnshuvudet som sitter strax ovanför markytan och som ska ha åtminstone två ventiler, en för normal drift och en av säkerhetsskäl. En automatisk säkerhetsventil nere i brunnen rekommenderas för att säkerställa att koldioxid inte oavsiktligt strömmar tillbaka upp i injekteringssystemet.

Genom att mäta trycket i utrymmet mellan foderrör och injekteringsrör i brunnen upptäcks läckage i den nedre tätningen tidigt. Injekteringen måste i så fall omedelbart stoppas för att undvika att utrustningen ovan jord utsätts för höga tryck och för att förhindra att koldioxid läcker ut. Genom olika säkerhetsarrangemang, t.ex. säkerhetsventiler eller sprängbleck, kan trycket sänkas för att förhindra skador på utrustning ovan jord. För att undvika läckage och skador på brunnen är det nödvändigt med regelbundet underhåll och inspektion av koldioxidbrunnarna.

### Konvertering av befintliga brunnar för koldioxidinjektering

Om en befintlig, äldre brunn ska konverteras för injektering av koldioxid är det viktigt att kontrollera brunnens täthet, det vill säga att foderrör är intakta och okorroderade. Cementen mellan foderrör



Figur A12:1. Exempel på utformning av brunn och brunnshuvud för injektering av koldioxid (IPCC 2005).

och berg måste också ha tillräcklig kvalitet. Vid injektering används ett smalt rör och tätning enligt principen i figur A12:1 för att begränsa och kontrollera de höga trycken i samband med injektering av koldioxid. Tätningen och injekteringsröret ska vara trycktäta för att förhindra läckage till den foder-rörsklädda brunnen. Samtliga delar i brunnen ska naturligtvis vara dimensionerade för förväntade tryck, flöden och temperaturer.

I det fall koldioxid ska injekteras med fritt vatten krävs speciella åtgärder och användning av korrosionsbeständiga material i de delar som har kontakt med koldioxiden på grund av den korrosiva miljö som då uppstår. För begränsade perioder, som t.ex. vid tester, bedöms påverkan vara försumbar.

## Avveckling och förslutning av brunnar

Förr eller senare kommer injekterings- eller observationsbrunnar att behöva förslutas. Det är ett viktigt moment som ska utföras noggrant för att undvika framtida läckage av koldioxid eller salthaltigt formationsvatten. Injekteringsbrunnar, avstängda brunnar och övergivna brunnar utgör enligt branschen den största risken för koldioxidläckage.

Om koldioxid eller salthaltigt vatten tränger upp via brunnen mot markytan kan färskvatten förorenas. För att undvika detta har man i många länder speciella föreskrifter och bestämmelser för hur en brunn ska avvecklas och förslutas, något som inte finns i Sverige. Här tillämpas istället Miljöbalkens allmänna hänsynsregler. Bestämmelser för hur en brunn ska avvecklas och förslutas kräver ofta en plugg av cement eller annan typ av tätning i delar av eller i hela brunnen.

Förslutningsmetodiken som används för olje- och gasbrunnar samt för brunnar för deponering av sur gas bedöms kunna användas för koldioxidbrunnar. Det som är speciellt för koldioxidbrunnar är att materialen måste stå emot nedbrytning från koldioxid. Sedan tidigare finns cement som är motståndskraftigt mot koldioxid och har utvecklats för oljebranschen och för geotermiska anläggningar där höga halter av koldioxid kan förekomma.

Foderröret är en känslig del av brunnen som utsätts för korrosion av koldioxid och det kan mer eller mindre rosta bort. Ett alternativ för att minska läckagerisken i förslutna brunnar är att ta bort foderröret i höjd med takbergarten och sätta en cementplugg på den nivån. Pluggen gjuts direkt mot berget och förutsätter en god kontakt med takbergarten. Alternativa lösningar kan vara att skydda foderrören med korrosionsskydd eller att använda foderrör i kompositmaterial. Efter förslutning bör tätheten bekräftas med övervakning under en tid framöver.

## Metodik i samband med injektering och övervakning

Injektering av koldioxid i akvifären sker genom att injekteringstrycket i brunnen på akvifärnivå överstiger akvifärtrycket. Uttrycket som används för att beskriva det kallas injektivitet eller injektivitetsindex och är injekteringsflödet delat med tryckskillnaden mellan injekteringspunkten i brunnen och akvifären (enheten är t.ex.  $\text{m}^3/\text{h}/\text{bar}$ ).

Vid jämförelse mellan injektering av koldioxid och formationsvatten bör injektivitetsindex för koldioxid vara högre på grund av en lägre viskositet, det vill säga vara lättare att trycka in i akvifären. Det har visat sig att så inte alltid är fallet. Till exempel har man i EHR-projekt (*Enhanced Hydrocarbon Recovery*) visat att man får olika förhållanden beroende på hur flödet sker rent geometriskt i akvifären eller beroende på den befintliga oljans flödesegenskaper. Frågan är i dagsläget inte helt utredd, därför får injektiviteten bedömas utifrån lokala förutsättningar.

Injekteringstrycket till akvifären måste, som tidigare nämnts, vara högre än trycket i akvifären för att koldioxid ska tränga ut i den vattenfyllda, porösa formationen. Det får dock inte vara så högt att formationen spricker upp (*hydrofracturing*). Som underlag för att kunna bedöma maximalt injekteringstryck behövs information avseende bergspänningar och portryck på aktuellt djup.

Det finns ett flertal olika uppgifter om vilka trycknivåer vid injektering som tillämpas i olika länder. För att anpassa ett säkert injekteringstryck till akvifären nämns ett acceptabelt tryck till 1 km djup på 1,35 gånger det hydrostatiska trycket och ökande till 2,4 bar för djup på 1–5 km. Enligt föreskrifterna i USA får injekteringstrycket aldrig uppgå till nivåer som spräcker formationen. Genom praktiska försök i USA har det framkommit att trycknivåerna för att spräcka en formation ligger på 11–21 kPa/m.

För att minimera de säkerhetsmässiga och miljömässiga konsekvenserna vid läckage av koldioxid i samband med injektering måste anpassade åtgärdsplaner vara framtagna. Utbildning och träning av berörd personal är en viktig del i säkerhetsförberedelserna. Omhändertagande av utläckande koldioxid kan visa sig vara svårt, men om lagersystemet innehåller mer än en injekteringsbrunn kan den utläckande koldioxiden injekteras i en annan brunn.

## BILAGA 13. LAGRING AV KOLDIOXID GENOM MINERALISERING

### Industriell mineralisering av koldioxid

Koldioxid kan omvandlas till stabila karbonatmineral i industriella processer eller in situ, det vill säga genom injektering i geologiska formationer där rätt förutsättningar finns för mineralbildning, se t.ex. Oelkers m.fl. (2008).

Industriella processer har föreslagits där koldioxid får reagera med metaller. Med få undantag är då metallerna i form av tvåvärda katjoner, vanligen  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  och  $\text{Fe}^{2+}$ . Den vanligaste katjonkällan i sammanhanget är något silikatmineral. Reaktionerna kan vara av typen:



eller



Sådana reaktioner har observerats både i naturen och i laboratorier. Industriella processer av denna typ, vilka endera kan ske torrt med utgångsmineralet i mald finkornig form eller vått vid en process med insatsmineralet i suspension, har föreslagits och testats i laboratorieskala. Fördelarna med en industriell metodik är att processen kan byggas upp i närheten av koldioxidkällan, den kan kontrolleras, råvaran (som även kan vara i form av någon avfallsprodukt) är lätt tillgänglig och slutprodukten, om den inte deponeras, kan ibland användas som industriell råvara. Många utmaningar återstår dock innan processen kan komma till användning i större skala. En beräkning rapporterad av Gerdemann m.fl. (2007) anger att för att neutralisera koldioxidutsläppen från ett koleldat kraftverk med storleken 1 GW behövdes 55 000 ton bergmaterial per år. Är bergmaterialet orent och innehåller mineral som inte deltar i neutraliseringsreaktionen behövs ytterligare mängder bergmaterial. I tabell A13:1 ges några exempel på råvarumineral som kan användas för en industriell mineraliseringsprocess.

Som exempel kan anges att skulle hela utsläppet från ett fossileldat kraftverk med utsläpp av 2 miljoner ton koldioxid per år omhändertas med industriell mineralisering av t.ex. forsterit skulle det medföra en årlig produktion av 1,3 miljoner kubikmeter magnesit. Det motsvarar en kub som är drygt  $100 \times 100 \times 100$  m stor och det medför givetvis stora logistiska svårigheter att hantera sådana volymer.

En annan svårighet är att komma till rätta med energikostnaden. Energi går åt till brytning, malning, transport etc. och inte minst till den värme som behövs för att uppnå tillräcklig reaktionshastighet. Energikostnaden kan bli betydande trots själva neutraliseringsprocessens fördelaktiga termodynamik.

### In situ-mineralisering

Många av de svårigheter som uppkommer i samband med en industriell process kan undvikas genom ett in situ-förfarande enligt samma kemiska principer som i den industriella processen, det vill säga man låter koldioxiden mineraliseras i befintlig berggrund. På senare tid har ett antal publikationer och pilotprojekt (t.ex. *Carbfix program*, Oelkers m.fl. 2008) framförts vilka redovisar att där även finns

Tabell A13:1. Några potentiella råvarumineral som kan vara tänkbara för industriell mineralisering av koldioxid (information hämtad från Oelkers m.fl. 2008).

| Råvara          | Kemisk formel                                   | Antal ton som behövs för att mineralisera 1 ton koldioxid |
|-----------------|-------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| Wollastonit     | $\text{CaSiO}_3$                                | 9,68                                                      |
| Forsterit       | $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$                       | 5,86                                                      |
| Serpentin       | $\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ | 7,69                                                      |
| Anortit         | $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$            | 23,1                                                      |
| Basaltiskt glas | $(\text{Na,K,Fe,Mg,Ca,Al})\text{SiO}_4$         | 8,8                                                       |

en stor potential i mineralisering (karbonatisering) av koldioxid som injekteras i porösa basalter och ultramafiska bergarter (O'Connor m.fl. 2003). Den teoretiska lagringskapaciteten i enbart Columbia-basalterna i USA uppskattas till mer än 100 miljarder ton koldioxid (McGrail m.fl. 2006).

Koldioxiden injekteras vid in situ-mineralisering i porösa bergarter där den får reagera med bergarten på plats. Kritiskt i detta fall är val och förekomst av lämpligt berg. Berget måste innehålla tillräcklig mängd lätt utlösbara metallkationer samt ha tillräckligt hög permeabilitet och porositet för att inrymma injekterad koldioxid och de bildade karbonatmineralen. Mest lovande är basalter eller ultramafiska bergarter. Utmaningen här är inte den generella tillgången på basiska bergarter utan kravet på tillräcklig lokal volym, djup och porositet i berget, tillgång till vatten för reaktionen samt tätande takbergart, då karbonatbildningsprocessen är långsam och läckage måste undvikas under tiden som processen pågår.

I dagsläget kvarstår ännu mycket forskning och teknikutveckling för att kunna lösa de problemställningar som finns med mineralisering och lagring i basalter och ultramafiska bergarter. Det kan mycket väl bli ett attraktivt alternativ till lagring i framtiden.

### Möjligheter till lagring i svenskt kristallint berg

I det svenska urberget finns unga paleozoiska och mesozoiska basalter i Västergötland och i Skåne. Dessa har inte speciellt stor utbredning och ligger för ytligt för att vara intressanta.

Utmed Västerbottenkusten mellan Bureå och Vindeln påträffas ett stråk med ultramafiter i en 20–30 km bred zon med en sträckning på ca 100 km, som ofta benämns Nickellinjen. Vid Rörmyrberget har man borrarat till ca 400 m djup i dessa ultramafiska bergarter. Djupare ner är utbredningen okänd. Syftet har varit malmprospektering varför bergartens fysikaliska egenskaper för bedömning av in situ-mineralisering av koldioxid inte undersökts.

I Tärnabyfjällen har nyligen ett större område med ultramafit med mineraliseringar av nickel påträffats. Ultrabasiter finns även i en fyndighet som LKAB gjort i Keukiskero i Norrbottens län.

En preliminär bedömning är att dessa förekomster inte är tillräckligt genomsläppliga för att vara lämpliga för koldioxidlagring. Samtidigt har de en stor malmpotential. Det krävs fördjupade studier av angivna förekomster för att utreda deras eventuella potential. Förekomster med wollastonit som råvara för industriell mineralisering finns bl.a. i en fyndighet vid Banmossen mellan Uppsala och Sala. Wollastonit finns även i en fyndighet i Tjåmotis i Jokkmokks kommun.

### Referenser

- Gerdemann, S.J., O'Connor, W.K., Dahlin, D.C., Panner, L.R. & Rush, H., 2007: Ex situ aqueous mineral carbonation. *Environmental Science & Technology* 41.
- McGrail, B.P., Schaef, H.T., Ho, A.M., Chien, Y.J., Dooley, J.J. & Davidson, C.L., 2006: Potential for carbon dioxide sequestration in flood basalts. *Journal of Geophysical Research* 111, 1–13.
- O'Connor, W.K., Rush, G.E. & Dahlin, D.C., 2003: Laboratory studies on the carbonation potential of basalt; applications to geological sequestration of CO<sub>2</sub> in the Columbia River Basalt Group. *AAPG Annual Meeting Expanded Abstracts* 12, 129.
- Oelkers, E.H., Gislason, S.R. & Matter, J., 2008: Mineral carbonation of CO<sub>2</sub>. *Elements* 4, 333–337.



## **BILAGA 14. EXEMPEL PÅ PROCESS FRÅN PLANERING TILL LAGRING**

I följande beskrivning ges ett exempel på en process från planering till drift av ett lager. Innehållet i denna principiella process varierar naturligtvis från fall till fall beroende på vilken basinformation som finns för den aktuella platsen. Vilken sorts information som ska tas fram och vad man bör tänka på kommer att behandlas i de handledningsdokument som tas fram av EU-kommissionen. Exemplet får därför ses som en principiell beskrivning av ett förlopp från planering till lagring.

Omfattningen på de olika delmomenten är beroende av de platsspecifika geologiska och geohydrologiska förhållandena. Till exempel innebär en komplex geologisk uppbyggnad mer detaljerade och omfattande undersökningar. I figur A14:1 ges en sammanfattande flödesbeskrivning av de olika stegen i detta exempel.

Nedan ges en sammanfattande beskrivning av de olika stegen i en process. Det bör poängteras att det i samband med borrhning och fältundersökningar kan komma att krävas arbetsmoment med framtagning av underlag för prövning enligt gällande miljölagstiftning eller kontinentalsockellagen. En proposition rörande geologisk koldioxidlagring och implementering av EU-direktivet om geologisk lagring av koldioxid i svensk lagstiftning väntas under våren 2011. I denna presenteras de förslag till förändringar av lagtexten (främst miljöbalken och kontinentalsockellagen) som rör koldioxidlagring.

### **1. Insamling av befintliga geologisk information och data**

Data från seismiska undersökningar, borrhning, m.m. från aktiviteter såsom kolväteprospektering, geotermiprojekt eller andra undersökningar samlas ihop för utvärdering. Underlaget från brunnar kan förväntas bestå av borrhparametrar, litologisk beskrivning, kärnprover, borrhkax, geofysiska loggar, formationstester samt kemisk analys av formationsvatten.

### **2. Tolkning och värdering av olika lagringsakvifärer och takbergarter**

Strukturell bedömning av förekomsten av sluten akvifär, gränsvillkor m.m. I steg två görs en första ansats till konsekvensanalys.

### **3. Konceptuell geologisk och fysikalisk modell**

I steg tre skapas en modell innefattande minst följande parametrar: djup till topp av akvifär, akvifärens tjocklek och fysikaliska parametrar, strukturernas laterala och vertikala utbredning samt geokemiska förhållanden.

### **4. Utvärdering – beslutssteg 1, om fortsatta undersökningar eller avbrott**

Om grundläggande förutsättningar saknas, dvs. om djup, utbredning, tjocklek, porositet eller permeabilitet är otillräckligt, eller om takbergart saknas eller inte är tillräckligt tät så avbryts undersökningarna. Visar underlagsdata på fortsatt goda egenskaper tas beslut om fortsatta undersökningar.

### **5. Kompletterande datainsamling, fältundersökningar, steg 1**

Genomförande av 2D-seismiska undersökningar för komplettering av befintliga data.

### **6. Seismiska data**

Nya rådata från genomförda fältundersökningar (punkt 5) bearbetas.

### **7. Tolkning och utvärdering av kompletterande data**

Alternativ processering som exempelvis seismisk inversion kan utnyttjas för framhävande av porositet.

## **8. Uppdatering av geologisk modell**

Det är av stor vikt att beskriva utbredning av potentiella akvifärer och takberg, potentiella förkastningar, sprickzoner och andra läckagepunkter. I detta skede görs även en geometrisk volymbedömning.

## **9. Utvärdering – beslutssteg 2, om fortsatta undersökningar eller avbrott**

Bedömning av lagringspotential (volym) och säkerhet (täthet) sker i steg 9. Vid fortsatt bedömt goda förutsättningar är nästa steg genomförande av borrhning och tester av akvifär och takbergart.

## **10. Fältundersökningar, steg 2**

Borrhning och tester samt 3D-seismiska undersökningar genomförs. Utöver konventionella tester eftersträvas kärnprovtagning av såväl akvifär som takberg. Tester för bestämning av akvifärdata, takbergets täthet samt geokemiska analyser genomförs.

## **11. Borrhåls-, analys-, parameter- och 3D-seismikdata**

Nya rådata från genomförda fältundersökningar (se punkt 10) bearbetas.

## **12. Tolkning, utvärdering, simulering och riskanalys**

Beräkning av akvifärvolym för lagrad koldioxid och injekteringskapacitet görs. Geokemiska bedömningar av tätheten i takberget, lämpliga avtappningspunkter, spridning av koldioxid och potentiella läckage utförs.

## **13. Lagringskapacitet, geohydrologisk modell, risker**

I steg 13 presenteras beräkningar, kapacitet, hydrogeologiska förhållanden, påverkansområde, riskbedömningar och förslag till övervakningsprogram samt förslag till design av lagringskomplexet (injekterings- och kontrollbrunnar m.m.). Lagringskomplexet är lokaliserat och geometriskt avgränsat.

## **14. Utvärdering – beslutssteg 3, om projektering eller avbrott**

När det tredje beslutet fattas ska det inte finnas några osäkerheter kring berggrundens lämplighet för lagring. Det ska gå att injektera koldioxid i akvifären, takbergarten är tät, det finns inga risker, det är en hydrogeologiskt homogen och avgränsad akvifär och påverkansområde etc.

## **15. Eventuellt kompletterande undersökning eller utredning**

Genomförande av platsspecifika undersökningar i samband med borrhning av injektionsbrunnar och kontrollbrunnar genomförs efter att det tredje beslutet har fattats.

## **16. Projektering**

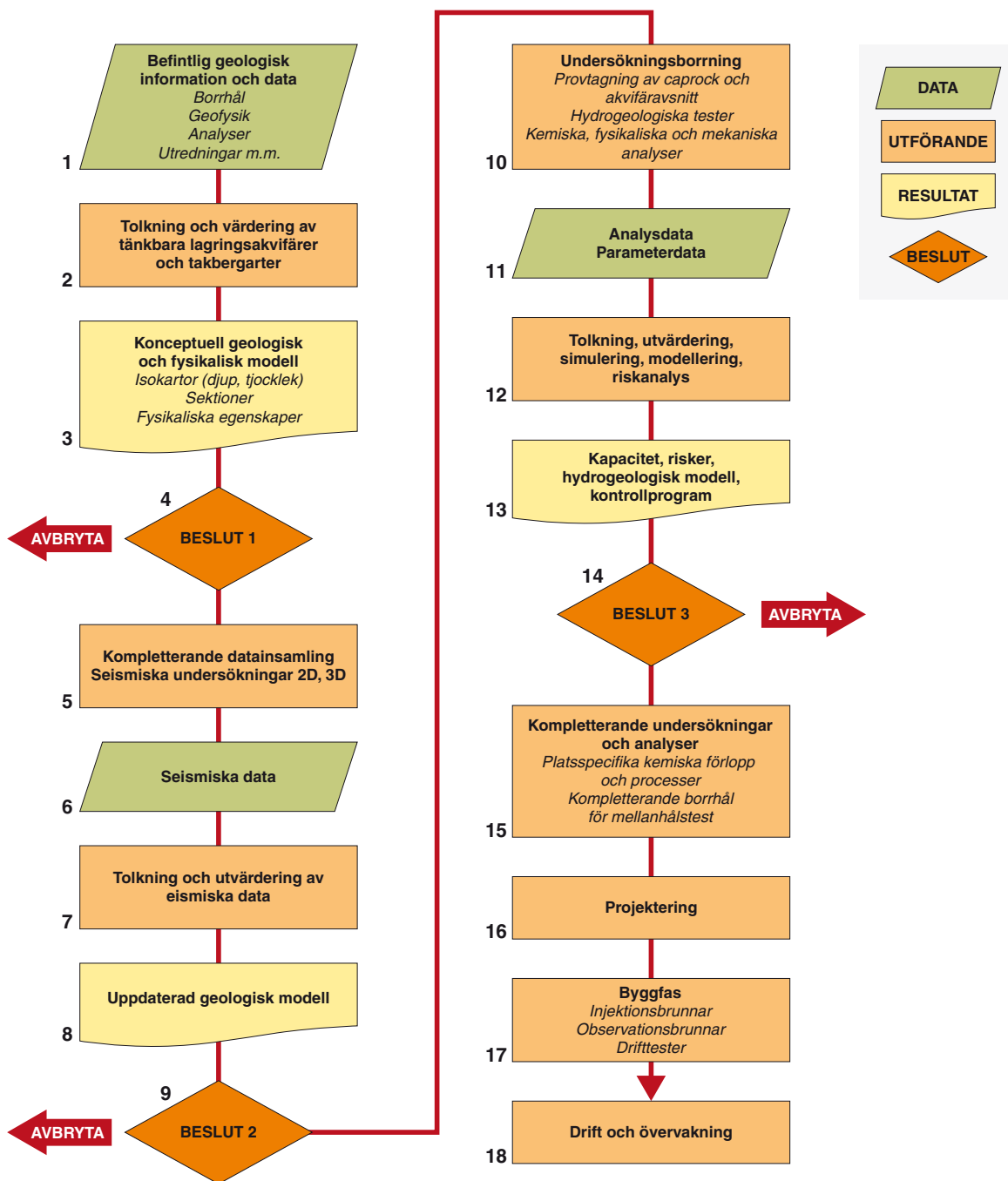
Miljö- och tillståndsprövning sker i steg 16. Design av brunnar, kontrollbrunnar, övervakningsutrustning, logistik och transportlösningar görs också.

## **17. Bygghfas för lager**

Borrhning samt konstruktion av infrastruktur kring lagringsplatsen sker i steg 17.

## **18. Drift med övervakning**

Driftfasen bedöms till 40–50 år. Under denna tid krävs omfattande övervakning. Beslut om omfattningen av övervakningen av lagret därefter sker sedan i samråd med nationella myndigheter. Insatserna bedöms efter slutförd injektering avta successivt med tiden. Hur lång tid övervakning ska ske beror på platsspecifika förhållanden, men kan röra sig om mer än 100 år.



Figur A14:1. Exempel på undersökningsprocess.





Geological Survey of Sweden  
Box 670  
SE-751 28 Uppsala  
Phone: +46 18 17 90 00  
Fax: +46 18 17 92 10  
[www.sgu.se](http://www.sgu.se)

Uppsala 2011  
ISSN 0349-2176  
ISBN 978-91-7403-098-3  
Tryck: Elanders Sverige AB