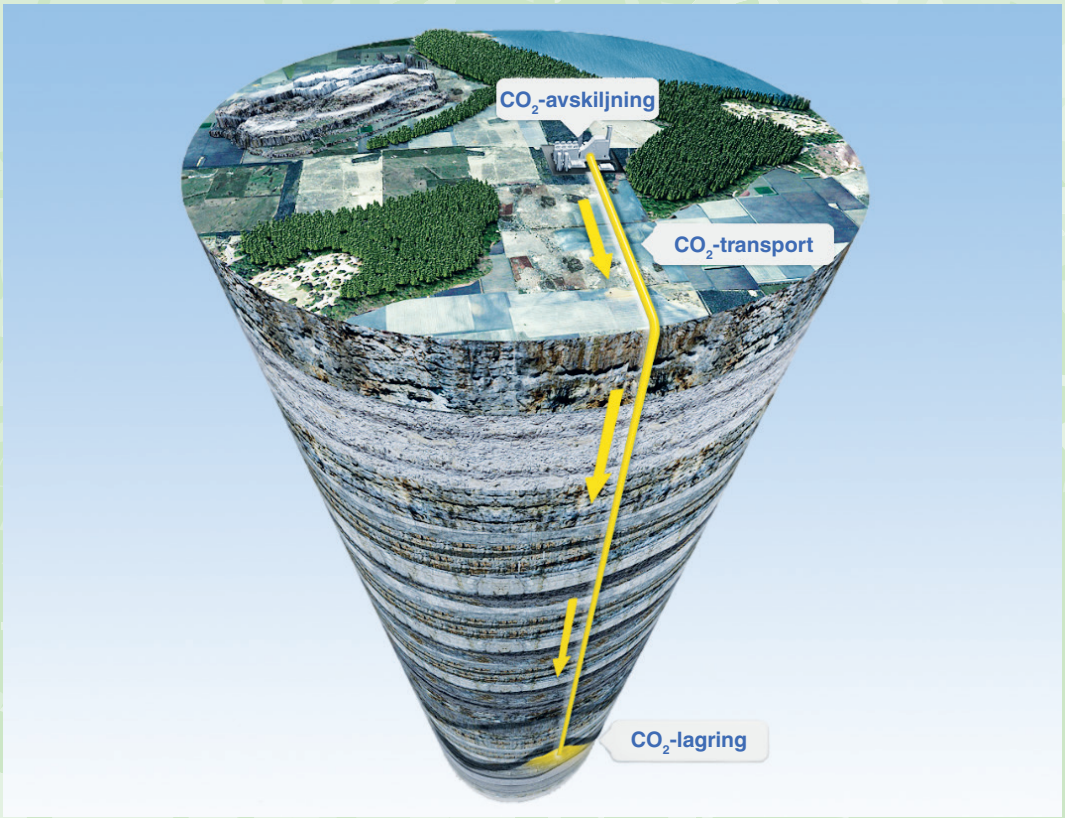
Rapporter och meddelanden 142

Geologisk lagring av koldioxid i Sverige

– Lägesbeskrivning avseende förutsättningar, lagstiftning och forskning samt olje- och gasverksamhet i Östersjöregionen

Gry Møl Mortensen, Mikael Erlström,
Sara Nordström & Johan Nyberg



SGU
Sveriges geologiska undersökning
Geological Survey of Sweden

Rapporter och meddelanden 142

Geologisk lagring av koldioxid i Sverige

– Lägesbeskrivning avseende förutsättningar, lagstiftning och forskning samt olje- och gasverksamhet i Östersjöregionen

Gry Møl Mortensen, Mikael Erlström, Sara Nordström & Johan Nyberg

Sveriges geologiska undersökning
2017

ISSN 0349-2176
ISBN 978-91-7403-399-1

Ändringar genomförda 20 oktober 2017
Ett antal språkliga fel har åtgärdats.

Omslagsbild: CCS-processen. Infångning och avskiljning av koldioxid vid utsläppsanläggning, transport till injekteringsplattform samt injektering och lagring djupt i berggrunden. Bild: the Global CCS Institute.

Granskad av: Peter Dahlqvist
Ansvarig enhetschef: Mugdim Islamovic
Projektnamn: RU – Kunskapsunderlag om geologisk lagring av koldioxid, kod 27040

Layout: Johan Sporrong, SGU 2017
Tryck: Elanders Sverige AB

FÖRORD

Regeringen har i sitt regleringsbrev för budgetåret 2017 uppdragit SGU att med beaktande av sitt ansvar enligt förordningen (2014:21) om geologisk lagring av koldioxid samt miljötillsynsförordningen (2011:13) avrapportera det aktuella kunskapsläget rörande geologisk lagring av koldioxid:

”SGU ska med beaktande av sitt ansvar enligt förordningen (2014:21) om geologisk lagring av koldioxid samt miljötillsynsförordningen (2011:13) och med utgångspunkt från SGUs publikation ”Rapporter och Meddelanden 131” uppdatera och avrapportera det aktuella kunskapsläget rörande geologisk lagring av koldioxid i motsvarande rapporteringsform. Rapporteringen ska vidare innehålla en redovisning av olje- och gasförekomster i närheten av och med förbindelse till potentiella områden för geologisk lagring av koldioxid, samt andra länders planer på prospektering och utvinning av olja och gas i anslutning till svensk kontinentalsockel, i form av beviljade och utnyttjade tillstånd. Uppdraget ska redovisas till Regeringskansliet (Näringsdepartementet) senast den 30 september 2017.”

Geologisk lagring av koldioxid utgör den sista delen av processen CCS (eng. *Carbon Capture and Storage*) där koldioxid infångas och avskiljs vartefter den transporteras till en injekteringsplattform där den injekteras och lagras i den djupt liggande berggrunden. Ett antal storskaliga projekt för geologisk lagring av koldioxid pågår globalt och fler projekt är på gång i form av, planerade och operativa, pilot- och demonstrationsanläggningar. CCS är en av många åtgärder som anses kunna bidra till klimatmålen och därmed minska utsläppen av växthusgaser till atmosfären i syfte att hålla oss under en två-graders temperaturhöjning.

Denna rapport redovisar kunskapen om de geologiska förutsättningarna för att lagra koldioxid i Sverige och ska även kunna bidra till det geovetenskapliga beslutsunderlaget för myndigheter och andra aktörer i samband med aktiviteter rörande geologisk lagring av koldioxid i Sverige. I rapporten redogörs för olika tekniker för geologisk lagring av koldioxid. I Sverige är lagring i djupa akviferer lämpligast och avser en teknik som är väl känd och prövad, bl.a. i vårt grannland Norge. Ett antal bedömningar som gjorts i Sverige indikerar att två områden i södra Sverige har bäst potential för geologisk lagring av koldioxid: sydöstra Östersjön och sydvästra Skåne med omgivande havsområde. I dessa områden finns sedimentära bergarter med grundläggande förutsättningar för geologisk lagring av koldioxid, inklusive förseglande takbergarter. Rapporten innehåller också en uppskattning av lagringsbehovet av koldioxid. Sammantaget överstiger möjligheterna till lagring det prognostiserade framtida behovet.

Äldre dataunderlag i form av seismik och borrhålsinformation finns för båda områdena, och möjligheter finns för förbättrade analyser och tolkningar. Innan implementering av geologisk lagring av koldioxid kan ske i Sverige behövs kompletterande data och undersökningar för de utpekade lagringsenheterna med tillhörande takbergarter. Samverkan och samarbete med länderna i Östersjöområdet kan ytterligare bidra till en fullständig förståelse för de geologiska lagrens utbredning och förutsättningar i detta område.

Rapporten har utarbetats av en projektgrupp bestående av Gry Møl Mortensen, Mikael Erlström, Sara Nordström och Johan Nyberg.

Uppsala, september 2017

Lena Söderberg
Generaldirektör

INNEHÅLL

Förord ... **3**

INTRODUKTION ... **7**
CCS-kedjan ... 8
Svenska koldioxidkällor och utsläppsdata ... 12
Pågående koldioxidlagringsprojekt ... 20

CCS-DIREKTIVET OCH SVENSK LAGSTIFTNING ... **26**
Undersökningar för bedömning av lagringsplatser ... 26
Förordningen om geologisk lagring av koldioxid ... 28
Prövningssystemet ... 28
Avskiljning och dumpning ... 30
Tillsyn ... 31
Internationella överenskommelser ... 31
Klimatmålen ... 32

KOLDIOXIDLAGRING I DJUPA AKVIFERER ... **33**
Definition av en akvifer ... 33
Akviferens fysikaliska och kemiska egenskaper ... 35
Koldioxidens egenskaper i djupa akviferer ... 37
Bindning av koldioxid i akviferen ... 39

FÖRUTSÄTTNINGAR FÖR LAGRING AV KOLDIOXID I DJUPA AKVIFERER ... **40**
Karaktärisering av en lagringsplats – geologiska krav och förutsättningar ... 40
Spridning av koldioxid i lagret ... 44
Bedömningsmodeller för lagringskapacitet ... 46
Säkerhet och övervakning ... 49

LAGRINGSMÖJLIGHETER I SVERIGE ... **54**
Geologiskt underlagsmaterial ... 56
Lagringsmöjligheter i sydöstra Östersjön ... 64
Lagringsmöjligheter i sydvästra Skåne ... 79
Lagringsmöjligheter i Kattegatt ... 88
Sammanställning ... 90

CCS-SITUATIONEN INOM ÖSTERSJÖREGIONEN ... **92**
CCS-status, projekt, samarbeten ... 92
CCS i Skagerrak–Kattegattregionen ... 94
Olje- och gasförekomster i närheten av och med förbindelse till potentiella områden för koldioxidlagring i Sverige ... 96
Prospektering och utvinning av olja och gas i anslutning till svensk kontinentalsockel ... 104

DISKUSSION OCH KOMMENTARER ... **110**

REFERENSER ... **112**

Bilaga 1. Länkar till projekt som nämns rapporten ... **118**

INTRODUKTION

En miljömässigt säker geologisk lagring av koldioxid anses vara ett nyckelbidrag för att nå uppsatta klimatmål. Sverige har antagit egna klimatmål (bl.a. att Sverige senast 2045 inte ska ha några nettoutsläpp av växthusgaser till atmosfären) men har även genom internationella överenskommelser förbundit sig att minska utsläppen av växthusgaser.

Detta ställer höga krav på utsläppande industri att på olika sätt minska sina nettoutsläpp samt i vissa fall att även att planera för avskiljning, transport och lagring av koldioxid. Den geologiska lagringen av koldioxid är en insats som kan ge effekt på lång sikt och som innebär långsiktiga investeringar. Åtgärder för att minska utsläppen på kortare sikt är mycket viktiga och svensk industri har en viktig roll i detta arbete.

SGUs roll är dels ansvar för beredning inför tillstånd samt tillsyn av anläggningar för geologisk lagring av koldioxid dels som producent av översiktliga geologiska underlag för prospektering och undersökning. Denna rapport beskriver kunskapsläget vad avser de geologiska möjligheterna för lagring av koldioxid i Sverige.

Under de senaste decennierna har internationella forskningsprojekt bidragit till en ökad kunskap kring tekniken att fånga och lagra koldioxid i berggrunden, så kallad CCS-teknik (eng. *Carbon Capture and Storage*). Idag har EU-finansierade forskningsprojekt byggt upp en kunskapsbas kring hur man karaktäriseraroch beräknar lagringskapaciteter, bedömer risker och övervakar ett koldioxidlager. EU sammanfattade år 2009 i CCS-direktivet hur karaktärisering, tillstånd, tillsyn och övervakning av ett lager bör utföras inom EUs medlemsstater. I direktivet angavs även att lagring företrädesvis ska ske i djupliggande akviferer. Många länder, däribland Sverige, har nu implementerat direktivet i den nationella lagstiftningen, med bl.a. innebörden att SGU fått ansvaret att hantera tillstånd och tillsyn avseende geologisk lagring av koldioxid i Sverige. Ett flertal länder inklusive Sverige har i lagstiftningen också uttalat att lagring endast får ske inom marint område, undantaget forskningsanläggningar där maximalt 100 000 ton CO_2 kan lagras eller användas för tester i landbaserade pilotanläggningar.

SGU har under det senaste decenniet medverkat till och följt utvecklingen på CCS området genom medverkan i de EU finansierade projekten Mustang och NORDICCS samt det europeiska nätverket CO2GeoNet. Främst har syftet varit att utreda förutsättningarna kring lagring i den svenska berggrunden, att bygga upp kunskap om hur man karaktäriserar berggrundens lämplighet och bedömer lagringskapaciteten samt följer utvecklingen i andra länder. SGU presenterade 2011 en rapport (Erlström m.fl. 2011) som övergipande tog upp CCS-tekniken och kunskapsläget om lagringsmöjligheterna i vår berggrund och i våra grannländer. Sedan dess har det från bl.a. ovan nämnda projekt framkommit ny kunskap och data kring lagringsmöjligheterna i Sverige, främst i södra Östersjön och bedömningar av lagringskapaciteten här. Dessutom har en övergripande nordisk atlas tagits fram inom NORDICCS-projektet som visar lagringsmöjligheterna för Norge, Island, Danmark och Sverige. Idag finns även ny kunskap om vilken metodik som är lämpligast att använda vid karaktärisering och modellering av lagringskapaciteten. Under de senaste åren har antalet internationella pilot- och demonstrationsprojekt blivit fler, vilket ytterligare bidrar till ökad kunskap om CCS-tekniken idag jämfört med läget 2011 då den första SGU-rapporten presenterades.

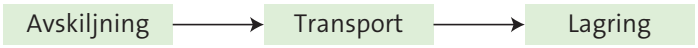
Rapporten från 2011 har hittills fyllt sitt syfte, men med bakgrund till utvecklingen de senaste åren har det successivt framkommit ett behov av en uppdatering och aktualisering av innehållet. Den här uppdaterade rapporten bygger till stora delar på rapporten från 2011 men med fokus på de svenska förutsättningarna för koldioxidlagring och hur tillstånds- och tillsynsprocessen ser ut för undersökningar och genomförande av ett potentiellt lager på svenskt område. Vissa avsnitt i den gamla rapporten, som bl.a. berör lagringsmöjligheterna i våra grannländer är kraftigt nedkortade. Däremot har ett avsnitt som berör olje- och gasverksamheten i Östersjön tillkommit då denna kan ha bäring på lagring av koldioxid i samma reservoarer.

Rapporten syftar till att sammanfatta och ge en översikt över hittills framtagna resultat från projekt som har bäring på koldioxidlagringsmöjligheter i Sverige och vad som sker internationellt inom

området. Rapporten är inte tänkt att ge en fullständig redovisning av forskningsresultat. Istället ska det redovisade materialet ses som en introduktion och guide till var ytterligare och mer detaljerad information finns att hämta för den som vill fördjupa sig inom specifika delar.

CCS-kedjan

CCS-processen består av tre steg: infångning och avskiljning av koldioxid vid industri- eller förbränningsprocessen, transport till lagringsplatsen och lagring.



Avskiljning

Avskiljning eller infångning av koldioxiden är den mest kostnadskrävande delen. Vissa bedömningar indikerar att denna del av CCS-kedjan kan uppgå till 75 procent av den totala kostnaden (Gode & Hovsenius 2005, NORDICCS 2016). Teknikerna för infångning och avskiljning av koldioxid brukar delas in i följande processer:

- Avskiljning före förbränning (eng. *pre-combustion*). Detta 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 av koldioxid ur rökgaser (eng. *post-combustion*). Detta sker efter förbränningen med någon form av absorptionsteknik, t.ex. aminer eller ammoniak.
- Syrgasförbränning (eng. *oxyfuel*). Denna metod baseras på förbränning i ren syrgasmiljö varvid rökgaserna huvudsakligen kommer att bestå av koldioxid.

Ytterligare tekniker är under utveckling sedan många år både i Sverige och internationellt, bl.a. metoder för effektivisering av infångning av biogena koldioxidutsläpp, ex. förbränning från biobränsleanläggningar.

Transport

När koldioxiden avskiljts ska den transporteras till en lagringplats. Transporten sker i vätskeform för att minska transportvolymen. Detta betyder att transportsystemen måste tåla höga tryck (över 73,9 bar). Transport av koldioxid med fartyg och via rörledningar är de huvudsakliga lösningar som diskuteras. Tekniska system och lösningar finns redan men behöver utvecklas med hänsyn till den storskalighet som kommer att krävas. Transportsystemen kommer sannolikt att utvecklas från enstaka rörledningar till komplexa regionala system med sammankoppling av flera avskiljnings- och lagringsplatser både på land och till havs. Man kan jämföra med de sammanlänkade rörledningssystem som finns för naturgasfälten i Nordsjön. Storskaliga transportsystem kommer sannolikt även att kombinera fartygstransport och rörledningssystem. Innan dessa system utvecklats kan fartygstransport med befintlig och beprövad teknologi vara ett alternativ. Tekniken till havs behöver dock utvecklas ytterligare kring hur man effektivast och säkrast överför koldioxiden från fartyget till injekteringsanläggningen i lagringsakviferen (NORDICCS 2016). Jämfört med transport i rörledningar kräver fartygstransporter mer logistik för lastning och lossning vilket bl.a. kräver någon typ av landbaserade mellanlager (cisterner). Transport av koldioxid i rörledningar ställer i sin tur stora kvalitetskrav på materialkvaliteten i de rör som används eftersom koldioxiden med vatten kan bilda en korrosiv syra. Även halten svavel, syre,

kväve och kolväten måste begränsas för att undvika bildning av korrosiva föreningar. Resultat från NORDICCS (2016) visar att fartygstransport av koldioxid jämfört med transport i rörledningar är mest kostnadseffektivt inom Norden. Detta gäller både för transport från enstaka avskiljningsplatser och för större system med kluster av koldioxidkällor, och beror på kombinationen av att det inom Norden rör sig om måttliga mängder koldioxid och långa transportavstånd.

Vid anläggning av rörsystem kommer det att ställas krav på laglig prövning, sannolikt liknande det som idag gäller för rörledningar för transport av råolja eller annan vätska eller gas på land eller till havs. Internationell samverkan är avgörande för att kunna utveckla säkra och kostnadseffektiva transportsystem.

Lagring

Geologisk lagring av koldioxid kan ske på olika sätt. Lagring kommer företrädesvis ske i så kallade djupt liggande porösa akviferer, mestadels sandstensberggrund med salt formationsvatten eller lagring i samband med injektering av koldioxid i slutfasen av utvinning av olja och gas i äldre fält (eng. *Enhanced Hydrocarbon Recovery*, EHR). Dessa två lagringsmetoder är de som anses ha den största potentialen idag, bl.a. utpekas de som mest lämpliga i EU-direktivet om CCS. I rapporten kommer därför de delar som specifikt berör lagring att fokusera på lagring i djupa akviferer (se avsnittet *Koldioxidlagring i djupa akviferer*, s. 33).

I Sverige finns möjligheter till lagring i djupt liggande, saltvattenförande geologiska formationer (djupa akviferer) medan EHR inte är aktuellt för svensk del eftersom oljeutvinningen här har varit av mycket liten omfattning. Från EHR finns internationell mångårig praktisk erfarenhet från olje- och gasindustrin där tekniken möjliggjort ett ökat utbyte av olja och gas från reservoarerna. När det gäller lagring i djupa akviferer kan praktiska erfarenheter dras från Sleipner- och Snøhvitfälten utanför norska kusten där koldioxid har lagrats sedan 1996 respektive 2008, i samband med naturgasutvinning. Exempel på olika lagringsmetoder i sedimentär berggrund illustreras i figur 1.

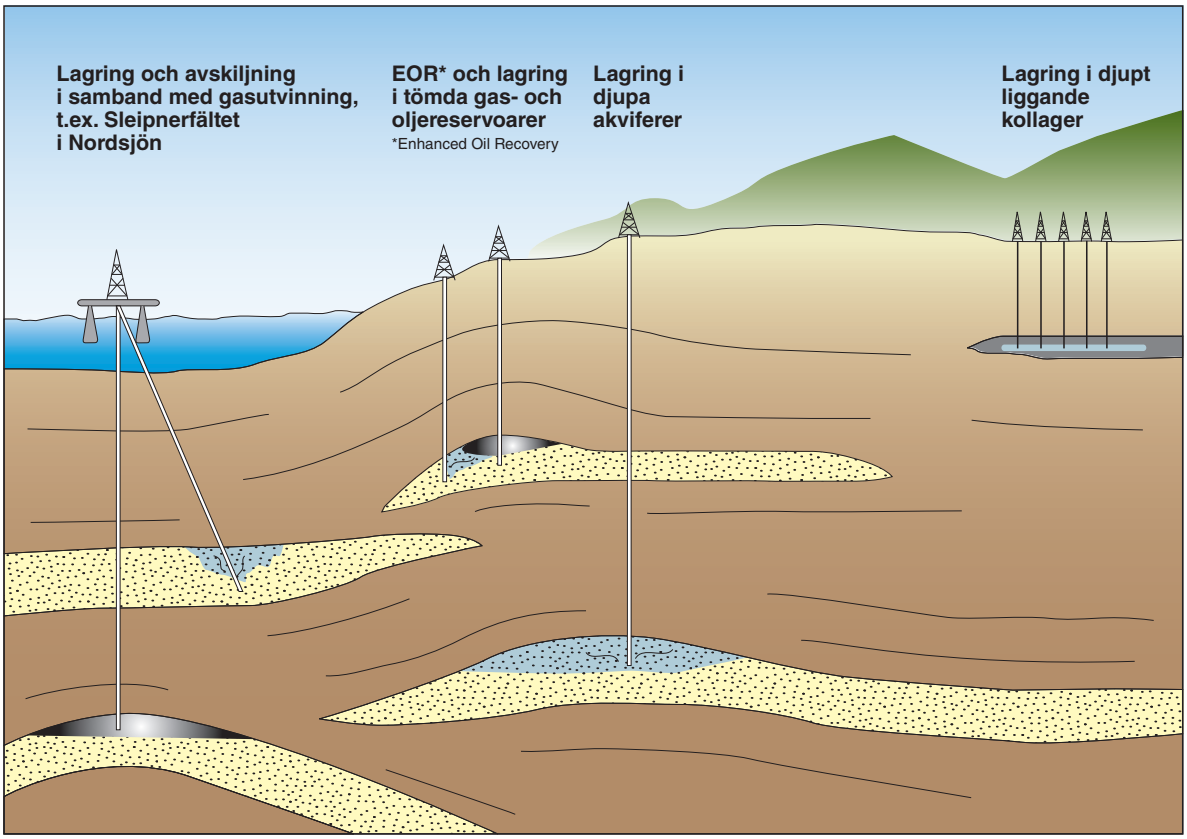
Andra lagringsmetoder som diskuterats är att t.ex. låta koldioxiden reagera med basiska bergarter eller mineral för att bilda stabila, fasta och lagringsbara mineralfaser. Även lagring i djupliggande icke brytvärda kolförekomster och organiska skiffrar är andra tänkbara alternativ. Nedan ges en kort sammanfattning av dessa metoder.

FAKTARUTA

EOR (eng. *Enhanced Oil Recovery*) och EGR (eng. Enhanced Gas Recovery) är en teknik där koldioxid injekteras i slutfasen av olje- och gasutvinning i syftet att kunna utvinna mer kolväten, och resultatet blir då att koldioxiden lagras permanent i de tömda olje- och gasreservoarerna.

ECBM (eng. *Enhanced Coalbed Methane Recovery*) är en teknik som motsvarar EOR och EGR, där man injekterar koldioxid i djupt liggande kollager med syfte att utvinna metan och sedan permanent lagra koldioxiden.

EHR (eng. *Enhanced Hyrdrocarbon Recovery*) är en gemensam beteckning för EOR, EGR och ECBM.



Figur 1. Olika lagringsmöjligheter i sedimentär berggrund (modifierad från Erlström m.fl. 2011).

Lagringstekniker med mineralisering av koldioxid

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

När koldioxid reagerar med berggrund som innehåller mineral med tvåvärda katjoner, vanligen Ca^{2+}, Mg^{2+} och Fe^{2+} sker en omvandling där koldioxiden bildar karbonatmineral. Reaktionerna kan till exempel vara av typerna:

$$Mg_2SiO_4 \text{ (forsterit)} + 2CO_2 = 2MgCO_3 \text{ (magnesit)} + SiO_2 \text{ (kvarts)}$$

$$CaAl_2Si_2O_8 \text{ (Anortit)} + CO_2 + 2H_2O = CaCO_3 \text{ (Kalcit)} + Al_2Si_2O5(OH)_4 \text{ (kaolinit)}$$

Denna typ av omvandling och bindning av koldioxid kan skapas genom industriella mineraliseringsprocesser men kräver stora volymer bergmaterial. 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. Problemen med industriell mineralisering är främst hanteringen av de stora bergvolymer som krävs för att det ska fungera. Skulle t.ex. hela utsläppet från ett fossileldat kraftverk med utsläpp av två miljoner ton koldioxid per år omhändertas med industriell mineralisering av t.ex. med 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, en volym som medför stora logistiska svårigheter. En annan svårighet är att komma till rätta med energikostnaden. Energi går åt

till brytning, malning, transport etc. och inte minst till värme som behövs för att uppnå tillräcklig reaktionshastighet, och energikostnaden kan bli betydande.

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. 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 lämplig berggrund. Bergarten måste innehålla tillräcklig mängd lätt utlösbara metallkatjoner samt ha tillräckligt hög permeabilitet och porositet för att rymma injekterad koldioxid och de bildade karbonatmineralen. Mest lovande är basalter eller ultramafiska bergarter. Utmaningen här är inte tillgången på basiska bergarter utan kravet på tillräcklig 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.

På senare tid har ett antal publikationer och pilotprojekt presenterats och genomförts (Oelkers m.fl. 2008) vilka visar på en stor potential i mineralisering (karbonatisering) av koldioxid som injekteras i porösa basalter och ultramafiska bergarter (O'Connor m.fl. 2003). I Carbfix-projektet i Island har man vid experiment visat resultat där koldioxiden mineraliserat mycket snabbare än beräknat. Lagringspotentialen har här beräknats till mellan 21 miljarder ton och 400 miljarder ton koldioxid beroende på använd beräkningsmetod (NORDICCS 2016). Den teoretiska lagringskapaciteten i Columbiabasalterna i USA uppskattas till mer än 100 miljarder ton koldioxid (McGrail m.fl. 2006). 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.

Lagring (bindning) av koldioxid i djupt liggande kollager (ECBM)

Djupt liggande kollager som inte är möjliga att exploatera med gruvdrift har bedömts ha en betydande potential för lagring av koldioxid i samband med utvinning av metangas. Tekniken omnämns ofta med förkortningen ECBM (eng. *Enhanced Coalbed Methane*). Metodiken bygger på att man injekterar koldioxid i ett kollager vilket resulterar i en sänkning av partialtrycket för metan som då avgår. Injekterad koldioxid tar metanmolekylernas plats och binds till det organiska materialet. Det internationella samarbetande forskningsprogrammet IEAGHG R&D (*International Energy Agency Greenhouse Gas Research & Development*) som grundar sig i Internationella energirådets (IEA eng. *International Energy Agency*) arbete redovisar i deras rapport från 2013 (IEAGHG 2013) att de bedömer lagringspotentialen till 480 miljarder ton CO_2 i samband med utvinning av metan. Det råder fortfarande stor osäkerhet kring de geologiska, ekonomiska och politiska möjligheterna att genomföra lagring i djupa kollager. Kunskap om metodiken kommer främst från försök i Alberta i USA och mindre försök i Canada, Polen och Japan. Erfarenheter från dessa försök visar, trots en del misslyckanden, att det finns en potential som med rätt teknik kan bli kommersiellt intressanta för lagring av koldioxid i framtiden. Störst lagringspotential för CO2-ECBM finns i Kina, Indonesien, Ryssland, USA och Canada (Godec m. fl. 2014).

Kostnader

Beräkningar av kostnaden för hela CCS-kedjan varierar stort mellan olika utredningar som ett resultat av många platsspecifika parametrar som påverkar beräkningarna samt olika antaganden beträffande teknikförutsättningar, teknikutveckling, mängden koldioxid, transportavstånd m.m. Analyser för genomförbarhet inom projektet NORDICCS delar upp den totala kostnaden mellan avskiljning, transport och lagring (NORDICCS 2016):

- Avskiljning är som tidigare nämnt den mest kostsamma delen och varierar mellan 55 och 90 euro per ton koldioxid främst beroende på volymen (större volym, mindre kostnad).

- Transportkostnaden varierar mellan 12 och 20 euro per ton koldioxid och är beroende av både volymen koldioxid och transportavståndet. Transport med fartyg är den mest kostnadseffektiva transportformen för flertalet av de systemberäkningar som gjorts, särskilt för längre transportavstånd.
- Kostnaderna för lagring i djupa akviferer är mycket beroende av platsspecifika förutsättningar, men bedöms ligga mellan 7 och 20 euro per ton koldioxid.

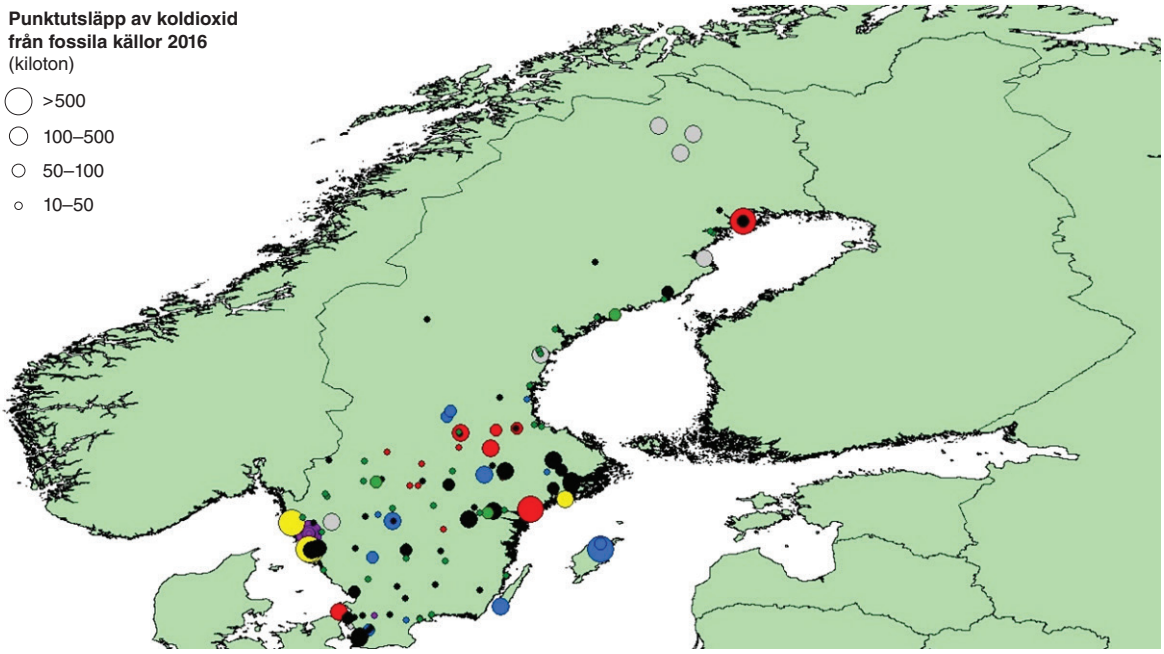
Svenska koldioxidkällor och utsläppsdata

Inom Norden härrör de större punktutsläppen av koldioxid från kraftvärmeverk, massa- och pappersproduktion, cementindustrin, olje- och gasraffinaderier samt järn- och stålproduktion. I NORDICCS (2016) beräknades Nordens samlade koldioxidutsläpp för 2011 till nästan 153 miljoner ton koldioxid. Beräkningarna gjordes utifrån anläggningar med årliga utsläpp på mer än 100 000 ton koldioxid.

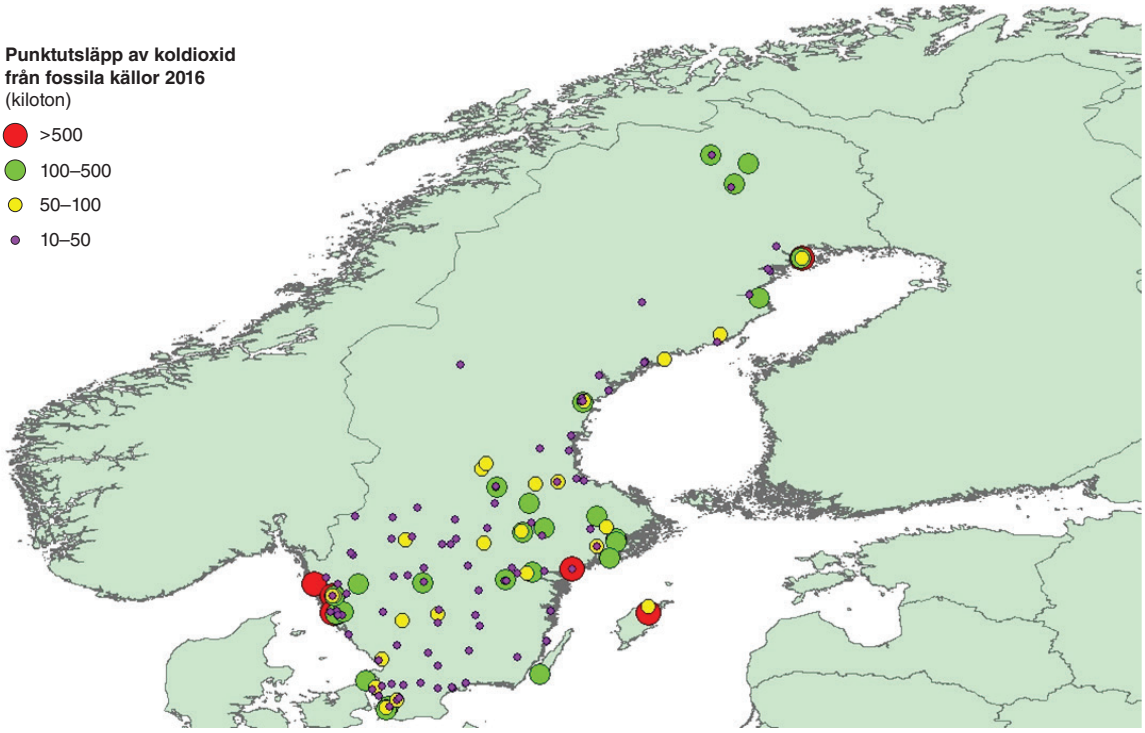
Utsläppen från de olika branscherna fördelar sig något annorlunda i Sverige jämfört med Norden som helhet. I Sverige kommer de största utsläppen från massa- och pappersindustrin, kraft- och energisektorerna samt järn- och stålindustrin, se figur 2. Dessa sektorers utsläpp genereras till största delen av biobränslen, som inte omfattas av kravet på utsläppsrätter, då biobränslen har utsläppsfaktorn noll och räknas som klimatneutrala.

Det totala utsläppet från fossila källor inom industrin i Sverige uppgick 2016 till 19,7 miljoner ton koldioxid (Naturvårdverket 2017). I figur 3 visas de största utsläppskällorna i Sverige med punktutsläpp på mer än 10 000 ton koldioxid.

Som det framgår av kartorna (fig. 2 och 3) ligger merparten av de stora utsläppspunkterna eller kluster av utsläppspunkter i Sverige långt från möjliga lagringsplatser, det vill säga sydvästra Skåne och sydöstra Östersjön.



Figur 2. Svenska punktutsläpp över 10 000 ton koldioxid från fossila källor 2016 uppdelat efter de största branscherna. Gröna prickar representerar massa- och pappersindustrin, röda är stål och järn, gula är raffinaderier, blåa mineral/cement, lila kemi, svarta el och värme och övriga är grå (Naturvårdsverket 2017. Data bearbetat av Jan Kjærstad, Energi och Miljö, Chalmers).



Figur 3. Svenska punktutsläpp över 10 000 ton koldioxid från fossila källor 2016. Röda prickar representerar punktutsläpp på 500 000 ton eller mer, gröna 100 000–500 000 ton, gula 50 000–100 000 ton och lila 10 000–50 000 ton. (Naturvårdsverket 2017. Data bearbetat av Jan Kjærstad, Energi och Miljö, Chalmers)

Pågående och avslutade CCS-projekt i Europa och globalt

Ett stort antal internationella projekt, forskningsstudier och nätverk som arbetar med frågor som rör CCS pågår eller har avslutats under senare år. SGU har medverkat och medverkar i ett antal av dessa. Flera av projekten har varit delar av EUs övergripande program för forskning och utveckling (eng. *Framework Programmes for Research and Technological Development,* FP). För länkar till projektens webbplatser, se bilaga 1.

ENeRG (1993–pågående)

ENeRG står för *European Network for Research in Geo-Energy* och är ett informellt nätverk för europeiska organisationer involverade i forskning och teknikutveckling med fokus på fossila energikällor, särskilt olja och gas. Under åren har fokusområdena breddats inom energiområdet och omfattar nu även olika metoder för att minska klimatpåverkan; geotermi, koldioxidlagring, energilagring m.m.

SACS (1998–2002)

SACS (*Saline Aquifer CO_2 Storage*) var ett projekt som startade 1998 och använder Utsiraformationens akvifer i Nordsjön för storskalig demonstration samt studier av migration, omvandling och kvarhållning av koldioxid i djupa akviferer. Projektet innefattar bl.a. kartläggning av akviferen, geokemiska undersökningar, formationsvattnets flöde, samt effekten av koldioxid i samband med salt formationsvatten. Injektering av koldioxid via Sleipnerplattformen och studier av seismiska parametrar är en del av projektet. Målet är kunskapsuppbyggnad och rådgivning 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 övervakning.

GESTCO (1999–2003)

GESTCO (*Geological Storage of CO_2 from Fossil Fuel Combustion*) skulle 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 har använts för strategiska bedömningar av CCS-kapaciteten på europeisk nivå. Projektet, som var treårigt, koordinerades av GEUS med deltagande från andra geologiska undersökningar, energi- och oljebolag samt myndigheter. SGU medverkade inte i detta projekt. Total kostnad var 3,8 miljoner euro varav 1,9 miljoner kom från EU (FP5).

CASTOR (2003–2006)

CASTOR (*CO_2 from Capture to Storage*) var ett forsknings- och demonstrationsprojekt med målsättningen att studera hela processen från avskiljning till lagring. Målet var att genom teknikförbättringar visa på möjligheten att avskilja och lagra 30 procent av den koldioxid som släpps ut från de större europeiska utsläppskällorna. Huvuddelen av projektet omfattade teknikutveckling och studier av framtida teknik för avskiljning. Projektet omfattade 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 dessutom en utökning av de lagringspotentialstudier som gjordes i GESTCO-projektet avseende södra och östra Europa. Partners i projektet var forskningsinstitutioner, kraftbolag, olje- och gasindustri och tillverkningsindustrier för utrustning och teknik. Budgeten var på 15,8 miljoner euro varav 8,5 miljoner kom från EU (FP6) under en fyraårsperiod fram till 2009.

CO_2STORE (2003–2006)

CO_2STORE (*CO_2 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 till 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).

CO_2GeoNet (2004–pågående)

CO_2GeoNet är ett nätverk för utbyte av kunskap och spetskompetens inom området geologisk lagring av koldioxid. Projektet innefattar numera forskare från 26 forskningsinstitut från 19 europeiska länder. CO_2GeoNet koordinerades fram till 2008 av den brittiska geologiska undersökningen (BGS), och hade en total budget på 9,18 miljoner euro varav 6 miljoner kom från EU (FP6). Sedan 2008 blev CO_2GeoNet en icke vinstdriven organisation under fransk lag och har sedan dess fått finansiell stöd från EU FP7, CGS Europe-projektet.

ULCOS (2005–2006)

Svenska stål AB (SSAB) deltog i projektet ULCOS (*Ultra Low Carbon-dioxide Steelmaking*) tillsammans med ett fem till tiotal andra europeiska företag och 15 organisationer, bland annat Statoil, Norsk Hydro och norska SINTEF. ULCOSs mål var att reducera utsläppen från stålverken med 50 procent. Projektet studerade främst möjligheterna till att förbättra själva processerna vid stålverken.

EU GeoCapacity (2006–2008)

EU GeoCapacity, som avslutades 2008, var en EU-övergripande studie med sammanställning av information om utsläpp, infrastruktur, potentiella lagringsplatser samt ekonomiska utvärderingar. Utvärderingar och matchningar av utsläppskällor mot lagringsplatser genomfördes för ekonomisk optimering på europeisk nivå. Projektet som koordinerades av GEUS fokuserade också på att skapa nätverk och tekniköverföring mellan länder och aktörer (FP6).

CO_2SINK (2006–2010)

CO_2SINK (*In-situ R&D Laboratory for Geological Storage of CO_2)* 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_2SINK var inriktat på studier av lagringssäkerhet och stabilitet i en djup akvifer, med hjälp av geofysik och geokemi, numerisk modellering och strategier för riskbedömning. Projektet finansierades av industrin samt med 8,3 miljoner euro från EU (FP6). Koldioxidinjektering pågår sedan 2008.

CO2ReMoVe (2006–2011)

CO2ReMoVe var ett EU-projekt (FP6) utfört under ett konsortium med företrädare från industrin och forskningsinstitutioner, alla med erfarenheter inom geologisk lagring av koldioxid direkt från ett antal olika lagringsplatser. Projektet var inriktat på att skapa en vetenskapligt baserad referensram för övervakning och verifiering av koldioxidlagring i syfte att styrka den långsiktiga pålitligheten och säkerheten kring geologisk lagring av koldioxid. Ytterligare skulle projektet utveckla framgångssätt och metoder för politiker och verksamhetsutövare kring certifiering och standarder för lagringsplatser.

ECO_2 (2009–2011)

ECO_2 projektet resulterade i en vägledning för ledning och administration av havsbaserad koldioxidinjektering och lagring med användning som tillägg till EU-direktivet för geologisk lagring av koldioxid i marin miljö. Vägledningen inkluderade även kvantitativa bedömningar av påverkan på marina ekosystem kring injekteringsbrunnen och lagringsplatsen. Metoder och modeller utvecklades för hur övervakning av migration och läckage av koldioxiden kan göras. Fältstudier utfördes inom de pågående lagringsprojekten Sleipner och Snøhvit i Norge, samt i områden med naturligt läckage av koldioxid från berggrunden i Nordsjön och Medelhavet.

CCS – Kattegat/Skagerrak (2009–2011)

CCS – Kattegat/Skagerrak (även kallat Skagerrakprojektet) var ett norsk-svenskt samarbetsprojekt koordinerat av Chalmers tekniska högskola som pågick under två och ett halvt år med avslutning 2011. Partners var 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 undersökte två potentiella områden för koldioxidlagring: en öppen/halvöppen lutande akvifer med stor utbredning respektive strukturella fällor i anslutning till saltdomer. Projektet utredde förutsättningarna för en gemensam infrastruktur och lösningar för avskiljning, transport och lagring av koldioxid från stora utsläppskällor i regionen. Vidare studerade projektet ekonomiska och tekniska möjligheter för industrin att utnyttja en sådan infrastruktur. Projektet hade en samlad budget på 1,3 miljoner euro och finansierades av bl.a. EUs strukturfonder och regionala myndigheter i de deltagande länderna.

MUSTANG (2009–2013)

MUSTANG var ett fyraårigt EU-finansierat projekt inom sjunde ramprogrammet (FP7) koordinerat av Uppsala Universitet. Konsortiet omfattade 19 institutioner, däribland SGU. Projektet resulterade i att riktlinjer, metoder och verktyg utvecklades för karaktärisering av djupa akviferer för långtidslagring av koldioxid. Resultaten baseras på fältstudier och vetenskaplig dokumentation av kemiska och fysikaliska processer, effekter av anisotropa egenskaper, möjliga läckagevägar samt takbergarternas tätande egenskaper. MUSTANG-projektet omfattade bland annat insamling av information och karaktärisering av sex potentiella lagringplatser med olika geologiska förutsättningar, däribland Heletz i Israel där försök med injektering av koldioxid utfördes inom projektet TRUST (se projektbeskrivning nedan). En utförlig redogörelse av försöken i Heletz redovisas i Niemi m.fl. (2016a,b).

CGS Europé (2010–2013)

CGS Europé (*Pan-European Coordination Action on CO_2 Geological Storage*) var ett fortsättningsprojekt på CO_2GeoNet och startade den 1 november 2010. I projektet fanns expertis från 28 europeiska länder presenterade, bl.a. alla länder kring Östersjön, utom Ryssland. Även SGU medverkade i projektet. CGS Europé var ett kommunikationsprojekt med syfte att inrätta en gemensam plattform för kunskapsutbyte. Projektet hade en budget på drygt två miljoner euro och koordinerades av Frankrikes geologiska undersökning (BRGM).

CO_2Care (2011–2013)

Projektet CO_2Care fokuserade på hur stängning av en lagringsplats kan utföras samt hur man förbereder ansvarsöverföring i det vidare förloppet i ett lagringsprojekt. Projektet ska bl.a. assistera länder och intressenter i implementeringen av EU-direktivet. Projektet var finansierat av EU (FP7) och industrin och hade 23 partners från Europa, USA, Canada, Japan och Australien. Nio injekteringsplatser var knutna till projektet: Ketzin i Tyskland, Sleipner i Norge, K12-B i Nederländerna, Rousse i Frankrike, Montmiral i Frankrike, Frio i USA; Wallula i USA, Nagaoka i Japan och Otway i Australien.

SiteChar (2011–2013)

SiteChar var ett karaktäriseringsprojekt med syftet att förbättra och utveckla den standardiserade karaktärisering av en lagringsplats inför ett lagringsprojekt. Projektet fokuserade även på identifiering av potentiella lagringskomplex lämpliga för implementering av koldioxidlagring inom en nära framtid.

ULTimateCO_2 (2011–2015)

ULTimateCO_2 syftade till att förstå långtidseffekterna av geologiskt lagrad koldioxid. Programmet inkluderade detaljerade laboratorie- och fältstudier samt modellering av fysikaliska och kemiska processer och påverkan på omgivande miljö. Fokus var att undersöka infångningsmekanismer i reservoaren,

vätskors egenskaper och effekter på uppspruckna takbergarter och förkastningssystem samt läckage i samband med mekaniska och kemiska skador i och i närheten av injekteringsbrunnar.

BIGCCS (2010–2016)

BIGCCS var ett CCS-forskningscenter med visionen att möjliggöra hållbar energi från fossila bränslen baserad på kostnadseffektiv CCS. Målet skulle nås genom internationellt expertsamarbete för påskyndande av utvecklingen mot storskalig CCS samt spridning av kunskap om tekniken. Ett överordnat mål var att skapa innovation genom hela CCS-kedjan.

NORDICCS (2011–2015)

Det nordiska kompetenscentret för CCS, NORDICCS, genomfördes under det nordiska ToppForskningsInitiativet (TFI). Projektet finansierades till merparten (75 procent) av Nordisk Innovation under Nordiska ministerrådet. NORDICCS samlade budget var 49 miljoner norska kronor under en fyrårig projektperiod och involverade några av de största nordiska forskningsinstitutionerna samt företrädare från industrin. Syftet för NORDICCS var att påskynda implementeringen av CCS i de nordiska länderna genom att skapa ett nätverk av experter med integration mellan FoU och industri. NORDICCS ägnade sig åt hela CCS-kedjan, där arbetsgruppen WP6 (*Work Package 6*), som SGU medverkade i, hade sin fokus på geologisk lagring av koldioxid. Huvudprodukten från WP6 var den nordiska lagringsatlasen, se figur 4, som finns publikt tillgängligt som web-GIS via Danmarks och Grönlands geologiska undersöknings (GEUS) webbplats, se bilaga 1.

SwedSTORECO2 (2012–2013)

SwedSTORECO2 var ett av Energimyndigheten finansierat koldioxidprojekt. I projektet deltog Uppsala Universitet, SGU, Luleå Tekniska Universitet och Lunds Universitet. SwedSTORECO2 hade som övergripande målsättning att genomföra forskning och metodutveckling kring djupförvar

Figur 4. Exempel på kartlager från den nordiska lagringsatlasen. Informationen är tillgänglig på Danmarks och Grönlands geologiska undersöknings (GEUS) webbplats. Se bilaga 1 för länk till atlasen.

av koldioxid i svensk sedimentär berggrund. Syftet var att bygga upp nationell kompetens kring geologisk lagring av koldioxid avseende geologisk karaktärisering och bedömning av djupa akviferer och deras takbergarter. Med utgångspunkt från SwedSTORECO2 projektets resultat finns det förutsättningar att inom en förhållandevis kort tid, med hjälp av pilotförsök på södra Gotland, fastställa om det är möjligt att lagra koldioxid i de djupa kambriska sandstensakvifererna i södra Östersjön. Projektets inledande fas, som finansierats av Energimyndigheten, har omfattat utvärdering av existerande data och förslag på placering av undersökningsborrhål på södra Gotland, samt utformning av tillhörande testprogram. Ett seminarium hölls i Uppsala 2013 där resultaten från fas 1 presenterades. Efter att slutrapporten från fas 1 levererats har projektgruppen vid ett antal tillfällen under 2013–2016 lämnat in ansökningar angående finansiering av provborrning och tester på södra Gotland, dvs. fas 2 och 3 enligt det ursprungliga programmet. Något ytterligare finansiellt stöd har dock ännu inte beviljats.

BASTOR 2 (2012–2014)

BASTOR (*Baltic Storage of CO_2*) var ett initiativ från främst svensk och finsk industri som syftade till detaljerade studier och modellering av potentiella lagringsakviferer i Östersjön som identifierats. Fördjupade nytolkningar av seismikdata från både Sverige och andra Östersjöländer användes för att identifiera strukturer och djupa akviferer lämpliga för lagring. Det efterföljande BASTOR 2-projektet undersökte förutsättningar för transport och geologisk lagring av koldioxid i Östersjöregionen. Projektet var huvudsakligen finansierat av Energimyndigheten och *the Global CCS Institute* samt representanter från svensk industri. Projektet inriktades på de mellankambriska sandstensavsnitten i Östersjöområdet och inkluderade även motsvarande berggrundsavsnitt på den baltiska sidan.

CO_2StoP (2012–2014)

Projektet CO_2StoP var en fortsättning på projekten EU GeoCapacity, CASTOR och GESTCO. Målsättningen har varit bedömningar av den europeiska lagringskapaciteten och etablering av en europeisk databas med publikt tillgänglig data med koppling till CCS och potentiella lagringsplatser i Europa. Databasen inkluderar bl.a. ett analyssystem och en GIS-plattform som administreras av Joint Research Centre (JRC), Europakommissionen, som även är värd för databasen. Databasen inkluderar data från 27 medlemsländer, där Sverige inte ingår.

PANACEA (2012–2014)

Det övergripande målet för EUs FP7-projekt PANACEA (eng. *Predicting and monitoring the long term behavior of CO_2 injected in deep geological formations*) har varit att utveckla metoder och tekniker som gör det möjligt att överföra kunskap och resultat som baseras på pilotstudier till att även göra säkrare bedömningar av fullskalig lagring. I projektet har även ingått studier av analogier där koldioxid påträffas naturligt i djupa akviferer. Projektet med 12 deltagare, inkluderande bl.a. Uppsala universitet, har resulterat i 20-talet publikationer i internationella tidskrifter.

BASRECCS (2012–pågående)

BASRECCS är ett nätverk inom CCS som påbörjades som ett utskott till BASREC, *Baltic Sea Region Energy Cooperation*, med syfte att stärka samarbetet kring CCS inom Östersjöregionen. Projekt och möten finansierades fram till 2015 av BASREC och det nordiska ministerrådet i samarbete med det finska CCSP, *Carbon Capture and Storage Program*, och *The Global CCS Institute*. Det finns tre arbetsgrupper inom nätverket: lagring, transport och kommunikation. Fokusområdet för geologisk

lagring av koldioxid är de kambriska sandstenarna i Östersjöområdet. Partners i nätverket utgörs av både akademi och industri, där SGU medverkar i arbetsgruppen *Lagring*. BASRECCS har dock inte varit aktivt sedan 2015.

TRUST (2013–2017)

TRUST är ett femårigt projekt som syftar till att genomföra pilotförsök med injektering av CO_2. Heletz (Israel) och Hontomin (Spanien) är försöksplatserna där merparten av testerna genomförs. Injektering av koldioxid och tillhörande mätningar påbörjades hösten 2016 i Heletz. Målsättningen är att utföra tester med olika slags injekteringsmetodik, identifiera och karaktärisera förlopp och processer som är representativa för storskalig lagring, och utveckla, använda och implementera karaktäriseringsteknik för att i realtid kunna visualisera injekteringsförloppet och koldioxidens utbredning i lagringsakviferen. Vidare är syftet att förbättra hur man bedömer lagringskapaciteten och använder beräkningsmodeller, som bland annat hanterar osäkerheter samt termomekaniska och kemiska processer i olika skalor. Projektet har också till uppgift att beskriva frågor om allmän acceptans, samhällsdeltagande, kommunikation, spridning, ansvar samt att utarbeta mallar för beredning och tillämpning av injekteringsslicenser och kommunikation med tillsynsmyndigheter. TRUST är ett EU finansierat FP7-projekt koordinerat av *Environmental & Water Resources Engineering* (EWRE) i Israel. Uppsala Universitet medverkar som partner i ett konsortium på totalt 17 medlemmar.

EN STRATEGISK FORSKNINGS- OCH INNOVATIONSAGENDA (2014–2015)

Syftet med den strategiska innovationsagendan var en strategi för hur den svenska processindustrin ska kunna minska sina utsläpp och samtidigt bibehålla sin position på den internationella marknaden. Agendan hade som mål att beskriva utvecklingsvägar för industrins klimatarbete där alternativ till minskning av koldioxidutsläpp saknas. Agendan finansierades av Vinnova och Energimyndigheten och beskriver bakgrunden till CCS i Sverige och vad som krävs av olika aktörer för att CCS ska kunna bli verklighet i stor skala i Sverige före år 2050. Arbetet med agendan har skett med bidrag från både akademi och svensk processindustri och koordinerades av Energiforsk tillsammans med konsultföretaget panaware AB. Även SGU har medverkat till agendan. Resultaten publicerades i rapporten Processindustrin och nollvisionen, CCS – en nyckel till ambitiösa klimatmål (Elforsk 2015).

ESTMAP (2015–2016)

ESTMAP var ett EU-finansierat H2020 projekt som under 2015–16 koordinerades av Nederländernas geologiska undersökning (TNO) och Frankrikes geologiska undersökning (BRGM). Projektet har syftat till uppbyggnad av en EU-gemensam databas med information om möjliga lagringsplatser för energi. Databasen innehåller uppgifter om utbredning och kapacitet av befintliga och framtida energilagringsplatser i berggrunden inom Europa som kan bidra till att en strategisk planering för olika energisystem på lång sikt. Projektet har varit av översiktlig karaktär med information från de nationella geologiska undersökningarna. I databasen ingår främst data om berggrundsområden lämpliga för storskalig lagring av värme, vätgas, naturgas, koldioxid och tryckluft samt områden där pumpkraftverk kan anläggas. För svensk del har främst områden med djupa akviferer i Skåne och på Gotland identifierats som möjliga energilagringsområden. ESTMAP-projektet har enbart hanterat data kring energilagring på land vilket till stora delar utesluter havsbaserad koldioxidlagring. Av särskilt intresse från resultaten är dock att ESTMAP tydliggjort den konkurrens som finns i många länder och områden angående användningen av potentiella djupa lagringsakviferer.

STEM-CCS (2016–2020)

STEMM-CCS är ett multidisciplinärt projekt med akademin och industrin i syfte att utveckla metodik och verktyg för säker administration av havsbaserad CCS. Projektet ska undersöka kostnadseffektiva metoder för övervakning av koldioxidens påverkan på havsmiljö vid läckage från lagringsplatsen. Fältexperiment i den brittiska delen av Nordsjön kommer att kombineras med laborativt arbete och matematisk modellering. Projektet är finansierat genom H2020.

ENOS (2016–2020)

ENOS är ett H2020 projekt som ska underlätta en snabb fullskalig implementering av geologisk lagring av koldioxid för att tillmötesgå Europakommissionens mål om 80 procent utsläppsminskning av växthusgaser till år 2050. Projektet har fokus på koldioxidlagring på land med ökad flexibilitet och minskade kostnader för infrastruktur och övervakning. ENOS ska även undersöka förutsättningar för säkring av energiförsörjningen och lokal ekonomi samt jobbmöjligheter inom Europa i samband med lagring på land. ENOS ska i fält utveckla, testa och demonstrera säker och hållbar koldioxidlagring och därigenom öka förståelse och förtroendet för koldioxidlagring. Nya pilot- och demonstrationsprojekt ska skapas på olika potentiella lagringsplatser inom Europa och i samband med detta ska även lokala, sociala och ekonomiska aspekter tillgodoses. SGU medverkar i den såkallade *End-User Committee* med syfte för återkoppling på de i projektet föreslagna riktlinjer för framtida CCS-projekt samt vägledningsdokumenten för dessa.

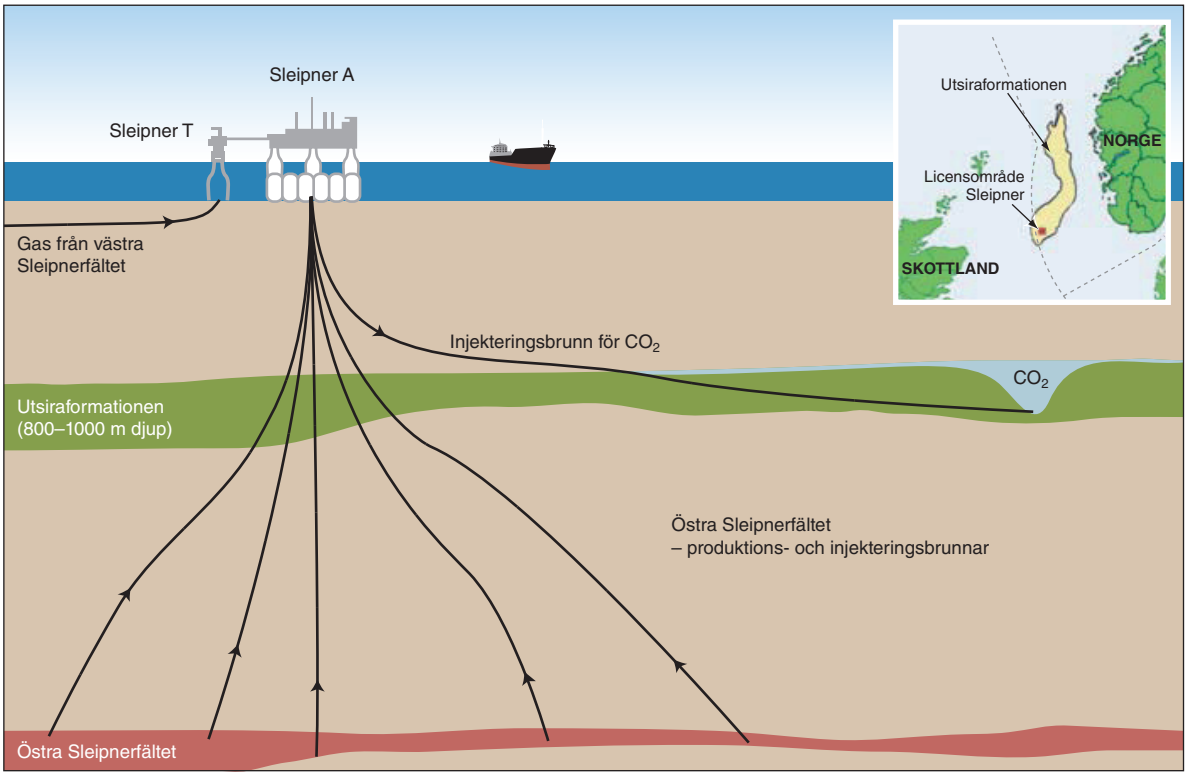
EERA (pågående)

EERA, *The European Energy Research Alliance*, är ett nätverk av mer än 170 europeiska forskningsinstitutioner och universitet och en del av *The European Strategic Energy Technology Plan* (SET-Plan). EERA arbetar aktivt kring 17 gemensamma forskningsprogram som bygger på nationella forskningsinitiativ. EERA samarbetar med industrin för att knyta samman forskning och innovation inom Europas energisektor.

Pågående koldioxidlagringsprojekt

Enligt en sammanställning från *the Global CCS Institute* (GCCSI) finns det i dag sammantaget 22 fullskaliga CCS-projekt runt om i världen som är operativa eller under uppbyggnad (fig. 5). Av dessa förväntas fem projekt bli operativa under 2017 och 2018. Den totala mängd koldioxid som beräknas kunna avskiljas från de 22 projekten uppgår till ca 40 Mt årligen. Ytterligare sju projekt är i sista definitionsfas och elva projekt i tidigare definitionsfaser och dessa har en sammanlagd avskiljningskapacitet runt 32 Mt koldioxid. Kring tre fjärdedelar av de operativa fullskaliga CCS-anläggningarna i världen kombinerar lagring av koldioxid med utvinning av olja och gas (EHR). Årligen injekteras och lagrats i storleksordningen 27,5 Mt koldioxid i samband med olje- och gasutvinning. När det gäller lagring i djupa akviferer uppgår den årliga samlade injekterade mängden koldioxid till ca 3,6 Mt. Därtill kommer lagring i samband med pilot- och demonstrationsanläggningar som i dagsläget globalt utgörs av 21 operativa anläggningar. Nedan exemplifieras några av de större CCS-projekten runt om i världen samt ett antal europeiska pilotprojekt. En kort sammanställning av några större lagringsanläggningar ges i tabell 1.

Figur 5. Översiktskarta över pågående och planerade fullskaliga CCS-projekt i världen identifierade av GCCSI (*the Global CCS Institute*, 2017).



Figur 6. Schematisk skiss av lagringsprojektet vid Sleipnerfältet (modifierad från Zweigel m.fl. 2004).

Sleipner (1996)

I norska Nordsjön pågår ett av de större CCS-projekten i en djup akvifer vid Sleipnerfältet där lagring av avskiljd koldioxid sker i samband med naturgasproduktion, se figur 6. Sleipner var det första CCS-demonstrationsprojektet i världen med injektering av koldioxid i en djup akvifer. Naturgasen i fältet innehåller relativt höga halter koldioxid (4–9 procent) och gasen behöver därför renas (uppgraderas) från koldioxid av såväl transportekonomiska som förbränningstekniska skäl. Utan avskiljning och injektering skulle stora mängder koldioxid ha släppts ut i atmosfären. Sedan 1996 och fram till juni 2016 har man avskiljt och återinjekterat ca 16,2 Mt koldioxid svarande till runt 0,9 Mt koldioxid/år. Lagring av koldioxid sker till havs i en 50–250 m mäktig akvifer på ca 800–1 000 m djup där temperaturen är ca 37 °C och formationstrycket 110 bar. Akviferen utgörs av en saltvattenförande sandstensformation (Utsiraformationen) med en mycket stor utbredning (400 × 70 km).

Snøhvit (2008)

Snøhvit omfattar tre gasfält i norska Barentshavet, Snøhvit, Albatross och Askeladd. Här har i samband med naturgasproduktion avskiljning och lagring av koldioxid pågått sedan 2008 på ett likartat sätt som i Sleipnerfältet. Det injekteras årligen runt 0,7 Mt koldioxid i djupa akviferer bestående av två sandstensformationer, Tubåenformationen på 2 560–2 670 m djup, och Støformationen på 2 430–2 470 m djup. Fram till 2016 har det totalt injekterats och lagrats ca 3 Mt koldioxid i Snøhvit. Den totala kapaciteten förväntas vara 15–20 Mt koldioxid under fältets livstid på ca 30 år.

Boundary Dam (2014)

CCS-projektet Boundary Dam är lokaliserat i södra Saskatchewan, Canada. Årligen avskiljs ca 1 Mt koldioxid från ett lignit-/kolkraftverk; avskiljd koldioxid injekteras i en oljeförande sandstensformation

på 1 500 m djup i samband med oljeproduktion. I nuläget medför den använda CCS-tekniken reduktion av koldioxidutsläppen från kraftverket med ca 90 procent. Hittills finns det för den oljeförande sandstensformationen (*Weiburn Oil Unit*) avtal om leverans av totalt 10 Mt koldioxid för injektering och lagring.

Quest (2015)

I Quest-projektet i Alberta, Canada, avskiljs koldioxiden i samband med väteproduktion vid uppgradering av tjärsand (eng. *tar sand*) till råolja. Uppgradering av tjärsand innebär utvinning av bitumen som uppgraderas till syntetisk råolja. Den avskiljda koldioxiden injekteras i en djup akvifer som utgörs av kambrisk sandsten på 2000 m djup. Sandstenen har en porositet på ca 17 procent och permeabilitet på ca 1000 mD. Den årliga mängd koldioxid som avskiljs och lagras i projektet uppgår till cirka en miljon ton. Totalt förväntas 5–7 procent av tillgängligt porutrymme i akviferen att användas av injekterad koldioxid efter 25 års injektering. Det bedöms att den avskiljda och lagrade koldioxiden minskar utsläppen från processen med ca en tredjedel.

Abu Dhabi (2016)

Abu Dhabi CCS-projektet verkar genom de Förenade Emiraters stålindustrier och är världens första CCS-projekt i samband med järn- och stålproduktion. Projektet lanserades i samband med åtgärder för ren energi i regionen och ingår i ett nätverk av projekt som involverar användning av avskiljd koldioxid (CCUS). Årligen infångas och avskiljas ca 0,8 Mt koldioxid som därefter injekteras i samband med oljeutvinning.

Illinois (2017)

Illinois' Industriella CCS-projekt är världens första storskaliga bioenergi CCS-projekt (BECCS) och pågår i samband med produktion av etanol. Under omvandlingsprocessen från majs till etanol avskiljs koldioxiden som sedan injekteras och lagras i en djup akvifer på 2 100 m djup. Akviferen är vid injekteringsbrunnen mer än 450 m mäktig. Årlig avskiljning och lagring av koldioxid uppgår till ca 1 Mt, och det aktuella tillståndet löper på fem år framåt i tiden.

Gorgon (2017)

Utanför Australiens västkust pågår Gorgon CO_2-injekteringsprojektet i dess sista fas innan full implementering förväntas ske i mitten av 2017. Projektet finns i samband med gasproduktion och kommer bli världens största med injektering av 3,4–4 Mt koldioxid årligen i en djup akvifer. Akviferen utgörs av en sandstensformation på 2 300 m djup. CO_2-injekteringsprojektet bedöms kunna minska de årliga koldioxidutsläppen från Gorgonfältet med ca 40 procent. I projektet bedöms mängden av de samlade växthusgaserna kunna minskas med mer än 100 Mt inom projekttiden.

Yanchang (2017–2018)

Delar av det integrerade demonstrationsprojektet Yanchang CCS i Kina blev operativt i slutet av mars 2017 och förväntas bli fullt operativt under 2018. Projektet är, trots landets många operativa pilot- och demonstrationsprojekt, det första storskaliga CCS-projektet i Kina. Runt 0,4 Mt koldioxid ska avskiljas årligen från kemiska anläggningar i Shaanxi-provinsen för injektering och lagring i samband med oljeutvinning på 1 500–2 200 m djup.

Det norska fullskaliga CCS-projektet

Norge har under senare år undersökt möjligheterna för ett fullskaligt CCS-projekt. Gassnova är projektkoordinator och har prospekterad den norska kontinentalshelfen för lämpliga lagringsplatser (Gassnova 2016). Man har kommit fram till att Smeaheia-platsen, 50 km från kusten vid Mongstad, uppfyller kraven för säker lagring under lång tid. Projektet väntas påbörjas under 2022 med injektering av ca 1,3 Mt koldioxid årligen. Projektet kommer bli det första CCS-projektet i Norge som påbörjats på basis av EUs CCS-direktiv.

Ketzin (2008)

Projektet i Ketzin är ett av de första CO_2-lagringsprojekten i världen. Projektet samordnas av det tyska forskningscentret för geovetenskaper (Deutsches GeoForschungsZentrum, GFZ) på uppdrag av ett antal nationella och regionala lagringsprojekt för att fördjupa kunskapen om lagring av koldioxid i djupa akviferer. Anläggningen ligger strax utanför Berlin i anslutning till en domformad struktur i berggrunden. Injektering av 67 kt koldioxid har genomförts i en triassisk sandstensformation på 630–650 m djup. Överlagrande takberggrund består av 165 m lersten. Pilotprojektet har genomförts i tre faser:

1. CO_2SINK (2004–2010). Syftet under inledande fasen var att undersöka vilka kemiska och fysikaliska processer som sker i lagringsakviferen samt att utveckla teknik och metodik för övervakning och numerisk modellering. Injektering av koldioxid påbörjades under 2008.
2. CO_2MAN (2010–2013). Primärt fokuserade den här fasen på övervakning av injekterad koldioxid och validering av modeller och kommunikation av resultaten. Ytterligare två observationsbrunnar borrades med syftet att med kärnor provta och undersöka sandstensavsnitt som varit i kontakt med injekterad koldioxid. Under 2011 injekterades ca 1500 ton koldioxid från avskiljningsanläggningen i Schwarze Pumpe (Anheden m.fl. 2011).
3. COMPLETE (2014–2017). Under den här pågående fasen är arbetet indelat i driftteknik och frågor kring nedläggning och avslutad injektering, övervakning och datahantering, modellering och simulering samt kunskapsöverföring till andra projekt. Övervakningen visar att inget läckage inträffat under projekttiden och att den injekterade koldioxiden följer förloppet som tidigare modellerats.

En övergripande beskrivning av pilotprojektet i Ketzin ges i Martens m.fl (2013). Från svensk sida har Uppsala Universitet varit engagerade i arbetet med seismisk övervakning av koldioxiden i lagringsakviferen (Ivandic m. fl. 2015).

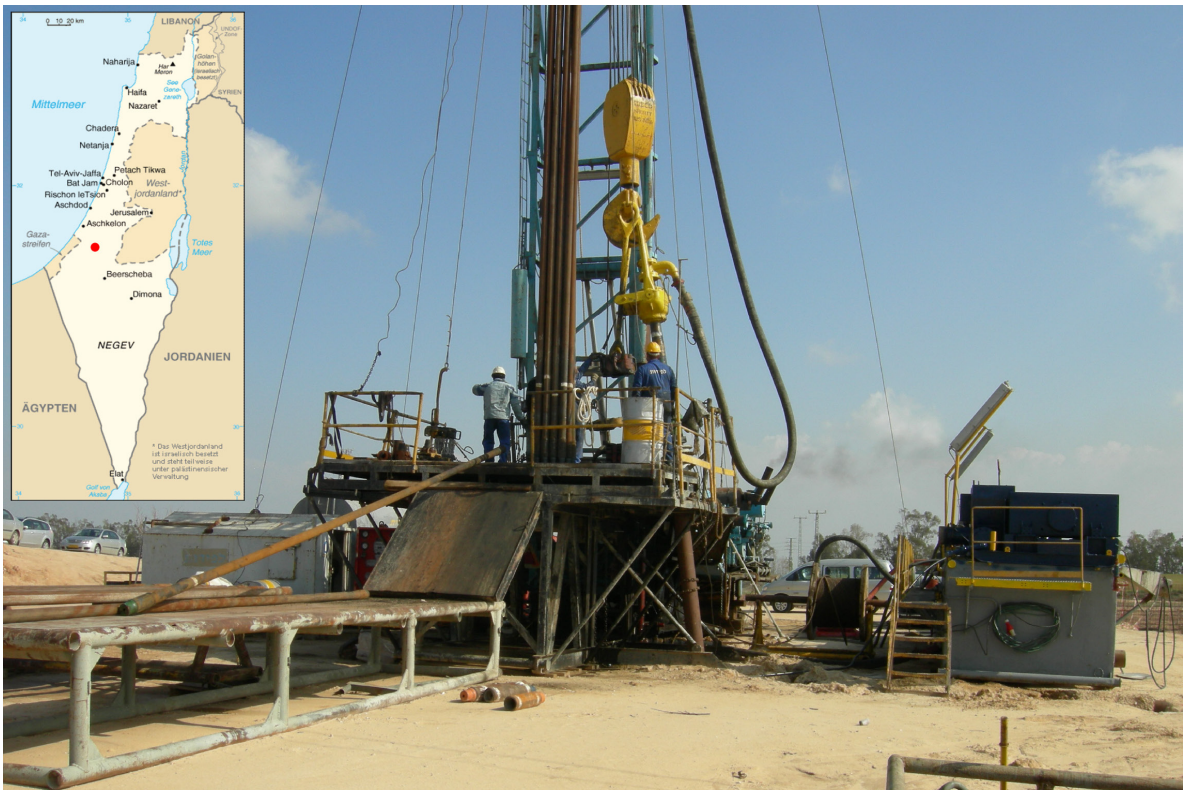
Hontomín (2009)

I Hontomín i nordvästra Spanien finns en anläggning (”*Technology Development Plant*”, TDP) för lagring av koldioxid. Anläggningen drivs av ”*Fundación Ciudad de la Energía*” (CIUDEN) och ingår som en del i ett större demonstrationsprojekt med avskiljning, transport och lagring (OXYCFB300-Compostilla projekt, ENDESA m. fl. 2013). Projektet inleddes 2009 och har på lagringssidan omfattat främst karaktärisering av berggrunden med undersökningsborrning och tester för att klarlägga strukturella, litologiska och hydrauliska egenskaper. Unikt för Hontomín är att testerna utförs i en kalkstensreservoar istället för i en sandstensreservoar. Den jurassiska kalkstensreservoaren ligger i en domformad struktur på 1450 m djup i berggrunden. Reservoaren överlagras av 200 m skiffer som utgör takberggrund. Hydrauliska tester visar på en lågpermeabel sprickakvifer. En redovisning av tester i de tre borrhålen som utförs ges i Ortiz m.fl. (2015). Hontomín ingår även som pilotanläggning i det pågående TRUST-projektet (se tidigare avsnitt). Compostilla-projektet är ett av få pilot-/demoprojekt

i Europa där hela kedjan från avskiljning, transport och lagring testas och som inte är knuten till olje- eller gasutvinning, ex. Sleipner-projektet.

Heletz (2016)

Heletz-platsen i södra delen av Israel är belägen inom ett olje- och gasfält som varit i produktion sedan 1950-talet. I området finns ett 90-tal borrhål varav merparten är belägna inom en antiklinal struktur i berggrunden. På varierande djup mellan 1 300 och 1 600 m finns en uppemot 20 m mäktig kretaceisk sandstensreservoar där olja ansamlats. Reservoaren överlagras av kalksten, skiffer och märgel som utgör takberggrunden. Merparten av oljan i reservoaren har utvunnits och endast ett fåtal brunnar är fortfarande i produktion. Eftersom det finns en god kännedom om de geologiska förhållandena och den strukturella fällan, tillgång till borrentreprenör och att fältförsöken i MUSTANG, se figur 7, och TRUST-projekten koordineras av vetenskapliga organisationer från Israel, valdes Heletz som lämplig pilotanläggning. Inför injekteringsförsöken utfördes en omfattande geologisk karaktärisering där förutom en 3D-modell av de strukturella förhållandena även data om de fysikaliska parametrarna som t.ex. permeabilitet och porositetsfördelningar i den djupa akviferen ingick. Dessutom utfördes kärnanalyser av reservoar och takberg samt geofysiska undersökningar i de nya test- och undersökningsbrunnarna, borrade till 1 650 m djup. Sandstensavsnittet som valdes för injekteringstesterna har en permeabilitet av 100–410 mD och en porositet på 20–25 procent, dvs. likartade värden som för Faluddensandstenen i södra Östersjön (se avsnittet *Lagringsmöjligheter i Sverige*). Injekteringsförsöken som omfattar ett par tusen ton koldioxid påbörjades hösten 2016. En övergripande dokumentation av design och resultat från fältförsöken i Heletz ges i stort antal artiklar i en specialutgåva av *Journal of International Greenhouse Gas Control* (Niemi m.fl. 2016a). Förutom MUSTANG och TRUST har även EU-projekten PANACEA och CO2QUEST medverkat i uppbyggnaden av Heletz-platsen och utförandet av fältförsöken.



Figur 7. Borrning vid Heletz-siten i Israel i anslutning till fältförsöken 2012 inom MUSTANG-projektet. Foto: M. Erlström.

Tabell 1. Sammanställning av några större lagringsprojekt i djupa akviferer som har beskrivits ovan.

Projekt	Typ av lager (typ av koldioxid)	Mängd injekterad koldioxid
Sleipner, norska Nordsjön, 1996–	Gasfält och sandstensakvifer på 800–1100 m djup (koldioxid från naturgasproduktion)	0,9 Mt/år, totalt 16 Mt (2016)
Snövit, norska Barentshavet, 2008–	Gasfält och sandstensakvifer på 2400–2700 m djup (koldioxid från naturgasproduktion)	0,7 Mt/år, totalt 3 Mt (2016)
Boundary Dam, Canada, 2014–	EOR (koldioxid från lignit-/kolkraftverk)	1 Mt/år
Quest, Canada, 2015–	Sandstensakvifer på 2000 m djup (koldioxid från produktion av bitumen till råolja från oljesand)	1 Mt/år
Abu Dhabi, 2016–	EOR, karbonatkomplex (koldioxid från järn- och stål-produktion)	0,8 Mt/år
Illinois, USA, 2017–	BECCS i djup sandstensakvifer på 2100 m djup (koldioxid från biobränsle, etanol)	1 Mt/år
Gorgon, Australien, planerad 2017–	Saltvattenakvifer, på ca 2300 m djup, antiklinal struktur (koldioxid från naturgasproduktion)	3,4–4 Mt/år (planerad)
Yanchang, Kina, 2017/2018–	EOR på 1500–2200 m djup (koldioxid från kemisk produktion, lignit/brunkol)	0,4 Mt/år (planerad)

CCS-DIREKTIVET OCH SVENSK LAGSTIFTNING

År 2009 kom Europaparlamentets och rådets direktiv 2009/31/EG av den 23 april 2009 om geologisk lagring av koldioxid (kallat CCS-direktivet). CCS-direktivet syftar till att skapa en rättslig ram för en säker geologisk lagring av koldioxid för att bidra till att bekämpa klimatförändringar. Direktivet är tillämpligt inom medlemsstaternas territorium, i deras ekonomiska zoner och på deras kontinentalsocklar. Denna uppräkning är uttömmande och det är således inte tillåtet att lagra koldioxid på en lagringsplats med ett lagringskomplex som sträcker sig utanför dessa områden. Medlemsstater kan dock komma överens om gränsöverskridande lagring medlemsstaterna emellan. Det är även möjligt att ingå överenskommelser med Norge eftersom frågor om geologisk lagring av koldioxid regleras under EES-samarbetet (Europeiska ekonomiska samarbetsområdet). Vidare är det heller inte tillåtet att lagra koldioxid i vattenpelaren och CCS-direktivet är inte tillämpligt vid lagring för forskningsändamål av mindre än 100 000 ton koldioxid, se artiklarna 1 och 2 i direktivet.

CCS-direktivet ger en möjlighet för medlemsländerna att själva bestämma var inom deras respektive territorium det ska vara tillåtet med geologisk lagring av koldioxid. Direktivet innehåller vidare bestämmelser om att det krävs tillstånd både för undersökning av lämpliga lagringsplatser och för lagringsverksamheten. Direktivet innehåller även förhållandevis detaljerade krav på vad en ansökan om lagringstillstånd ska innehålla.

När det gäller lämpligheten för en lagringsplats ska denna avgöras genom en beskrivning och bedömning av det potentiella lagringskomplexet och det omgivande området enligt de kriterier som anges i bilaga 1 till CCS-direktivet, vilket framgår av artikel 4.3 i direktivet.

Direktivet omfattar hela CCS-kedjan, från undersökning till tiden efter det att verksamheten avslutats samt transport av koldioxiden. Därför innehåller direktivet bestämmelser som reglerar verksamhetsutövarens skyldigheter gällande övervakning av verksamheten, rapportering till berörda myndigheter samt överföring av ansvaret för anläggningen när denna stängts.

Undersökningar för bedömning av lagringsplatser

Vad som ska ingå i en undersökning regleras av CCS-direktivet och i enlighet med direktivets femte artikel krävs det undersökningstillstånd om nya undersökningar ska utföras (t.ex. borrning och geofysiska mätningar). Nedan presenteras en kortfattad beskrivning av vilka viktiga underlagsdata och information som ska ingå i resultatet av en undersökning. Resultatet av bör inkludera övergripande beskrivningar av berggrundens allmänna uppbyggnad med hänsyn till förekomst av lämpliga akviferer och takbergarter. Arbetet ska inledningsvis omfatta inventering av befintliga data från borrningar och

borrhålsgeofysiska undersökningar med avseende på berggrundens uppbyggnad med information om bl.a. utbredning, lagring, homogenitet, tjocklek, porositet, permeabilitet, temperatur, mineralogisk uppbyggnad, porstorlek, kapillär förmåga, formationsvätskor och gaser.

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

För flertalet av EUs medlemstater 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. Inom projekten har i vissa fall ett antal delområden och slutna strukturella fällor pekats ut som speciellt lämpliga och där rekommenderas att det görs kompletterande plats- och områdesspecifika undersökningar.

Områdesspecifika undersökningar

I CCS-direktivet finns en instruktion för hur en beskrivning och bedömning av ett potentiellt lagringskomplex ska genomföras. Instruktionen omfattar två steg.

Steg 1: Insamling av basinformation
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 kärnborrningar 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)
- akvifergeologiska 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 2000områden, 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
- akviferens 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.

Förordningen om geologisk lagring av koldioxid

CCS-direktivet har implementerats i svensk lagstiftning genom bestämmelser i miljöbalken och dess förordningar, genom förordningen (2014:21) om geologisk lagring av koldioxid och genom lagen (1966:314) om kontinentalsockeln (KSL). Förordningen om geologisk lagring av koldioxid innehåller flera bestämmelser som riktar sig till såväl verksamhetsutövaren som till tillstånds- och tillsynsmyndigheterna. Liksom direktivet är inte förordningen tillämplig på verksamheter som avser lagring av mindre än 100 000 ton koldioxid och som anläggs för forskningsändamål.

Förordningen innehåller detaljerade bestämmelser om hur verksamhetsutövaren ska gå tillväga för att bedöma lämpligheten av en potentiell lagringsplats. Den innehåller även bestämmelser som riktar sig till verksamhetsutövaren och som innebär att denne ska ta fram en plan för avhjälpande åtgärder, en övervakningsplan samt en plan för underhåll efter stängning. Dessa planer ska tas fram innan en verksamhet får påbörjas.

I förordningen regleras även förutsättningarna för stängning av verksamheten samt hur ansvaret för verksamheten efter stäningen ska överflyttas från verksamhetsutövaren till tillsynsmyndigheten.

Av 2 kap. 26 § miljötillsynsförordningen (2011:13) framgår att det är SGU som är tillsynsmyndighet i fråga om geologisk lagring av koldioxid. Förordningen om geologisk lagring av koldioxid innehåller bemyndiganden för tillsynsmyndigheten att meddela föreskrifter som rör frågor om rapportering och avgifter vid ansvarsöverförande samt skyldighet för verksamhetsutövare att lämna uppgifter om den stängda anläggningen.

Prövningssystemet

I Sverige har man valt att anpassa prövningen av geologisk lagring av koldioxid till det system som idag finns för alla miljöfarliga verksamheter. För att kunna uppfylla de krav som ställs upp i CCS-direktivet måste dock lagstiftningen innehålla ett flertal bestämmelser som är speciella just för prövningen av geologisk lagring av koldioxid. Geologisk lagring av koldioxid är miljöfarlig verksamhet och omfattas därför av bestämmelserna i 9 kap. miljöbalken. Prövningssystemet enligt miljöbalken när det gäller geologisk lagring av koldioxid har förändrats något under det senaste året, bl.a. så ska anläggningar som avser lagring av mindre än 100 000 ton koldioxid tillståndsprövas av miljöprövningsdelegationen vid länsstyrelserna (MPD). I korthet innebär prövningssystemet att anläggningar som är större än 100 000 ton ska prövas av mark- och miljödomstol samt tillåtlighetsprövas av regeringen. Dessa anläggningar får endast förläggas under havsbotten. Tillstånd krävs enligt KSL.

Anläggningar som avser mindre än 100 000 ton ska prövas av MPD. Om anläggningen görs för forskningsändamål är inte förordningen om geologisk lagring av koldioxid tillämplig och det krävs heller inte någon tillåtlighetsprövning. Om anläggningen avser lagring av mindre än 100 000 ton men är av kommersiell karaktär ska verksamheten tillåtlighetsprövas av regeringen enligt 17 kap. miljöbalken och förordningen om geologisk lagring av koldioxid ska tillämpas. Dessa mindre anläggningar kan förläggas antingen under havsbotten eller på land.

Undersökningstillstånd

För att kunna avgöra om en potentiell lagringsplats är lämplig krävs att denna noggrant undersöks. Att borra i syfte att bedöma om en plats är lämplig för geologisk lagring för koldioxid är enligt miljöprövningsförordningen (2013:251) en så kallad C-verksamhet vilket innebär att verksamheten kräver anmälan till kommunen. Kommunen har då möjlighet att förelägga verksamhetsutövaren att vidta försiktighetsmått vid borrningen.

Är det fråga om borrning till havs krävs tillstånd för att utforska kontinentalsockeln enligt KSL. Ett sådant tillstånd meddelas av regeringen. Vid prövningen ska regeringen tillämpa de så

kallade hänsynsreglerna, dvs. bestämmelserna i 2 kap. miljöbalken. Ansökan ska innehålla en miljökonsekvensbeskrivning som ska utformas i enlighet med bestämmelserna i 6 kap. miljöbalken, samt den övriga information som framgår av bestämmelserna i kontinentalsockelförordningen (1966:315, KSF). Giltighetstiden för ett undersökningstillstånd ska inte vara längre än vad som bedöms nödvändigt för att genomföra de undersökningar som ansökan omfattar. Tiden kan dock förlängas. Om någon har fått tillstånd att utforska kontinentalsockeln för geologisk lagring av koldioxid får inte någon annan ges tillstånd att utforska eller använda området i samma syfte, se 3 d § KSL.

Lagringstillstånd

Som nämnts ovan genomfördes den 1 januari 2017 förändringar i miljöprövningsförordningen som bl.a. innebar att det numera krävs tillstånd från miljöprövningsdelegationen för anläggningar för geologisk lagring av koldioxid om mängden koldioxid som är planerad att lagras är högst 100 000 ton, se 29 kap. 61 § i miljöprövningsförordningen. När det är fråga om lagring för mer än 100 000 ton gäller tillståndsplikt A, vilket innebär att tillstånd söks hos mark- och miljödomstol. Av 10 § i förordningen om geologisk lagring av koldioxid framgår att lagring över 100 000 ton endast får ske i Sveriges ekonomiska zon och i de områden som inte ingår i fastigheter i svenskt territorialhav från en nautisk mil utanför baslinjen. Det gör att samtliga eventuella tillståndsansökningar som prövas av mark- och miljödomstol som första instans kommer att vara anläggningar förlagda till havs.

Det bedöms som mest troligt att de mindre anläggningarna kommer att vara för forskningsändamål och de omfattas då inte av bestämmelserna i CCS-direktivet eller av bestämmelserna i förordningen om geologisk lagring av koldioxid. Förordningen ska dock tillämpas på anläggningar som lagrar mindre än 100 000 ton om lagringen görs i annat syfte än forskningsändamål. Större anläggningar kommer, som konstaterats ovan, förläggas under havsbottnen inom den ekonomiska zonen men utanför territorialgränsen. I normalfallet är inte svensk lagstiftning tillämplig utanför territoriet, men av 1 kap. 2 § miljöbalken framgår att balkens bestämmelser i fråga om hushållning med mark- och vattenområden, tillstånd, anmälan och tillåtlighet ska tillämpas på Sveriges kontinentalsockel även utanför territorialgränsen när det gäller frågor om geologisk lagring av koldioxid.

Vad som ska ingå i en ansökan om tillstånd för geologisk lagring av koldioxid framgår av bestämmelserna i 22 kap. miljöbalken. Ansökan ska bl.a. innehålla en miljökonsekvensbeskrivning, förslag till skyddsåtgärder, övervakning och kontroll. De nyss nämnda kraven är sådant som alltid ska ingå i en ansökan om tillstånd för en A-verksamhet. Utöver dessa generella krav ska en ansökan om tillstånd för geologisk lagring av koldioxid innehålla ett flertal andra uppgifter vilka framgår av 22 kapitlet, första paragrafen i miljöbalken. Det är bl.a. uppgifter om vem som driver verksamheten och dennes tekniska kompetens, en beskrivning av varifrån den koldioxid som ska lagras kommer och hur den ska transporteras till lagringsplatsen. Ansökan ska även innehålla en beskrivning av den geologiska formationens egenskaper, lagringsplatsen och det område runt lagringsplatsen som med hänsyn till de geologiska förhållandena har betydelse för lagringens integritet och säkerhet.

När en ansökan om tillstånd till geologisk lagring av koldioxid inkommit till mark- och miljödomstolen ska domstolen, inom en månad från det att ansökan kom in, skicka ett exemplar av ansökningshandlingarna till SGU och Europeiska kommissionen.

Regeringen ska pröva tillåtligheten av nya verksamheter för geologisk lagring av koldioxid enligt 17e kapitlet i miljöbalken. Undantagna från tillåtlighetsprövningen är anläggningar för forskningsändamål omfattande mindre än 100 000 ton. Vid en tillåtlighetsprövning av en A-verksamhet handläggs ärendet av mark- och miljödomstolen som sedan överlämnar ärendet med eget yttrande till regeringen för beslut i tillåtlighetsfrågan. Domstolens yttrande skickas till kommissionen. Om regeringen vid sin prövning kommer fram till att verksamheten får komma tillstånd kan regeringen besluta om villkor som behövs för att tillgodose allmänna intressen samt besluta om de villkor som behövs med hänsyn till de synpunkter som kommissionen har lämnat i samband med tillåtlighetsprövningen. Genom

denna konstruktion, samt möjligheten för regeringen att meddela villkor gällande de synpunkter som kommissionen haft, har man löst frågan om det beslutsutkast som kommissionen ska få möjlighet att yttra sig över enligt artikel 10 i CCS-direktivet. När regeringen har beslutat i tillåtlighetsfrågan går ärendet åter till mark- och miljödomstolen för meddelande av villkor i domen. Det finns särskilda bestämmelser som reglerar vad en dom om tillstånd till geologisk lagring av koldioxid ska innehålla. Bl.a. ska skälen för avvikelse från de synpunkter som kommissionen har lämnat i samband med regeringes tillåtlighetsprövning alltid anges. När domstolen meddelat dom och denna vunnit laga kraft ska domstolen underrätta SGU och kommissionen om innehållet i domen och om regeringens beslut i tillåtlighetsfrågan.

För verksamheter som förläggs under havsbottnen krävs även tillstånd enligt KSL. Precis som när det är fråga om undersökningsverksamhet är det regeringen som meddelar tillstånd och till ansökan ska det finnas en miljökonsekvensbeskrivning. Vad ansökan i övrigt ska innehålla framgår av 4 § KSF. Ett tillstånd ska förenas med de villkor som bl.a. behövs för att skydda allmänna intressen och enskild rätt, exempelvis skydda människors hälsa och miljön mot skador och olägenheter. Ett lagringstillstånd enligt KSL behöver inte begränsas i tiden, detta eftersom lagringsverksamheten kommer pågå under oöverskådlig tid.

Sammanfattningsvis kommer anläggningar för forskningsändamål vilka avser mindre än 100 000 ton koldioxid och som är landbaserade tillståndsprövas av miljöprövningsdelegationen enligt ordinarie rutiner för miljöfarlig verksamhet. Om en sådan anläggning skulle läggas till havs kommer den även kräva tillstånd enligt KSL. För större anläggningar krävs en mer omfattande prövning. Flera special-bestämmelser bl.a. om vad en ansökan ska innehålla enligt 22 kapitlet i miljöbalken blir tillämpliga. Även förordningen om geologisk lagring av koldioxid ska tillämpas med dess krav som kan ställas på verksamhetsutövaren. Prövningen kommer dessutom att göras i flera steg då regeringen ska besluta om tillåtlighet, mark- och miljödomstolen ska meddela tillstånd, kommissionen ska ha möjlighet att yttra sig och det krävs tillstånd enligt KSL.

Avskiljning och dumpning

Tillstånd för avskiljning av koldioxidströmmar

Som konstaterats ovan krävs tillstånd både för undersökning av potentiella lagringsplatser och för lagring av koldioxid. För avskiljande av koldioxidströmmar gäller tillståndsplikt B, dvs. en tillstånds-ansökan ska prövas av miljöprövningsdelegationen, detta gäller både för anläggningar som omfattas av industriutsläppsförordningen (2013:250) och de anläggningar som inte gör det. De anläggningar som avger den koldioxid som ska avskiljas omfattas många gånger själva av tillståndsplikt då det är fråga om miljöfarlig verksamhet. Vilka tillstånd som då kan bli aktuella kommer inte att beskrivas i denna rapport eftersom det helt beror på vilken typ av verksamhet det är fråga om. Miljöbalken innehåller dock bestämmelser om att vissa förbränningsanläggningar vid tillståndsprövningen ska ange om möjligheterna finns att avskilja koldioxid och förutsättningarna för att göra så.

Bestämmelser om dumpning

I miljöbalkens 15 kapitel regleras frågor om avfall. Avfall definieras som varje ämne eller föremål som innehavaren gör sig av med, avser att göra sig av med eller är skyldig att göra sig av med. I kapitlet finns även bestämmelser om dumpning. Av dessa bestämmelser, vilka är en implementering av bl.a. Londonprotokollet (se nedan), framgår att avfall inte får dumpas inom Sveriges sjöterritorium och ekonomiska zon. Avfall som är avsett att dumpas i, eller förbrännas på, det fria havet får heller inte föras ut ur landet eller ur den ekonomiska zonen. Denna bestämmelse följs dock av ett bemyndigande för regeringen att meddela föreskrifter om undantag från förbudet mot dumpning av avfall för geologisk lagring av koldioxid.

Tillsyn

SGU är tillsynsmyndighet över efterlevnaden av föreskrifter och villkor för tillstånd enligt KSL. Detta gäller såväl undersökningstillstånd som lagringstillstånd. SGU har som tillsynsmyndighet möjlighet att kontrollera verksamheten samt meddela förelägganden, vilka kan förenas med vite. Vissa bestämmelser om hur tillsynen ska bedrivas finns i KSL, men detta är inte reglerat i detalj. SGU är således relativt fri att utforma tillsynen på sätt som bedöms lämpligt.

SGU är även utpekad som tillsynsmyndighet enligt miljöbalken vad gäller geologisk lagring av koldioxid. Generella bestämmelser om tillsyn finns i 26 kap. miljöbalken. I miljötillsynsförordningen (2011:13) och i förordningen om geologisk lagring av koldioxid finns mer detaljerade bestämmelser om hur tillsynen ska bedrivas. Som tillsynsmyndighet kommer SGU bl.a. att kontrollera att verksamheten bedrivs i enlighet med gällande tillstånd, fatta beslut om stängning av verksamheten, besluta om tidpunkt för ansvarsöverföring m.m. Den 1 januari 2017 trädde en uppdatering av bilagan till förordningen (1998:940) om avgifter för prövning och tillsyn enligt miljöbalken, ikraft. Förändringen innebär att det numera är möjligt att ta ut en prövnings- och tillsynsavgift för lagring och avskiljning av koldioxid, något som inte varit möjligt tidigare.

Internationella överenskommelser

Londonkonventionen och Londonprotokollet

År 1972 undertecknades konventionen om förhindrande av havsföroreningar till följd av dumpning av avfall, den s.k. Londonkonventionen. Konventionen har retificerats av 87 länder, bl.a. flera europeiska. Konventionen innebar ett totalförbud mot dumpning av en viss grupp särskilt farliga ämnen i kombination med ett tillståndssystem för dumpning av andra ämnen. År 1996 moderniserades konventionen genom antagandet av Londonprotokollet. I Londonprotokollet är utgångspunkten, tvärt emot Londonkonventionen, att all dumpning är förbjuden förutom de ämnen som anges i en bilaga till protokollet och för dessa ämnen krävs tillstånd. År 2006 gjordes ett tillägg till Londonprotokollet så att det nu tillåter geologisk lagring av koldioxid under havsbotten. I bilagan preciseras de krav som ska vara uppfyllda för att lagringen ska få ske, den måste ske i en geologisk formation under havsbotten. Koldioxidströmmen ska till övervägande delen bestå av koldioxid, men den får dock innehålla spår av andra ämnen som kommer från källan och från avskiljningen och lagringsprocessen. Inget avfall eller annat material får blandas med koldioxiden i syfte att göra sig av med det avfallet eller materialet. Om dessa krav följs är lagringen förenlig med både Londonkonventionen och Londonprotokollet. Artikel 6 i Londonprotokollet innehåller ett generellt förbud mot export av avfall för dumpning eller förbränning till havs. Eftersom detta förbud skulle kunna förhindra transport av koldioxid för lagring i en annan stat, gjordes år 2009 ett tillägg till artikel 6 så att det nu kan medges undantag från exportförbudet.

OSPAR-koventionen

OSPAR-koventionen (*Convention for the Protection of the Marine Environment of the North-East Atlantic*) är en regional konvention med 15 deltagande länder, bl.a. Norge, Danmark, Schweiz och Tyskland, för att skydda miljön i Nordostatlanten. OSPARS arbete sker inom fem tematiska områden, vilka är biologisk mångfald, övergödning, farligt avfall, havsbaserad verksamhet och radioaktiva ämnen. År 2007 genomfördes förändringar i bilagorna till konventionen för att på så sätt kunna medge lagring av koldioxid under havsbottnen.

HELCOM-konventionen

Helsingforskonventionen (1992 års konvention om skydd av Östersjöområdets marina miljö) är en regional konvention för samarbete inom miljöområdet för Östersjöområdet, inklusive Kattegatt. Del-

tagande parter är EU, Ryssland, Estland, Finland, Tyskland, Lettland, Litauen, Polen Danmark och Sverige. Arbetet samordnas av Helsingforskommissionen, HELCOM. Målet är att återställa miljön i Östersjöområdet och att bevara dess ekologiska balans. I Helsingforskonventionen behandlas bl.a. frågor om dumpning, förorening från landbaserade källor samt undersökning och utvinning från havsbottnen.

Klimatmålen

Det framgår redan av artikel 1 i CCS-direktivet att en miljömässigt säker geologisk lagring av koldioxid bidrar till att bekämpa klimatförändringarna. Sverige har antagit egna klimatmål men har även genom internationella överenskommelser förbundit sig att minska utsläppen av växthusgaser.

Förenta Nationernas ramkonvention om klimatförändringar, Klimatkonventionen, undertecknades i Rio år 1992 och trädde ikraft år 1994. Ändamålet med konventionen är att uppnå en stabilisering av koncentrationen av växthusgaser i atmosfären på en nivå som förhindrar inverkningar på klimatsystemet. Detta åtagande preciserades genom Kyotoprotokollet där vissa parter, bland annat Sverige, åtog sig kvantifierade utsläppsbegränsningar. Till klimatkonventionen hör Parisavtalet som beslutades i december 2015 och trädde ikraft i november 2016. Parisavtalet ska börja gälla senast år 2020 och konkretiserar klimatkonventionen. Det viktigaste målet är att länderna ska hålla temperaturökningen som sker på grund av den globala uppvärmningen under två grader och sträva efter att den stannar vid 1,5 grader. Länderna har dessutom enats om att efterhand öka ambitionsnivån.

I januari 2008 lades ett förslag till klimat- och energipaket för EU fram av Europeiska kommissionen. Förslaget beslutades av Europa rådet i april 2009 och här fastställs ambitionen att utsläppen av växthusgaserna ska minskas med 20 procent. Om även länder utanför EU är villiga att bidra kan den beslutade minskningen ändras till 30 procent. Tre viktiga komponenter för att medlemsländerna ska kunna uppnå detta är direktivet om handel med utsläppsrätter, ansvarsfördelningsbeslutet samt CCS-direktivet.

Direktivet om handel med utsläppsrätter (direktiv 2003/87/EG) syftar till att på ett kostnadseffektivt och ekonomiskt effektivt sätt minska utsläppen av växthusgaser. Systemet (som kallas EU ETS) är tillämpligt på verksamheter som anges i bilaga 1 till direktivet och de växthusgaser som anges i direktivets bilaga 2. Verksamheter som omfattas är bl.a. större förbränningsanläggningar, järn- och stålproduktion samt till viss del luftfart. En ”utsläppsrätt” avser en rätt att från en viss anläggning släppa ut ett ton koldioxidekvivalenter under en fastställd period. Ett ton koldioxidekvikvalenter definieras som ett ton koldioxid eller den mängd av någon annan växthusgas och som har motsvarande potential för global uppvärmning och den fastställda perioden är åtta år. Tanken är att mängden utsläppsrätter ska minska över tiden och på så sätt driva fram en minskning av utsläppen av växthusgaser. Inom handelssystemet EU ETS ska utsläppen minska med 21 procent jämfört med år 2005. Handelsbestämmelserna har implementerats i svensk rätt genom lagen (2004:1199) om handel med utsläppsrätter. För de utsläpp som inte omfattas av EUs handelssystem (Non ETS) ska medlemsländerna själva ta ansvar för och genomföra nödvändiga åtgärder för att på så sätt minska utsläppen, men varje land har ett eget reduktionsmål. Utsläppen utanför EU ETS ska minska med totalt tio procent till 2020. Minskningarna har fördelats mellan medlemsstaterna genom det så kallade ansvarsfördelningsbeslutet (beslut 406/2009/EG). Varje land har ett åtagande om -20 till +20 procent. Det innebär att vissa länder ska minska sina utsläpp och för andra länder tillåts begränsade ökningar. Sveriges åtagande är satt till -17 procent. De sektorer och verksamheter som omfattas är lokaler och bostäder, transport, jordbruk, avfall samt de industrier som anses för små för att tillhöra EUs system för handel med utsläppsrätter.

I februari 2017 beslutade regeringen om ett nytt klimatpolitiskt ramverk som ska bestå av tre delar, en klimatlag, klimatmål och ett klimatpolitiskt råd. Klimatlagen föreslås träda ikraft 1 januari 2018 och lagfäster att regeringens klimatpolitik ska utgå från klimatmålen och hur arbetet ska bedrivas. De mål som ställs upp innebär bl.a. att senast 2045 ska Sverige inte ha några nettoutsläpp av växthusgaser

till atmosfären. För att nå nettoutsläppsmålet får åtgärder som att öka upptaget i skog och mark samt investeringar i andra länder tillgodoräknas. Utsläppen i Sverige utanför EU ETS bör senast år 2030 vara minst 63 procent lägre än de var år 1990 (Regeringskansliet 2017).

För att nå målet får även avskiljning och lagring av koldioxid, där rimliga alternativ saknas, räknas som en åtgärd. Detta innebär att koldioxidlagring, förutom en minskad användning av fossila bränslen, ses som ett nyckelbidrag till minskade utsläpp.

KOLDIOXIDLAGRING I DJUPA AKVIFERER

Enligt Internationella energirådets (IEA, eng. *International Energy Agency*) utsläppsstatistik uppgick de energirelaterade utsläppen inom OECD-länderna i 2014 till 11,9 miljarder ton koldioxid och är den lägsta nivån sedan mitten av 1990-talet. Detta kan jämföras 2007, precis innan den ekonomiska krisen slog till, där utsläppen uppgick till 12,9 Gt koldioxid, alltså en minskning med åtta procent på sju år. Globalt bedöms djupa akviferer 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 (Gielen 2003). I projektet NORDICCS gjordes bedömningen att det i djupa akviferer enbart inom Norden (Sverige, Danmark och Norge) finns en total potential att kunna lagra ca 120 miljarder ton koldioxid, varav ca 14 miljarder ton i tömda olje- och gasfält (NORDICCS 2016). Som jämförelse gjordes en beräkning inom NORDICCS (Bergmo & Emmel 2015), att med samma årliga utsläppstakt inom Norden som 2011 (152,8 miljoner ton koldioxid från utsläppskällor över 100 000 ton CO_2 per år) skulle Nordens 18 bäst lämpade djupa akviferer med en samlad lagringskapacitet på mer än 86 miljarder ton koldioxid, ha kapacitet att ta emot Nordens samlade större utsläpp i 564 år. Dessa siffror är dock långt ifrån den praktiskt genomförbara lagringskapaciteten som beror på en mängd styrande parametrar som inte minst rör de geologiska förutsättningarna, acceptans, avstånd mellan koldioxidkälla och lagringsplats m.m.

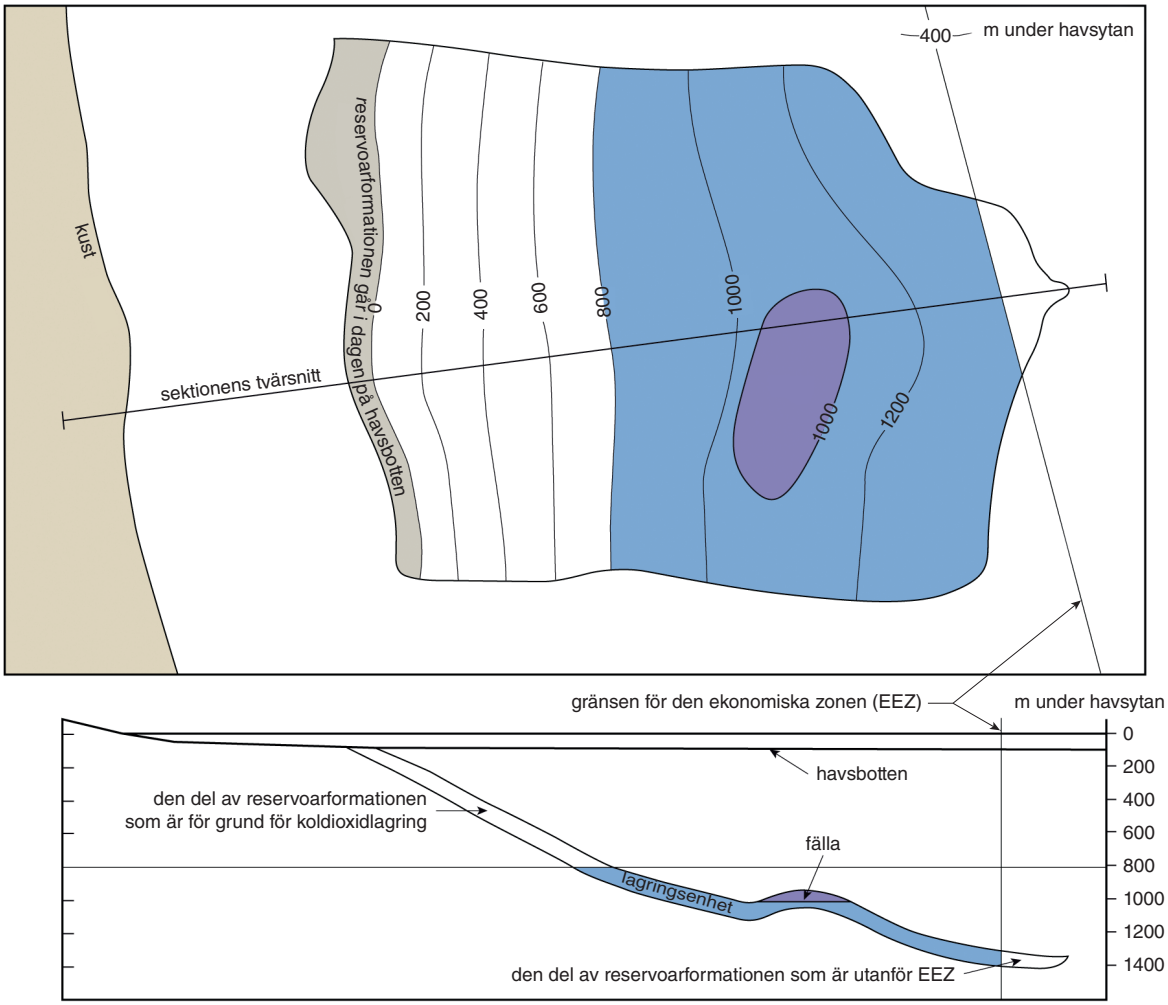
Vid värderingen av lagringspotentialen i djupa akviferer måste hänsyn tas till några grundläggande faktorer. Först och främst ska ett lager ha kapacitet att ta emot stora mängder koldioxid, helst mer än vad koldioxidkällan till lagret genererar under sin livslängd. Som exempel kan nämnas att ett större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

Definition av en akvifer

En akvifer definieras här som en regionalt utbredd men ändå geometriskt och strukturellt avgränsad berggrundsstruktur som är tillräckligt permeabel och porös för att kunna hålla stora volymer vatten. Man skiljer på sprick- och porakviferer. I en sprickakvifer förekommer grundvattnet i sprickor och krosszoner medan det i en porakvifer är magasinerat i bergartens porer. En porakvifer (t.ex. sandsten) har generellt en mycket högre magasineringspotential än en sprickakvifer (t.ex. kalksten). Vanligtvis har sandstensakviferer en porositet på mellan 10 och 30 procent medan en uppsprucken kalksten oftast har en porositet på någon enstaka procent.

Med djupa akviferer menas sådana akviferer som förekommer på tillräckligt stora djup för att möjliggöra lagring av koldioxid i superkritiskt tillstånd. I lagringssammanhang används även termen lagringsplats (eng. *storage site*) som alltså utgör den del av akviferen som är lämplig för lagring av koldioxid. En lagringsplats kan innehålla både lagringsenheter (eng. *storage units*) och fällor (eng. *traps*), se figur 8.

Koldioxid övergår från gasfas till superkritiskt tillstånd när temperaturen och trycket överstiger 31,1 °C respektive 73,9 bar. Vid normala tryck och temperaturförhållanden i berggrunden betyder det att akviferen bör ligga på minst 800 m djup. Akviferer på detta djup innehåller fossilt eller relikt vatten, vilket är grundvatten som varit instängt i akviferen under tusentals till miljontals år. Fossilt



Figur 8. Schematisk illustration av lagringsplats med lagringsenheter och fälla (modifierad från Gammar m.fl. 2011).

grundvatten har ofta mycket höga salthalter. Salthalten i det fossila grundvattnet på 1 000 m djup är normalt cirka tio procent. Förutom salter kan ett fossilt grundvatten innehålla höga halter av t.ex. järn, svavel och mangan.

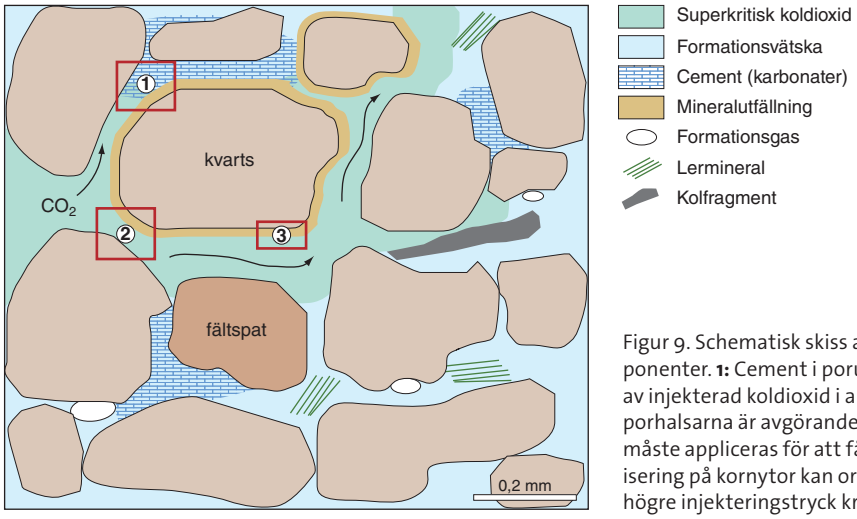
Akviferer kan antingen vara öppna eller slutna. I en sluten akvifer är grundvattnet, till skillnad från i en öppen akvifer, isolerat från omgivningen, dvs. det saknar kommunikation med andra akviferer eller atmosfären och havet. Om en akvifer är sluten eller öppen har stor betydelse för vilka gränseffekter som uppstår när koldioxid förs in i akviferen och trycker undan befintligt porvatten. Är akviferen 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 hur mycket vattnet kan pressas samman samt bergartens hållfasthet. Lagringspotentialen är i dessa fall mycket beroende av storleken på den slutna akviferen och vilka övertryck som akviferen och överlagrande takberg tål. I öppna system är det lättare att injektera koldioxid eftersom mottrycket blir lägre. Det är dock större risk att undanträngt fossilt grundvatten tränger upp och förorenar ytligare berggrundslager eller dricksvattenmagasin. När man gör modelleringar och simuleringar över akviferens beteende och respons vid injektering av koldioxid simulerar man ofta tillägg av vattenproducerande brunnar. Syftet med dessa är att genom uttag av porvatten jämna ut trycket som förorsakas av den injekterade koldioxiden. Vid användning av vattenproducerande brunnar i samband med koldioxidinjektering måste eventuella miljökonsekvenser beaktas vid omhändertagande av det uttagna vattnet eftersom fossilt grundvatten

kan ha höga halter av t.ex. järn, svavel och mangan. Många slutna strukturer innehåller förutom fossilt grundvatten ofta även olja och gas. I Norge har man inom projektet *Nullutslipp* (DNV GL 2015) arbetat intensivt med metoder för minskning av oljeinnehållet i det producerade vattnet vid oljeproduktion. Arbetet är förankrat i en riskbaserad uppskattning vilket innebär att kostnadseffektiva lösningar anpassas till risknivån. Projektet implementerades som en anpassning till OSPARs riktlinjer för hantering av producerat vatten, där praxis värderas efter bästa tillgängliga teknik (eng. *Best Available Techniques, BAT*) som inkluderar en rad faktorer utöver rening av vattnet, bl.a. energiförbrukning. Den använda metoden i Norge baseras på återinjektering och rening av producerat vatten innan utsläpp till havet. Rening från olja av det producerade vattnet bidrar även till rening av andra komponenter, såsom tillsatta kemikalier och naturliga komponenter. Det är en kostsam process som för enstaka anläggningar betyder en initial miljardinvestering för själva anläggningen och sedan extra årliga kostnader från få miljoner till tiotals miljoner kronor för drift (DNV GL 2015). OSPAR publicerade 2013 en översikt över tillgängliga tekniker för rening av producerat vatten till havs (OSPAR 2013). I akviferer där man har utvunnit olja eller gas har ett undertryck skapats i denna vilket medför att större mängder koldioxid kan injekteras jämfört med en ostörd sluten grundvattenakvifer.

Akviferens fysikaliska och kemiska egenskaper

Mineralkorn och övriga komponenter

En akviferbergart är uppbyggd av mineralkorn, cement, formationsvätska och gas (fig. 9). Mineralkornen i en vanlig sandsten 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 procent av bergarten kan bestå av fältspater och bergartsfragment. Sandstenar med hög kvartshalt är mindre känsliga för kemiska reaktioner i samband med lagring av koldioxid. Cement som binder ihop mineralkornen består av kemiskt utfällda mineraliseringar av karbonat, kiselsyra eller järnföreningar. Cement 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 porutrymmen. När utfällningarna bildar sträva hinnor på kornens yta ökar tryckmotståndet kraftigt i bergarten vilket i sin tur minskar permeabiliteten. Kornformen och mängden finmaterial i



Figur 9. Schematisk skiss av en akviferbergarts olika komponenter. **1:** Cement i porutrymmena förhindrar spridning av injekterad koldioxid i akviferen. **2:** Öppningsvidden på porhalsarna är avgörande för hur stort injekteringstryck som måste appliceras för att få in koldioxid i akviferen. **3:** Mineralisering på kornytor kan orsaka ökad friktion som gör att ett högre injekteringstryck krävs. (från Erlström m.fl. 2011).

bergarten har också stor betydelse för hur lätt en vätska eller gas kan förflytta sig. En stor andel kantiga och finkorniga partiklar gör att permeabiliteten minskar.

Formationsvätska

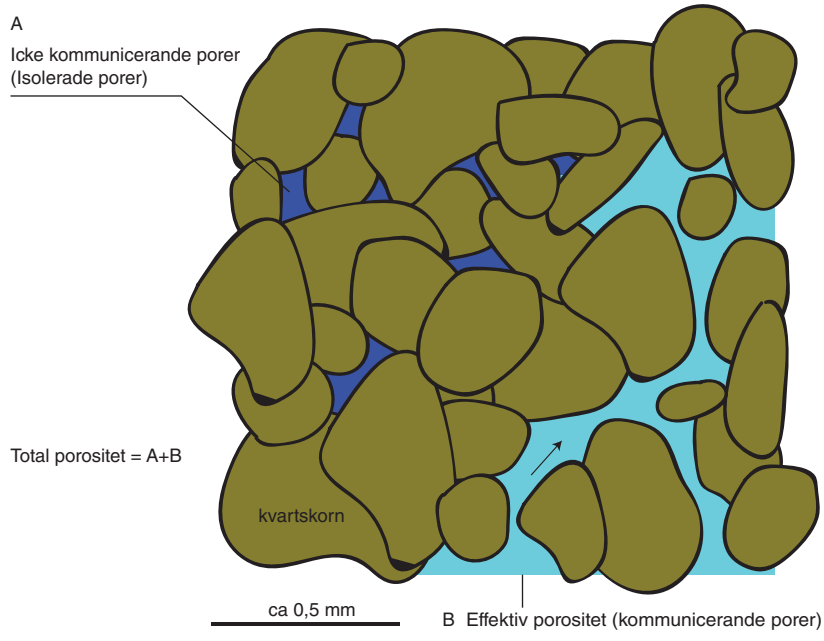
Porvattnet (formationsvätskan) i djupa akviferer med marint ursprung hade ursprungligen ungefär samma sammansättning som havsvattnet där sedimentet avsattes. I samband med att formationen överlagras av yngre sediment och kompakteras, koncentreras havsvattnets salthalt genom kemiska reaktioner och osmos 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 procent) på 1 000 m djup.

Kemisk reaktivitet

Avgörande för mineralisering av koldioxiden är akviferbergartens 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 (eng. *cation exchange capacity, CEC*).

Porositet, permeabilitet, hydraulisk konduktivitet och injektivitet

Porositet och permeabilitet är två viktiga parametrar för bedömning av en akvifers lagringspotential. Porositet mäts i procent och anger hur stor andel av akviferbergarten 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, se figur 10. Den effektiva porositeten är alltid lägre än den totala, beroende på att det finns inneslutna porer och sprickor som är isolerade och därmed inte kommunicerar med varann. Porositeten



Figur 10. Schematisk mikrotexturell figur som visar en sandsten med både kommunicerande porer (effektiv porositet) och slutna, icke kommunicerande porer. Båda porsystemen ingår i den totala porositeten men endast den effektiva har betydelse för möjligheten till injektering och lagring av koldioxid.

beror på kornstorleksfördelning, kornform och packning samt graden av konsolidering och förekomst av cement.

Permeabilitet (även 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. Sandstenar med en permeabilitet mellan 10 och 100 mD kan i vissa fall också vara lämpliga kandidater. I sandstenar med lägre permeabilitet krävs det högre injekteringstryck och längre tid för att få in motsvarande volymer koldioxid. Högre permeabilitet ger bättre förutsättningar för injektering och gaslagring.

I en akvifer som består av sandsten 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 lersten), 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 akviferbergarterna har ett lågt kapillärtryck. Takbergarten hindrar genomströmning av gas eller vätska från underliggande akvifer 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 flödeshastigheten blir låg.

Hur mycket vätska som kan transporteras genom en akvifer vid en viss gradient, t.ex. via en brunn, anges med injektivitet. Denna beror på vätskans egenskaper, så som densitet, temperatur och viskositet, samt akviferens porositet, permeabilitet och mäktighet. Vid bedömning av lagringskapacitet beräknas injektiviteten som permeabiliteten multiplicerad med akviferens mäktighet. Sammantaget utgör de beskrivna parametrarna viktiga data för bedömningen av lagringsmöjligheterna i en akvifer.

Koldioxidens egenskaper i djupa akviferer

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. Den årliga genomsnittliga koncentrationen av koldioxid i atmosfären överstiger idag 400 ppm. Enligt WMO (eng. *World Meteorological Organisation*) motsvarar denna nivå en ökning på 144 procent sedan pre-industriell tid där koncentrationen av koldioxid i atmosfären var 278 ppm och i balans mellan atmosfär, oceaner och biosfär. Koldioxid är en växthusgas som bildas vid i stort sett all förbränning av kolföreningar i samband med syre. Detta gör den till en av de dominerande bidragarna växthuseffekten. I tabell 2 anges några värden för koldioxidens egenskaper.

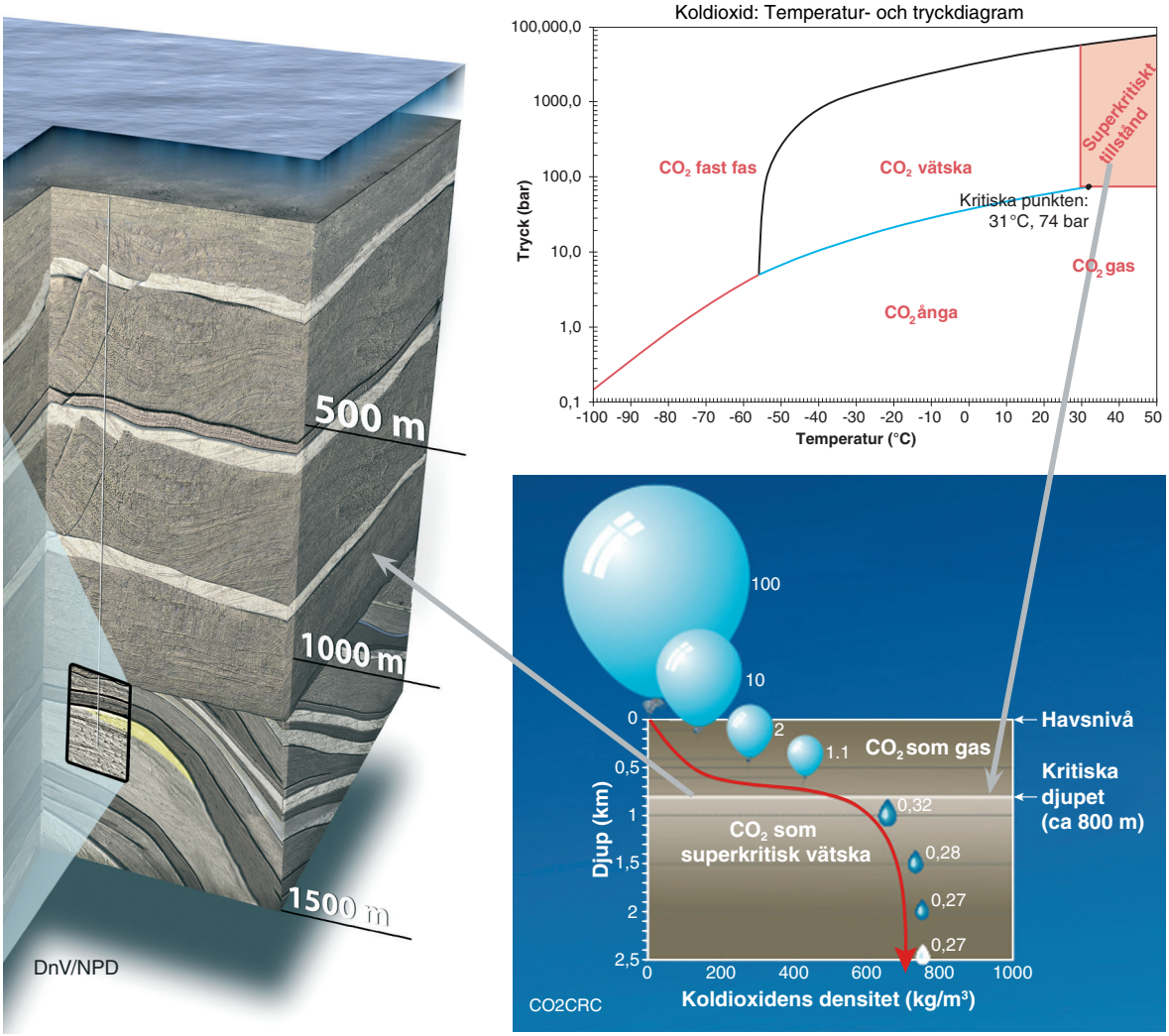
Koldioxid har en hög löslighet i vatten. Vid ökat tryck ökar generellt lösligheten medan den minskar med ökad temperatur och salthalt. Exempelvis är lösligheten i vatten med en salthalt på 15 procent (jämförbart med formationsvatten på ca 1 500 m djup) endast en tredjedel av vad den är i färskvatten.

Tabell 2. Sammanställning av några nyckelvärden för koldioxidens egenskaper.

Egenskap	Värde	Anm
Kritisk temperatur	31,1 °C	
Kritiskt tryck	73,9 bar	
Viskositet scCO_2*	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^3	1000–2500 m djup
Löslighet i vatten	2 000 mg/l 15 °C	

*) sc: superkritiskt tillstånd

Beroende på tryck, salthalt och temperatur kan mellan 20 och 60 kg koldioxid lösas i en kubikmeter formationsvatten. När koldioxid löses i formationsvattnet bildas en syra som sänker pH-värdet vilket kan leda till att metaller frigörs när mineralkornen 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 akviferens botten. Vid normala tryck- och temperaturförhållanden uppträder koldioxiden i gasfas. Med ökat tryck och ökad temperatur förändras dess egenskaper (fig. 11). Vid 73,9 bars tryck och en temperatur på 31,1 °C övergår koldioxiden i superkritiskt tillstånd. Vid lagring i djupa akviferer 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^3. Den kemiska sammansättningen av bergarter och formationsvätska är avgörande för hur koldioxiden kommer att reagera i akviferen. Eftersom de fysikaliska och kemiska förhållandena varierar kraftigt mellan olika akviferer är det platsspecifika förhållanden som avgör vilka reaktioner och kemiska förlopp som kommer att dominera. SACS-projektet (se sida 13) poängterar betydelsen av referensdata, det vill säga beskrivning av ursprunglig kemisk sammansättning i akviferen, samt tryck- och temperaturförhållanden. Detta är nödvändigt för att kunna förutsäga och identifiera de kemiska och fysikaliska processer som sker vid injektering av koldioxid.

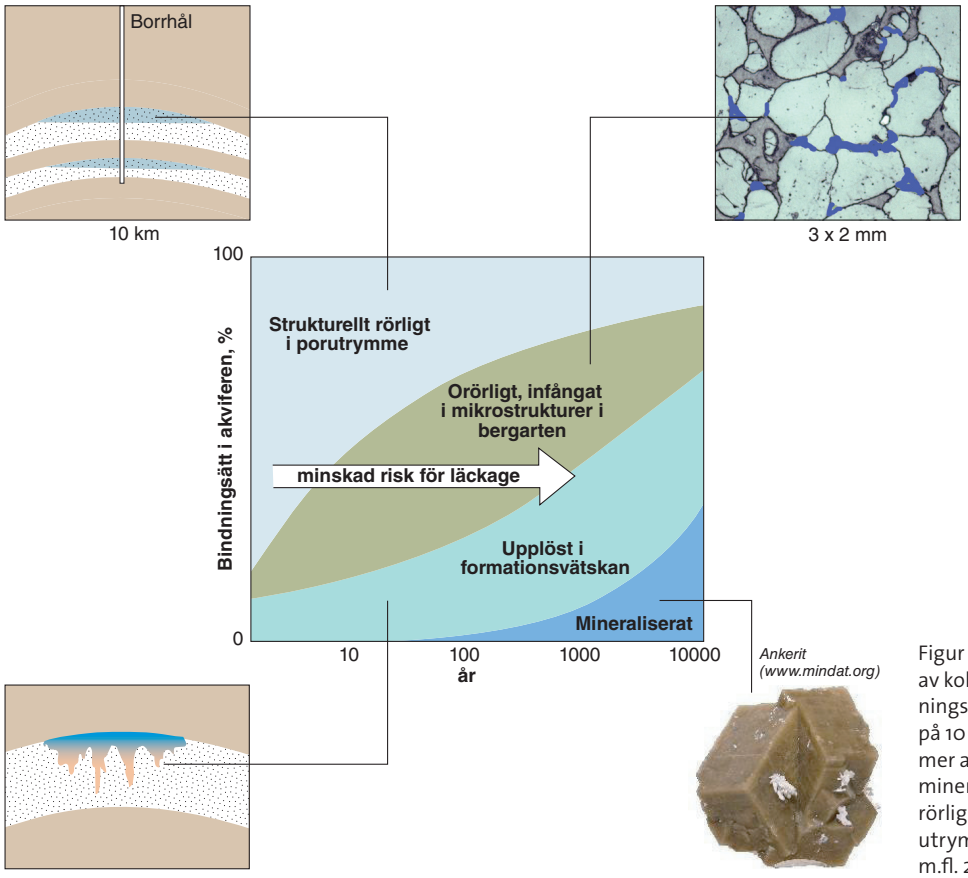


Figur 11. Bilden längst uppe till höger visar ett fasdiagram avseende tryck och temperatur. Nere till höger illustreras volym och densitetsförändring i förhållande till djup (indirekt tryck och temperatur), och till vänster markeras positionen i exempel på berggrund (modifierad från Halland m.fl. 2014)

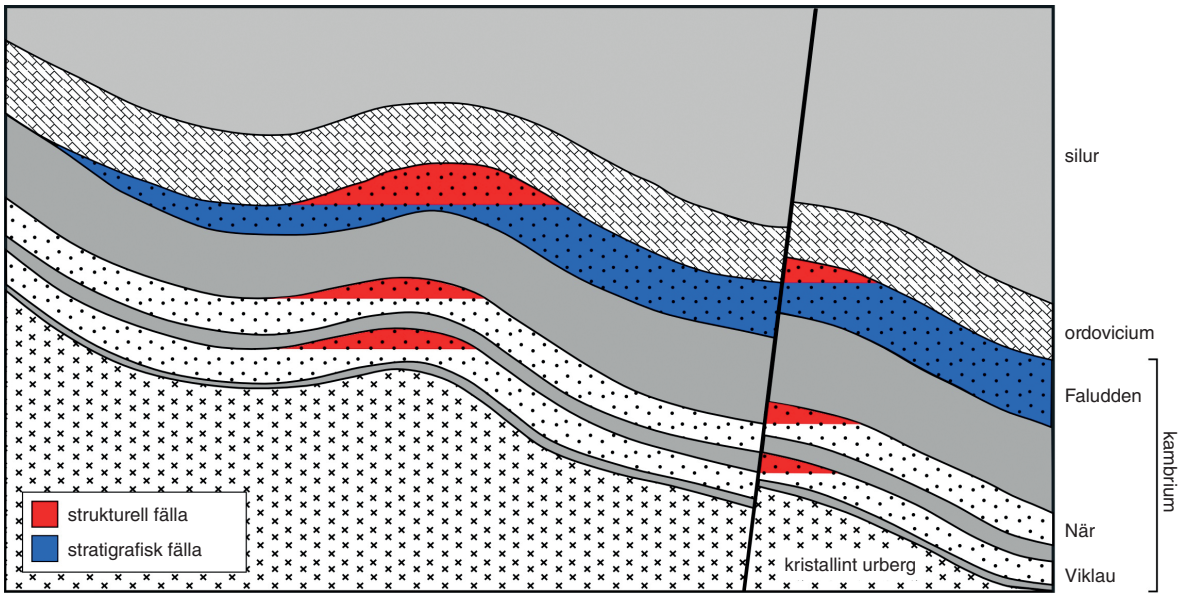
Bindning av koldioxid i akviferen

Koldioxid som injekteras i en geologisk formation och befinner sig i superkritiskt tillstånd kan bindas i akviferen på fyra olika sätt. Dessa varierar över tid och förekommer samtidigt i olika omfattning (fig. 12):

1. Ansamling i porutrymmen. Eftersom injekterad superkritisk koldioxid är 30–50 procent lättare än formationsvattnet stiger det uppåt, tränger undan detta och ansamlas i de högsta delarna av formationen närmast under takbergarten (eng. *structural and stratigraphic trapping*), se figur 13. Denna process är relativt snabb och dominerar den första lagringsfasen.
2. En stor del koldioxid binds eller fastnar mikrostrukturellt i bergarten (eng. *residual trapping*) i samband med att den förflyttar sig upp genom akviferen.
3. Successivt löser sig koldioxiden i formationsvattnet (eng. *solubility trapping*) som då ökar i densitet (cirka en procent) vilket gör att det sker en långsam förflyttning av koldioxidmättat formationsvatten nedåt i formationen. Detta kan med tiden resultera i konvektionsströmmar av vatten med olika densitet inuti akviferen. Ungefär 20–60 kg koldioxid kan lösas i en kubikmeter formationsvatten beroende på tryck och salinitet. På 100 år kan uppemot 20–30 procent av den ursprungliga mängden lagrad koldioxid ha lösts upp i formationsvattnet.
4. Koldioxiden reagerar med akviferbergartens mineral (eng. *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.



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 (från Erlström m.fl. 2011).



Figur 13. Definition av strukturell och stratigrafisk fälla illustrerad som schematisk profil från sydöstra Östersjön (modifierad från Sopher m.fl. 2014).

FÖRUTSÄTTNINGAR FÖR LAGRING AV KOLDIOXID I DJUPA AKVIFERER

Karaktärisering av en lagringsplats – geologiska krav och förutsättningar

Ett grundläggande krav för koldioxidlagring i djupa akviferer är en porös och permeabel (genomsläpplig) berggrund. Bäst lämpade är sandstensformationer ner till ca 2 500 m djup. Därunder är 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 en djup akvifer ska kunna klassificeras som lämplig för geologisk lagring av koldioxid. Dessa kan delas in i:

1. Akviferens geometriska och strukturella egenskaper, vilket innefattar utbredning, mäktighet och begränsningar samt vertikal och horisontell uppbyggnad.
2. Fysikaliska egenskaper, innefattande porositet, permeabilitet, kapillärtryck och formationstryck samt kemiska egenskaper och mineralogisk uppbyggnad.
3. Takbergartens egenskaper, innefattande utbredning, mäktighet och uppbyggnad, samt fysikaliska och kemiska egenskaper.

Akviferens geometriska och strukturella krav

En djup akvifer kan definieras som en geologisk formation med hög porositet och permeabilitet som innehåller fossilt grundvatten. Djupt liggande porösa sandstenslager med en mäktighet på minst 15 m anses som de mest intressanta alternativen för koldioxidlagring. 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 sekvens av bergarter med likartade egenskaper och bildningsförhållanden. Formationernas mäktighet är oftast betydande och flera nivåer (lager) inom en formation kan vara lämpliga för lagring.

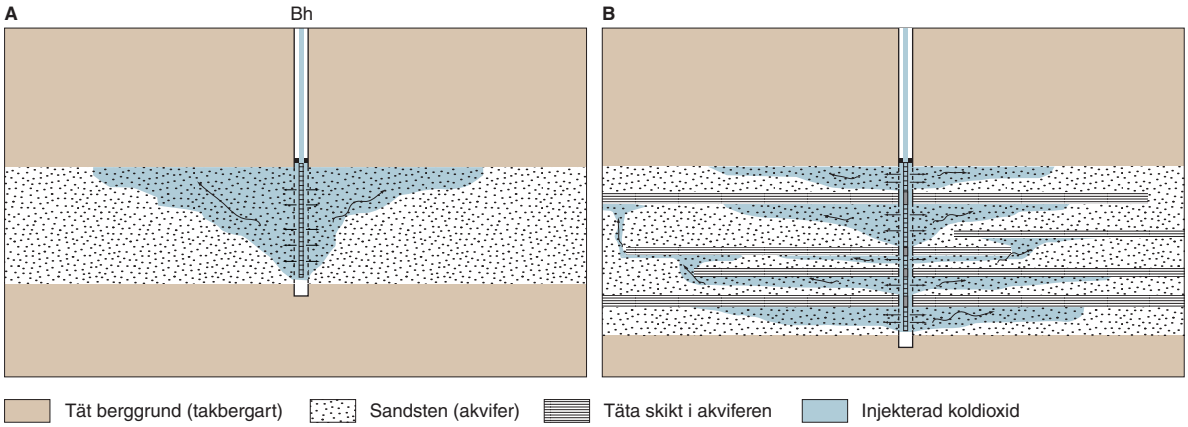
En geologisk formation bestående av flera olika bergartslager kan beskrivas utifrån sin heterogenitet. Det så kallade sand net/gross (N/G) förhållandet anger förhållandet mellan sandstensavsnitt med lämpliga akviferegenskaper för lagring i förhållande till lager med ogynnsamma egenskaper. Net/gross bedöms i regel utifrån satta gränsvärden på porositet och lerhalt samt kornstorlek. I förenklad betydelse anger andelen sandstenslager i formationen (i meter) den volym som är lämplig för koldioxidlagring. Gross anger formationens totala mäktighet (i meter).

En homogent uppbyggd formation med få enskilda sandstenslager med sammanlagd tillräcklig mäktighet är mest fördelaktig för lagring. Detta skapar förutsättningar för en mer enhetlig koldioxidströmning från injekteringsbrunnen och in i akviferen (fig. 14A). Den injekterade koldioxiden stannar inom en relativt begränsad bergvolym på grund av att superkritisk koldioxid är lättare än formationsvatten och därmed relativt snabbt förflyttar sig uppåt i akviferen tills den når takbergarten. En homogent uppbyggd akvifer möjliggör också en bättre övervakning av den lagrade koldioxiden.

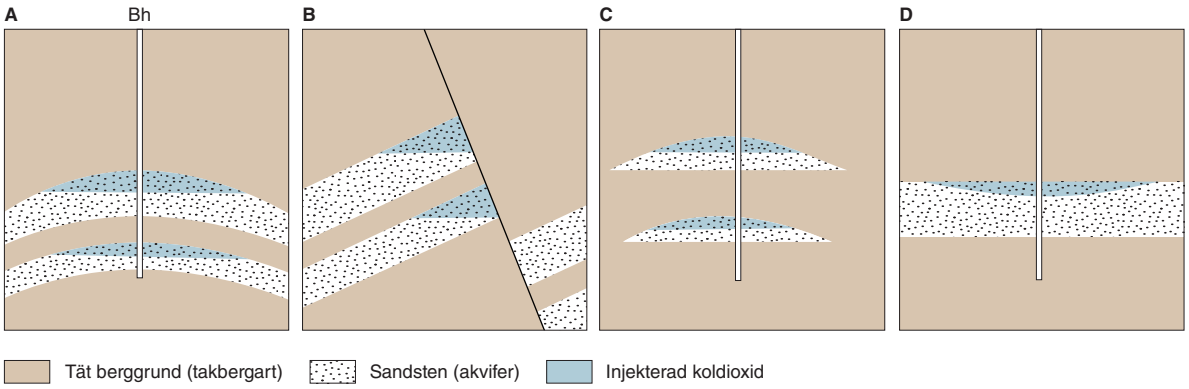
Ett koldioxidlager fördelat på flera sandstensnivåer inom samma formation ger en heterogen fördelning av den lagrade koldioxiden och därigenom sämre möjlighet till övervakning. Den injekterade koldioxiden migrerar ut i de olika sandstenslagren och förflyttar sig längre ut från brunnen jämfört med i en mäktigare och mer homogen formation utan några större vertikala variationer i lagring och fysikaliska egenskaper, ex. vertikal permeabilitet (fig. 14B). Andelen koldioxid som binds mikrostrukturellt anses däremot vara något högre vid lagring på flera nivåer.

Lagring i slutna strukturer ger bäst förutsättningar för att kunna kontrollera koldioxidens utbredning. En sådan struktur kan utgöras av antiklinala, förkastningsavgränsade eller stratigrafiska strukturer (fig. 15A–C). De sistnämnda kan exempelvis bestå av isolerade porösa sandlinser (enskilda akviferer) omgivna av täta bergarter, exempelvis lersten.

Helt slutna akviferer är ovanliga. Däremot finns det stora områden med mer eller mindre horisontellt liggande djupa akviferer (fig. 15D). Dessa har med ökad kunskap om koldioxidlagring bedömts som lämpliga för lagring, speciellt i de fall de har en regional utbredning och en betydande mäktighet. Ett exempel på en horisontellt liggande djupakvifer är Utsiraformationen i Sleipnerfältet i Nordsjön (fig. 6). Erfarenheterna med geologisk lagring av koldioxid i Sleipnerfältet har påvisat att koldioxiden stannar inom en relativt begränsad del av akviferen i nära anslutning till injekteringsbrunnen.



Figur 14. 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 (från Erlström m.fl. 2011).



Figur 15. Exempel på olika typer av akviferer som omges av täta bergarter, bild A–C är exempel på slutna akviferer. **A.** Antiklinal dom. **B.** Förkastningsbegränsad struktur. **C.** Stratigrafiskt begränsad struktur. **D.** Horisontell akvifer (från Erlström m.fl. 2011).

Fysikaliska och kemiska baskrav och önskvärda förutsättningar för lagring av koldioxid i berggrunden

För att geologisk lagring av koldioxid ska vara möjligt krävs att ett antal fysikaliska och kemiska baskrav uppfylls och ytterligare ett antal förutsättningar bör gälla. Ett grundläggande krav för lagring är att den sker under sådana förhållanden att koldioxiden är i ett superkritiskt tillstånd vilket medför att mängden koldioxid som lagras optimeras. Samma mängd koldioxid har betydligt mindre volym i superkritiskt tillstånd än i gasfas. För att uppnå superkritiskt tillstånd krävs i regel att akviferen ligger på minst 800 m djup.

Den teoretiska mängd koldioxid som kan lagras i berggrunden är, förutom akviferens totala volym, beroende på mängden porer, dvs. porositeten. Porositetsvärden på över tio procent har angetts som förutsättningar som bör uppfyllas inom projektet NORDICCS. Den faktiska (effektiva) lagringskapaciteten är generellt sett avsevärt mindre än den teoretiska vilket beror på en mängd andra faktorer, som t.ex. förekomsten av förkastningar, heterogen berggrund, kemiska förhållanden, temperatur, formationstryck, bergspänningar m.m.

En annan viktig faktor vid bedömning av en lagringsplats är hur lätt det är att få ner koldioxiden i berggrunden, dvs. injektiviteten. Denna är ett mått på hur lätt det går att injektera koldioxid i akviferen och därefter hur snabbt koldioxiden sedan migrerar bort från brunnen. Injektiviteten definieras som produkten av lagringsenhetens permeabilitet och mäktighet och mäts i darcymeter (Dm). Erfarenheter från injekteringar av naturgas och lagring indikerar att det krävs en injektivitet på minst 0,25 darcymeter för att lagring ska vara möjlig. Permeabiliteten är en annan parameter som har stor betydelse för injektiviteten. En permeabilitet på minst 100 millidarcy har angetts i NORDICCS som gällande förutsättning för lagring av koldioxid, men även högre krav har nämnts i lagringssammanhang (Chadwick m.fl. 2008).

Takberggrundens uppbyggnad och funktion

Enligt EUs direktiv för geologisk lagring av koldioxid (Europeiska kommissionen 2009) är val av plats för geologisk lagring av koldioxid, förutom en tillräcklig hög lagringskapacitet och injektivitet, beroende på säker lagring utan negativa effekter på omgivande miljö. En betydande förutsättning för säker lagring där koldioxiden hålls kvar i akviferen och förhindras migrera upp till markytan och atmosfären, är en tät och tillräckligt mäktig takbergart (eng. *caprock*), som utgörs av den överlagrande berggrund. Typiska takbergarter är lera, lersten, lerskiffer eller lerig kalksten. Takbergartens täthet och mäktighet är avgörande egenskaper 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 bildar en syra när den kommer i kontakt med vatten vilket löser upp karbonater) och därigenom leda till öppna migrationsvägar för koldioxiden. Vid injektering av koldioxid ökas trycket i akviferen vilket kan leda till att befintliga sprickor vidgas i takbergarten, speciellt i de fall då denna består av sprödare bergarter. Semiplastisk lera eller lersten är därför de bästa takbergarterna eftersom dessa har en förmåga att vara självläkande, dvs. sprickor och förkastningar återsluts av den semiplastiska leran. Inom tektoniskt aktiva områden kan höjd seismicitet leda till skakningar eller jordbävningar som kan förorsaka läckage genom aktivering av sprickor och förkastningar. Detta tydliggör vikten av inte att utse lagringsplatser inom tektoniskt aktiva områden.

Inom NORDICCS definierades en rad förutsättningar av avgörande betydelse vid karaktärisering av takbergarter, se tabell 3 (Bergmo 2013, Lothe 2014) vilka baserades på tidigare studier från bl.a. SACS och CO2STORE (Chadwick m.fl. 2008), norska Oljedirektoratets CO_2-lagringsatlas avseende norska Nordsjöområdet (Halland m. fl. 2011) samt IEA-GHG (2009). Förutsättningarna för att uppnå optimala förhållanden gällande takbergarter är en kontinuerlig utbredning med en mäktighet på minst 50 m, en litologi som utgörs av leriga bergarter för att uppnå tät försegling, förkastningar av låg intensitet och utsträckning av hänsyn till potentiella migrationsvägar, samt förekomst av multipla takbergarter bestående av mer än en sekvens förseglande takbergarter ovanför lagringsplatsen för ytterligare begränsning av koldioxidmigration.

Metod för karaktärisering av lagringsplats

I NORDICCS definierades en metod för karaktärisering och klassning av lagringsplatser (Bergmo 2013), se tabell 3, som bl.a. bygger på norska Oljedirektoratets CO_2-lagringsatlas avseende norska Nordsjöområdet (Halland m.fl. 2011). Metoden gäller för djupa akviferer i sedimentär berggrund. Klassningen underlättar jämförelser och utvärderingar av olika lagringsplatser i syfte att göra prioriteringar och urval för detaljerade studier och modelleringar. Exempel på klassning enligt NORDICCS metodik finns beskrivit under avsnittet *Lagringsmöjligheter i Sverige – Sammanställning*. I NORDICCS metod används enbart geovetenskapligt baserade kriterier, t.ex. reservoaregenskaper, takbergartsegenskaper, säkerhet och risk samt mognad och datatillgänglighet. Uttrycket mognad syftar på hur mycket forskning som utförts på lagringsplatsen och hur mycket resultat som finns. Mängden av data och tillgängligheten till dessa har en direkt koppling till lagringsplatsens mognad, mer information finns under avsnittet *Bedömningsmodeller för lagringskapacitet*. Metod för bedömning av seismisk aktivitet baserades främst på antaganden och utgör därför ett mycket osäkert underlag. Karaktäriseringen av olika potentiella lagringsplatser beskrivs med en färgkod där

- grön indikerar önskvärda förhållanden
- gul indikerar osäkra förhållanden, men kan i vissa fall accepteras
- röd indikerar att försiktighet tillrådes.

Tabell 3. Schematisk framställning av metoden som användes inom NORDICCS för karaktärisering och klassning av identifierade lagringsplatser (modifierad från Bergmo 2013).

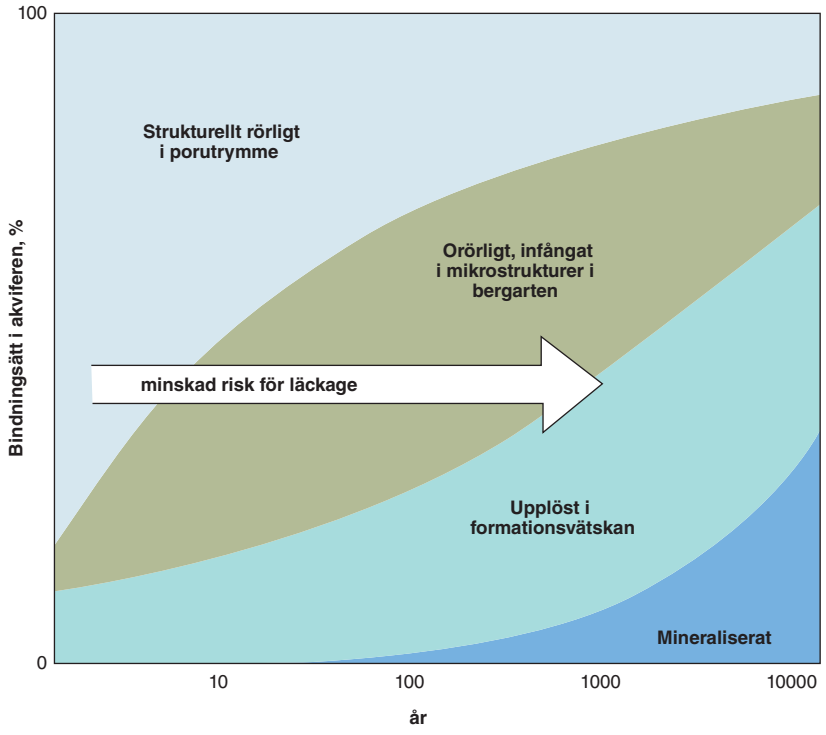
Reservoaregenskaper	**Optimal**	**Osäker**	**Försiktighet tillrådes**	**Anmärkningar**
Djup	>800–2 500 m	600–800 m		Beroende på temperatur-gradient inom området
Porositet	>20 %	10–20 %	<10 %	
Permeabilitet (gas)	>100 mD	10–100 mD (eller extra-polerat*)	<10 mD (eller ingen data)	*extrapolerade värden från närliggande borrhål genom samma reservoar
Heterogenietet	Låg N/G >0,4	Medium N/G 0,1–0,4	Hög N/G <0,1	
Portryck	Hydrostatisk eller lägre		Övertryck	
Mäktighet/Net sand	>50 m	15–50 m	<15 m	
Takbergartsegenskaper	**Optimal**	**Osäker**	**Försiktighet tillrådes**	
Mäktighet	>50 m	20–50 m	<20 m	
Förkastningsintensitet	Låg	Moderat	Hög	Metod från MUSTANG
Lateral utbredning	Kontinuerlig	Kontinuerlighet osäker	Ej kontinuerlig	
Multipla takbergarter	Mer än en	Enbart en	Osäker förekomst av takbergart	
Litologi	Homogen ler- eller slamsten, evapo-riter	Kritkalksten (beroende av fysikaliska egenska-per)	Högt innehåll av silt eller sand	
Säkerhet/risk	**Optimal**	**Osäker**	**Försiktighet tillrådes**	
Seismicitet	Låg	Moderat	Hög	
Förorening av grund-vatten	Nej	Osäkert	Ja	
Mogenhet/Datatillgäng-lighet	**Optimal**	**Osäker**	**Försiktighet tillrådes**	
Borrhålsdata	Borrhål genom lagrings-enhet eller fälla	Borrhål genom ekviva-lent geologisk formation	Ingen borrhålsdata	
Seismiska undersökningar	3D seismik	2D seismik yngre än 1970	2D seismik äldre än 1970, eller enbart få data	

Spridning av koldioxid i lagret

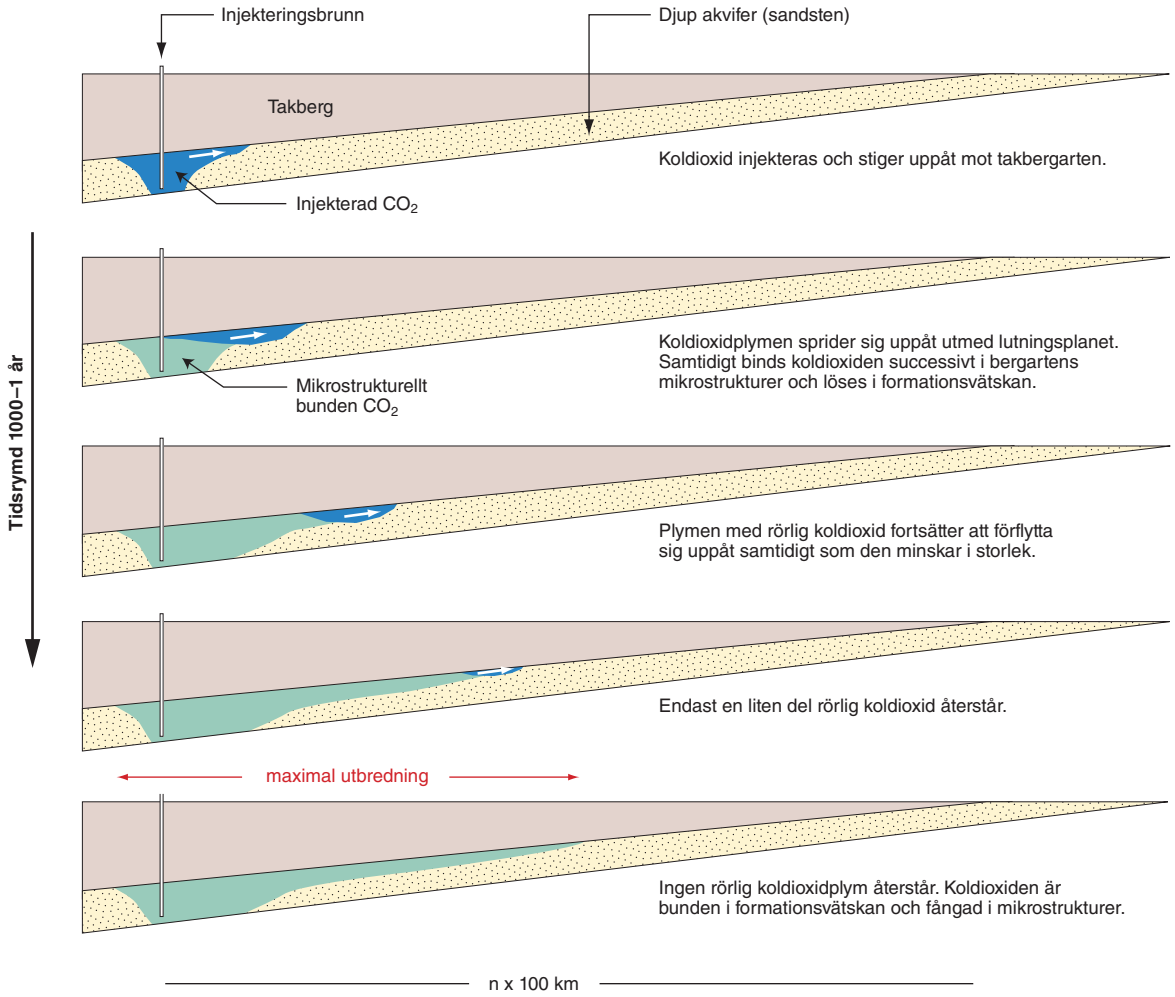
När koldioxid har injekterats i akviferen söker den sig uppåt och ackumuleras i dess övre del. Har akviferen en domformad struktur, som utgör en sluten fälla, blir utbredningen lateralt liten. Är akviferen däremot horisontell i sin övre del, och representerar en så kallad öppen formation, kan utbredningen av koldioxidplymen bli mer lateralt utbredd. Transport av koldioxid i akviferen uppstår när koldioxiden söker sig uppåt i en lutande akvifer.

Lagring i fällor gör det möjligt att lättare kontrollera koldioxidens utbredning i akviferen. Eftersom superkritisk koldioxid har en lägre densitet än formationsvätskan i akviferen stiger den initialt uppåt. Med tiden löses dock allt mer av koldioxiden i formationsvätskan som då blir tyngre och sjunker nedåt i akviferen. Mängden koldioxid i superkritiskt tillstånd under akviferens topp minskar därmed också med tiden. Därför avtar också den strukturella fällans betydelse samtidigt som det även sker en successiv reaktion med berggrunden vilket leder till att koldioxiden mineraliseras i akviferen, se figur 16 (se även fig. 12).

Vid lagring i lutande öppna akviferer med en stor regional utbredning (tusentals kvadratkilometer) kommer den injekterade koldioxiden, på grund av lutningen, att fördela sig och förflytta sig en längre sträcka i akviferen jämfört med om transporten i huvudsak sker i vertikalled, se figur 17. Detta medför att större andel koldioxid kan bindas mikrostrukturellt i akviferen jämfört med lagring i en strukturell fälla. En annan fördel är att den vertikala permeabiliteten, som ofta är lägre än den horisontella, inte



Figur 16. Förhållandet mellan olika typer av koldioxid i en akvifer och deras inbördes förändring med tiden (modifierad från IPCC 2005).



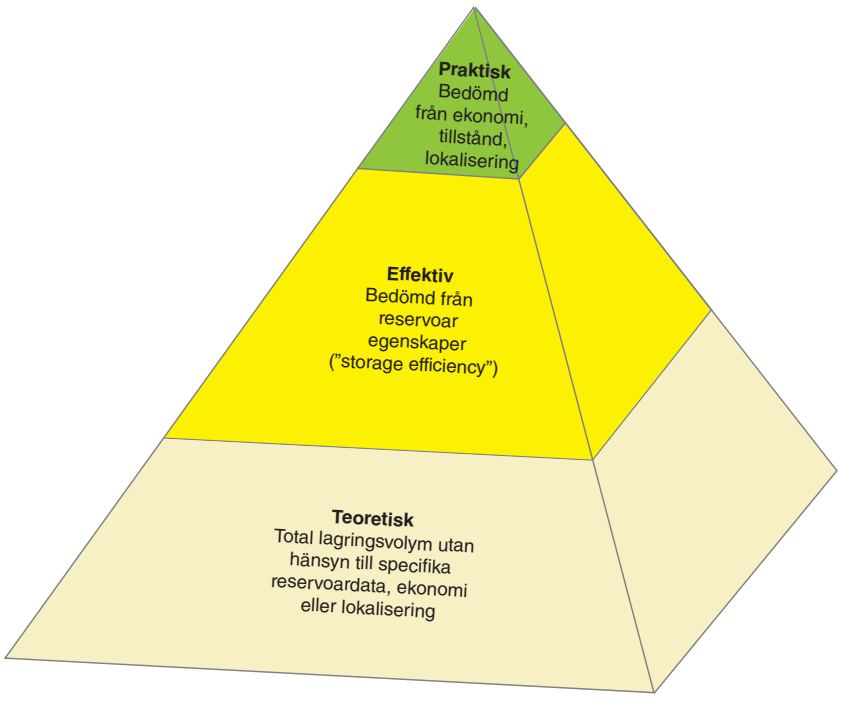
Figur 17. Schematisk illustration av spridningsförloppet vid injektering och lagring av koldioxid i en lutande akvifer (från Erlström m.fl. 2011).

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 akviferer 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 akvifer krävs omfattande modelleringar som beskriver spridnings- och bindningsförlopp.

Bedömningsmodeller för lagringskapacitet

Flertalet utredningar som gjorts de senaste åren har påtalat osäkerheten i att värdera lagringskapaciteten. Detta beror på att det är relativt många variabler som påverkar en sådan värdering. Bedömningarna grundas på hur mycket koldioxid som går att få in i en porös och permeabel akvifer. Tryckförhållanden och kemiska reaktioner i formationen beaktas oftast inte i de första, teoretiska kapacitetsberäkningarna. För mer precisa bedömningar behövs platsspecifika parameterdata och ofta även resultat från hydrotester och injektering. Vid bedömning av lagringskapacitet skiljer man mellan olika faser av så kallad teknisk mognad (baserad på Bradshaw m.fl. 2007). Modellen kan illustreras med en pyramid, se figur 18, indelat i tre faser:

- första fasen (beige) beskriver den *teoretiska* kapacitet där beräkningar för lagringskapacitet enbart utgår från få parametrar och baseras på det totala porutrymmet inom lagringsenheten. Denna fas kallas även för screeningsfasen och är tidspunkten för identifiering av lagringsakviferen.
- andra fasen (gul) beskriver den *effektiva* kapacitet som utöver porutrymme även inkluderar en såkallad lagringsfaktor (eng. *storage efficiency factor,* S_{eff}). Beräkningar för lagringskapacitet utgår från fler parametrar samt mer bearbetad data i karaktäriseringen av hela lagringskomplexet. Genomförande av datorsimuleringar och modelleringar kan leda till nästa fas
- tredje fasen (grön) är när lagringsplatsen är klar för första injektering av koldioxid, i pilotskala. Erfarenheterna från första injektering kan sedan utvecklas för en större demonstrationsanläggning och till slut uppnå mognad för fullskalig säker injektering och lagring av koldioxid.



Figur 18. Mognadspyramid. Vid bedömning av lagringskapacitet inom en lagringsplats leder högre mogenhet (beige till grön) till högre lämplighet för injektering av koldioxid, men samtidig även en minskning av tillgänglig lagringskapacitet (modifierad från Bradshaw m.fl. 2007).

Typen av beräkningar för lagringskapacitet övergår från *statiska* beräkningar i pyramidens botten till *dynamiska* beräkningar i mitten av pyramiden. Nedan följer en beskrivning av de två beräkningsmetoderna. Akviferens porositet, mäktighet, laterala och vertikala utbredning samt homogenitet är avgörande för den grundläggande volymberäkningen. Akviferens permeabilitet och hydrauliska egenskaper samt dess kemiska egenskaper och tryckförhållanden har stor betydelse för möjligheten att injektera och hur mycket av porvolymen som är tillgänglig för lagring.

Statiska beräkningar för lagringskapacitet

Statiska beräkningar för en lagringsenhets kapacitet utgår från teoretiska beräkningar och inkluderar inga datorsimuleringar eller modelleringar. Beräkningarna baseras på akviferens totala porutrymme och grundar sig på lagringsenhetens volym tillsammans med sand net/gross förhållandet, porositeten och koldioxidens densitet vid aktuellt djup. Metoden för statisk beräkning av lagringskapacitet är inte standardiserad, men för svenska sedimentära lagringsenheter och -fällor fungerar metoden från EU GeoCapacity (Vangkilde-Pedersen m.fl. 2009).

Den *teoretiska* lagringskapaciteten är likvärdig med det totala porutrymmet inom lagringsenheten, och tar inte hänsyn till övertryck, vilket kan vara en begränsande faktor, speciellt i slutna akviferer.

Den teoretiska lagringskapaciteten baserad på GeoCapacity definieras vid ekvationen:

$$TH_MCO2 = V \times N/G \times \phi \times \rho CO2r$$

TH_MCO2	teoretiska lagringskapaciteten
V	akviferens eller fällans volym
ϕ	medelporositeten, %
$\rho CO2r$	densiteten för superkritiskt CO_2 på aktuellt djup

Den *effektiva* lagringskapaciteten är den del av lagringsenhetens porutrymme som är tillgänglig och som teoretiskt sett kan uppta koldioxid. Beräkningen för effektiv lagringskapacitet tar hänsyn till en så kallad lagringsfaktor (eng. *storage efficiency factor,* S_{eff}) som bedöms utifrån om beräkningen görs för en strukturell fälla eller för en öppen formation.

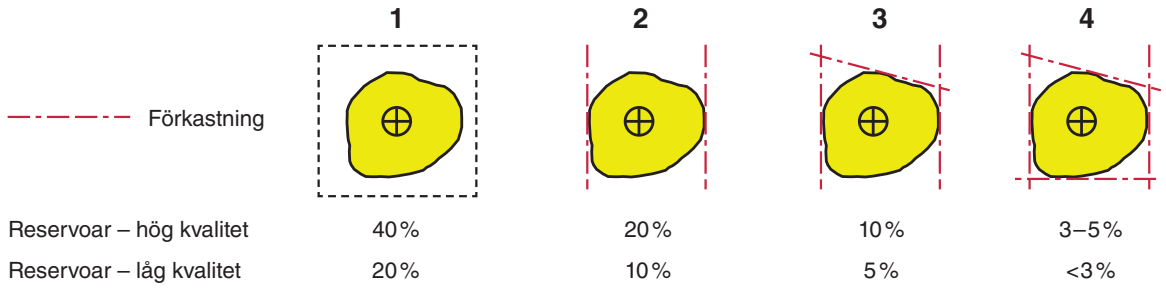
Den effektiva lagringskapaciteten baserad på GeoCapacity definieras vid ekvationen:

$$TH_MCO2 = V \times N/G \times \phi \times \rho CO2r \times S_{eff}$$

S_{eff}	lagringsfaktor (eng. *storage efficiency factor)*

Lagringsfaktorn har ett högre värde i strukturella fällor jämfört med flacka, öppna formationer. Detta beror på att strukturella fällor ofta är bättre undersökta med mer omfattande mätdata. Lagringsfaktorn bedöms till uppemot 40 procent i strukturella fällor, se figur 19, vilket också stöds av resultat från naturgaslagring i fällor med motsvarande karaktär.

Vid beräkningar för lagringskapacitet inom flacka, öppna formationer har USAs Energidepartement (U.S. DOE) utvecklat en metod som bl.a. riktar sig mot salina, öppna formationer, dvs. saltvattenförande sandstensformationer med regional utbredning (Goodman m.fl. 2011). Metoden bygger på volymetriska beräkningar där hänsyn tas till formationsvattnets flöde och undanträngning, vilket bl.a. påverkas av heterogeniteten i akviferen. I öppna formationer gäller olika mekanismer för lagring



Reservoar – hög kvalitet	40 %	20 %	10 %	3–5 %
Reservoar – låg kvalitet	20 %	10 %	5 %	<3 %

Figur 19. Schematisk modell av metod använd i GeoCapacity för bedömning av lagringsfaktorns storlek avseende fällor, beroende på dess grad av öppenhet, definierad utifrån antalet förkastningar (modifierad från Vangkilde-Pedersen m.fl. 2009).

av koldioxid, dessa inkluderar strukturell och stratigrafisk infångning, infångning där koldioxiden är strukturellt rörligt i porutrymmet, kapillär infångning i mikrostrukturer och porer i bergarten (eng. *residual trapping*), upplösning i formationsvattnet samt mineralisering (fig. 9). US-DOE metoden bygger främst på strukturell och stratigrafisk infångning samt infångning där koldioxiden är strukturellt rörlig i porutrymmen. Lagringsfaktorn i US-DOE metoden bestäms utifrån statistiska egenskaper på geologiska parametrar (area, mäktighet, porositet) samt flödesparametrar som representerar olika fysikaliska barriärer som är till hinder för koldioxiden i att uppnå fullständig kontakt med tillgängligt porutrymme inom akviferen. Exempel på fysikaliska barriärer som hindrar koldioxiden i att uppnå kontakt med porutrymme är orörligt (stationärt) formationsvatten, eller litologisk heterogenitet i akviferen som hindrar koldioxiden i att stiga uppåt. För salina akviferer, t.ex. sandsten, har lagringsfaktorer inom US-DOE metoden uppskattads till 0,51–5,4 procent med 50-percentilen på två procent. För uppskattning av lagringskapacitet för de svenska akviferer inom NORDICCS används det enligt denna metodik en lagringsfaktor på två procent.

Dynamiska beräkningar för lagringskapacitet

Dynamiska datorsimuleringar och modelleringar förbättrar den generella förståelsen av koldioxidens beteende inom lagringsenheten och är därmed en uppgradering från statiska beräkningar. Dynamiska modelleringar och simuleringar kan göras med olika metoder och programvaror, men gemensamt är ett krav på tillgängliga data i form av bl.a. borrhålsinformation och seismik. I NORDICCS modellerades två svenska lagringsplatser (Mortensen m.fl. 2016), Faludden och Arnagergrönsanden, efter två olika metoder:

- bassängmodellering, som uppskattar lagringskapaciteten för strukturella och stratigrafiska fällor med användning av SEMI-programvaran (Sylta 2004).
- dynamisk reservoarsimulering, som uppskattar lagringskapaciteten för ett antal infångningsmekanismer inom lagringsenheten genom att modellera koldioxid–vattensystemets dynamiska beteende med hjälp av programvaran ECLIPSE 100 (ECLIPSE 2007).

Båda metoderna baseras på samma fysikaliska parametrar som för statiska beräkningar tillsammans med geografisk digital information om bl.a. akviferytor och djupförhållanden, förkastningar, berggrundskartor och borrhålldata, och batymetriska kartor. Modellerna inkluderar det totala utbredningsområdet för akviferen, och indikerar även hur stor del av koldioxiden som eventuellt kan migrera mot mindre djup utanför lagringsenheten. De dynamiska reservoarmodelleringar för Faludden och Arnagergrönsand beskrivs senare i rapporten i avsnittet *Lagringsmöjligheter i Sverige*.

SEMI är en uppdaterad programvara för bassängmodellering, som är utvecklad för simulering av migration och infångning av kolväten i bassängskala. SEMI-metoden visar hur koldioxiden i akviferen sprids under takbergarten på dess väg mot att infångas i strukturella fällor. Det transporterande lagrets lutning är därmed bestämmande för migrationens riktning. Metoden värderar både mängden av koldioxiden som fångas in i fällorna samt det som fångas in längs med migrationsvägarna. Koldioxidens migration är beroende på förekomst och utbredning av förkastningar, och modellen belyser därför två scenarier, där antingen förkastningsmekanismer vägs in, eller där förkastningar inte ingår.

ECLIPSE 100 är utvecklat för dynamisk reservoarsimulering, och modellerar hela systemet inom akviferen gällande koldioxidens migration och infångning inom både fällor och porutrymme (kapillärt infångande), samt upplösning i formationsvattnet. För konstruktion av reservoarmodeller för akviferna användes programmet Petrel. Reservoarmodellen konstrueras som rutnät där heterogenitet ingår.

Säkerhet och övervakning

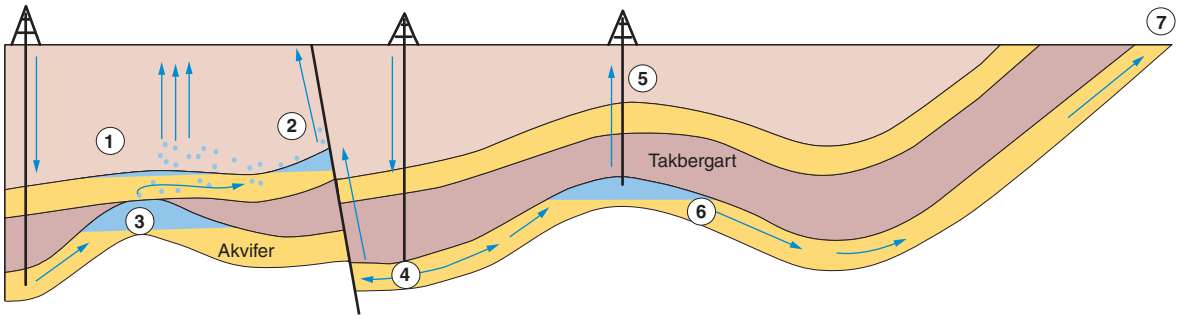
Bedömning av miljö- och hälsorisker vid injektering av koldioxid

Säker hantering och bedömning av miljö- och hälsorisker är en nyckelfråga vid införandet av koldioxidlagring i större skala. Mycket arbete läggs därför på dessa frågor, och det har stor betydelse att frågorna 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. Det har gjorts bedömningar av de hälsorisker som förknippas med lagring och tester med koldioxid i underjordiska saltvattenakviferer, detta 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.

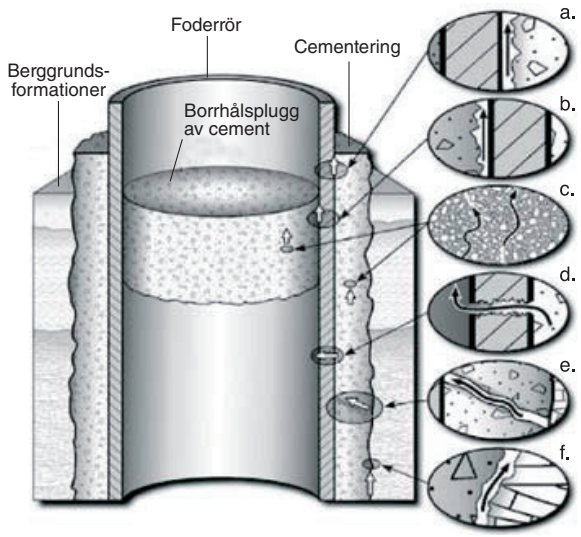
Riskbedömningarna utgår från ett antal fall som illustreras i figurerna 20 och 21 avseende geologi och brunnar. I riskbedömningen ingår såväl identifiering av oönskade händelser som analys och värdering av deras konsekvenser i anslutning till lagringskomplexet, det vill säga akvifer, takbergart och brunnar.



Möjliga läckagevägar och orsaker

1. När gränstrycket för berggrundens hållfasthet överskrids tränger CO_2 upp genom överliggande berggrund	**2.** CO_2 läcker via förkastningar eller sprickzoner	**3.** CO_2 läcker upp i andra lager p.g.a. otät takbergart eller avsaknad av tät takbergart	**4.** Injekterad CO_2 transporteras uppåt, vilket ökar formationstrycket och risken för att läckagevägar uppstår i förkastningar	**5.** CO_2 läcker via gamla brunnar som är dåligt tätade	**6.** Strömningar i akviferen gör att löst CO_2 kan transporteras ut från den slutna strukturen	**7.** CO_2 läcker ut till atmosfären

Figur 20. Potentiella läckagevägar i ett koldioxidlager (modifierad från IPCC 2005).



Figur 21. Potentiella läckagevägar i anslutning till brunnar, **a)** på utsidan av foderrör, i kontaktzonen mellan foderrörsvägg och borrhålscement, **b)** på insidan av foderrör, i kontaktzonen mellan foderrörsvägg och borrhålsplugg av cement, **c)** genom porös och permeabel cement, **d)** genom skadat foderrör, **e)** via sprickor och hålrum i cementen, **f)** i kontaktzonen mellan borrhålscementen och berggrundsformationen (modifierad från IPCC 2005).

Följande oönskade konsekvenser för miljö och hälsa i samband med koldioxidlagring utgör bakgrund för bedömning enligt tabell 4:

1. Gasformig koldioxid letar sig upp till ytliga jordlager eller till markytan. Eftersom gasen är tyngre än luft samlas den i lågt liggande terräng, källare m.m. med ökad risk för såväl människor och djur som växter. En längre tids exponering för halter över två procent leder allmänt till huvudvärk och trötthet. Om halterna koldioxid i luften överstiger 4–5 procent leder det till akuta cirkulationsrubbningar och andningsbesvär (kvävningskänsla) samt yrsel och huvudvärk. Barn och äldre kan påverkas vid även lägre halter. Koncentrationer av koldioxid i luften på mer än 7–10 procent leder till kraftig försämring med kvävning och död som följd (IPCC 2005).
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.

Tabell 4. Exempel på händelser och konsekvenser i samband med koldioxidlagring. Förklaring av konsekvens 1–3 ges i texten ovan.

Händelse		Skede		Konsekvens		
Nr		Injektering	Lagring	1	2	3
Geologiskt system (jfr fig. 20 och 21)						
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 (jfr fig. 21)						
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.

Övervakning av koldioxidspridning

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 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 sikt.

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 akviferen 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. Akviferens temperatur och tryck (för att avgöra koldioxidens tillstånd och egenskaper).

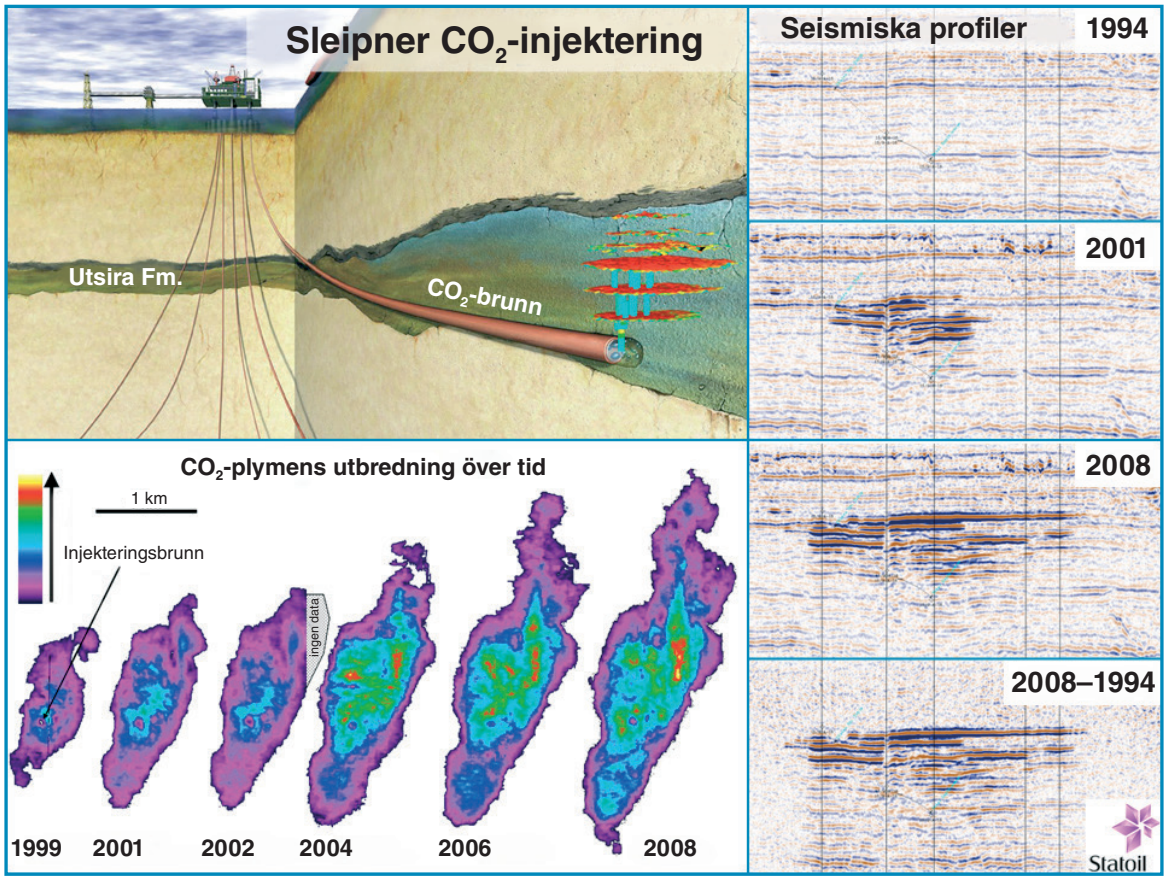
Andra parametrar som kan övervakas är:

1. Andelen löst koldioxid och andelen mineraliseringar i akviferen.
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.

Det pågår en kontinuerlig utveckling av olika geofysiska metoder för att övervaka koldioxidspridning. 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 5 beskriver kortfattat olika övervakningsmetoder. Vanligast är att använda någon typ av seismisk mätning, men övervakning kan även utföras t.ex. genom mätning av tyngdkraft eller elektrisk ledningsförmåga.

Tabell 5. Möjliga metoder för övervakning av olika parametrar.

Parameter	Övervakningsmetod
Lokalisering av koldioxidplym	Reflektionsseismik i 3D och 4D Borrhålsseismik Elektriska och elektromagnetiska metoder Satellitmätning av ytläge och marklutning Tyngskraftsmätning Akvifertryck Provtagning vid brunnshuvud och i akvifer Spårämnen, naturliga och tillsatta
Tidig varning av fel i lager	Reflektionsseismik i 2D och 3D Borrhålsseismik Satellitmätning av ytläge och lutning Tryckmätning i injekteringssbrunn och akvifer
Koldioxidkoncentration och dess variation på markytan	IR-mätning av koldioxidkoncentration Luftprovtagning och analys med gaskromatograf eller masspektrometer Övervakning av naturliga eller tillsatta spårämnen
Injekteringsbrunnars skick, flöden och tryck	Borrhålsloggar inkl. korrosionslogg, ljudlogg, temperaturlogg Tryckmätning vid brunnshuvud och i akvifer Tryckmätning i utrymme mellan foderrör och injekteringstub Flödesmätning av typen strypfläns eller annan tryckfallsmätning Koncentration av koldioxid vid markytan nära injekteringsbrunnen
Löst koldioxid i formationsvattnet eller mineraliserat	Provtagning av formationsvatten och analys av koldioxid (joner, isotoper) Övervakning av naturliga och tillsatta spårämnen
Läckage i förkastningar eller sprickzoner	Reflektionsseismik i 2D och 3D Borrhålsseismik Elektrisk och elektromagnetisk metod Satellitmätning av ytläge och marklutning Tryckmätning i akvifer Provtagning i grundvatten och jorden (omättade zonen)
Grundvattenkvalitet	Provtagning och geokemisk analys av grundvatten 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 Provtagning av gas i marken (omättade zonen) och gasanalys Provtagning för geobotanisk analys Undersökning av biologiskt liv
Mikroseismisk aktivitet	Passiv seismisk mätning



Figur 22. 4-D seismiska övervakningsbilder från koldioxidlagring på Sleipner-fältet i norska Nordsjön. Bilderna till höger är seismiska profiler från injekteringsbrunnen där koldioxidplymens utveckling kan följas från 1994 och fram till 2008. De seismiska profilerna indikerar att det inte råder läckage till markytan. Bilderna längst ner till vänster illustrerar den arealmässiga utbredning av koldioxidplymen som i 2008 hade uppnått en storlek kring 3 km² med fortsatt växt (modifierad från Statoils figur i Halland m.fl. 2014).

Till Sleipner- och Snøhvitfältet i Norge använder man bl.a. 4-D seismik för övervakning av koldioxidplymen, se figur 22, samt gravimetriska metoder bl.a. för uppskattning av lösningsraterna för koldioxiden i formationsvattnet.

Att mäta förändringar i tyngdkraften med gravimetriska metoder kan vara en lämplig kompletterande övervakningsmetod till seismik. Metoden kan användas för tyngd- och volymberäkningar av koldioxiden i akviferen, och enligt SACS-projektet skulle även den kunna användas som varningssystem, i fall exempelvis stora mängder koldioxid bryter genom takbergarten. Gravimetriska mätningar utförs normalt på markytan men kan även utföras på havsbottnen, vilket exempelvis är fallet kring Sleipnerfältet.

Koldioxid som lagras i en akvifer förändrar berggrundens elektriska ledningsförmåga, något som kan mätas med flera olika metoder. I samband med projektet CO2SINK användes såväl borrhålsbaserade som markbaserade mätsystem för att kontinuerligt följa den injekterade koldioxidens utbredning.

Det är generellt både enklare och mindre kostsamt 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. Valet av övervakningsmetod är alltså till stor del en kostnadsfråga, men styrs även av andra faktorer, exempelvis tillgång till borrhål. Med ett bra övervakningsprogram har man möjlighet att upptäcka, och därigenom förebygga, eventuellt läckage från akviferen innan koldioxiden hinner migrera upp till havsbottnen eller markytan.

LAGRINGSMÖJLIGHETER I SVERIGE

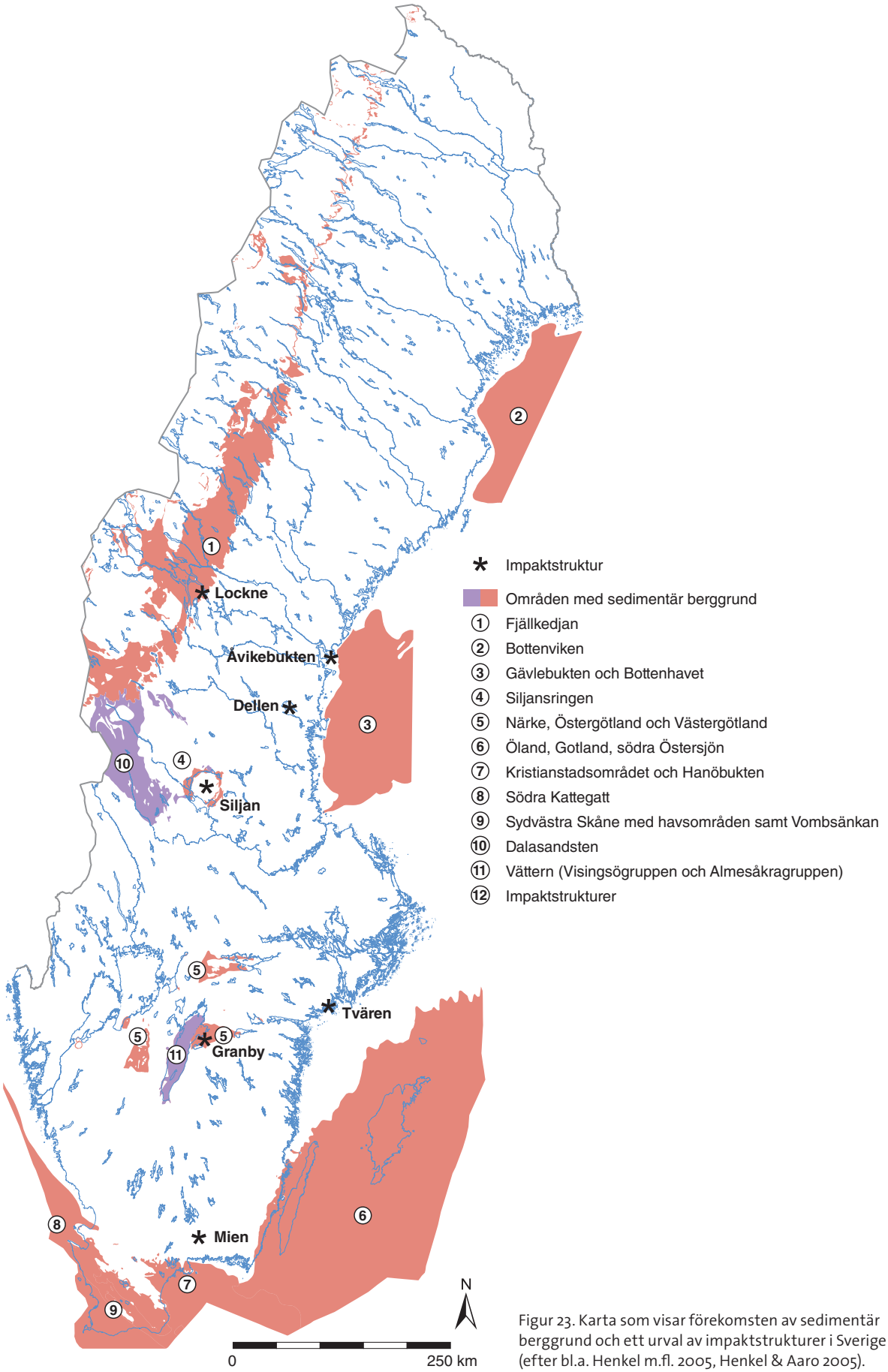
En övergripande inventering och bedömning av möjligheterna till geologisk lagring av koldioxid i Sveriges berggrund presenteras i en SGU-rapport (Erlström m.fl. 2011). I denna redovisas utifrån ett antal krav och förutsättningar som ställs på berggrunden för att lagring ska kunna vara möjligt att genomföra (tabell 6). Grundläggande i den tidigare analysen har varit en bedömning av var det kan finnas lämpliga djupa akviferer i den sedimentära berggrunden. Eftersom Sveriges berggrund domineras av prekambriskt kristallint urberg är antalet områden som kan vara intressanta begränsade till främst södra Östersjön och sydvästra Skåne. Här förekommer tillräckligt mäktiga lagerserier som innehåller djupt liggande sandstensformationer (akviferer) som överlagras av lämplig takberggrund. Detta tillsammans gör att de kan anses lämpliga kandidatområden för lagring av koldioxid.

I den tidigare rapporten har förutom områden med sedimentär berggrund även bedömningar om eventuell möjlighet till lagring i anslutning till impaktstrukturer (fig. 23) och mineralisering i basalter bedömts. Sammantaget är slutsatsen att dessa inte kan användas för lagring på grund av främst begränsade lagringsvolymer och osäkerheter rörande tillräckligt täta takbergarter. För en mer detaljerad redovisning angående bedömningen av de områden som visas i figur 23 hänvisas till texten i Erlström m.fl. (2011). I den här rapporten redovisas en uppdatering av kunskapsläget rörande de identifierade områdena i södra Östersjön och i Skåne. Främst baseras uppdateringen på ny information från NORDICCS-projektet (Mortensen 2016), Bastor-projektet (Elforsk 2014), SGU-rapporten 2014:26 (Erlström m. fl. 2014) och vetenskapliga publikationer (t.ex. Sopher m.fl. 2014, 2016) samt pågående intern FoU verksamhet.

I Sverige har nio potentiella lagringsenheter identifierats med varierande kvalitet och lagringskapacitet (Erlström m.fl. 2011, Mortensen 2014, Elforsk 2014, Sopher m.fl. 2014). Områdena med möjlighet till geologisk lagring av koldioxid fördelar sig mellan tre regioner: sydöstra Östersjön, sydvästra Skåne och södra Kattegatt. Samtliga lagringsenheter finns i djupa akviferer och flertalet sträcker sig även utanför svensk ekonomisk zon. Resultat från nyare studier presenteras för lagringsakviferer och takbergarter i sydöstra Östersjön och sydvästra Skåne. Inga nyare undersökningar avseende koldioxidlagring för södra Kattegattområdet har utförts och den tidigare beskrivningen (Erlström m.fl. 2011) inkluderas därför i denna rapport.

Tabell 6. Sammanställning av de värden på krav och förutsättningar som använts för inventering och bedömning av områden som kan vara intressanta för koldioxidlagring i Sverige

Krav , förutsättning	Värde
Lagringskapacitet	>100 Mt CO_2
Djup	800–2 500 m
Akviferens mäktighet	>20 m
Porositet	>10 %
Permeabilitet	>100 mD
Temperatur	>31,1 °C
Tryck	>73,9 bar
Formationsvätskans salinitet	Cl^- >1 000 mg/l
Takberggrundens mäktighet	>100 m



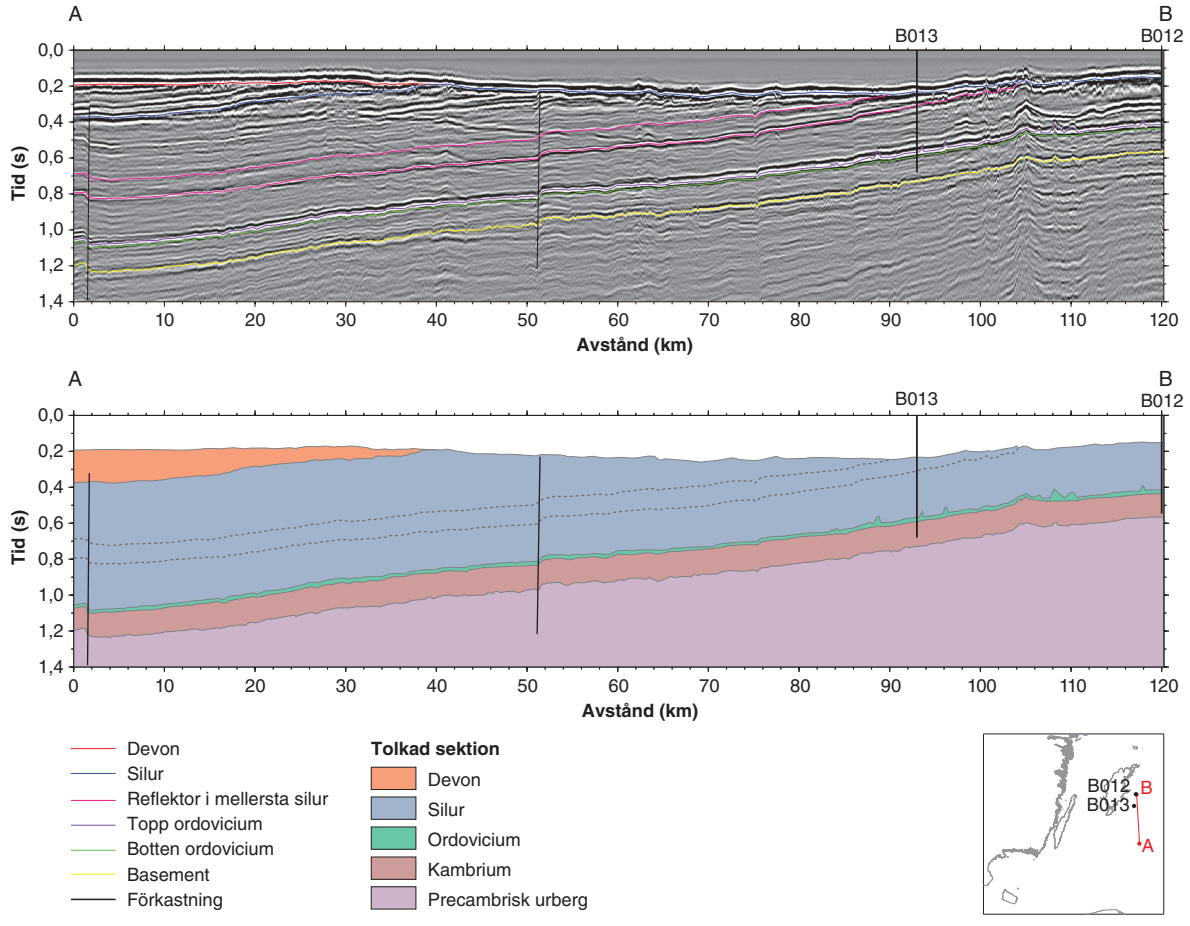
Figur 23. Karta som visar förekomsten av sedimentär berggrund och ett urval av impaktstrukturer i Sverige (efter bl.a. Henkel m.fl. 2005, Henkel & Aaro 2005).

Geologiskt underlagsmaterial

Seismik

Reflektionsseismiska mätningar är den vanligaste geofysiska metoden vid undersökningar av sedimentär berggrund och den används i stor utsträckning för olje- och gasprospektering. De äldre seismiska mätningarna är vanligtvis 2D-mätningar, dvs. mätningar utförda längs linjer, vilka resulterar i seismogram som visar vertikala tvärsnitt av berggrundens akustiska egenskaper. Ett exempel på tolkade seismogram från södra Östersjön visas i figur 24. Numera är det vanligt att använda mer omfattande 3D-mätningar, vilket resulterar i att en volym av berggrunden kan avbildas. Vid seismisk övervakning av injekterad koldioxid är det 3D-seismik med regelbundna återkommande mättillfällen med samma utförande som är aktuella. Bra exempel på sådana mätserier är de som utförts inom koldioxidlagringsprojektet i Sleipnerfältet utanför Norge (Chadwick m.fl. 2010).

För Sveriges vidkommande utfördes under främst 1970-talet en omfattande prospektering efter olja och gas i områden med sedimentär berggrund. Oljeprospektering AB (OPAB) utförde under perioden omfattande seismiska mätningar av berggrunden i Östersjön, Kattegatt och Skagerrak samt på land i Skåne och på Gotland (fig. 25). Inom vissa områden ligger mätlinjerna mycket tätt, exempelvis sydost om Gotland samt i yttre delen av Hanöbukten, se figur 26. Enstaka seismiska mätprofiler utfördes även i Bottenhavet samt i Siljansområdet. Mätningarna har normalt fullt tillräcklig djupkänning och kvalitet för att vara användbara som ett underlag för en första bedömning av berggrundens uppbyggnad och lämplighet avseende koldioxidlagring. Liknande mätningar har också utförts av andra bolag,

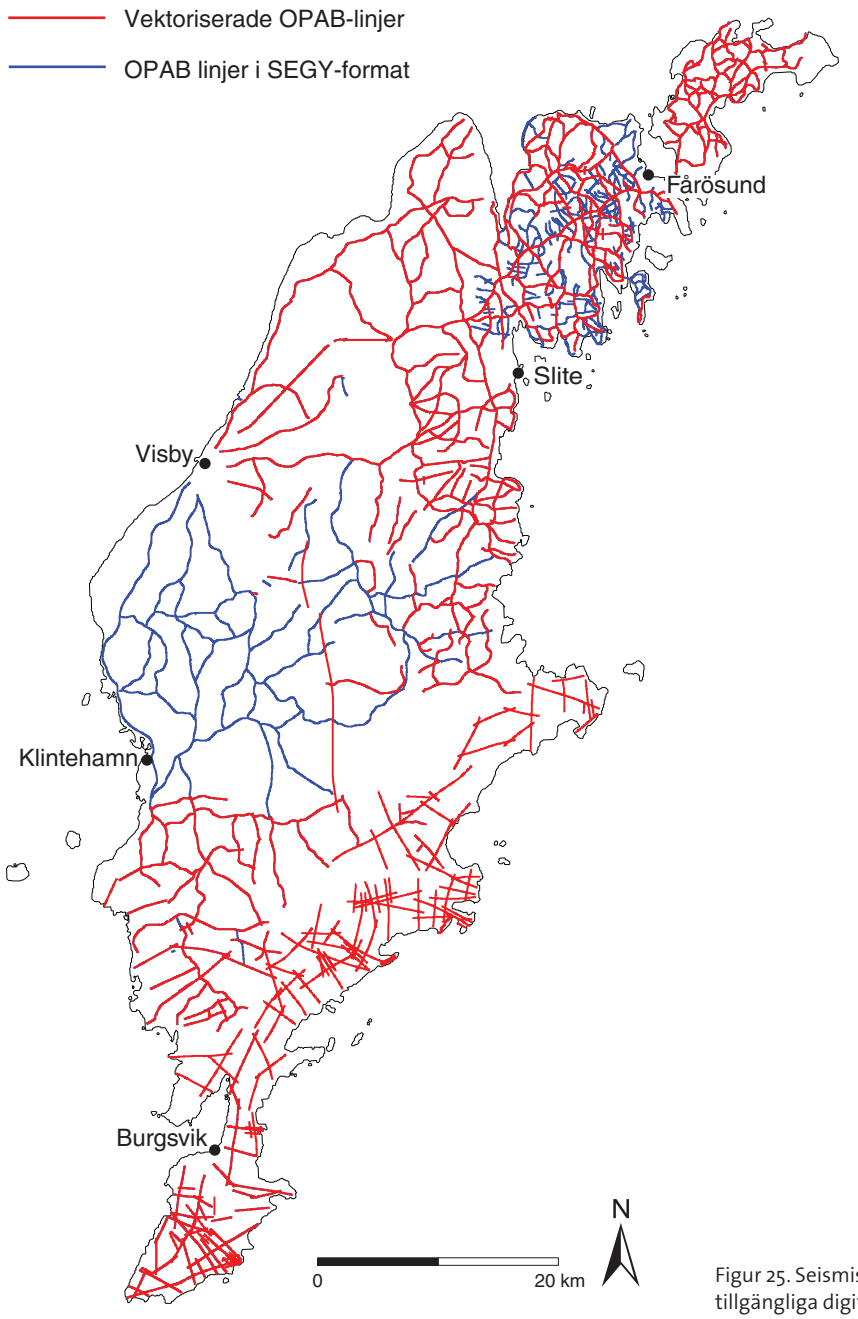


Figur 24. Exempel på seismisk profil med tolkning från södra Östersjön (framställd av Daniel Sopher, Uppsala Universitet).

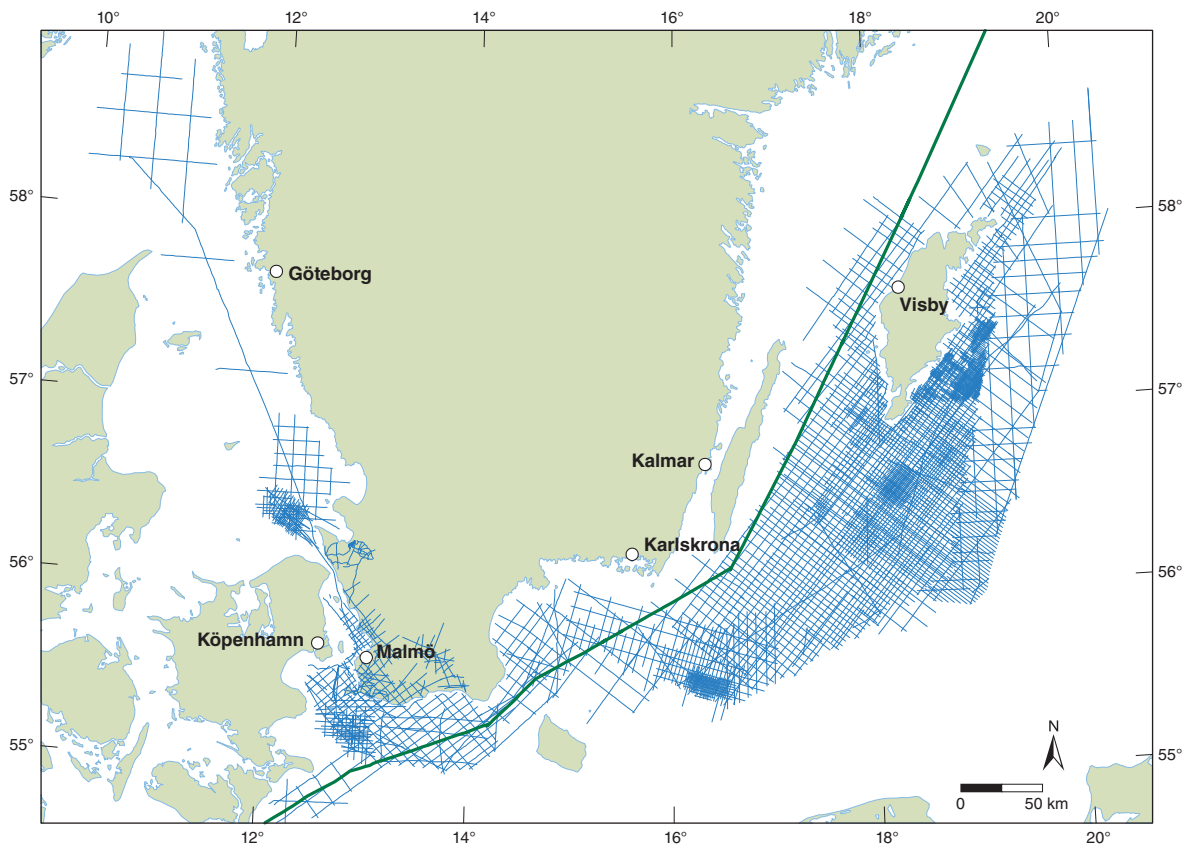
exempelvis de mätningar som utfördes av SECAB i södra Kattegatt och söder om Trelleborg–Falsterbohalvön under slutet av 1980-talet.

Data från OPABs seismiska mätningar förvaltas idag av SGU. En hel del av detta material finns endast som inskannat material i rasterformat. För merparten finns dock även digital data i format som gör det möjligt att med modern programvara göra nya bearbetningar av rådata. En studie från Uppsala universitet har visat att det med ny metodik är möjligt att höja kvaliteten, vilket möjliggör bättre tolkningar av berggrundens uppbyggnad (Sopher & Juhlin 2013, Sopher m.fl. 2016). Deras studie har även visat att rasterfilerna kan omvandlas till ett dataformat som gör det möjligt att även höja kvaliteten på dessa.

I slutet av 1980-talet utfördes djupseismiska marina mätningar inom BABEL-projektet (Meissner m.fl. 1993, 1996) från Kielbukten till Bottenviken. Linjen går bland annat genom Hanöbukten och området mellan Öland och Gotland (fig. 26). Mätningarna var huvudsakligen inriktade på djupa



Figur 25. Seismiska linjer på Gotland. Blå linjer finns tillgängliga digitalt, röda finns som rasterbilder.



Figur 26. Karta som visar seismiska mätningar i södra Sverige. De blå linjerna markerar OPABs och SECABs mätningar, den kraftigare gröna linjen markerar BABEL-linjens sträckning (Meissner m.fl. 1993, 1996).

strukturer (ned till övre manteln) men BABEL-profilen ger även en god seismisk bild av den relativt ytligt liggande sedimentära berggrunden.

Förutom dessa data finns mätningar gjorda från mitten av 1960-talet till slutet av 1990-talet av Stockholms universitet där de senaste utfördes i samarbete med Tartu universitet i Estland. Dessa undersökningar täcker stora delar av södra Östersjön och ger värdefull information om den övre delen av den sedimentära berggrunden och bottensedimentens strukturella uppbyggnad. Djupkänningen är till skillnad från OPABs mätningar endast några hundratal meter. Flera arbeten har publicerats med resultat och tolkningar av dessa data (t.ex. Flodén 1981, Flodén m.fl. 1995, Tuuling & Flodén 2000, Bjerkéus & Eriksson 2001). I forskningssyfte har dessutom ny 2D-seismik samlats in under 2016 av Hamburgs universitet utmed en mätlinje som går från havsområdet söder om Ystad, genom Bornholmsgattet, tvärar Hanöbukten och södra Östersjön. Linjen sträcker sig vidare upp öster om Gotland där den viker av rakt söderut. I samarbete mellan Uppsala och Hamburgs universitet kommer ytterligare liknande seismiska undersökningar söder och norr om Gotland att utföras under 2017 och 2018.

I samband med Stockholms universitets mätningar utfördes 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 mäktighet (Wannäs 1989), liknande mätningar har även utförts i Östersjön (Flodén 1981) samt i Vättern (Flodén m.fl. 1984).

SGU utför även kontinuerligt seismiska mätningar till havs primärt med inriktning på de kvartära avlagringarna. Mätningarna, som har maximalt ca 100 m penetration, kan användas 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. Dessa seismiska mätningar kan inte användas för kartläggning av lagringsberggrunden på större djup men kan ge värdefull information om de ytliga bottenförhållandena. Detta kan röra sig om identifikation av ytliga förkastningszoner eller andra strukturella bottenförhållanden som är av vikt för riskbedömning av läckagevägar. Den ytliga informationen kan även utgöra ett underlag för planering, placering och design av övervakningssystem.

Borrningar

Framför allt i samband med olje- och gasprospekteringen i Sverige har sedan mitten av 1900-talet har främst OPAB och SGU utfört ett stort antal djupborrningar utförts på Gotland, Öland, Skåne och i södra Östersjön.

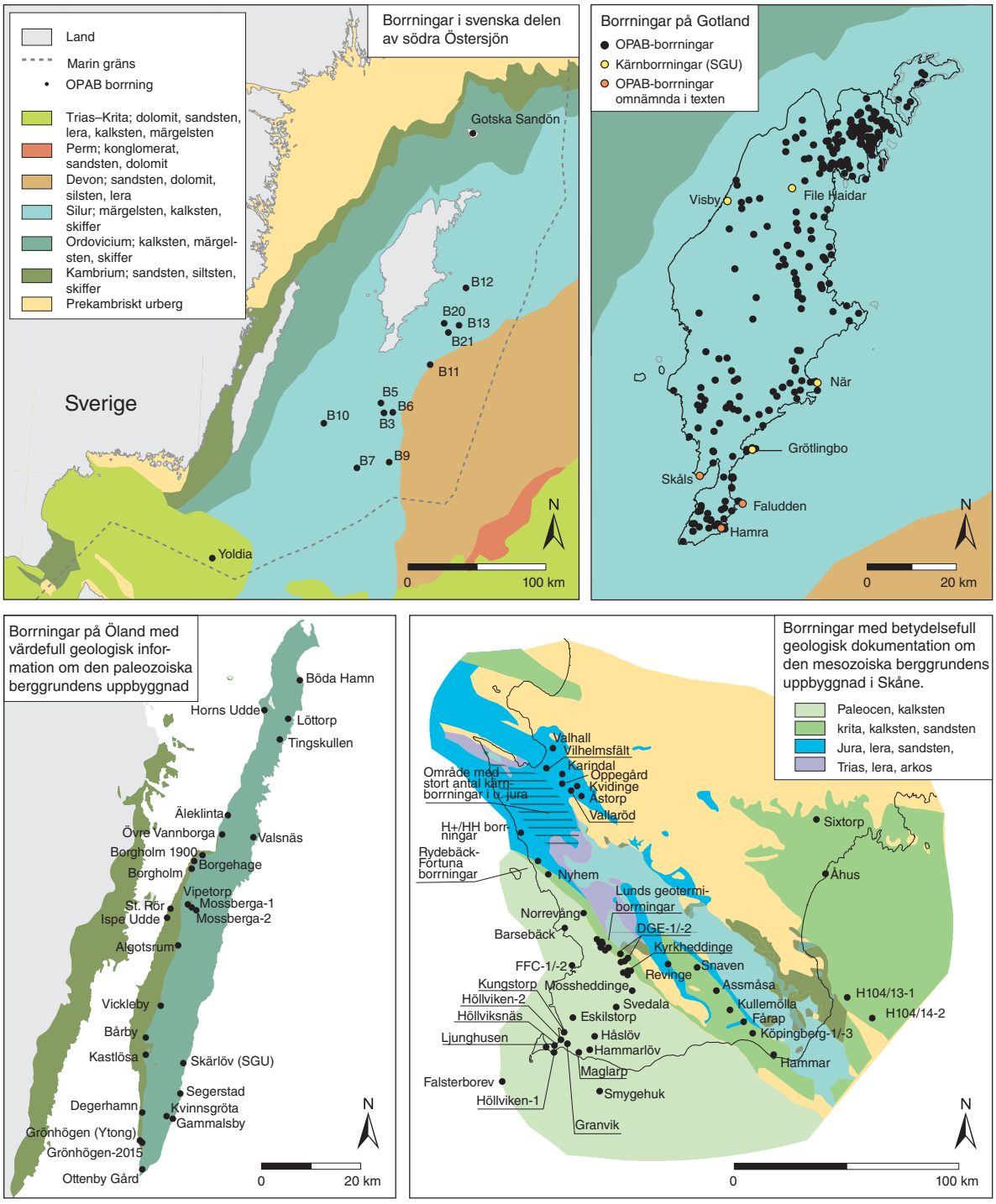
Från 1930-talet fram till slutet av 1980-talet pågick kolväte- och saltprospektering i sydvästra Skåne. De första djupa borrningarna (Höllviken-1, -2, Trelleborg-1, Östratorp-1, Svedala-1 och Ljunghusen-1) gjordes på den skånska sydkusten mellan 1940 och 1950 av SGU. Förutom dessa borrades 1947 Granvik-1 av Rederi Nordstjernan AB. SGU fick 1967 ytterligare ett uppdrag att genomföra en mindre kampanj med borrningar och geofysiska mätningar för att undersöka och bedöma förekomst av kolväten i den svenska berggrunden. Undersökningar genomfördes i Helsingborg-Ängelholmsområdet, Centralskåne, Sydvästskåne, Ystadsområdet och på Gotland samt i Östersjön sydost om Gotland, se figur 27. Områdena med sedimentär berggrund i Bottniska viken och i Bottenhavet bedömdes som ointressanta för olje- och gasprospektering.

SGUs arbeten resulterade 1968 i en bedömning att de geologiska förutsättningarna för större fyndigheter inte är speciellt gynnsamma i Sverige (Anderegg m.fl. 1968). I rapporteringen påtalas att störst potential finns i den paleozoiska berggrunden i södra Östersjön. Fynd av gas och olja i den kambriska sandstenen och i ordoviciska rev (så kallade *mounds*) i borrhål på Gotland (Grötlingbo-1 och När-1) var de starkaste indikationerna på förekomst av både moder- och reservoarbergarter i den paleozoiska berggrunden i södra Östersjön. Även mindre gasfynd i borrningar i Ängelholmsområdet och runt Ystad gav indikationer som kunde vara intressanta att följa upp med fortsatta undersökningar. I slutet av 1960-talet övertog Oljeprospekterings AB (OPAB) rollen som prospektör av olja och gas i Sverige. Under 1970-talet inledde de en omfattande prospekteringskampanj.

Förutom geofysiska undersökningar borrades ett stort antal djupa borrhål på Gotland, Öland och i Skåne. Även några borrhål i Siljansringen gjordes. Totalt borrade OPAB 241 prospekteringshål och produktionshål för olja på Gotland. Produktion skedde i 18 borrhålskluster på norra och södra Gotland. Gotlandsolja AB övertog 1987 verksamheten och ytterligare 82 borrhål borrades på geofysiskt indikerade revstrukturer i den ordoviciska kalkstenen.

I södra Östersjön utförde OPAB totalt 11 djupa borrhål i den paleozoiska berggrunden med fokus på att undersöka den kambriska sandstenens potential som reservoar för olja och gas. I ett av borrhålen, B9, observerades, i samband med borrning och tester, gas i den porösa kambriska Faluddensandstenen på ca 900 m djup. I Hanöbukten borrades två djupa borrningar i den södra delen på 1970-talet samt Yoldia-1 i den yttre delen av Hanöbukten 1987.

I Skåne borrade OPAB ett femtontal djupa borrhål som samtliga inte kunde påvisa någon förekomst av olja eller gas. SECAB utförde även en djupborrning vid Köpingberg, öster om Ystad men inte heller den gav indikationer på olja eller gas. I Skåne har även ett antal geotermiborrningar utförts i Malmö-Lundområdet som ger viktig kompletterande information om de djupgeologiska förhållandena. FFC-1 borrningen i Malmö har t.ex. utgjort ett av de viktigaste typområdena för CO_2-modellering utförd inom Mustang-projektet (Tian m. fl. 2016).



Figur 27. Översiktskartor över borrningar i sydöstra Östersjön, på Gotland, på Öland och i sydvästra Skåne.

Den geologiska informationen från dessa borrningar är av mycket varierande kvalitet och omfång. Eftersom de inte utförts med syfte att undersöka berggrundens lämplighet avseende koldioxidlagring saknas därför ofta specifik information för detta ändamål. Normalt sett finns dock en relativt god dokumentation om förekommande bergarter och stratigrafi i borrhålsrapporteringen. Merparten av dessa beskrivningar är dock baserade på borrkax som inte lämpar sig för någon mer detaljerad analys av berggrundens fysikaliska egenskaper. Borrkärnor finns i begränsad omfattning och främst från

äldre kärnborrningar som SGU utförde för drygt 60 år sedan och från de första av OPABs borrningar på Gotland. På Öland och Gotland är det borrningarna Segerstad, Grötlingbo, När, Visby och File Haidar som i stort sett utförts med kontinuerlig kärnborrning. Dessa förvaras av SGU i Eggebyholm och utgör idag ett viktigt referensmaterial vilket gör att det inte är möjligt med ytterligare analyser, undantaget passiva mätningar och okulära beskrivningar.

I Skåne finns kärnmaterial från borrningarna Höllviken-1, -2, Ljunghusen-1 och Svedala-1 som även det finns förvarat i Eggebyholm och på samma sätt utgör, förutom att det är gammalt material, viktigt referensmaterial.

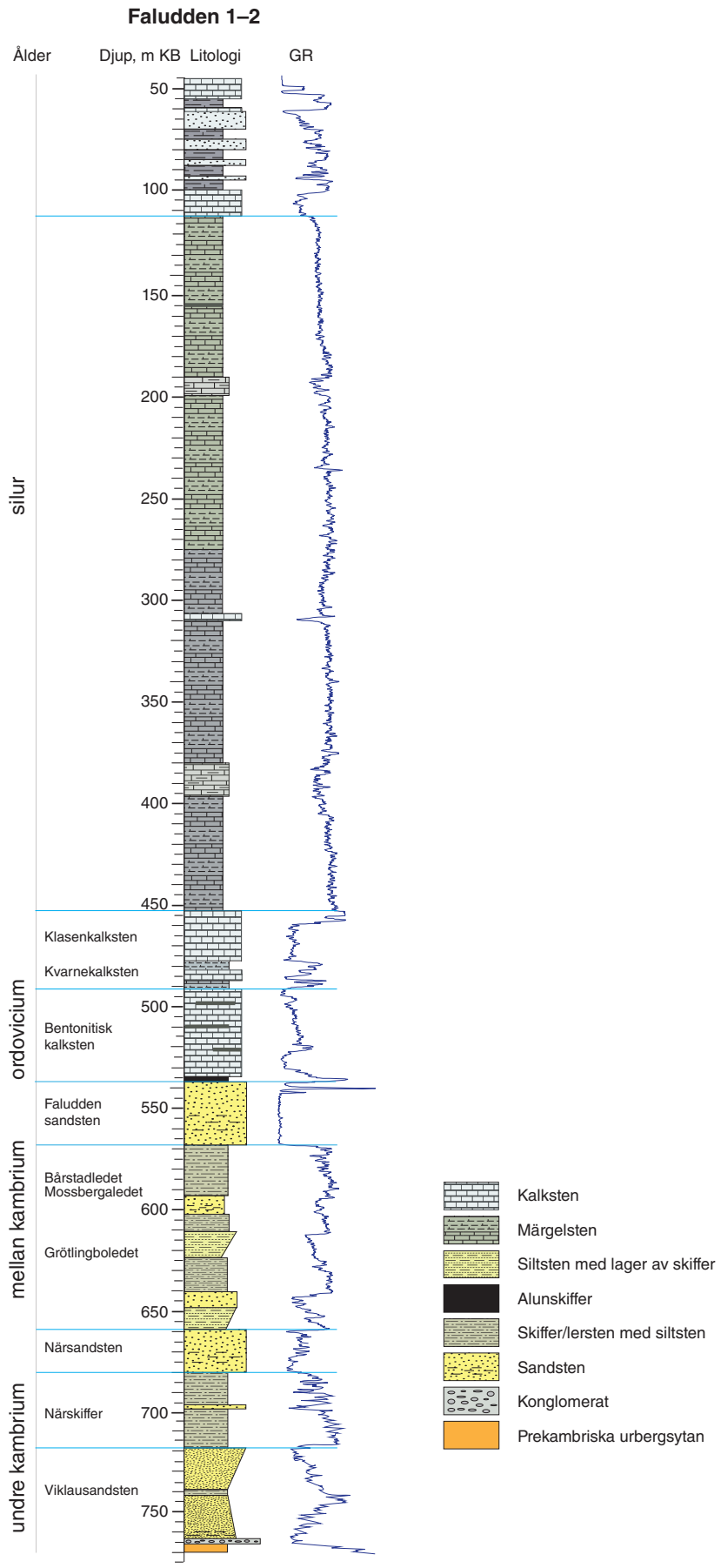
OPAB utförde i vissa av sina borrningar på Gotland och i södra Östersjön även kärnprovtagning över vissa intervall. Merparten av kärnintervallen på Gotland faller inom den ordoviciska kalkstenssekvensen men en del finns även i den kambriska Faluddensandstenen, speciellt i borrningar på södra Gotland.

Förutom beskrivningar av borrkax och i viss mån kärnbeskrivningar finns oftast någon form av geofysiska borrhålsmätningar. Dessa ger kompletterande information till bergartsbeskrivningarna av borrkax och då främst avseende lagergränser och i viss mån data om porositet och densitet. De är även betydelsefulla underlag för en korrelation av berggrundsavsnitt mellan borrhål.

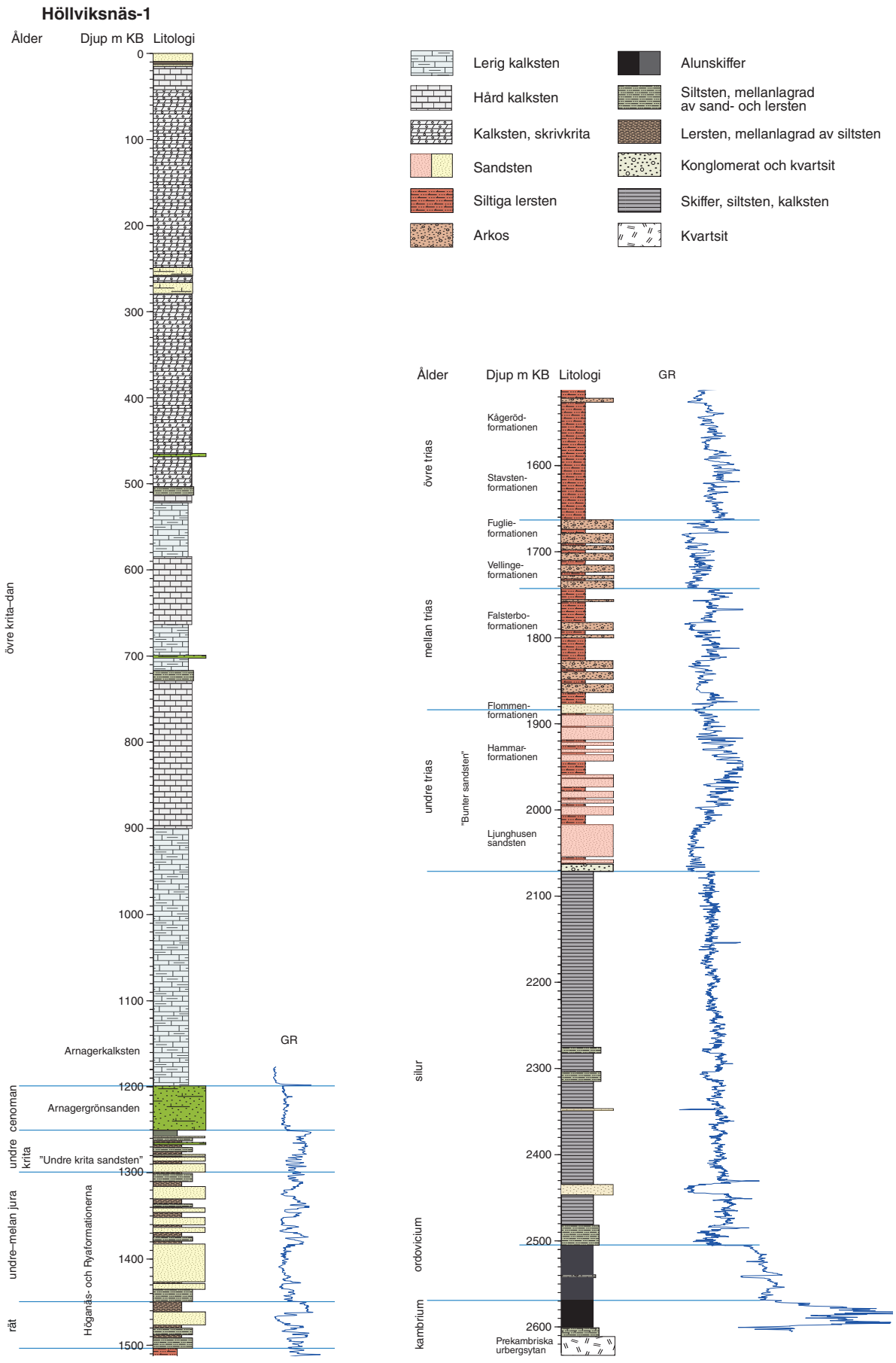
I figur 28 och 29 visas exempel på generaliserade litostratigrafiska loggar från olika borrningar i sydöstra Östersjönrespektive sydvästra Skåne .

Förutom bergartsbeskrivningar och borrhålsgeofysik finns det i begränsad omfattning empiriska mätresultat av porositet, permeabilitet, temperatur, bergspänningar, formationstryck, salthalt, hydraulisk konduktivitet, injektivitet och kemisk uppbyggnad från dessa områden. Dessa faktorer är avgörande för en bedömning av möjligheten till koldioxidlagring. I de fall det finns resultat är de oftast relaterade till reservoarberggrunden (sandstenslagren). Mätresultat avseende takberggrundens fysikaliska egenskaper är i stor sett obefintliga. Viss kompletterande provtagning och analys av befintligt kärnmaterial är möjlig att genomföra, men eftersom materialet är så pass gammalt kan inte sekundära förändringar av materialet uteslutas, t.ex. saltutfällningar, uttorkning, oxidering, vilket kan påverka analyserna.

För att kunna bekräfta lagringsmöjligheten, t.ex. i södra Östersjön, krävs därför kärnborrning och hydrauliska tester där fokus ligger på analys och mätning av parametrar som syftar till att ge svar på de speciella frågeställningar som finns rörande koldioxidlagring. SwedestoreCO2-projektet har t.ex. föreslagit borrning och tester på södra Gotland för att förbättra bedömning av lagringsmöjligheter i södra Östersjön.



Figur 28. Generaliserad litostratigrafisk logg från sydöstra Östersjön, baserad på borrningarna Faludden-1 och -2.



Figur 29. Generaliserad litostratigrafisk logg från sydvästra Skåne, baserad på borrningen Höllviksnäs-1.

Lagringsmöjligheter i sydöstra Östersjön

Den sedimentära berggrunden i sydöstra Östersjön består av en paleozoisk lagerföljd med en kambrisk undre del, en mellanliggande ordovicisk del samt en silurisk övre del. I de mer distala delarna mot sydöst överlagras den kambrosiluriska berggrunden av bergarter av devon ålder.

Berggrunden stupar svagt (mindre än 1 °) åt östsydöst vilket medför att successivt yngre berggrund bildar berggrundsyta i riktning mot den baltiska delen av Östersjön (fig. 30). Av den geologiska kartan (fig. 30) framgår att kambriska bergarter bildar berggrundsyta i västligaste delen av Östersjön (Öland) medan bergarter bildade under devon bildar berggrundsyta i sydöstra delen av södra Östersjön. Mäktigheten på hela den sedimentära lagerföljden är i storleksordningen 1 000–1 500 m i den östra delen av utbredningsområdet medan den i borrningar på norra Öland endast uppgår till 140 m. På Öland är delar av den kambriska lagerföljden känd från berggrundsblottningar, medan den kambriska lagerföljden på Gotland endast är känd från borrningar och förekommer på mer än 250 m djup.

Den kambriska till ordoviciska lagerföljden i sydöstra Östersjön bildades under relativt stabila tektoniska förhållanden i den Baltiska bassängen, se figur 31, 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 berggrundens uppbyggnad har sitt ursprung i förändringar i avsättningsmiljö, till exempel avståndet till kusten, utseendet på flodmynningar och deltan, vattendjup, vattenströmmar och vågor.

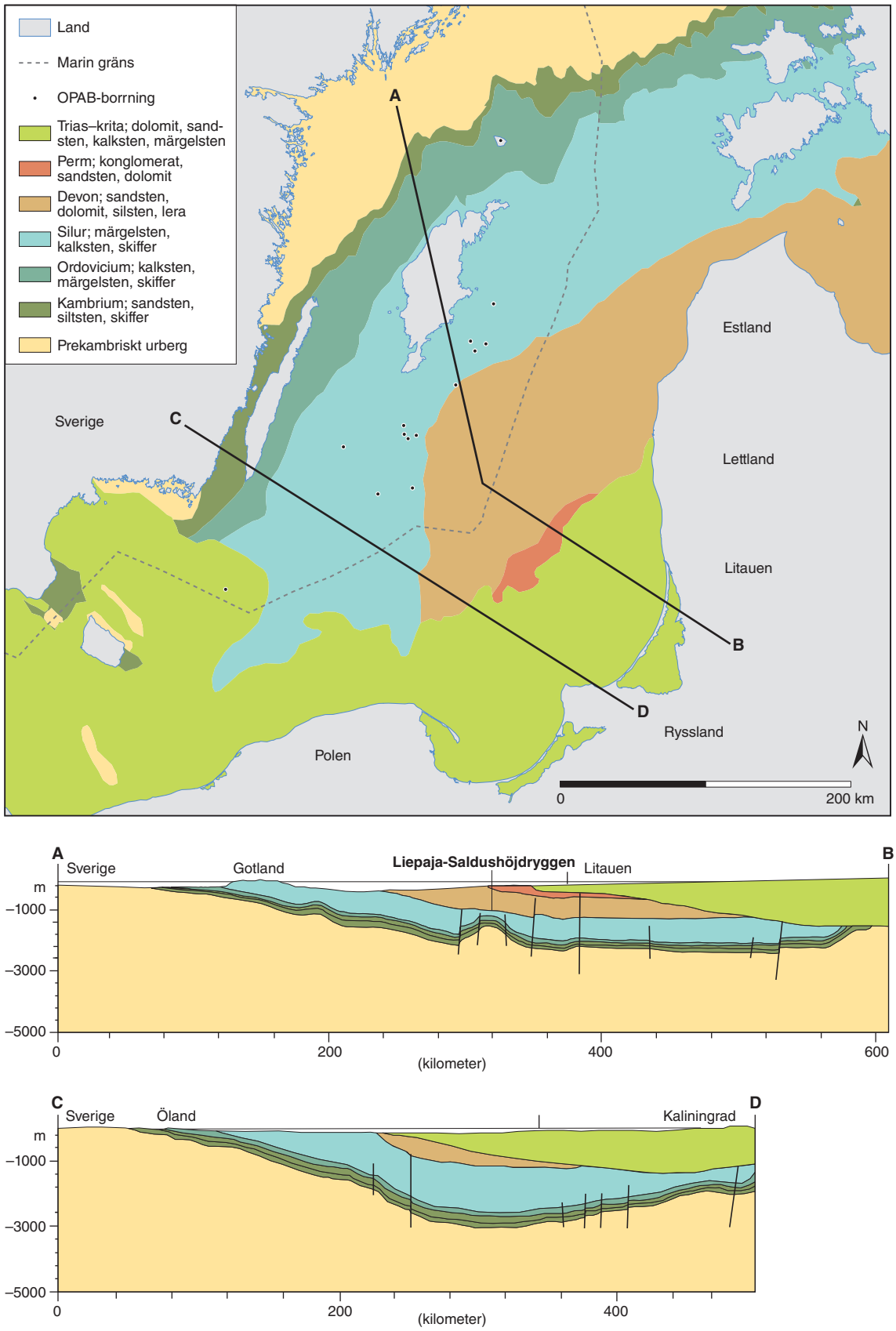
Tre potentiella lagringsenheter har identifierads i sydöstra Östersjön, alla inom den kambriska lagerföljden. Enheternas namn relaterar till de stratigrafiska avsnitt de härrör ifrån, se figur 32:

- Faludden (mellan kambrium)
- När (undre kambrium)
- Viklau (undre kambrium).

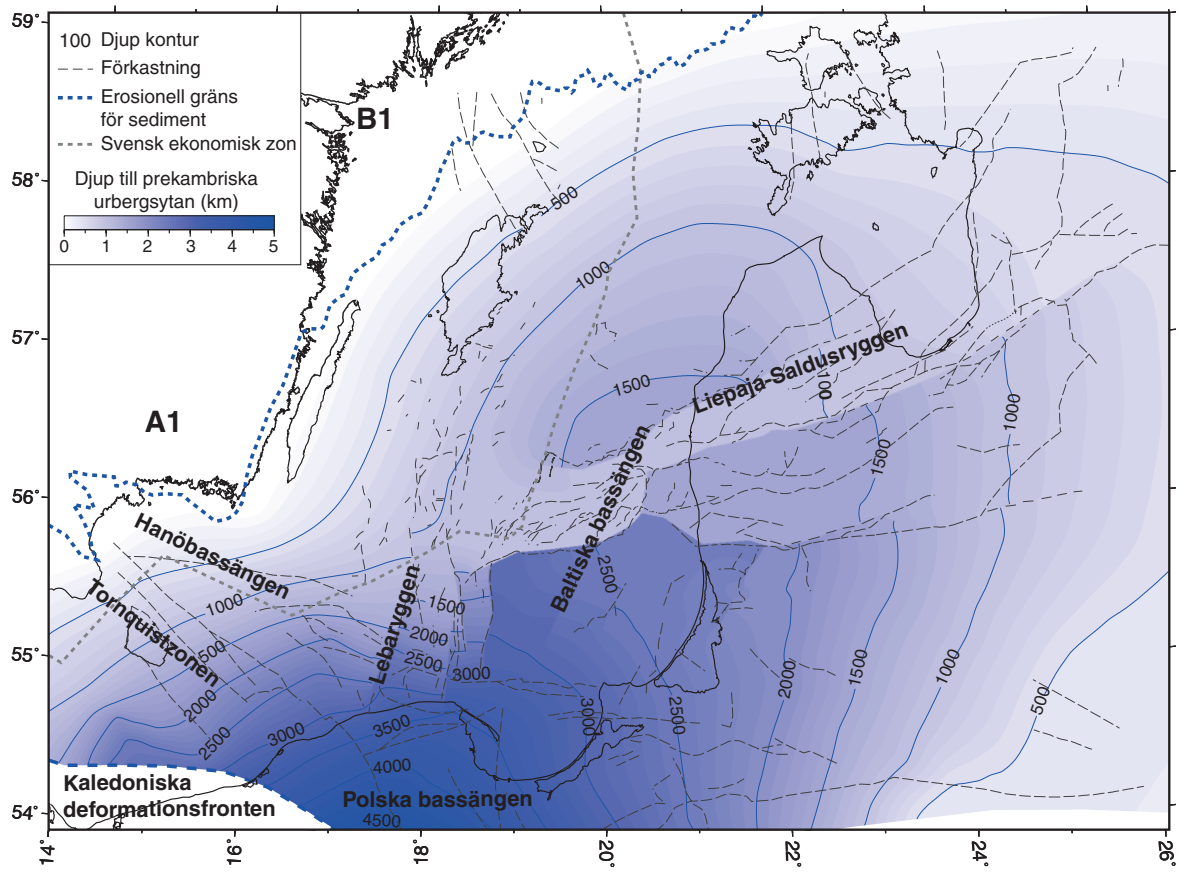
Inom och i anslutning till svensk ekonomisk zon mot sydöst finns även en strukturell fälla, den så kallade Dalders-strukturen vilken samtliga tre enheter är en del av. Lagringsenheterna och den strukturella fällan tillhör två stratigrafiska intervall från kambrisk tid, File Haidarformationen och Borgholmformationen, se figur 32. De tre lagringsenheterna, och den strukturella fällan, förekommer även utanför svensk ekonomisk zon. När det gäller koldioxidlagring, beskriver denna rapport enbart de delar som ligger inom svenskt territorium.

En reviderad beskrivning av den kambriska lagerföljdens indelning av Nielsen & Schovsbo (2007) ligger till grund för beskrivningen av den kambriska lagerföljden, se figur 32.

I den svenska delen av sydöstra Östersjön består den kambriska lagerföljden av File Haidarformationen (undre kambrium), Borgholmformationen (undre kambrium till mellersta kambrium) och Alunskifferformationen (mellan kambrium till ordovicium). File Haidarformationen och Borgholmformationen domineras av lerstenar, slamstenar och siltstenar. I denna lagerföljd förekommer också ett antal sandstenslager, oftat med stor lateral utbredning. Inom File Haidarformationen finns huvudsakligen två sandstenshorisonter, Viklauledet och Närsandsten, och inom Borgholmformationen en sandstenshorisont, Faluddenledet. Sandstenslagren i den kambriska lagerföljden har varierande uppbyggnad och egenskaper som en följd av variationer i den ursprungliga avsättningsmiljön. Detta återspeglas främst i varierande kornstorlekar, sorteringsgrad samt kvarts- och lerhalt. Finkorniga kvartssandstenar med relativt hög andel finmaterial (lera och silt) dominerar, 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 sandstensenheterna (Viklau och När). De tre sandstenslagren har en stor lateral utbredning i sydöstra Östersjön. Det förekommer även andra sandstenslager i den undre till mellankambriska lagerföljden med varierande lateral utbredning, men dessa bedöms ha mindre betydelse i detta sammanhang.



Figur 30. Karta som översiktligt visar berggrundsytans ålder i sydöstra Östersjön. Profilerna i undre delen av figuren visar tvärsnitt genom berggrunden från nordväst till sydöst (från Erlström m.fl. 2014).

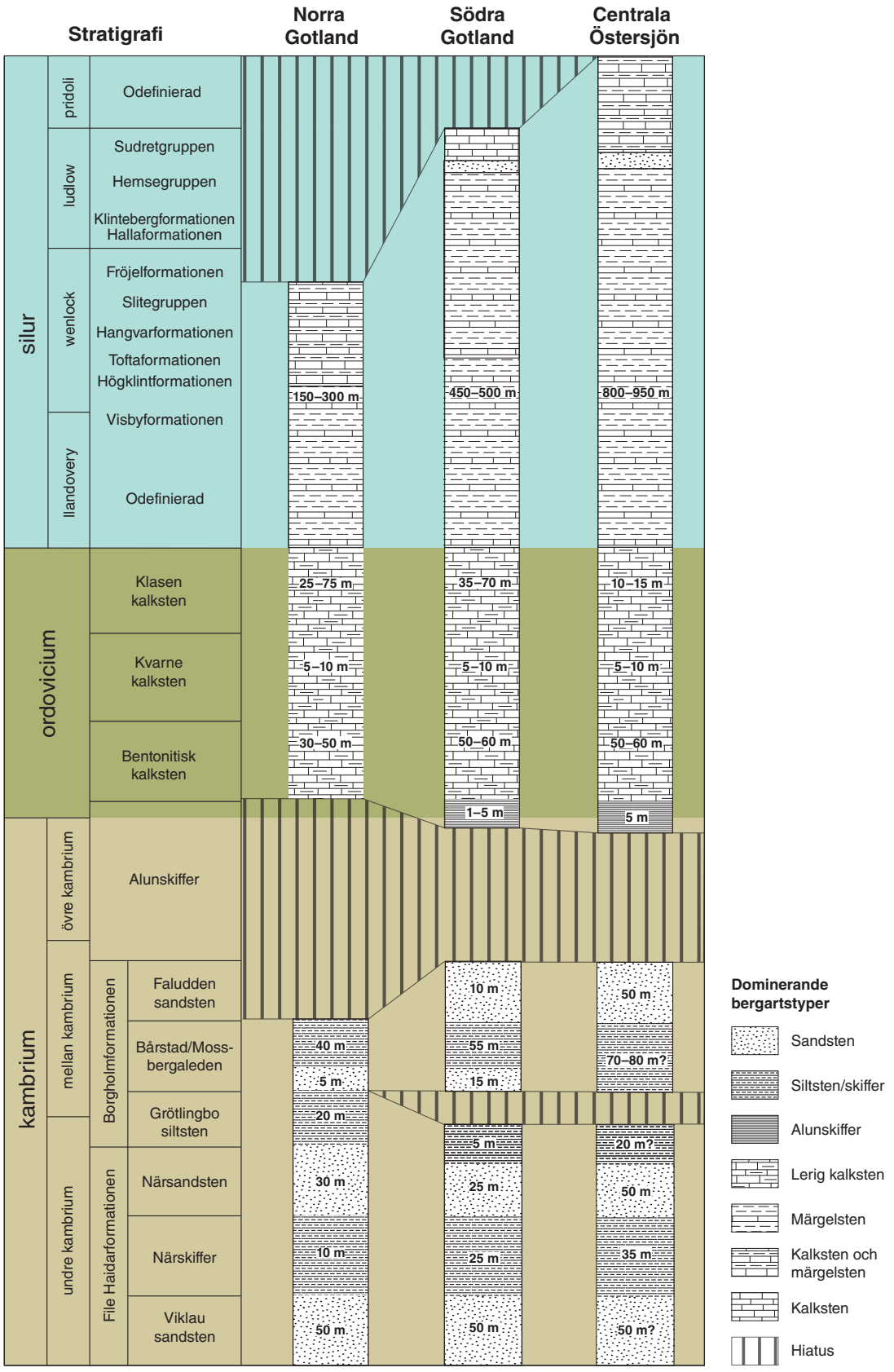


Figur 31. Strukturella element i sydöstra Östersjön (modifierad från Sopher m.fl. 2016).

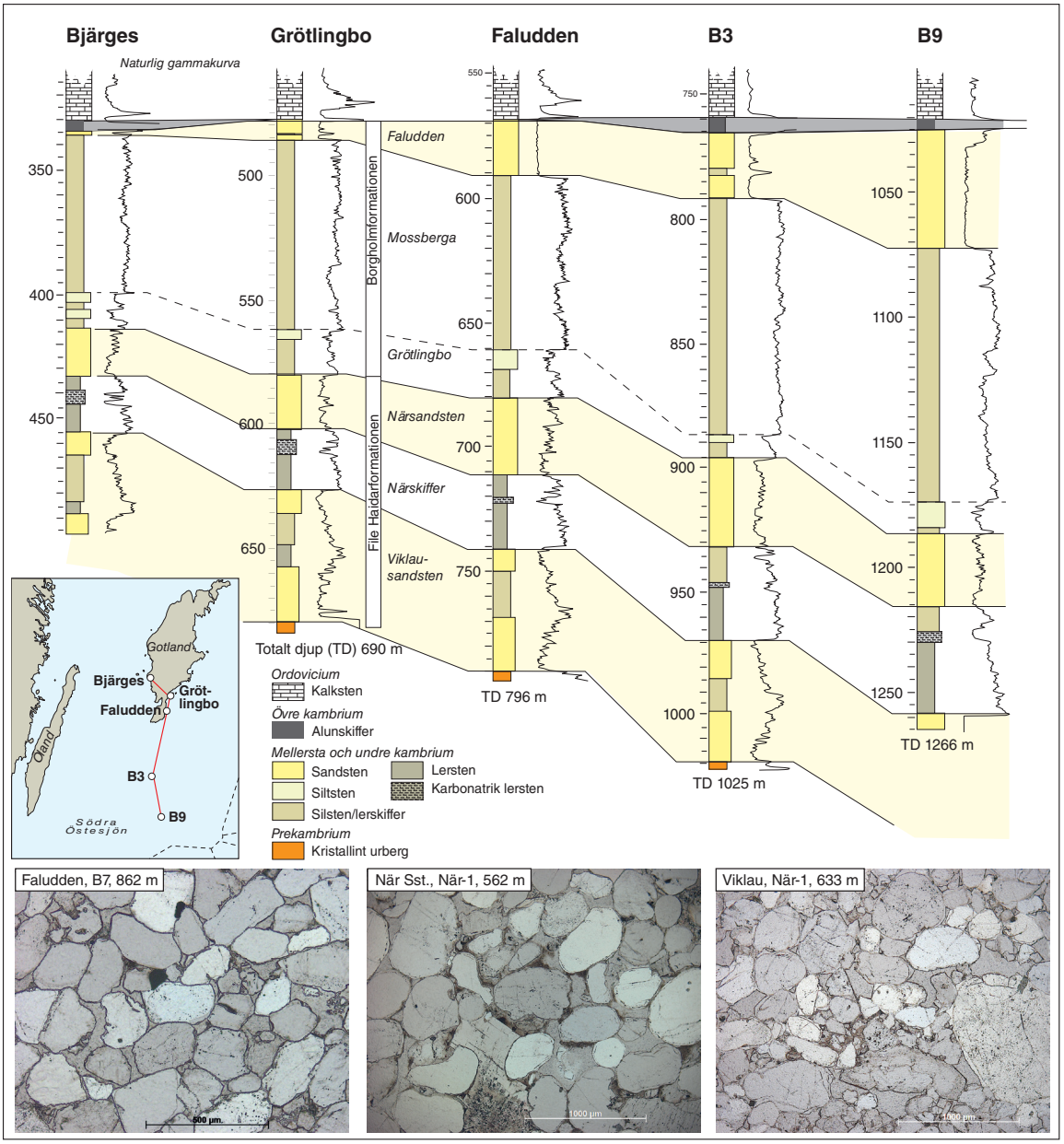
Den kambriska berggrunden har dokumenterats i ett antal borrningar, både på land och till havs. I figur 33 visas ett antal borrhål och hur den kambriska lagerföljden korreleras mellan dessa. Korrelationerna är gjorda genom bergartsbestämning av borrkärnor och borrkax, samt geofysiska mätningar som utförts i borrhålen.

Den paleozoiska berggrunden i sydöstra Östersjön är relativt opåverkad av förkastningar. I OPABs data har det enbart identifierats ett fåtal mindre förkastningar som påverkar den kambriska och siluriska lagerföljden. På den baltiska sidan av Östersjön förekommer antiklinala strukturer och mindre domformade strukturer med bl.a. kambrisk sandsten. Dessa utgör slutna strukturer i berggrunden i vilka det ställvis påträffas olja och gas. Inom svenskt territorium eller ekonomisk zon finns indikationer på mindre, likartade strukturer. Inom området där sandstenen ligger på större djup än 800 m finns ett femtontal strukturer som är 5 till 25 km^2 stora. Ett exempel på en större struktur är den tidigare nämnda Dalders-strukturen belägen i sydostligaste delen av Östersjön vid gränsen mot Polen, Ryssland, Litauen och Lettland. Den har en storlek på ca 200 km^2 (illustrerad senare i rapporten i figur 61).

Nedan ges en beskrivning av förutsättningarna för geologisk lagring av koldioxid inom de tre potentiella lagringsenheterna.



Figur 32. Schematisk stratigrafisk modell för den paleozoiska berggrunden inom svenskt territorium i sydöstra Östersjön. Den siluriska indelningen är baserad på Gotlands ytberggrund, vilken inte är definierad för de mer distala delarna av Östersjön. Modellen baseras på information från Erlström m.fl. (2009, 2011) samt Nielsen & Schovsbo (2007) (modifierad från Anthonsen m.fl. 2015b).

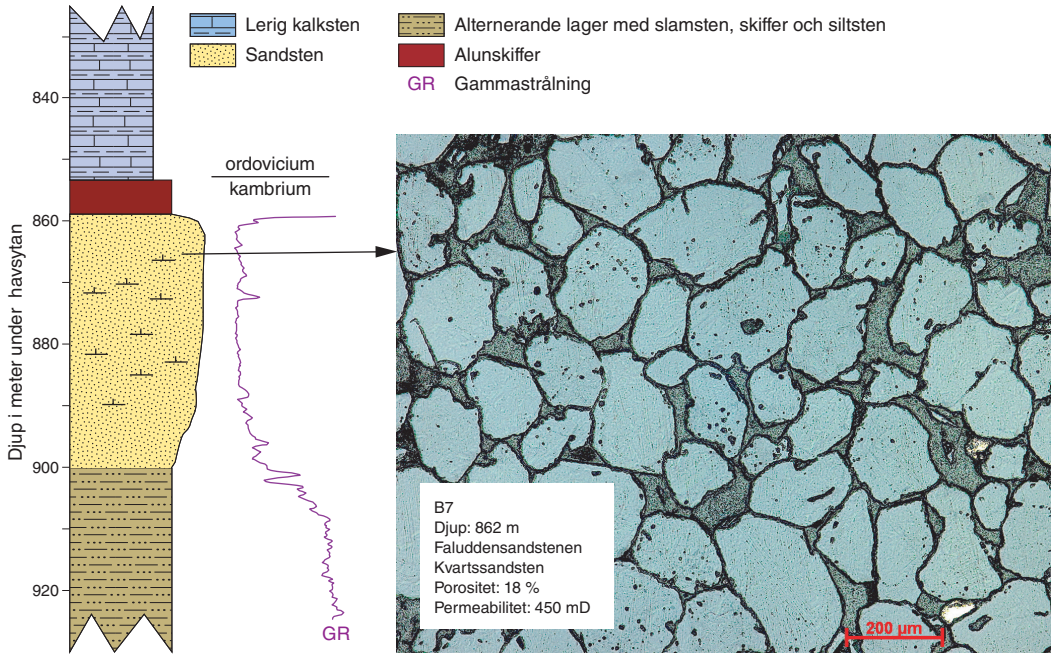


Figur 33. Ett nord–sydligt orienterat tvärsnitt av den kambriska berggrundens uppbyggnad i borrningar från centralt i södra Östersjön till landbaserade borrningar på södra Gotland med exemplifiering av de olika potentiella lagringsbergarternas mikrotexturella uppbyggnad (modifierad från Sopher m. fl. 2014)

Faludden

Faluddensandstenen tillhör stratigrafiskt Faluddenledet som utgör det yngsta ledet i Borgholmformationen från mellankambrisk tid. Faluddensandstenen är en vit till ljusgrå, fin- och medelkornig, karbonatcementerad, välsorterad kvartssandsten med tunna inslag av skiffer och siltsten. Kemiska analyser från borrkärnor i södra Östersjön visar att Faluddensandstenen domineras av kiseloxid, som kan kopplas till kvarts. Kiseloxidhalterna varierar mellan 84,7 och 97,8 procent i de analyserade proven. Förutom kisel finns aluminium, järn, kalcium och kalium i halter mellan 1 och 3 procent (uttryckt som oxider). Dessa grundämnen kan relateras till förekomsten av lermineral, fältspat och pyrit i de analyserade bergproven. I vissa prov finns även spår av olja i porutrymmena.

På Gotland har Faluddensandstenen en genomsnittlig porositet på 17 procent och en permeabilitet som varierar mellan 300 och 1300 mD. Ett exempel på sandstenens uppbyggnad visas i figur 34.



Figur 34. Exempel på Faluddensandstenens litologiska uppbyggnad. Provet är från borrningen B7 (från Erlström m.fl. 2011).

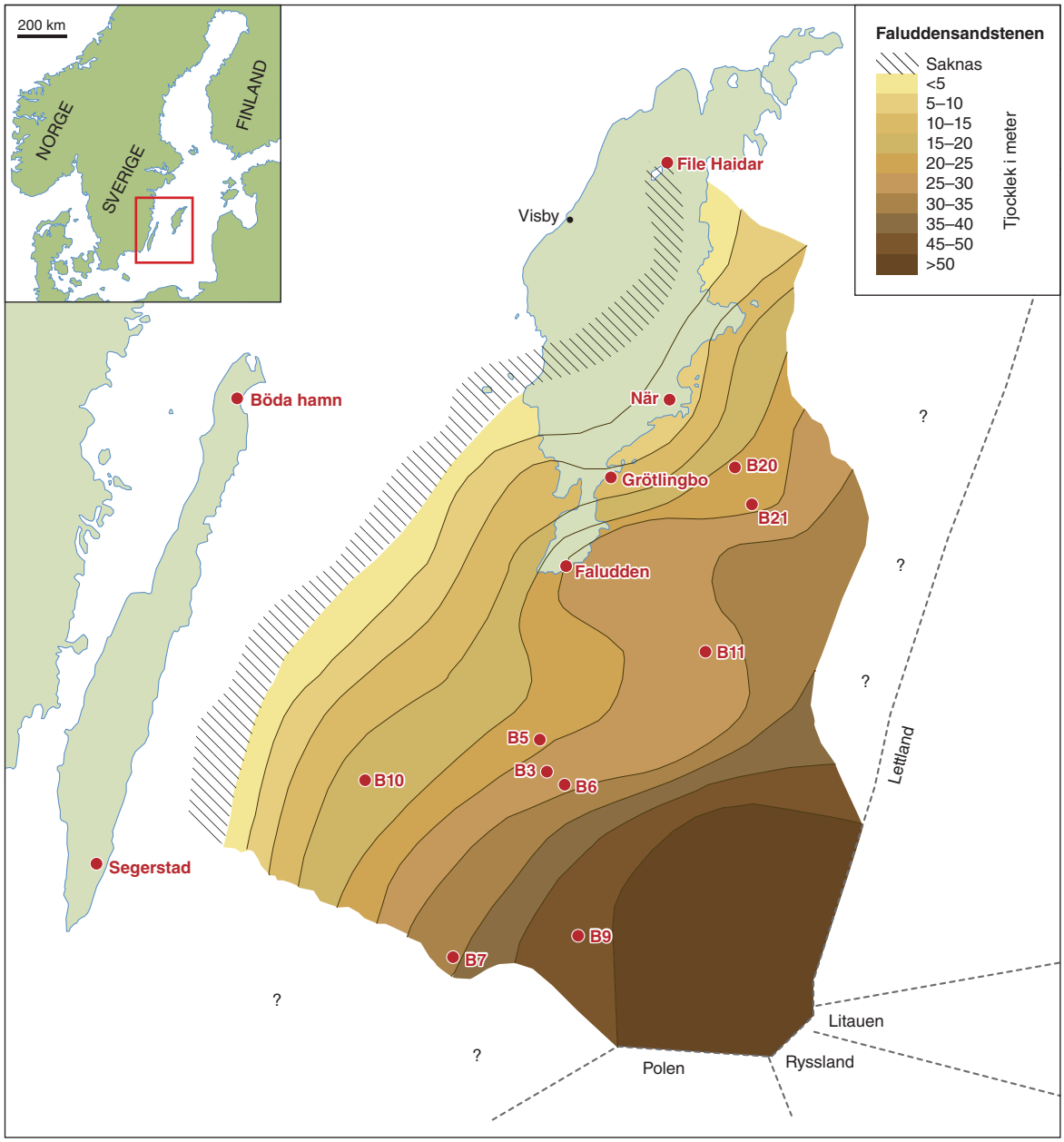
	Litostratigrafi		Öland	Norra Gotland	Södra Gotland	B9	Litauen–Polen
Mellersta kambrium	Borgholmformationen	Äleklintaledet	18–70 m				
		Faluddensandsten (Faluddenledet)			10 m	48 m	Deimena-formationen
		Bårstadledet Mossbergaledet	44 m	40 m	55 m	100 m	Tebra-formationen
				5 m	15 m		
		Grötlingboledet		20 m	5 m		
Undre kambrium	File Haidarformationen	Närsandsten	7–32 m	30 m	25 m	52 m	
		Närskiffer	13–30 m	10 m	25 m	36 m	Ventava-formationen
		Viklausandsten (Viklauledet)	5–57 m	50 m	50 m	9+ m	

Sandsten
Lersten, slamsten och siltsten

Figur 35. Översikt av kambrisk litostratigrafi i södra Östersjön (från Erlström m. fl. 2014)

I borrningen B7 har sandstensproven porositet på 13,9 procent och permeabilitet på 124 mD. I borrningen B9 är den genomsnittliga porositeten 16,0 procent och permeabiliteten 169 mD. Uppskattade genomsnittsvärden för den del av Faluddensandstenen som befinner sig djupare än 800 m motsvarar porositet på 14 procent och permeabilitet på 147 mD.

Faluddensandstenen har en regional kilformad utbredning i sydöstra Östersjön. Sydöst om en linje som går från norra Gotland till sydöst om Öland påträffas Faluddensandstenen. Mäktigheten tilltar successivt i sydöstlig riktning. Sandstenen fortsätter in i våra baltiska grannländer och kallas där för *Deimenaformationen*, se figur 35. Faluddensandstenen är en stratigrafisk avgränsad, delvis öppen,

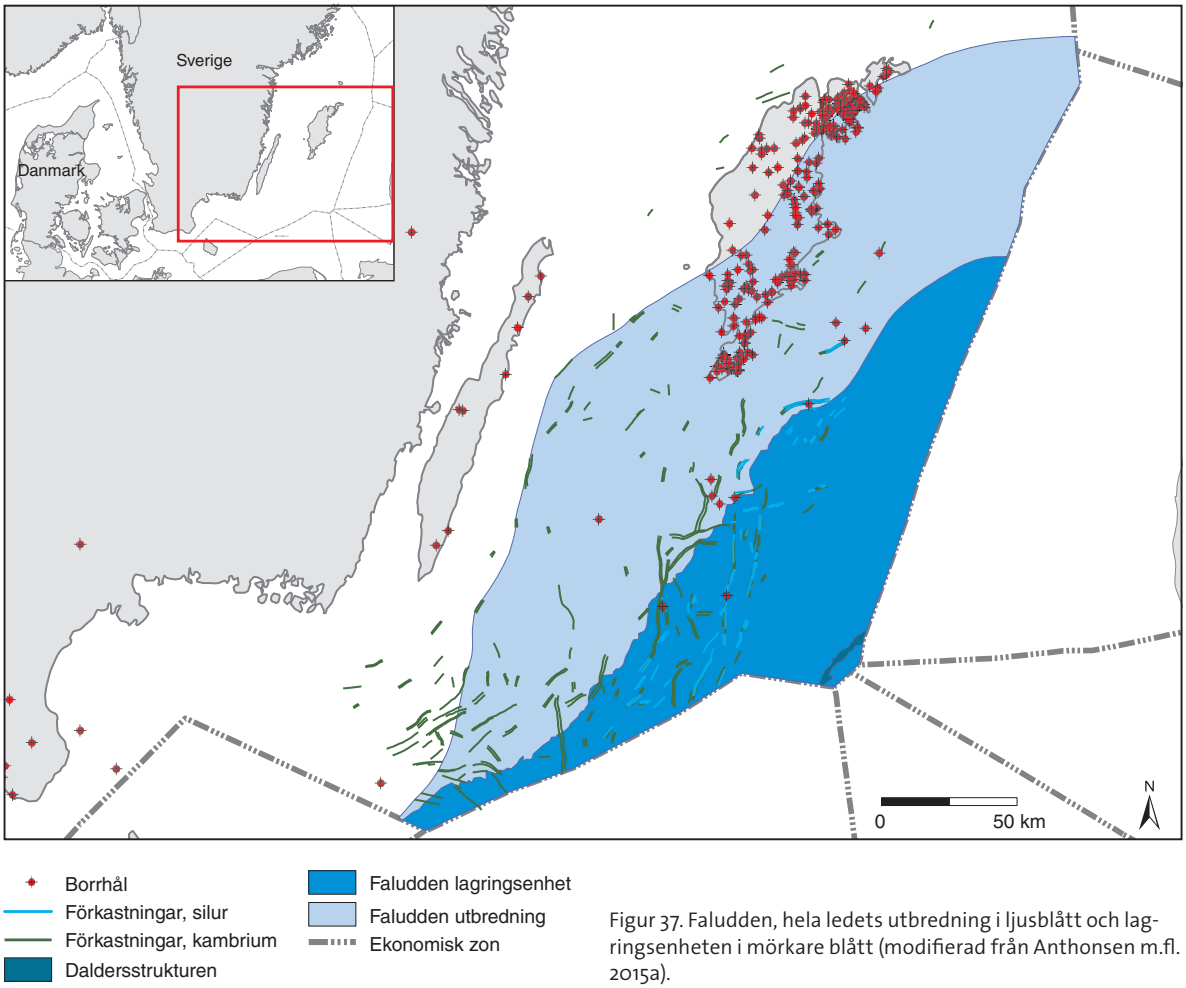


Figur 36. Faluddensandstenens mäktighet i delar av södra Östersjön (från Erlström m.fl. 2011).

salin akvifer. Faluddensandstenen uppnår en maximal mäktighet på ca 50 m i sydöstligaste delen av den svenska ekonomiska zonen i sydöstra Östersjön, se figur 36. Andelen sand i enheten är hög och sand net/gross uppskattas till 90 procent, vilket motsvarar ca 40 m beräknat utifrån en genomsnittlig mäktighet på 45 m inom området där den påträffas på mer än 800 m djup.

Lagringsenheten Faludden representerar den del av Faluddensandstenen som finns på mer än 800 m djup i den sydöstliga delen av utbredningsområdet, se figur 37. Medeldjup till toppen av lagringsenheten ligger på ca 830 m under havsnivå, se figur 38. Den del av sandstenen inom svenskt territorium som är lämplig för koldioxidlagring har en area på ca 11 000 km^2.

I borrningarna 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 vilket för svenska förhållanden är ett högt värde. Som jämförelse är gradienten i kristallin berggrund oftast kring eller strax



Figur 37. Faludden, hela ledets utbredning i ljusblått och lagringsenheten i mörkare blått (modifierad från Anthonsen m.fl. 2015a).

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 procent och pH är 5,5.

Beräkningar av lagringskapacitet på lagringsenheten Faludden har gjorts både som statiska beräkningar (Erlström m.fl. 2011, Mortensen 2014, Sopher m.fl. 2014, Elforsk 2014) och dynamiska beräkningar (Joodaki m.fl. 2013, Mortensen m.fl. 2016). Nedan följer exempel från statiska och dynamiska beräkningar genomfört inom projektet NORDICCS. I projektet användes det två olika metoder för dynamiska beräkningar av lagringskapacitet, se tidigare avsnittet *Bedömningsmodeller för lagringskapacitet* i denna rapport. I *bassängmodellering* (SEMI) där migration och infångning av den injekterade koldioxiden simuleras riktar metoden sig främst mot infångning i strukturella fällor, och eftersom Faludden har en relativt plan överyta med få strukturella fällor redogörs inte för resultaten av SEMI-metoden inom denna rapport. NORDICCS resultat enligt SEMI-metoden beskrivs i Mortensen m.fl. (2016) och Mortensen (2016).

Statiska beräkningar för lagringskapacitet görs som tidigare nämnt utifrån en rad parametrar med ekvationen $TH_MCO2 = V \times N/G \times \phi \times \rho CO2r \; (\times S_{eff})$, se tabell 7.

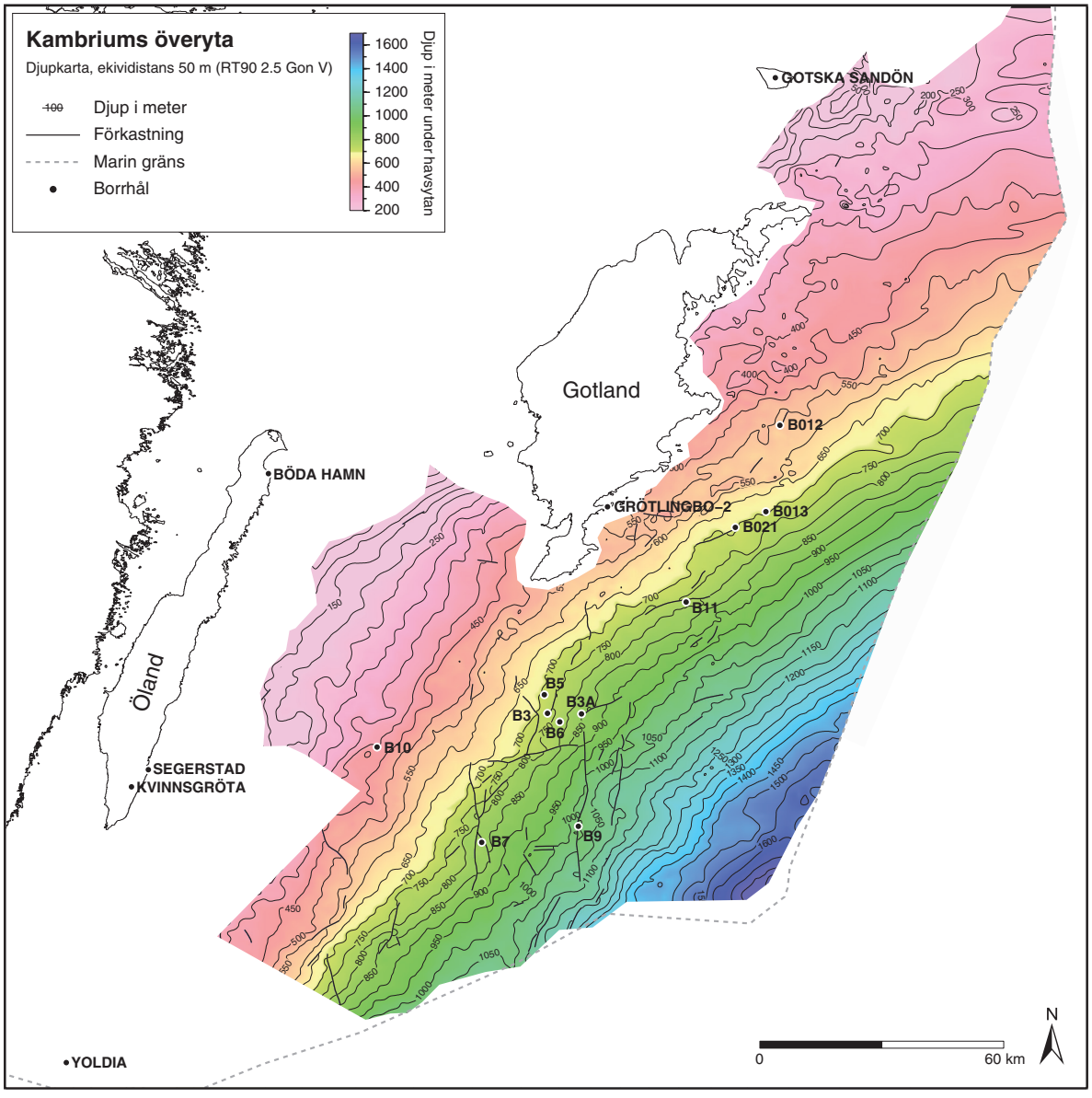
Tabell 7. Fysikaliska parametrar som använts för beräkning av lagringskapacitet för Faludden.

	Volym, km³	Sand N/G	Porositet	CO_2-densitet	Teoretisk kapacitet, Mt	Effektiv kapacitet, Mt
Faludden	493	0,90	0,14	0,600	37 271	745

Statiska beräkningar indikerar således att Faludden har ett porutrymme motsvarande en teoretisk kapacitet på 37 271 Mt koldioxid. Detta är dock ett orealistiskt mått eftersom inte hela porutrymmet är tillgängligt för lagring av koldioxid. För att uppnå ett mer realistisk mått för lagringskapacitet inkluderas en lagringsfaktor på två procent, vilket är en rimlig lagringsfaktor för större formationer (akviferer) enligt U.S. DOE-metoden. Den effektiva lagringskapaciteten för Faludden uppskattas då till 745 Mt koldioxid.

För en förbättrad förståelse av lagringsenheten och en uppgradering av statiska beräkningar gjordes det även dynamiska simuleringar och modelleringar för Faludden. Nedan redogörs för dynamiska beräkningar för lagringskapacitet inom lagringsenheten Faludden enligt metoden ECLIPSE 100, dynamisk reservoarsimulering.

I *dynamisk reservoarsimulering* (ECLIPSE 100) för Faludden genomfördes en rad tester för att nå fram till hur många injekteringsbrunnar samt deras position och injekteringsstakt som behövdes. För optimala förhållanden krävs sex injekteringsbrunnar placerade inom de djupaste delarna av lagrings-



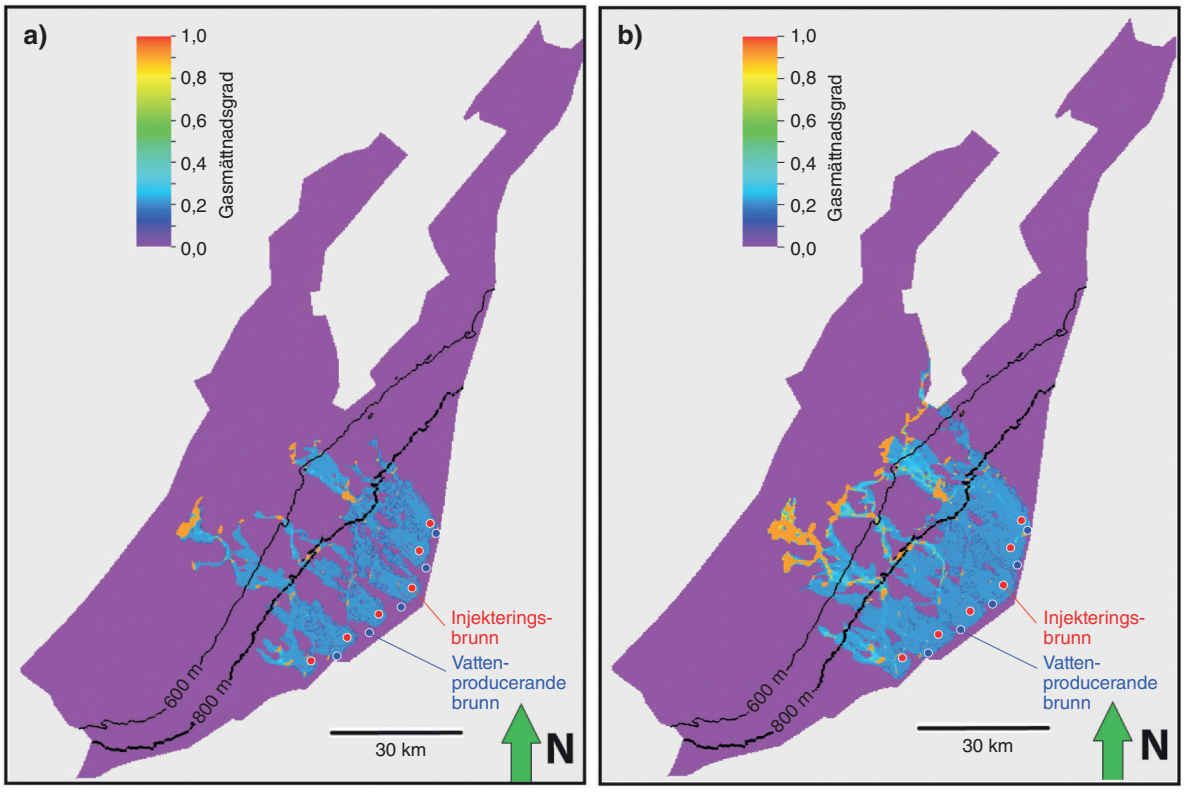
Figur 38. Karta som visar djupet till kambriums överyta i södra Östersjön.

enheten, längst ut mot gränsen för svensk ekonomisk zon i sydöst, se figur 39. Den optimala årliga injekteringstakten uppskattades till 0,5 miljoner ton koldioxid i brunnarna längst mot norr och söder, samt en miljon ton koldioxid i de fyra mellanliggande brunnarna. För att kunna höja injekteringstakten och samtidigt hålla injekteringstrycket under 75 procent av det litostatiska trycket, placerades fem vattenproducerande brunnar intill injekteringsbrunnarna. Två injekteringsscenarier med ovanstående injekteringsstakt testades för Faludden. I ett scenario (fig. 39a), injekterades totalt 250 miljoner ton koldioxid över en period på 50 år. I ett annat scenario (fig. 39b), injekterades 500 miljoner ton under 100 år. En efterföljande simuleringstid på 6 000 år för bägge scenarier indikerar migrationsvägarna för koldioxiden inom akviferen.

I scenario (a), där 250 miljoner ton koldioxid injekterades, var det 9,1 procent av koldioxiden som migrerade till områden mellan 600 och 800 m djup, och 4,1 procent till djup grundare än 600 m. Detta betydde att inom lagringsenheten infångades 86,8 procent av koldioxiden kapillärt eller löstes i formationsvattnet under den 6 000 år långa simuleringstiden. Av den infångade andelen koldioxid var det 42,5 procent som löstes i formationsvattnet.

I scenario (b) där 500 miljoner ton koldioxid injekterades, migrerade 10,8 procent av koldioxiden till områden på mellan 600 och 800 m djup, och 13 procent till områden grundare än 600 m. Efter 6 000 års simuleringstid var totalt 76,2 procent av koldioxiden kapillärt infångat eller löst i formationsvattnet. Av den infångade andelen koldioxid blev 39 procent löst i formationsvattnet.

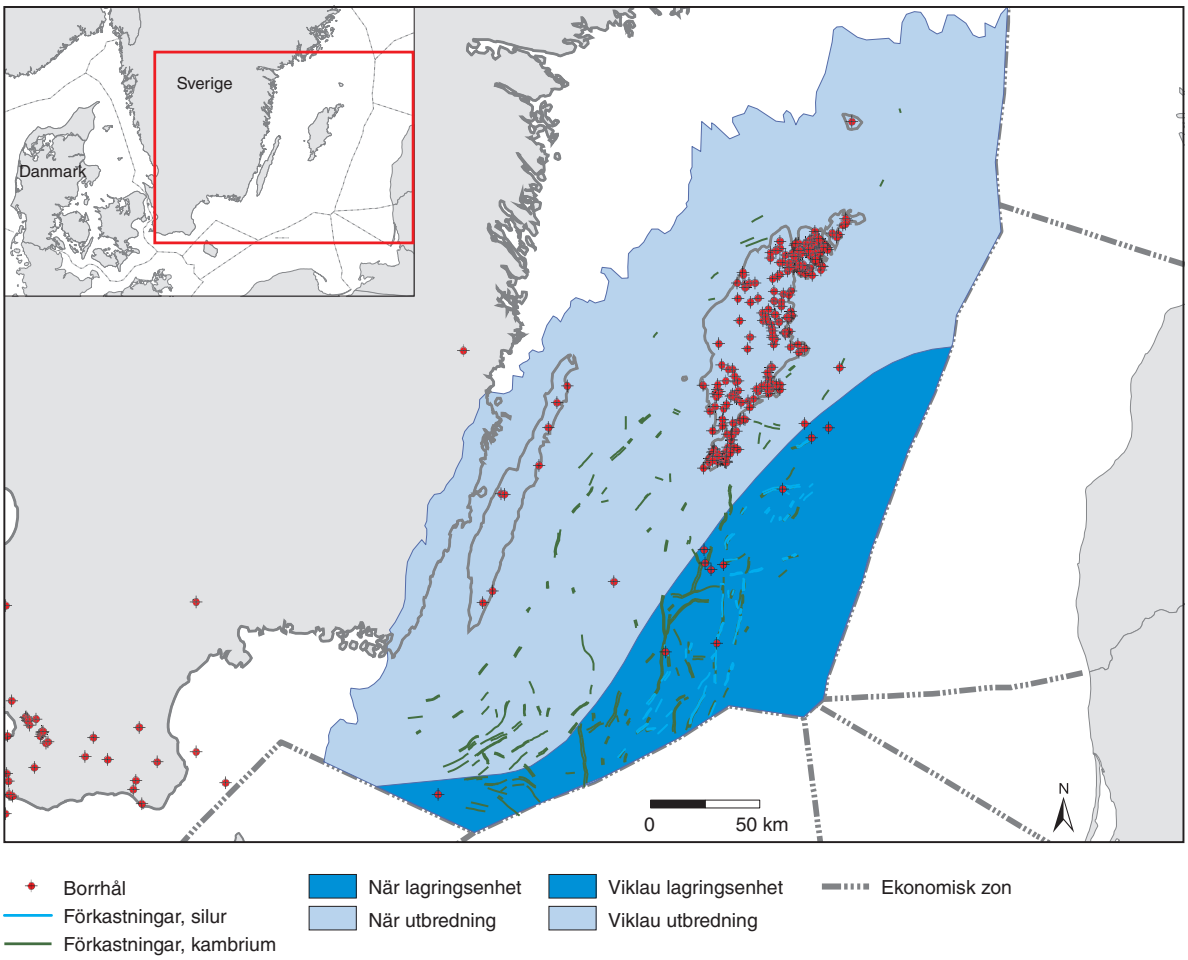
Det bedöms som sannolikt att den migrerade koldioxiden på grunt djup inom lagringsplatsen Faludden, trots gasfas, kommer infångas inom mindre strukturella fällor i akviferen och därmed inte migrera ytterligare.



Figur 39. Resultat från dynamisk reservoarsimulering för Faludden, där mängden av kapillärt (inom porutrymmen) infångad koldioxid efter 6000 år visas som blå områden; **a)** 250 miljoner ton koldioxid injekterad under 50 år, **b)** 500 miljoner ton koldioxid injekterad under 100 år (från Mortensen m.fl. 2016).

När

Närsandstenen representerar det yngsta ledet i File Haidarformationen där sedimenten avsattes sent under tidig kambrium. Närsandstenen domineras av fin- till medelkorniga sandstenar med slam- och siltstenslager. Den har en stor lateral utbredning och förekommer i såväl Yoldiaborrningen i sydväst som i östra delen av sydöstra Östersjön samt på Öland och Gotland, se figur 40. 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 kvartsrika sandstenar med obetydlig porositet. Den övre delen utgörs i Yoldiaborrningen av en 33 m tjock lagerföljd, uppbyggd av medel- och grovkorniga, välcementerade sandstenar med liten porositet. I borrningarna B3 och B9 är den genomsnittliga porositeten 13–14 procent. Baserat på de få empiriska mätdata som finns rörande porositet och permeabilitet har genomsnittsvärden för dessa egenskaper uppskattats till 10 procent respektive 50 mD. Även andelen sandstenslager i sekvensen har varit svårbedömd, men ett net/gross-förhållande på 65 procent har bedömts som en rimlig uppskattning. På Gotland varierar den samlade mäktigheten mellan 10 och 39 m, på Öland mellan 7 och 32 m och i borrningarna B3 och B9 är mäktigheten 32 m respektive 52 m. Närsandstenen saknas i borrningen B10, men påträffas som ytberggrund i Kalmarsundsområdet både i de östligaste delarna av Småland–Blekinge och lokalt utmed Ölands västra strand. Likt Faluddensandstenen, fortsätter Närsandstenen sin utbredning mot sydöst och påträffas även i de baltiska länderna.



Figur 40. Lagringsenheterna När och Viklau, tolkat med samma utbredningsområde. Total utbredning i ljusblått och lagringsenheter i mörkare blått (modifierad från Anthonsen m.fl. 2015a).

Närsandstenen är en öppen salin akvifer. Lagringsenheten När representerar den del av Närsandstenen som finns på djup under 800 m i den sydöstliga delen av utbredningsområdet, till havs sydöst om Gotland (fig. 40). Lagringsenheten har inom svenskt territorium en genomsnittlig mäktighet på 36 m, och omfattar ett område på ca 15 000 km^2 inom svenskt territorium i sydöstra Östersjön (Anthonsen m.fl. 2015a).

För lagringsenheten När har det på grund av begränsad mängd data enbart gjorts statiska beräkningar, se tabell 8. Nedan följer exempel på de statiska beräkningar som gjordes inom projektet NORDICCS.

Tabell 8. Fysikaliska parametrar som använts för beräkning av lagringskapacitet för När.

	Volym, km^3	Sand N/G	Porositet	CO_2-densitet	Teoretisk kapacitet, Mt	Effektiv kapacitet, Mt
När	546	0,65	0,10	0,600	21 294	426

Statiska beräkningar för lagringsenheten När indikerar ett porutrymme motsvarande en teoretisk lagringskapacitet på 21 294 miljoner ton koldioxid. Inkluderas en lagringsfaktor på 2 procent för uppgradering av beräkningarna, uppskattas den effektiva lagringskapaciteten för När till 426 miljoner ton koldioxid.

Viklau

Viklauledet utgör det äldsta ledet i File Haidarformationen, och sedimenten som bygger upp ledet avlagrades under tidig kambrium direkt ovanpå det prekambriska underlaget. Den undre och övre delen av Viklauledet består av fin- och medelkornig kvartssandsten (den så kallade Viklausandstenen) och den mellersta delen av Viklauledet består av av bioturberad siltsten (även kallad kråksten) eller laminerad mörkgrön skiffer. Den undre delen av ledet är delvis arkosisk och konglomeratförande. Bergarten är generellt välcementerad med låg porositet och permeabilitet. Det finns mycket begränsad information om Viklausandstenens porositet och permeabilitet (OPAB 1976 a, b). Värdena för porositet och permeabilitet bedöms till 8 procent respektive 30 mD.

Enhetens mäktighet varierar mellan 5 och 57 m på Gotland och mellan 40 och 74 m på Öland där den även saknas lokalt. I borrningen B3 är den 56 m och i Yoldiaborrningen 27 m. Andelen sandstenslager i avsnittet bedöms till 65 procent. Viklausandstenen har mer eller mindre samma utbredning som Närsandstenen, vilket gör att de båda har getts samma areella utbredning i beräkningarna (fig. 40). Förutom i södra Östersjön, förekommer ekvivalent till Viklausandstenen även i södra delen av Bottenhavet samt på det svenska fastlandet, dock inte på lämpligt djup för koldioxidlagring.

Viklausandstenen är en öppen salin akvifer. Lagringsenheten Viklau är den del av Viklausandstenen som finns på djup under 800 m i den sydöstliga delen av utbredningsområdet, till havs sydöst om Gotland (fig. 40). Lagringsenheten Viklau omfattar ett område på ca 15 000 km^2 inom svenskt territorium i sydöstra Östersjön, och har en genomsnittlig mäktighet på 57 m (Anthonsen m.fl. 2015a). Utbredningen av de individuella sandstenslagren inom lagringsenheten kan karaktäriseras som separata linser med varierande lateral utbredning.

Av samma anledning som för lagringsenheten När har det enbart gjorts statiska beräkningar för lagringskapaciteten inom Viklau lagringsenhet, se tabell 9. Nedan följer exempel på de statiska beräkningar som gjordes inom projektet NORDICCS.

Tabell 9. Fysikaliska parametrar som använts för beräkning av lagringskapacitet för Viklau.

	Volym, km^3	Sand N/G	Porositet	CO_2-densitet	Teoretisk kapacitet, Mt	Effektiv kapacitet, Mt
Viklau	864	0,65	0,08	0,615	27 631	553

Statiska beräkningar indikerar ett porutrymme svarande till en teoretisk lagringskapacitet på 27631 miljoner ton koldioxid. För effektiv lagringskapacitet inkluderas en lagringsfaktor på 2 procent och resulterar då i en lagringskapacitet på 553 miljoner ton koldioxid inom lagringsenheten Viklau.

Takbergarter i sydöstra Östersjön

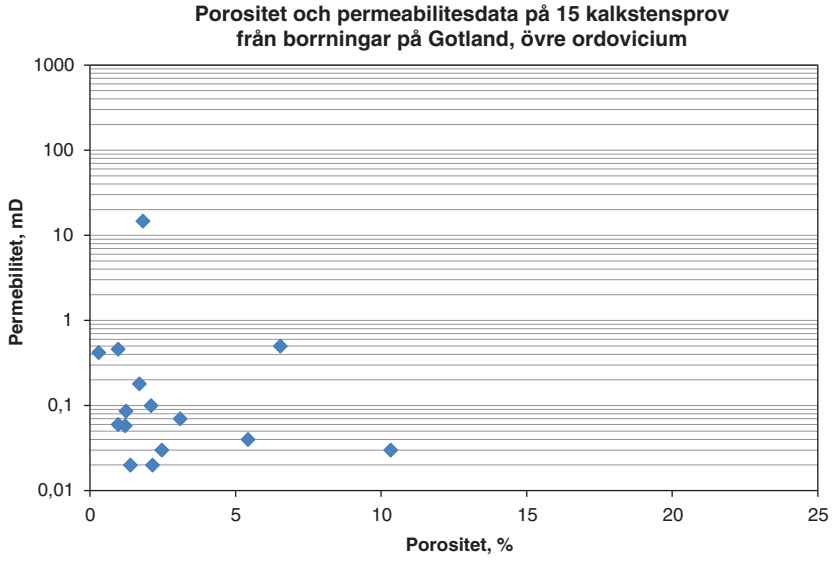
Inom stora delar av södra Östersjön och på Gotland överlagras den kambriska lagerföljden med de olika lagringsenheterna Viklau, När och Faludden av en 65–125 m mäktig ordovicisk sekvens med kalkstensdominerade bergarter. Söder och sydväst om Gotland påträffas även lager med alunskiffer som här ingår i den överlagrade takberggrunden. Alunskiffern tilltar successivt i mäktighet söderut och är i de sydligaste delarna av svenskt område i södra Östersjön i storleksordningen 20–30 m mäktig. På Gotland har alunskiffern endast påträffats i ett fåtal borrningar och är då endast ett par meter mäktig.

Den ordoviciska lagerföljden överlagras i sin tur av en flera hundra meter mäktig lagerföljd med siluriska karbonatbergarter. Inom området där Faluddensandstenen ligger på lämpligt lagringsdjup, dvs. djupare än 800 m, är den siluriska lagerföljden minst 700 m mäktig och domineras av märgelsten och karbonatrik lersten samt finkristallin lerig kalksten. I de distala delarna av svenskt område i södra Östersjön påträffas en uppemot 200 m mäktig sekvens med devonska bergarter ovanför den siluriska sekvensen. Denna har en likartad uppbyggnad som motsvarande berggrund i borrningar på litauiskt och polskt område, dvs. en heterogen sekvens med siltsten-, dolomit-, sandsten- och lerlager (Kumpas 1978) och bedöms ha dåliga egenskaper som tät takberggrund.

De ordoviciska och siluriska sekvensernas egenskaper är avgörande för om dessa lager enskilt eller tillsammans kan säkerställa funktionen som takberggrund för lagring i de underliggande kambriska lagringsenheterna. Det bör dock påpekas att om lagring sker i När- och Viklausandstenarna finns även kambriska berggrundsavsnitt mellan dessa och över Närsandstenen som till stor del består av lerskiffer. Även dessa lager kan ha en funktion som takberggrund, exempelvis Närskiffern.

Även om takbergarternas fysikaliska, kemiska och mineralogiska uppbyggnad samt funktion är dåligt undersökta ger förekomsten av olje- och gasfällor, både i den kambriska sandstenen och i ordoviciska rev (så kallade *mounds*) på Gotland samt i Faluddensandstenen i södra Östersjön, en verifikation på att den ordoviciska och den siluriska lagerföljden, åtminstone lokalt, uppfyller kraven som tät takberggrund.

Den kunskap och data som finns om takbergarternas fysikaliska egenskaper härrör från ett fåtal mätresultat av permeabilitet, porositet, densitet och värmeledningsförmåga samt kemiska analyser som utförts av OPAB och SGU. Dessa mätresultat visar ofta på mindre än fem procent porositet och en permeabilitet på mindre än 0,5 mD (fig. 41). Eftersom provtagningen varit selektiv till att mest omfatta reservoarkalkstenar med relativt högre porositet och permeabilitet bedöms data inte som representativa för hela den ordoviciska sekvensen. För detta krävs en mer omfattande provtagning och analys. För den siluriska lagerföljden saknas motsvarande data.



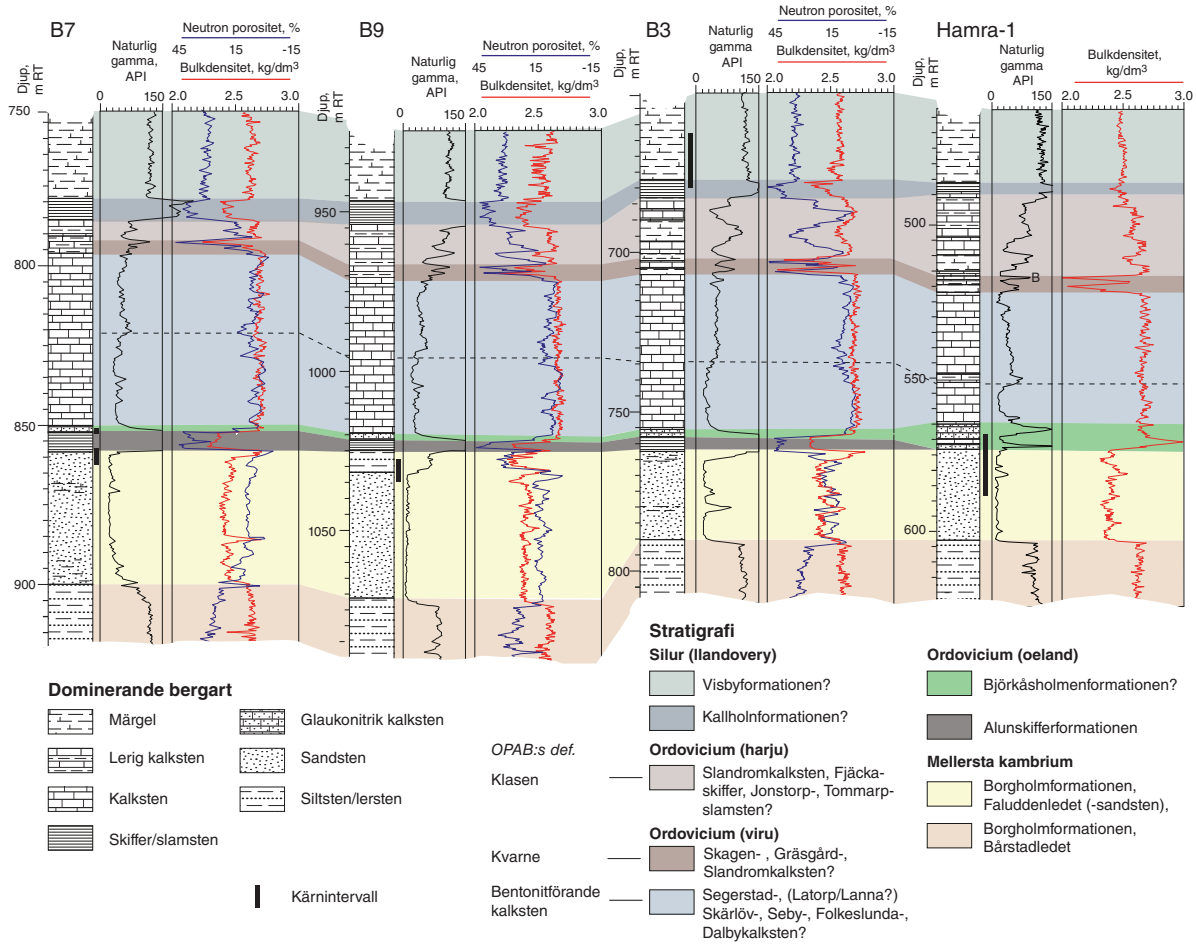
Figur 41. Diagram som visar porositets- och permeabilitetsvärden för ordovicisk kalksten. Baserad på SGUs och OPABs mätdata på kalkstensprov från övre ordovicium.

Den ordoviciska lagerföljden kan delas in ett antal enheter. OPAB gjorde i samband med sin prospekteringsverksamhet en grov indelning i tre enheter som baserades på generella geofysiska logsignaturer, dvs. Klasen, Kvarne och Bentonitförande kalksten. Det har på Gotland och i södra Östersjön under lång tid inte funnits någon annan indelning beroende på att det saknats biostratigrafisk information för att kunna korrelera lagerföljden till motsvarande stratigrafiskt avgränsade och namngivna sekvenser på Öland, i Östergötland, i Västergötland och i Dalarna. OPABs indelning har i stort fungerat men vid noggrannare analys av de geofysiska borrhålsmätningarna har en mer detaljerad indelning kunnat göras (fig. 42). Genom en kombination av resultaten från geofysiska borrhålsmätningar och biostratigrafiska data (ex. Männik m. fl. 2010) har det varit möjligt att korrelera och namnge åtminstone den övre delen av lagerföljden till definierade litostratigrafiska enheter. Även andra vetenskapliga arbeten (ex. Calner m. fl. 2010) ger ytterligare information om t.ex. förekomsten av en tydlig erosionsyta i toppen av Slandromkalkstenen i gränsen viru-harju som kan geofysiskt korreleras över hela Östersjöområdet. Tuuling & Flodén (2000) kunde också identifiera motsvarande yta i deras seismiska undersökningar nordöst om Gotland. Även arbeten av Kjellström (1971) och Bergström m.fl. (2004) har utgjort ett viktigt stöd för den indelning som illustreras i figur 42.

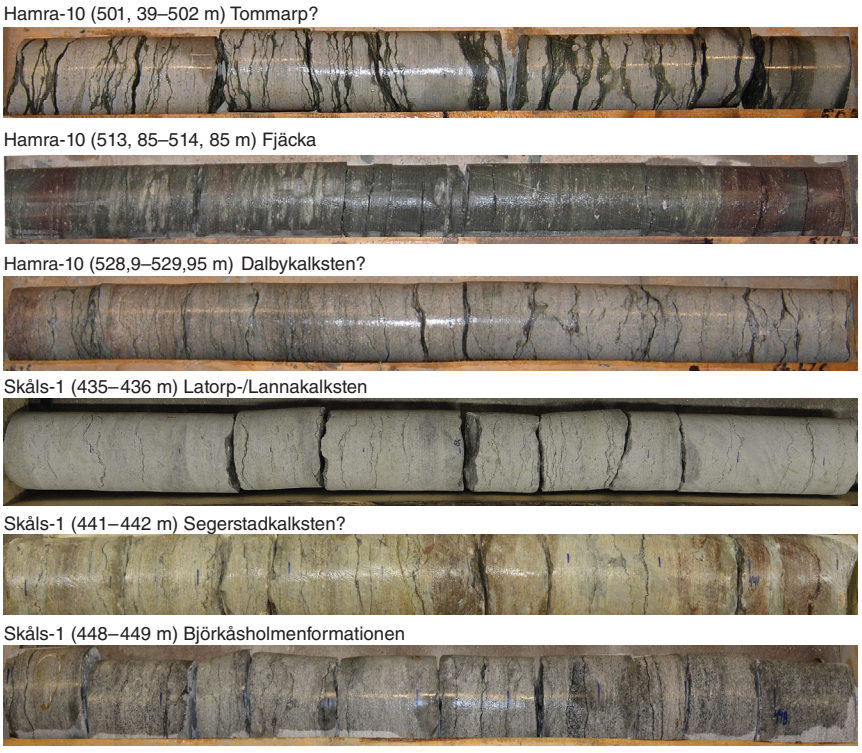
De geofysiska borrhålsloggarna visar att den ordoviciska lagerföljdens olika enheter är relativt homogent uppbyggda och lateralt uthålliga. I stor sett samma uppdelning kan följas från de sydligaste borrningarna i södra Östersjön till borrningar på norra Gotland. Indelningen i figur 42 är baserad på resultat från ett pågående FoU-projekt vid SGU.

Lagerföljden består underst av ett uttunnande lager med svart till svartgrå alunskiffer och slamsten. Intervallet bedöms bestå av en ofullständig representerad alunskiffersekvens tillhörande undre ordovicium, i många avseenden likt den som påträffas på norra Öland (Erlström 2016). Underst i den ordoviciska lagerföljden påträffas även glaukonitförande kalkstenslager som hör till Björkåsholmenformationen, se figur 43. Dessa tilltar i mäktighet norrut och är i borrningar på Gotland uppemot 10 m. Nästföljande enhet består huvudsakligen av en 40–60 m mäktig homogen grå–rödgrå kalkstensekvens med tunna lerskikt. I den övre delen förekommer bentonitlager som tolkas korrelera till Kinnekullebentoniten (Männik m. fl. 2015). Denna undre enhet motsvarar den enhet som OPAB benämner bentonitförande kalksten. Enheten överlagras av ett avsnitt med en mycket tydlig förändring av de geofysiska loggkurvornas utseende. Detta hör samman med en regionalt förekommande erosionsyta som representerar ett sedimentationsavbrott som sammanfaller med toppen av Slandromkalkstenen (se diskussion i Calner m.fl. 2010). Över denna påträffas kalkstenslager med mycket varierande lerhalt. Enskilda lager kan klassas som karbonatrik slamsten eller lersten. Avsnittet är generellt 5–10 m mäktigt och kan jämställas med Kvarnekalkstenen i OPABs nomenklatur. Avsnittet kan med sin mycket karakteristiska logsignatur identifieras i samtliga borrningar på Gotland och i den svenska delen av södra Östersjön. Överst i den ordoviciska lagerföljden följer ett avsnitt som tilltar i mäktighet norrut i den Baltiska Bassängen. I söder är avsnittet endast 10–20 m mäktigt medan det i borrningar på norra Gotland och öster om Gotland lokalt har en mäktighet som överstiger 60 m. Detta beror på förekomsten av ordoviciska mounds som mestadels påträffas i den norra och nordöstra delen av södra Östersjön (Sivhed m.fl. 2004). Berggrundens uppbyggnad varierar inom denna övre del av den ordoviciska lagerföljden beroende på den skiftande avsättningsmiljö som rådde under yngre ordovicium. Enheten benämns Klasenkalksten av OPAB.

Den ordoviciska lagerföljden överlagras i de södra borrningarna av ett 5–10 m mäktigt lerskiffer/slamstenslager som gradvis tunnar ut i nordöstlig riktning. Dess stratigrafiska tillhörighet är osäker med avsnittet tolkas som tillhörande undre silur. Den överliggande siluriska lagerföljden domineras av märgelsten med ett frekvent innehåll av tunna lerlager. Snäll (1978) identifierade i Grötlingboborrningen mer än 200 lerlager varav ett flertal utgörs av tunna bentoniter, vilket styrker bedömningen av den siluriska lagerföljdens funktion som takberggrund.



Figur 42. Tvärsnitt av berggrundens uppbyggnad i intervallet från övre delen av mellersta kambrium till understa delen av silur i borrningar från södra Östersjön (B7, B9 och B3) och sydligaste Gotland (Hamra). Borrhålens placering anges i figur 27, i avsnittet *Geologiskt underlagsmaterial*.



Figur 43. Fotografier på borrkärnor från borrningar på södra Gotland som visar olika kalkstensvarianter i den ordoviciska lagerföljden. Foto: M. Erlström.

Lagringsmöjligheter i sydvästra Skåne

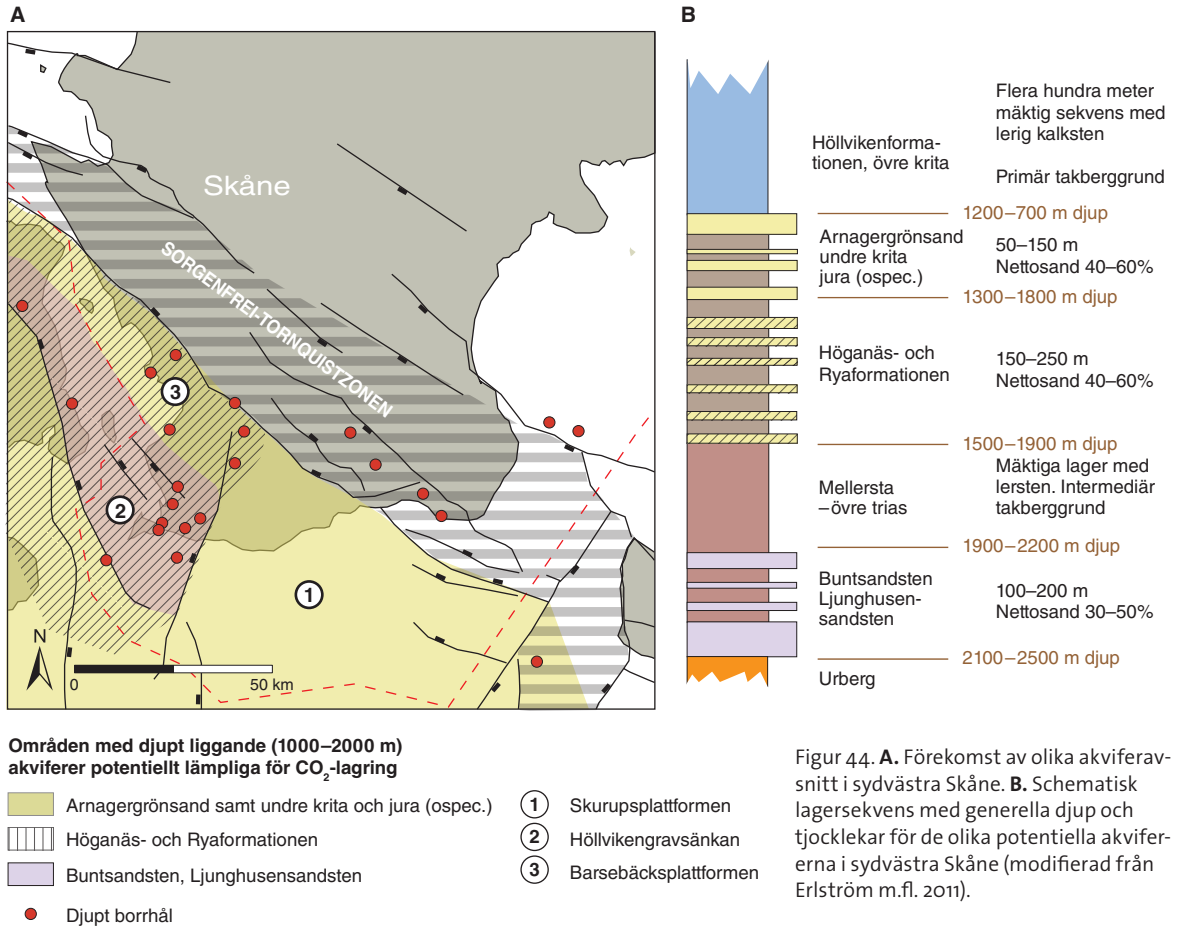
Berggrundens uppbyggnad i sydvästra delen av Skåne överensstämmer till stor del med den i Danmark. Den sedimentära berggrunden är uppemot 4 000 m mäktig i de djupaste delarna av den skånska delen av Danska bassängen. Inom övriga delar av sydvästra Skåne uppgår den sedimentära berggrundens mäktighet till ca 2 000 m. Sydvästra Skånes berggrund avgränsas i nordost av Romeleåsens förkastningszon som utgör Sorgenfrei-Tornquistzonens (STZ) sydvästra begränsning. STZ är en regional stortektonisk förkastningszon utmed vilken rörelser i jordskorpan skett vid upprepade tillfällen sedan paleozoisk tid. Även inom STZ i Vombsänkans sydliga del förekommer akviferer med lämpliga fysikaliska egenskaper.

Sydvästra Skånes berggrund kan delas in i tre delområden: Skurupsplattformen, Höllvikengravsänkan och Barsebäcksplattformen med olika förekomst av akviferer som kan vara lämpliga för koldioxidlagring (fig. 44).

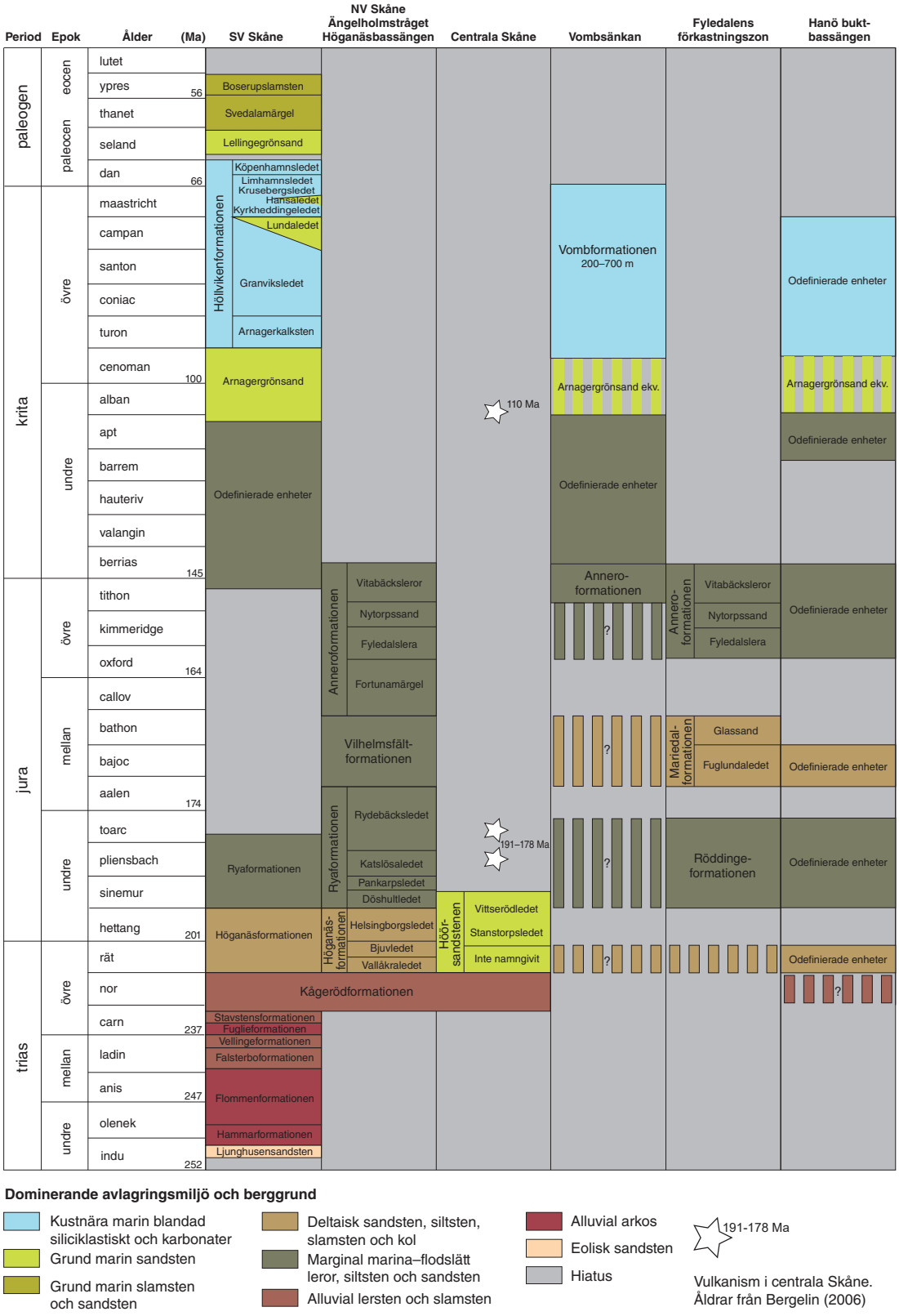
Med utgångspunkt i baskraven och börkraven (se avsnittet *Karaktärisering av lagringsplats/komplex – geologiska krav och förutsättningar*) har fem potentiella lagringsenheter i sydvästra Skåne identifierats:

- Arnagergrönsand (undre–övre krita)
- Undre krita, enhet A (övre jura–undre krita)
- Undre krita, enhet B (övre jura–undre krita)
- Höganäs–Rya (övre trias–undre jura).
- Bunter (undre trias).

Samtliga akviferer, förutom enheten Undre krita B, påträffas i Höllvikengravsänkan och på delar av Barsebäcksplattformen, medan endast Undre krita A och Arnagergrönsanden även finns på Skurupsplattformen, se figur 44.



Figur 44. **A.** Förekomst av olika akviferavsnitt i sydvästra Skåne. **B.** Schematisk lagersekvens med generella djup och tjocklekar för de olika potentiella akvifererna i sydvästra Skåne (modifierad från Erlström m.fl. 2011).



Figur 45. Schematisk stratigrafisk modell för mesozoisk och kenozoisk berggrund i Skåne. Modellen baseras på information från Norling m.fl. (1993), Grigelis & Norling (1999), Sivhed m.fl. (1999), Erlström m.fl. (2004), Ahlberg m.fl. (2003), Bergelin (2006) samt Erlström & Sivhed (2012) (modifierad från Anthonsen m.fl. 2015b).

Namnen på lagringsenheterna härrör från de stratigrafiska avsnitt som de tillhör, se figur 45. Enheten Undre krita är en stratigrafisk odefinierad sandstenssekvens som sträcker sig från toppen av övre jura till undre krita. Sandstenshorisonten följer Arnagergrönsandens utbredning och förekommer på lämpligt

djup både söder om Romeleåsens förkastningszon och inom den södra delen av Vombsänkan. De två utbredningsområdena är avskurna från varandra av förkastningar och har därför indelats i enhet A och B. Den potentiella lagringsenheten Höganäs–Rya utgör stratigrafiskt delar av två formationer, Höganäsformationen och Ryaformationen.

Den djupaste av de potentiella lagringsenheterna, Bunter, tillhör stratigrafiskt Ljunghusensandstenen och Hammarformationen, men namngavs i NORDICCS till Bunter med referens till den dansk-tyska ekvivalent *Buntsandstein* (eng. *Bunter Sandstone*, Erlström & Sivhed 2012).

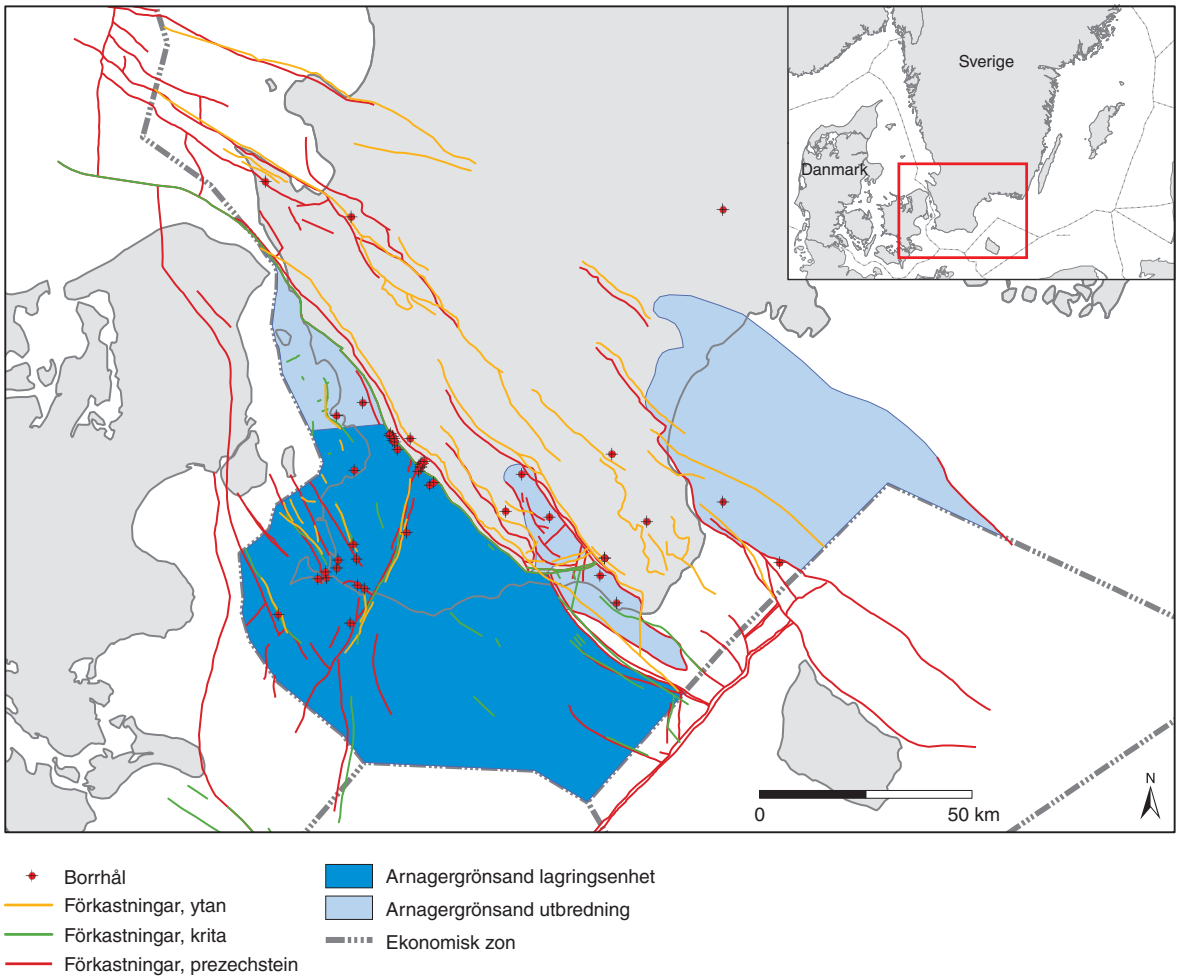
Inom Höllvikengravsänkan stupar den paleozoiska och triassiska lagerföljden mot syd–sydväst. Motsatsen gäller för den överlagrande lagerföljden, som i sydvästra Skåne stupar 1–2 ° mot nordöst och mot Romeleåsens förkastningszon. Den sedimentära berggrundens uppbyggnad och utbredning i Skåne beror till stor del på antingen tension (trias) eller kompression (krita) i berggrunden, mestadels kopplat till rörelser i de större förkastningssystemen som ingår i Sorgenfrei-Tornquistzonen (STZ). Förekomst av slutna strukturer har inte påvisats i någon del av lagerföljden.

I följande text ges en beskrivning av förutsättningarna för geologisk lagring av koldioxid inom de potentiella lagringsenheterna i sydvästra Skåne.

Arnagergrönsand

Arnagergrönsanden har en relativt homogen och regional uppbyggnad med generellt goda akviferegenskaper. Formationen har en regional utbredning i Skåne med utbredning söder om Romeleåsens förkastningszon, i Vombsänkan och i Kristianstadbassängen, se figur 46. Sandstenen överlagras av en tät och hård kalksten vilket gör att intervallet är lätt att identifiera i de seismiska profilerna. Arnagergrönsanden har mindre mäktighet inom Kristianstadbassängen och i Vombsänkan och förekommer även på grundare djup vilket inte gör den lämplig för koldioxidlagring inom dessa områden. I utbredningsområdet söder om Romeleåsens förkastningszon varierar mäktigheten till mellan 20 och 60 m och den genomsnittliga mäktigheten här bedömts till 39 m. Utifrån borrhållsdata uppskattas andelen sand till 80 procent. Formationen utgörs av dåligt konsoliderad, fin- och medelkornig glaukonitisk kvartssandsten. Sandstenen innehåller även mindre mängder av pyrit, glimmer, zirkon och fältspat, samt varierande innehåll av karbonat och lermineral (Sivhed m.fl. 1999). Arnagergrönsanden har mycket varierande fysikaliska egenskaper. I gynnsamma partier är permeabiliteten mer än en Darcy och porositeten 27–30 procent vilket gör Arnagergrönsanden lokalt till en mycket god akvifer. Inom andra delar av utbredningsområdet, speciellt på Barsebäcksplattformen, är sandstenen finkornigare och innehåller karbonatcementeringar i porerna vilket gör permeabiliteten generellt lägre (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. Uppskattade genomsnittsvärden för porositet och permeabilitet för Arnagergrönsanden är 26 procent respektive 681 mD.

I sydvästra Skåne påträffas Arnagergrönsanden i borrningarna på djup mellan 1 200 och 1 700 m. Lagringsenheten Arnagergrönsand utgör den del av formationen som påträffas på djup under 800 m, alltså utbredningsområdet söder om Romeleåsens förkastningszon, med undantag för den nordliga delen av området vid Landskrona där formationen utgörs av mer finkorniga och lågpermeable sandstenslager (fig. 46). Lagringsenheten Arnagergrönsand är en öppen, salin akvifer med ett ca 5 200 km^2 stort utbredningsområde inom svenskt territorium. Medeldjupet till toppen av lagringsenheten är 1 200 m. Utbredningen av Arnagergrönsanden fortsätter mot syd och väst utanför Sveriges territorium, dvs. i Tyskland och Danmark.



Figur 46. Utbredning av Arnagergrönsand, hela formationen i ljusblått och lagringsenheten i mörkare blått (modifierad från Anthonsen m.fl. 2015a).

För lagringsenheten Arnagergrönsand har det gjorts både statiska beräkningar, se tabell 10 (Erlström m.fl. 2011, Mortensen 2014) och dynamiska beräkningar (Mortensen m.fl. 2016) på lagringskapaciteten. Nedan ges exempel på statiska och dynamiska beräkningar utförda inom projektet NORDICCS.

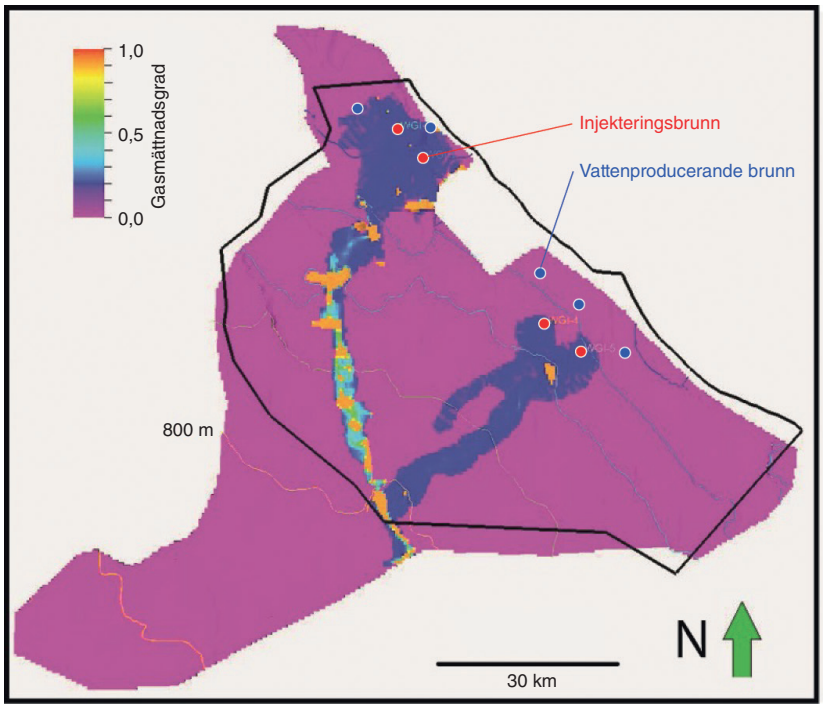
Tabell 10. Fysikaliska parametrar som använts för beräkning av lagringskapacitet för Arnagergrönsand.

	Volym, km³	Sand N/G	Porositet	CO_2-densitet	Teoretisk kapacitet, Mt	Effektiv kapacitet, Mt
Arnager-grönsand	202	0,80	0,26	0,620	26 050	521

Statiska beräkningar indikerar att Arnagergrönsand har ett porutrymme motsvarande en teoretisk kapacitet för 26 050 miljoner ton koldioxid. Med en lagringsfaktor på två procent uppskattas den effektiva lagringskapaciteten för Arnagergrönsand till 521 miljoner ton koldioxid.

Precis som för Faludden gjordes det inom projektet NORDICCS även dynamiska beräkningar för lagringskapacitet inom lagringsenheten Arnagergrönsand. Eftersom inga större strukturella fällor har påvisats inom Arnagergrönsand redogörs enbart för resultaten från dynamisk reservoarsimulering (ECLIPSE 100) inom denna rapport. Resultat från SEMI-metoden för Arnagergrönsand finns i Mortensen m.fl. (2016) och Mortensen (2016).

I *dynamisk reservoarsimulering* (ECLIPSE 100) för Arnagergrönsand uppnåddes ett optimalt scenario med fyra injekteringsbrunnar placerade intill Romeleåsens förkastningszon i de djupaste delarna, se figur 47. De årliga injekteringstakter uppskattades till 0,25 miljoner ton koldioxid för var av de två södra brunnarna och en miljon ton koldioxid för var av de två norra brunnarna. För att kunna kontrollera ökat tryckuppbyggnad under injektering av koldioxid placerades även fem vattenproducerande brunnar intill injekteringsbrunnarna inom de djupaste delarna av lagringsenheten (fig. 47). Ett antal olika simuleringar testades och bästa utfallet visade på totalt 250 miljoner ton koldioxid injekterad under en 100 års period. En 6 000 års simuleringsperiod resulterade i att 96,7 procent av den injekterade koldioxiden antigen infångades kapillärt eller löstes i formationsvattnet. Av den infångade andelen koldioxid var 26,2 procent löst i formationsvattnet. Enbart 3,3 procent av koldioxiden migrerade till områden grundare än 800 m, härav en mindre del till områden utanför svenskt territorium (fig. 47). Tester med ökad injekteringstakt och ökad mängd injekterad koldioxid resulterade i en större del av den injekterade koldioxid som migrerade till områden grundare än 800 m under den 6 000 år långa simuleringstiden.



Figur 47. Resultat från den dynamiska reservoarsimuleringen för Arnagergrönsanden. Blå områden representerar mängden av kapillärt (inom porutrymmen) infångat koldioxid efter 6 000 år (från Mortensen m.fl. 2016).

Undre krita

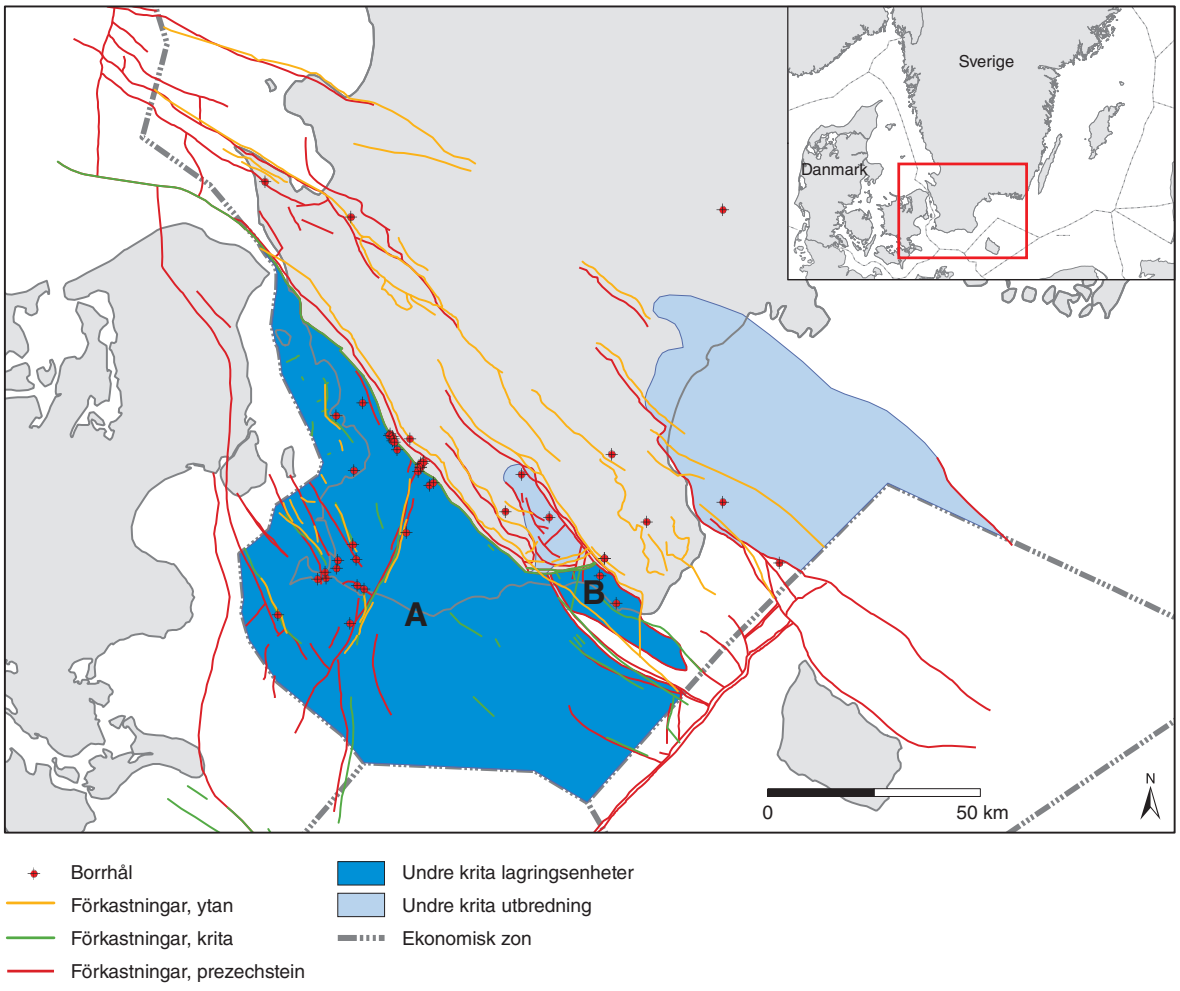
I gränssnittet från övre jura och en bit in i undre krita finns ett berggrundsavsnitt som består av sandstenshorisonter som ännu inte har någon formell stratigrafisk definition. Sandstenslagren har mer eller mindre samma utbredningsområde som Arnagergrönsanden men har stora lokala variationer i mäktighet och sammansättning. Sekvensen består av kvartssandsten med mellanlager av silt- och lersten (Erlström 1994, Lindström & Erlström 2011). Hög porositet och permeabilitet har mätts från sandstenslagren och uppskattningsvis bedöms medelporositet till 25 procent och medelpermeabilitet till 200 mD. Andel sandstenslager i förhållande till lersten bedöms till 65 procent (Mortensen 2004).

Potential för geologisk lagring av koldioxid på lämpligt djup bedöms kunna rymmas inom två delar av undre krita-sekvensen, se figur 48:

- Lagringsenhet A, lokaliserad i området söder om Romeleåsens förkastningszon
- Lagringsenhet B, inom den södra delen av Vombsänkan.

Undre krita, lagringsenhet A är en delvis öppen salin akvifer avgränsad i nordöst av Romeleåsens förkastningszon och med ett utbredningsområde på ca 5 600 km^2. Djup till toppen av lagringsenheten är ca 965 m och genomsnittlig mäktighet är 29 m.

Undre krita, lagringsenhet B utgör en delvis stängd, förkastningsbetingad salin akvifer med begränsad hydraulisk förbindelse. Enheten är lokaliserad i södra delen av Vombsänkan och täcker en area på



Figur 48. Undre krita, total utbredning i ljusblått och lagringsenheter i mörkare blått (från Mortensen 2016).

ca 300 km^2. Djupet till toppen av lagringsenhet B är ca 776 m och den genomsnittliga mäktigheten uppgår till ca 200 m. Det råder dock en viss osäkerhet kring djup och mäktighet för Undre krita B eftersom de litologiska gränserna är dåligt definierade inom området.

För lagringsenheterna Undre krita A och B har det på grund av begränsad mängd data enbart utförts statiska beräkningar, se tabell 11. Beräkningsresultaten nedan är från båda enheterna som beräknat inom projektet NORDICCS.

Tabell 11. Fysikaliska parametrar som använts för beräkning av lagringskapacitet för Undre krita A och B.

	Volym, km^3	Sand N/G	Porositet	CO_2-densitet	Teoretisk kapacitet, Mt	Effektiv kapacitet, Mt
Undre krita A	164	0,65	0,25	0,620	16 523	330
Undre krita B	59	0,65	0,25	0,600	5 753	115

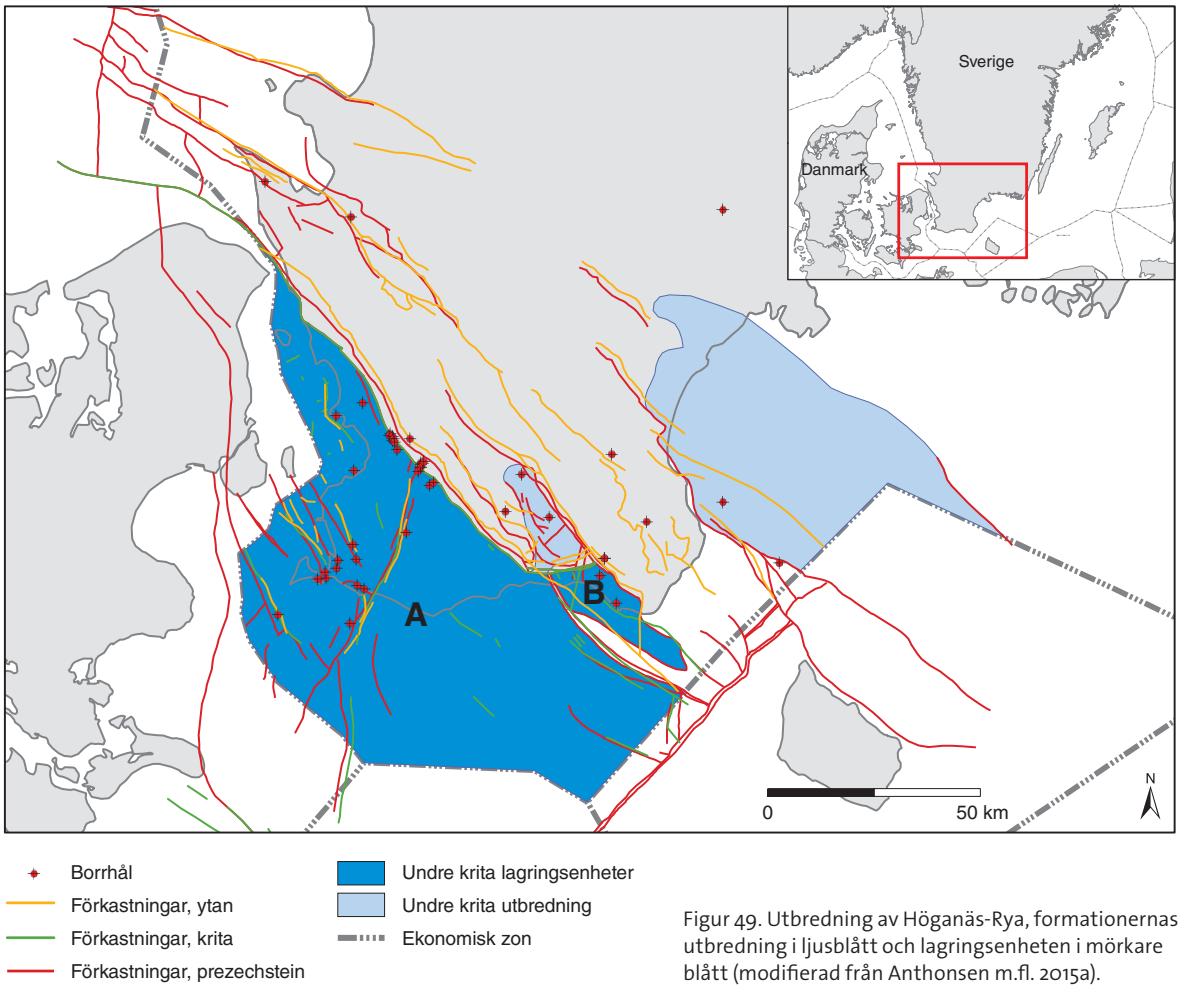
Statiska beräkningar för lagringsenheten Undre krita A indikerar ett porutrymme motsvarande en teoretisk lagringskapacitet på 16 523 miljoner ton koldioxid. Inkluderas en lagringsfaktor på 2 procent uppskattas den effektiva lagringskapaciteten för Undre krita A till 330 miljoner ton koldioxid.

För Undre krita B är motsvarande lagringskapacitet 5 753 miljoner ton koldioxid för full utnyttjande av porutrymmet, och 115 miljoner ton koldioxid vid en utnyttjande på två procent. Eftersom Undre krita B är en förkastningsbetingad lagringsenhet bedöms förkastningsintensiteten kring enheten vara hög och det finns risk för kontaminering med grundvattnet.

Höganäs–Rya

Höganäs–Rya sekvensen utgörs av Höganäsformationen (rät–hettang) och delar av Ryaformationen (sinemur), se figur 45. Formationerna Höganäs och Rya påträffas i västra Skåne inom svenskt territorium, se figur 49, men finns även delvis representerade i Danmark, Norge och Tyskland, här som ekvivalenten *Gassumformationen*. Sekvensen påträffas i samtliga borrningar i Höllvikengravsänkan och på Barsebäcksplattformen. Formationerna utgör berggrundsytan inom ett stort område i nordvästra Skåne. Lagerföljden består av en växellagrad sekvens med sandsten, siltsten, lersten och kol bildat i en kustnära avsättningsmiljö med deltan, laguner och flodslätter. Sandavsnitten i sekvensen är linsformade med stor lateral utbredning och enskilda sandavsnitt kan ha en mäktighet uppemot 20 m. 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. Sandstenslagren består till merparten av finkornig, ren kvartssand. Lager med medelsand och grovsand utgör ca 10 procent av den sammanlagda sandmäktigheten i formationen. På grund av växellagringen uppvisar Höganäs–Rya sekvensen stor heterogenitet och därmed även stor variation i porositet och permeabilitet. Mäktigheten och de fysikaliska egenskaperna på enskilda sandstenslager varierar också. Finsandlagren har god porositet men relativt dålig genomsläpplighet (permeabilitet). Enligt mätningar är permeabiliteterna ofta mindre än 100 mD för finsandslagren medan motsvarande värden för mellansand är 1–3 D. Genomsnittsvärdena för porositet och permeabilitet i sandstensavsnitten i Höganäs–Rya sekvensen har uppskattats till 23 procent och 200 mD, respektive (Mortensen 2014).

Lagringsenheten Höganäs–Rya är en delvis förkastningsbetingad, delvis öppen, flerlagrad, salin akvifer. Området som är lämpligt för geologisk lagring av koldioxid är begränsat till den del som ligger söder om Romeleåsens förkastningszon (fig. 49), och omfattar inom svenskt territorium en area på ca 2 100 km^2. Enheten är begränsad i nordöst av Romeleåsens förkastningszon, i sydöst av Svedalaförkastningen och delvis i sydväst av Öresundsförkastningen. Genomsnittlig mäktighet på lagringsenheten är ca 180 m där andelen sandstenslager (N/G) utgör ca 51 procent av lagerföljden. Djupet till toppen av lagringsenheten Höganäs–Rya är mer än 976 m. Det har inte påvisats förekomst av strukturella fällor inom lagringsenheten Höganäs–Rya, dock kan enskilda, linsformade sandstenslager lokalt fungera som strukturellt slutna akviferer eftersom de omsluts av täta lerstenar.



Figur 49. Utbredning av Höganäs-Rya, formationernas utbredning i ljusblått och lagringsenheten i mörkare blått (modifierad från Anthonsen m.fl. 2015a).

På grund av begränsad mängd data har det enbart gjorts statiska beräkningar för lagringsenheten Höganäs–Rya, se tabell 12. Nedan ges exempel på kapacitetsberäkning från projektet NORDICCS.

Tabell 12. Fysikaliska parametrar som använts för beräkning av lagringskapacitet för Höganäs–Rya.

	Volym, km³	Sand N/G	Porositet	CO_2-densitet	Teoretisk kapacitet, Mt	Effektiv kapacitet, Mt
Höganäs–Rya	373	0,51	0,23	0,620	27127	543

Enligt beräkning för lagringsenheten Höganäs–Rya indikeras ett porutrymme motsvarande en teoretisk lagringskapacitet på 27127 miljoner ton koldioxid. Inkluderas en lagringsfaktor på 2 procent blir den effektiva lagringskapaciteten för Höganäs–Rya 543 miljoner ton koldioxid.

Bunter

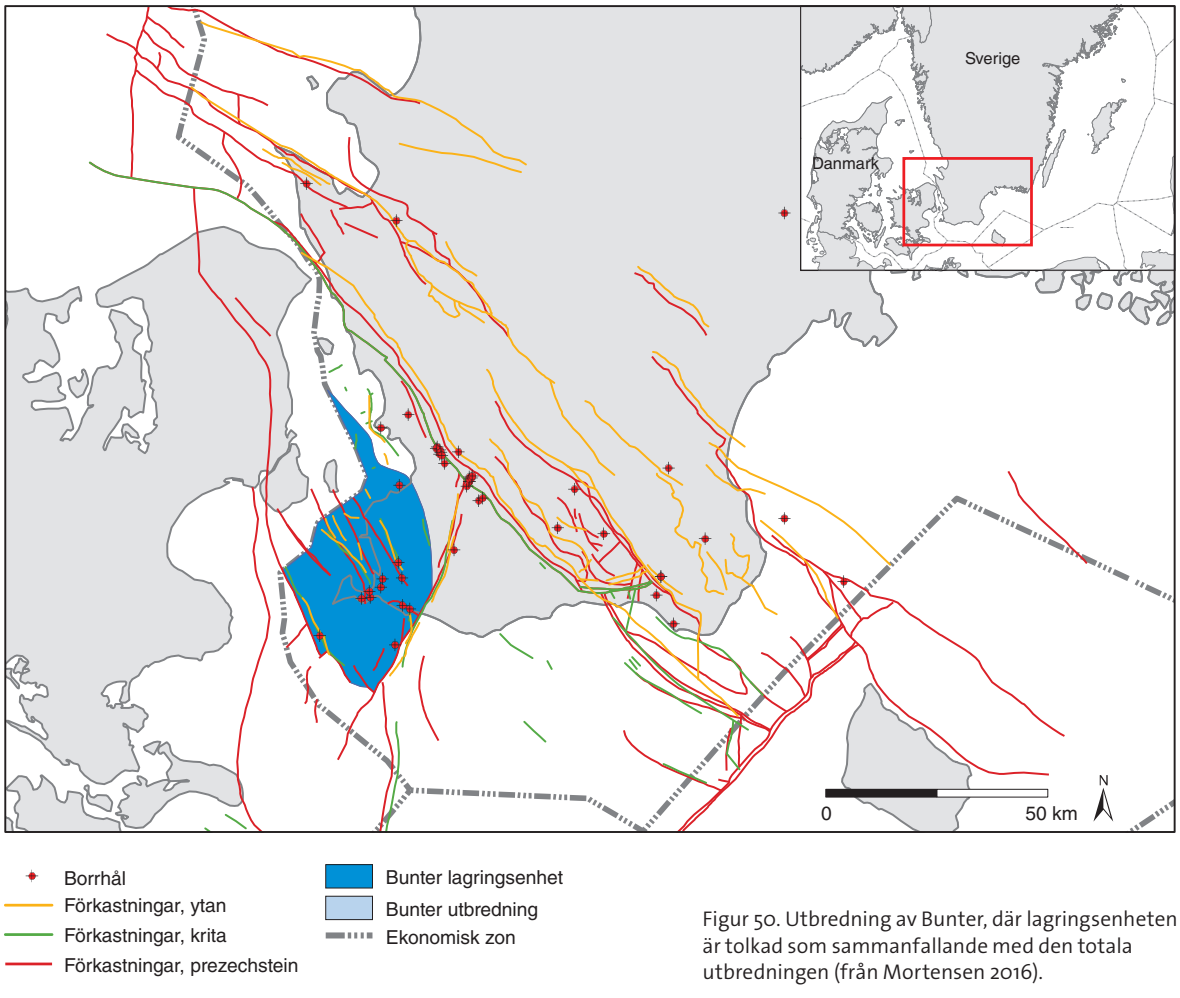
Bunter används här som samlingsnamn för de triassiska sandstensavsnitt som inom svensk stratigrafi (Erlström & Sivhed 2012) tillhör Ljunghusensandstenen och Hammarformationen, se figur 45. Sandstensavsnitten som här beskrivs är ekvivalenta till delar av den dansk-tyska *Buntsandstein*, eller *Bunter Sandstone*. I Sverige är berggrunden likartat uppbyggd även om området med berggrund från äldre trias är mycket mindre och enbart påträffas i de djupaste delarna av Höllvikengravsänkan.

Den undre delen av sandstensavsnitten som utgörs av Ljunghusensandstenen är en mycket välsorterad, medel- och grovkornig, uppemot 50 m tjock och homogen kvartssandsten med mycket goda

akviferegenskaper. Mellanliggande lager med siltsten förekommer. Uppåt i lagerföljden sker en gradvis övergång till mer leriga sandstenar, motsvarande Hammarformationen. Hammarformationen utgörs av grön- och rödaktig, finkornig gråvacka mellanlagrad av grovkornig arkosisk sandsten. Borrningar på Falsterbohalvön och i Köpenhamn har bekräftat en berggrund som till stor del består av rödgrön, medelkornig till grovkornig, fältspatsrik kvartssandsten. Siltiga lerstenslager förekommer frekvent inom den sandstensdominerade sekvensen.

Den triassiska berggrundens mäktighet ökar markant söderut i Höllvikengravsänkan. Lagringsenheten Bunters genomsnittliga mäktighet är 137 m där andelen sandstenslager uppskattas till 67 procent. Toppen av lagringsenheten finns på mer än 1 500 m djup. Medelporositet och -permeabilitet har, trots mycket begränsad data, uppskattats till 12 procent och 300 mD, respektive (Mortensen 2014). Porositetsvärden från geofysiska loggar har visat på sandstensintervall med en porositet på 20–25 procent. I Köpenhamn produceras stora mängder varmt vatten (ca 70 °C) för geotermisk energiproduktion ur Buntsandstenen vilket bevisar att sandstenslagren är goda akviferer med hög permeabilitet.

Utbredningen av lagringsenheten Bunter är inom svenskt territorium begränsad till Höllvikengravsänkan, där den begränsas i sydöst av Svedalaförkastningen och i sydväst av Öresundsförkastningen (fig. 50). Sandstenssekvensen fortsätter dock sin utbredning över den svenska gränsen mot Tyskland i söder och Danmark i väster. Lagringsenheten Bunter är en delvis förkastningsbetingad, delvis öppen salin akvifer, och finns i Sverige inom lämpligt djup för koldioxidlagring inom hela sitt utbredningsområde på ca 1 100 km^2.



Figur 50. Utbredning av Bunter, där lagringsenheten är tolkad som sammanfallande med den totala utbredningen (från Mortensen 2016).

På grund av begränsad mängd data har det enbart gjorts statiska beräkningar för lagringsenheten Bunter, se tabell 13. Nedan följer exempel på statiska beräkningar från projektet NORDICCS.

Tabell 13. Fysikaliska parametrar som använts för beräkning av lagringskapacitet för Bunter.

	Volym, km^3	Sand N/G	Porositet	CO_2-densitet	Teoretisk kapacitet, Mt	Effektiv kapacitet, Mt
Bunter	157	0,67	0,12	0,655	8 268	165

Statiska beräkningar för lagringsenheten Bunker indikerar ett porutrymme motsvarande en teoretisk lagringskapacitet på 8 268 miljoner ton koldioxid. Med en lagringsfaktor på 2 procent uppskattas den effektiva lagringskapaciteten för Bunter till 165 miljoner ton koldioxid.

Takbergarter i sydvästra Skåne

De primära takbergarterna i sydvästra Skåne utgörs av *Höllvikenformationen* sydväst om Romeleåsens förkastningszon och *Vombformationen* i Vombsänkan.

Höllvikenformationen har en kontinuerlig utbredning med fortsättning mot söder och västerut över svensk ekonomisk zon och har en mäktighet på 900–1 700 m. Höllvikenformationen domineras av mer eller mindre lerig kalksten och skrivkrita som mellanlagras av lera samt silt- och sandsten. Andelen lera och finmaterial är hög i formationen. Inom delar av utbredningsområdet inkluderar Höllvikenformationen även två större sekvenser dominerade av sandsten, Hansaformationen och Lundasandstenen. Bägge har lokal utbredning med betydande mäktigheter inom vissa områden. Generellt ökar andelen kalksten och krita mot sydväst, och trots varierande sand net/gross-förhållanden över området uppskattas medelvärdet till 9 procent (Anthonsen m.fl. 2015b).

Vombformationen är primär takbergart för Undre krita B lokaliserad i Vombsänkan. Vombformationen är delvis ekvivalent, men mer heterogent uppbyggd, till Höllvikenformationen och består av en heterogen lagerföljd med graderande sandig kalksten, silt- och sandsten, märgelsten, lersten, konglomerat och tunna lager med kol. Vombformationen täcker hela Undre krita B med en mäktighet runt 600 m. På grund av det höga sand net/gross-förhållandet, som uppskattas till 60 procent, råder det en del osäkerhet rörande kvalitén och lämpligheten av denna formation som takbergart.

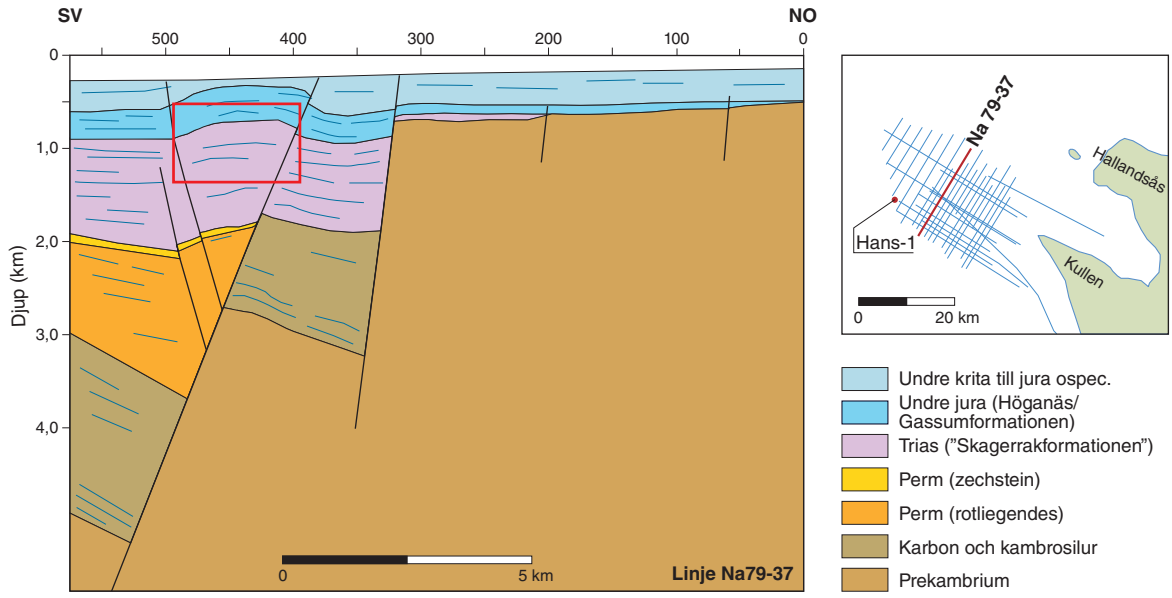
Förutom de två primära takbergarterna finns det mellan de potentiella lagringsenheterna Bunter och Höganäs–Rya en hundratals meter mäktig sekvens triassiska bergarter bestående av lerstenar och arkoser som inom vissa delar har lämpliga egenskaper som intermediär takbergart. Lerstenarna har bra egenskaper som takbergart medan de mer sandiga arkosavsnitten kan fungera som intermediär lagringsplats för eventuell migrerande koldioxid. Det saknas dock information om bergarternas fysikaliska egenskaper vilket gör det svårt att bedöma deras täthet. I lagringsenheten Höganäs–Rya kan de mellanlagrande lerstens- och skifferavsnitten lokalt fungera som intermediära takbergarter.

Det finns även ett fåtal meter mörk skiffer av apt ålder i sydvästra Skåne. Denna är ännu inte stratigrafiskt definierad och dess utbredning är därmed osäker, men sannolikt kontinuerlig (Sivhed m.fl. 1999). Den mörka skiffern från apt påträffas mellan det underkretaceiska sandstensavsnittet och Arnagergrönsanden och bedöms, trots dess ringa mäktighet, även den kunna fungera som intermediär takbergart.

Lagringsmöjligheter i Kattegatt

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

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



Figur 51. Tolkad tvärsektion från södra Kattegatt, baserad på OPABs seismiska mätningar samt information från borrning (Erlström & Sivhed 2001). Inramat område i rött markerar den intressanta, antiklinala lagringsstruktur som nämns i texten (från Erlström m.fl. 2011).

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. 51). Man fann ingen olja men borrningen resulterade i en geologisk dokumentation som medförde en bättre tolkning av de seismiska profilerna.

Tänkbara lagringsakviferer

Gassumformationen är i borrningen 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 porositet kring 25 procent för sandstensavsnitten. Inom svenskt område ligger formationen sannolikt för ytligt för koldioxidlagring. Toppen på formationen ligger på ca 500 m djup och bottnen på ca 1 000 m djup.

Den underliggande Skagerrakformationen är drygt 1 000 m tjock och ligger på djup mellan 1 000 och 2 000 m vilket gör den mer intressant som lagringsakvifer. Lagerföljden är mycket varierande med grova, fältspatrika sandstenslager med potentiellt goda akviferegenskaper. Lagren är dock inte undersökta i detalj.

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.

Beräkning för lagringskapaciteten i Södra Kattegat är mycket osäker och är sannolikt mindre än 100 miljoner ton koldioxid på grund av fällans begränsade utbredning och uppbyggnad.

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. Sammantaget råder det dock stor osäkerhet kring hur tät takberggrunden är eftersom området ligger inom den Fennoskandiska randzonens tektoniskt störda berggrund.

Sammanställning

Beskrivningarna och resultaten ovan pekar på att det finns potential för geologisk lagring av koldioxid i Sverige. De områden som har störst potential och där det finns mest tillgänglig data är i sydöstra Östersjön och sydvästra Skåne. I tabell 14 ges en sammanställning av fysikaliska parametrar samt statiska kapacitetsberäkningar för identifierade lagringsenheter inom dessa två områden.

Dynamiska beräkningar för lagringskapacitet har genomförts för lagringsenheterna Faludden och Arnagergrönsand. Inom NORDICCS användes två olika metoder, bassängmodellering (SEMI) och dynmisk reservoarsimulering (ECLIPSE 100), där stora skillnaderna i resultaten pekar på hög osäkerhet inom modelleringarna. Brist på data resulterar i många antaganden och förenklingar vilket påverkar bl.a. hastighet och avstånd av migration samt graden av kapillär infångning och lösning i formationsvatten. Dynamiska beräkningar kan, precis som statiska beräkningar, betraktas som ungefärliga uppskattningar av lagringskapacitet. Utifrån de data som var tillgängliga för kapacitetsberäkningarna kan resultaten betraktas som representativa.

I projektet NORDICCS togs det fram en metod för rankning, eller utvärdering, av identifierade potentiella lagringsenheter, se tabell 15. Metoden bygger på tidigare beskriven klassningsmetod (tabell 3) där både fysikaliska parametrar för lämplighet samt graden av kunskap, eller mogenhet, är avgörande för resultaten. För utvärdering läggs poäng till de olika färgerna i klassningen:

- Grön representerar optimala förhållanden och är lika med tre poäng.
- Gul representerar osäkra, men i vissa fall godtagbara, förhållande och är lika med två poäng.
- Röd representerar stor osäkerhet och försiktighet tillrådes, lika med ett poäng.

Enligt denna utvärdering kan en lagringsplats maximalt uppnå 45 poäng. Tabell 15 illustrerar en schematisk framställning av utvärderade lagringsenheter i Sverige med störst potential för geologisk

Tabell 14. Genomsnittliga värden för fysikaliska parametrar samt statiska beräkningar för lagringskapacitet för samtliga identifierade lagringsenheter. För effektiv kapacitetsberäkning användes en S_{eff} på 2 %. Namn på lagringsplats refererar till det eller de stratigrafiska intervall lagringsplatsen spänner över (modifierad från Mortensen 2014).

Namn	Djup (m)	Mäktighet (m)	N/G	Porositet (%)	Permeabilitet (mD)	Teoretisk kapacitet (Mt)	Effektiv kapacitet (Mt)
Faludden	830	45	0,90	14	147	37271	745
När	817	36	0,65	10	50	21294	426
Viklau	865	57	0,65	8	30	27631	553
Arnagergrönsand	946	39	0,80	26	681	26050	521
Undre krita, enhet A	965	29	0,65	25	200	16523	330
Undre krita, enhet B	776	200	0,65	25	200	5753	115
Höganäs–Rya	976	180	0,51	23	200	27127	543
Bunter	1509	137	0,67	12	300	8268	165

lagring av koldioxid. Åtta svenska lagringsenheter ingår i utvärderingen där lagringskapacitet har beräknats utifrån en lagringsfaktor på två procent. Dalders-strukturen ingår också i klassningen och är listad som fälla med en lagringsfaktor på tio procent enligt metodiken för fällor definierad i projektet GeoCapacity (Vangkilde-Pedersen m.fl. 2009) , se figur 19 i tidigare avsnitt.

Lagringsenheterna i Sverige som har bäst potential för geologisk lagring av koldioxid är Faludden som i nuläget uppnår 40 poäng samt Arnagergrönsand, Höganäs–Rya och Undre krita A som alla i nuläget uppnår 39 poäng. Som framgår av tabell 15 finns det parametrar som kan förändra utfallet. Av störst betydelse är seismiska undersökningar, där nya eller kompletterande undersökningar kan öka poängtalet för berörda lagringsenheter. Även fördjupade undersökningar rörande interaktion med grundvatten eller påverkan från förkastningar skulle kunna ändra poängtalet i positiv eller negativ riktning.

Tabell 15. Utvärdering av de svenska lagringsenheter och fällor som bedöms ha bäst potential för geologisk lagring av koldioxid (modifierad från Aagaard m.fl. 2014).

Lagringsenhet (u) eller fälla (t)			**Reservoaregenskaper**						**Takbergartsegenskaper**					**Säkerhet/risk**		**Mogenhet/ datatillgänglighet**	
Namn	Lagrings-kapacitet i Mt	Total poäng	Djup	Porositet	Permeabilitet (gas)	Heterogeneitet	Portryck	Mäktighet/Net sand	Mäktighet	Förkastningsintensitet	Lateral utbredning	Multipla takbergarter	Litologi	Seismicitet	Grundvatten	Borrhålsdata	Seismiska undersökningar
Faludden (u)	745	40	3	2	3	3	2	2	3	3	3	3	2	3	3	3	2
Arnagergrönsand (u)	521	39	3	3	3	3	3	2	3	2	3	2	2	3	2	3	2
Höganäs–Rya (u)	543	39	3	3	3	3	3	2	3	2	3	3	2	3	2	3	1
Undre krita, enhet A (u)	330	39	3	3	3	3	3	2	3	2	3	3	2	3	2	3	1
Daldersstrukturen (t)	22	38	3	2	2	3	2	2	3	3	3	3	2	3	3	3	1
När (u)	426	37	3	2	2	3	3	2	3	3	1	3	2	3	3	3	1
Bunter (u)	165	37	3	2	2	3	3	2	3	2	3	3	2	3	2	3	1
Viklau (u)	553	36	3	1	2	3	3	2	3	3	1	3	2	3	3	3	1
Undra krita, enhet B (u)	115	36	2	3	3	3	3	3	3	1	3	3	2	2	1	3	1

CCS-SITUATIONEN INOM ÖSTERSJÖREGIONEN

Geologi tar inte hänsyn till landgränser eller ekonomiska zoner. Som det har påvisats inom denna rapport och inom geologiska beskrivningar generellt sträcker sig geologiska formationer och enheter utöver landgränser mot grannländer och ibland ännu längre. De identifierade geologiska enheterna som visat sig mest lämpliga för geologisk lagring av koldioxid har utbredningsområden som sträcker sig utanför svenskt territorium mot sydöst, syd och sydväst. Man behöver därför även titta på grannländerna och inte minst de faktorer som har betydelse för geologisk lagring av koldioxid. Utöver de geologiska förhållandena behöver man även utreda granländernas situation gällande nationella lagar för geologisk lagring av koldioxid samt integrering av EU CCS-direktivet, och även inkludering och ratificering av internationella avtal som Londonkonventionen (LC) och Londonprotokollet (LP) för transport av koldioxid.

CCS-status, projekt, samarbeten

I Östersjöregionen har nätverket BASRECCS pågått sedan 2012 med syfte att stärka samarbetet kring CCS inom regionen. Partners i nätverket utgörs av både akademi och industri, och ledde i början av 2016 till den EU-finansierade förstudien *CGS Baltic* (*CO_2 Geological Storage in the Baltic Sea Region*). Studien som avslutades i mars 2017, skulle bl.a. rapportera CCS-situationen i Östersjöregionen samt utreda möjligheter och förbereda för ansökan för ett koldioxidlagringsprojekt i Östersjöregionen i regi av Östersjöstrategin.

Gällande nationell lagstiftning kring geologisk lagring av koldioxid, är provinjektering av koldioxid i forskningssyfte i mindre pilotanläggningar med uppemot 100 kt koldioxid tillåten i alla våra grannländer som är medlemmar i EU. Nedan ges en översikt över tillstånd för koldioxidlagring samt CCS-status och aktiviteter i länderna inom Östersjöregionen. Inga informationer finns för Ryssland.

Finland

Berggrunden i Finland utgörs till mestadels av kristallint berg och de har därför ingen möjlighet för koldioxidlagring i djupa sedimentära akviferer. Möjligheter för lagring i landets basaltiska bergarter bedöms som obefintlig och olönsam. Geologisk lagring av koldioxid är inte tillåten i Finland.

Finland har tagit del av Londonkonventionen, men inte Londonprotokollet.

Finland har haft ett eget CCS-program, CCSP (*CLIC Innovation Oy's Carbon Capture and Storage R&D Program*) från 2011 till 2016 med syftet att stärka finsk industri och forskning inom CCS-tekniken och därmed stärka förutsättningarna för bl.a. internationella samarbeten rörande CCS. Mer information finns på programmets webbplats, se länk i bilaga 1.

Estland

Estland har inga geologiska lager på lämpligt djup för koldioxidlagring. Geologisk lagring av koldioxid är inte tillåten i Estland, men landet har inkluderat och ratificerat både Londonkonventionen och Londonprotokollet.

Geologiska institutionen på tekniska universitetet i Tallinn (TTUGI) medverkar bl.a. i det stora EU-projektet ENOS, se tidigare beskrivning i introduktionsavsnittet.

Tallins tekniska universitet ska även medverka i ett fyrårigt projekt med start i september 2017. Projektet heter CLEANCER (*CLEAN clinker production by Calcium looping process*) och ska via experiment och pilottest undersöka möjligheterna för både bindning av koldioxid (*CO_2 mineral carbonation*) i samband med avfallsprodukter inom cementindustrin, samt geologisk lagring av koldioxid från cementindustrin.

Lettland

I Lettland är koldioxidlagring inte tillåtet och landet har inte tagit del i Londonkonventionen eller Londonprotokollet. Geologiskt finns det dock potential för koldioxidlagring i mellankambriska sandstenslager, bl.a. i ett antal strukturella fällor på land och till havs.

Litauen

I Litauen är geologisk lagring av koldioxid tillåten både på land och till havs. Litauen har god potential för koldioxidlagring i strukturella fällor inom den kambriska och devonska lagerföljden (Sliaupa m.fl. 2008). Litauen har genomfört provinjekteringar i samband med studier för EOR i 2013.

Litauen har inte tagit del i Londonkonventionen eller Londonprotokollet.

Polen

I Polen är geologisk lagring av koldioxid förbjuden i första hand fram till år 2024 med undantag för lagring i samband med demonstrationsanläggningar till havs. I ett dekret från polska Miljöministeriet (*Ministry of Environment*) tillåts lagring av koldioxid inom kambriska akviferer till havs inom östra delen av polskt territorium där det även finns ett antal olje- och gasfält. Polen har tagit del av Londonkonventionen, men inte Londonprotokollet.

Berggrunden i Polen domineras av sedimentär berggrund och akviferer finns på olika djup. Lagringspotentialen bedöms som mycket god och potential finns även i samband med olje- och gasfält. Polens geologiska institut (PGI) har tidigare tagit fram och publicerad lagringsatlas för koldioxidlagring i Polen vilken finns tillgänglig på deras webbplats, se länk i bilaga 1.

I Polen pågår det för närvarande inga pilot- eller demonstrationsprojekt för koldioxidlagring, men ett antal institutioner inom landet är för tillfället involverade i fyra forskningsprojekt kring koldioxidlagring i Polen:

- SHALESEQ undersöker fysiokemiska effekter av koldioxidlagring i gasförande skiffer med syfte för storskala lagring.
- PRO_CCS undersöker miljöeffekter av koldioxidlagring samt ekonomisk effektiva och socialt accepterade CCS/EOR processer. Syftet är undersökning för storskala koldioxidlagring samt att öka kännedomen om CCS till befolkning och politiker.
- MUSE undersöker koldioxidlagring i relation till miljö och energi med syfte för storskala lagring.
- CO2MARINE ska utreda de miljömässiga effekterna av koldioxidläckage från djupliggande geologiska lager till havs.

Tyskland

Tyskland tillåter koldioxidlagring uppemot totalt 4 miljoner ton per år, med maximalt 1,3 miljoner ton koldioxid per projekt årligen. Enskilda stater i Tyskland har dock möjlighet att avgöra om lagen ska tillämpas eller inte, och varje stat kan därmed tillåta eller förbjuda koldioxidlagring inom den egna staten. I nuläget har tre stater i Tyskland förbjudit koldioxidlagring. Lagen gällande koldioxidlagring ska igen utvärderas under 2018.

Tyskland har inkluderat och ratificerat både Londonkonventionen och Londonprotokollet.

Just nu håller Tyskland på med avveckling av ett pilot projekt i Ketzin, se tidigare beskrivning i *Pågående koldioxidlagringsprojekt*, som kommer att avslutas i december 2017, mer information om projektet finns beskrivet tidigare i introduktionsavsnittet. Tyskland har gjort en GIS-baserad lagringskatalog som bl.a. kan tillämpas för koldioxidlagring. Se webbplatsens länk i bilaga 1.

Danmark

I Danmark är alla former för koldioxidlagring, även i mindre skala i forskningssyfte, som utgångspunkt förbjudet och det fram till år 2020 då man på nytt ska ta ställning. Gällande koldioxidlagring till havs i samband med EOR ska eventuella ansökningar i ett första skede behandlas och utvärderas i Folketinget (motsvarande Riksdagen). I nuläget finns det inga pågående ansökningar för koldioxidlagring i samband med EOR i Danmark (pers. kom. Karen Lyng Anthonsen, GEUS).

Danmark har inkluderat och ratificerat både Londonkonventionen och Londonprotokollet.

Danmarks och Grönlands geologiska undersökning (GEUS) har deltagit i en rad europeiska projekt för koldioxidlagring och har i huvudsak fokuserat på lagring i strukturella fällor. Med den övervägande sedimentära berggrund har Danmark mycket goda förutsättningar för koldioxidlagring i djupa akviferer. GEUS ansvarade och bidrog även till den nordiska lagringsatlasen som togs fram inom projektet NORDICCS, se länk i bilaga 1.

Med start 2017 kommer GEUS att leda ett nytt projekt i Danmark kring lagring, CO2Nvert (*CO_2 Neutral energy system utilising the subsurface*). Projektets mål är att undersöka de tekniska och ekonomiska möjligheter för ett integrerat energisystem där berggrunden under ytan används för geotermisk energiproduktion samt lagring, inklusive temporär koldioxidlagring. Tre olika tekniker kommer undersökas:

- Termisk värmelagring i djup akvifer (djupare än 1 000 m), där vattnet värms upp från överskottselektricitet från förnybara energikällor.
- Gaslagring i geologiska strukturer (saltdomer), där gasen utvecklas från elektricitet genom kemiska reaktioner mellan CO_2 och CH_4.
- BECCS, där koldioxid fångas in från biogena kraftvärmeverk (CHP) eller industri och därefter temporärt lagras i berggrunden med syfte för framtida användning inom produktion av hållbara syntetiska bränslen.

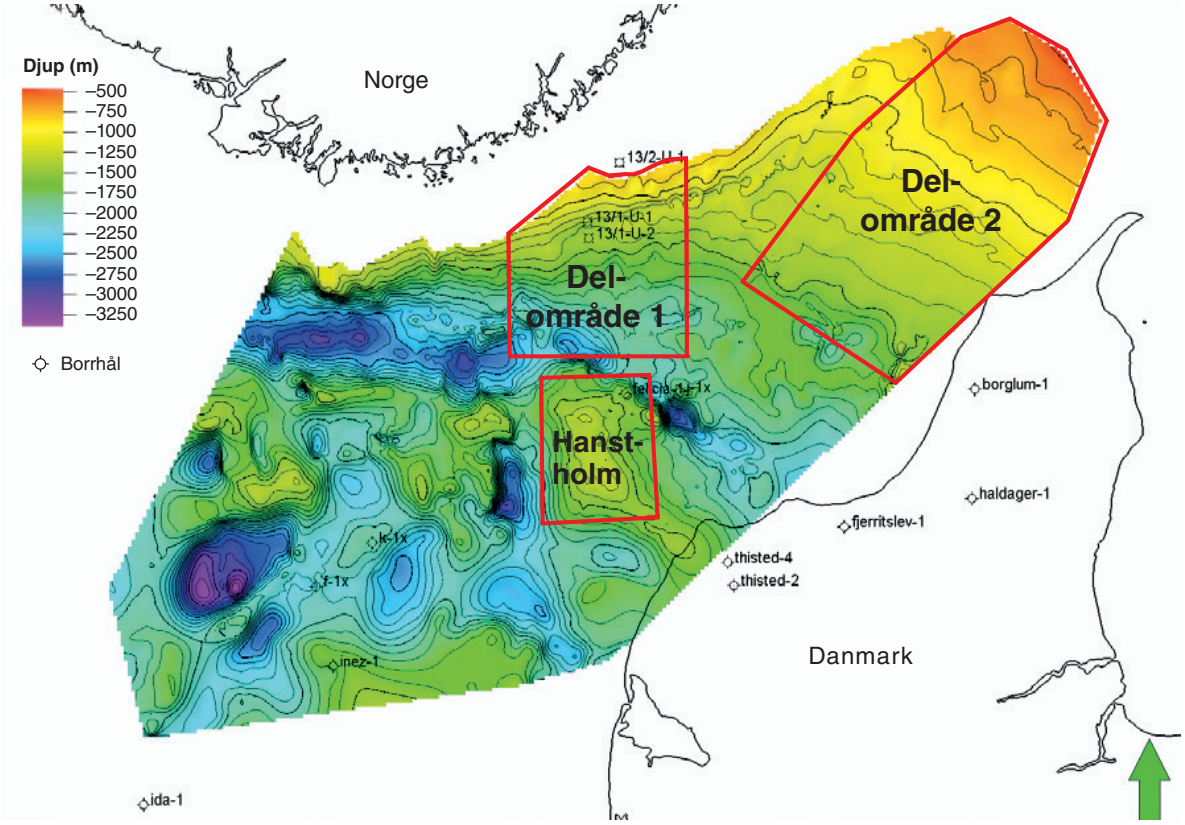
Nedan redogörs i korthet för exempel på gränsöverskridande samarbete kring möjligheter för CCS, inom Skagerrak-Kattegattregionen (Bjørnsen m.fl. 2012). Även om den i projektet utpekade lagringsenheten inte befinner sig inom svenskt territorium, medför formationens utbredning och stupning att injekterad koldioxid kommer migrera mot svenskt territorium varför projektet bör nämnas inom denna rapport.

CCS i Skagerrak–Kattegattregionen

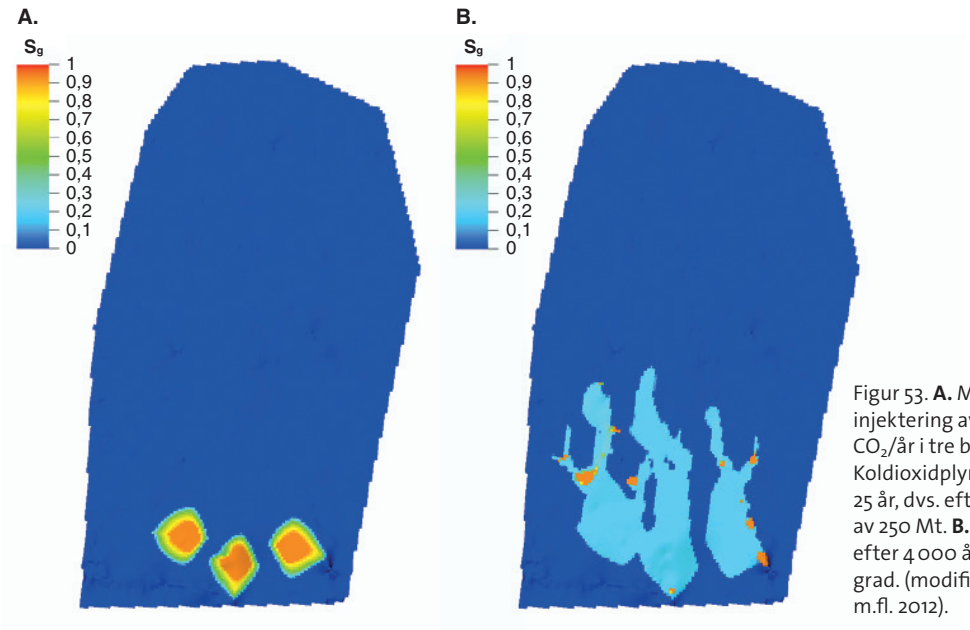
Mellan 2009 och 2011 genomfördes en studie av möjligheterna till CCS i Skagerrak-Kattegattregionen. Tel-Tek, Oslo Universitet, Chalmers Tekniska Högskola, Telemark University College, SINTEF och GEUS genomförde ett EU Interreg IVA projekt med stöd från näringsliv och myndigheter, bl.a. Energimyndigheten i Sverige. Runt Skagerrak-Kattegatt identifierades 27 utsläppskällor med var och en ett årligt utsläpp på mer än 100 000 ton koldioxid. Tillsammans genererar de ca 30 miljoner ton CO_2 vilket utgör ett bra underlag för gemensamma lösningar av transport och lagring i potentiella sandstensakviferer i den jurassiska berggrunden i Skagerrak. Den underjurassiska Gassumformationen, vilken i stort motsvaras av Höganäsformationen i Skåne, bedömdes som den mest intressanta lagringsakviferen.

För tre delområden i Skagerrak, se figur 52, gjordes modelleringar av CO_2-injektering. Simuleringarna av injektering i Gasssumformationen visar att modellområde 2 (fig. 53), norr om Skagen, vid en injekteringshastighet på 10 miljoner ton CO_2/år i tre brunnar under 25 år på ca 1 700 m djup, fungerar som fälla. Simuleringen visar att efter 4 000 år har 24 procent av koldioxiden löst sig i formationsvattnet och resterade del fastnat mikrostrukturellt i lagringsbergarten (eng. *residual trapping*). För svenskt vidkommande angränsar modellområde 2 till vår ekonomiska zon i Västerhavet (fig. 52).

Resultaten bedöms som lovande men det påtalas att mer detaljerad information om berggrunden behövs, bland annat med hjälp av undersökningsborrningar. Vidare påtalas att en regional CCS-lösning i Skagerrak-Kattegatt kräver en samverkan på flera nivåer (myndigheter, näringsliv, universitet m.fl.) samt att det måste finnas finansiella resurser för en implementering av en infrastruktur avseende CCS (Bjørnsen m.fl. 2012).



Figur 52. Karta som visar djupet i meter till Gassumformationens överyta samt placeringen av de tre delområden där modellering av CO_2-injektering gjorts (modifierad från Bjørnsen m.fl. 2012).



Figur 53. **A.** Modellområde 2 med injektering av 10 miljoner ton CO_2/år i tre brunnar under 25 år. Koldioxidplymens utbredning efter 25 år, dvs. efter avslutad injektering av 250 Mt. **B.** Plymens utbredning efter 4 000 år. Sg = gasmättnadsgrad. (modifierad från Bjørnsen m.fl. 2012).

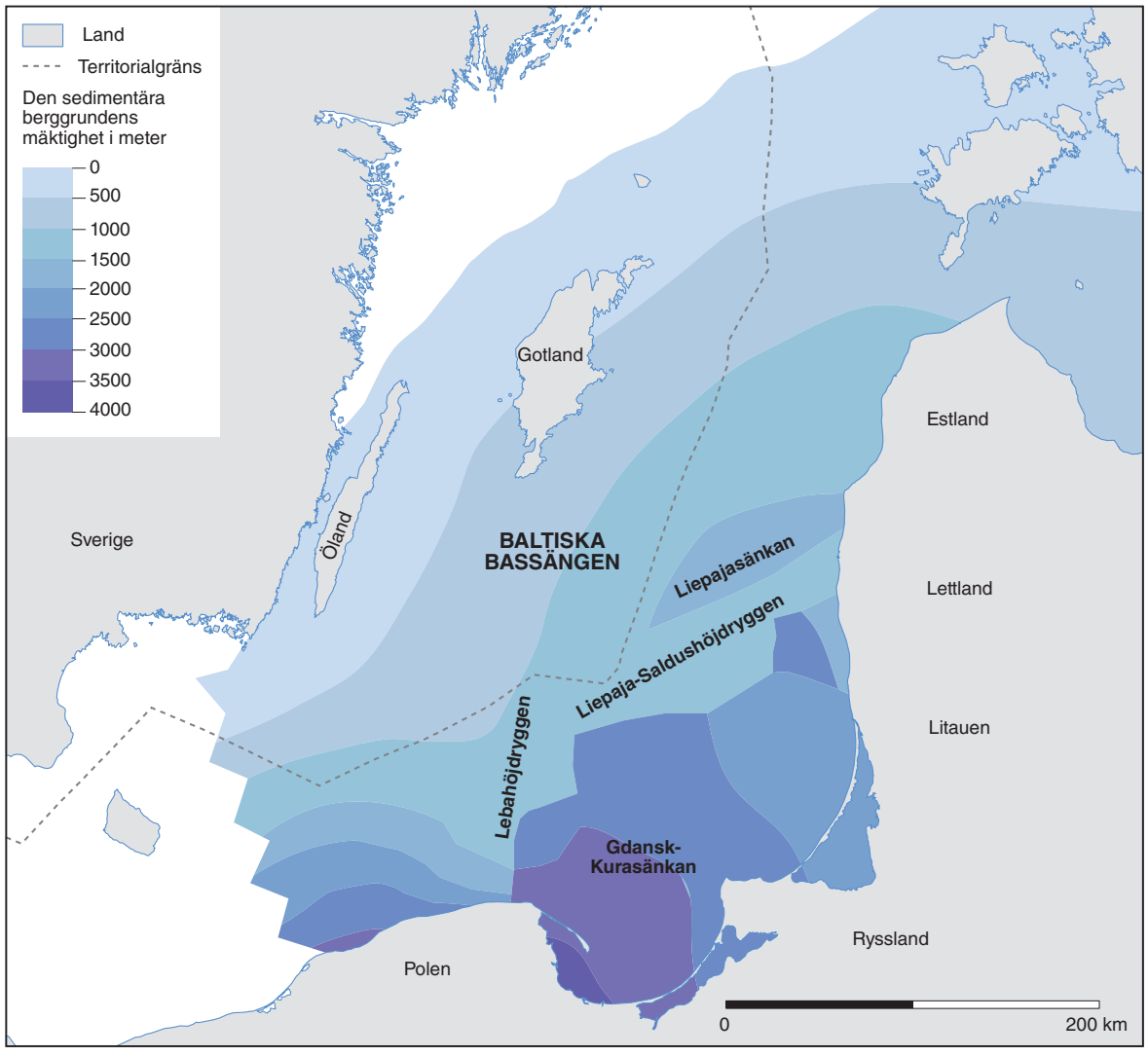
Olje- och gasförekomster i närheten av och med förbindelse till potentiella områden för koldioxidlagring i Sverige

Hittills utförda undersökningar av bl.a. OPAB och SGU visar att det endast är i den södra delen av Östersjön på svensk kontinentalsockel som det finns förutsättningar för större fynd av olja och gas. I Västerhavet, Bottenviken och övrig del av Östersjön saknas antingen sedimentär berggrund eller så har berggrunden inte de egenskaper som krävs, dvs. förekomst av lämpliga moder- eller reservoarbergarter.

Förekomster av kolväten i södra Östersjön

I södra och centrala Östersjön finns ett större sammanhängande område med sedimentär berggrund, som geologiskt tillhör den så kallade Baltiska bassängen, där kolväten påträffas i olika koncentrationer. Denna sedimentära berggrunds mäktighet tilltar successivt söderut i den Baltiska bassängen, se figur 54, från ca 1 200 m på svenskt område i centrala Östersjön, till ca 3 500 m nära den polska kusten.

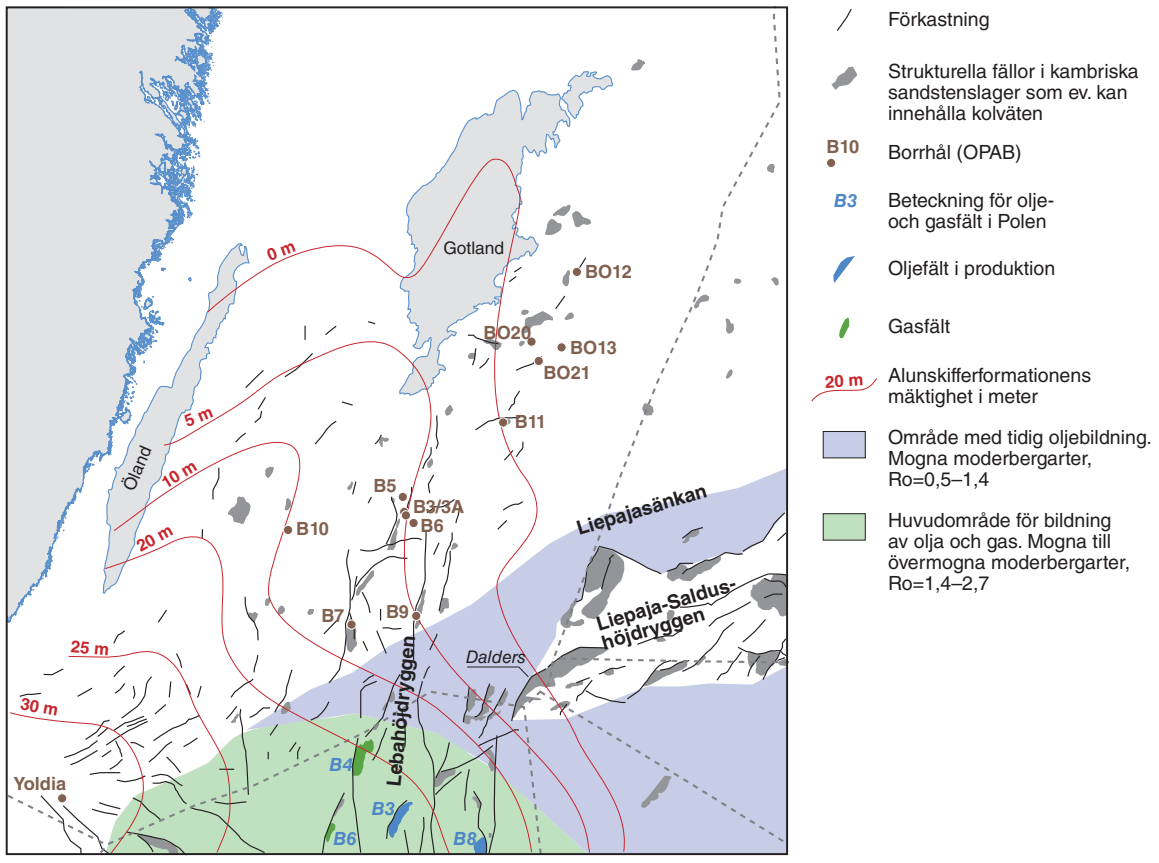
Lagerföljden i denna sedimentära berggrund består underifrån av kambrisk sandsten, siltsten och skiffer samt ordoviciska och siluriska karbonatbergarter. Mot ost och sydost tillkommer sedan, i den



Figur 54. Den sedimentära berggrundens mäktighet i Östersjöområdet (från Erlström m.fl. 2014)

övre delen av berggrunden, devonska bergarter, enligt indikationer från geofysiska mätdata (seismik) och borrningar på litauiskt och polskt område (fig. 30). Ännu mer mot sydost förekommer sedan, på lituaiskt, ryskt och polskt område även en mesozoisk (trias–jura–krita) berggrund som överlagrar den devonska, permiska och karbonska berggrunden och bidrar till den flera kilometer mäktiga sedimentära lagerserien som här överlagrar urberget.

Den huvudsakliga moderbergarten för kolväteförekomsterna i den sedimentära berggrunden i sydöstra Östersjön anses vara avsnittet med kambrisk och ordovicisk svart skiffer (alunskiffer och Dictyonemaskiffer), som ingår i den kambrosiluriska berggrunden med avsnitt av svarta skiffrar och siltstenar med hög organisk halt (Buchardt m.fl. 1997). Mellankambriska och undre siluriska mörka skiffrar och siltstenar anses också kunna bidra till bildningen av kolväten (Kotarba m.fl. 2010), även om dessa inte har lika hög organisk halt. Alunskiffern i den sydvästligaste delen av Östersjön är som mest 20–30 m mäktig, se figur 55, och har även i dessa områden en mognadsgrad som gör att den har kunnat bilda olja och gas. Då alunskiffern norrut och österut avtar i mäktighet bidrar sannolikt andra mörka paleozoiska skiffrar, förutsatt att de uppnått mognad, till den olja som påträffas i den östra delen av Östersjön. Eftersom alunskiffern bedöms vara omogen för större delen av den svenska förekomsten, härstammar merparten av den olja och gas som påträffas i bl.a. de ordoviciska reven på Gotland sannolikt från områden utanför svenskt territorium. Eventuellt kan alunskiffern som förekommer längst i sydost och söder inom svensk ekonomisk zon någon gång under den geologiska historien ha varit på sådant djup att den uppnått mognad och befunnit sig inom det s.k. oljefönstret.

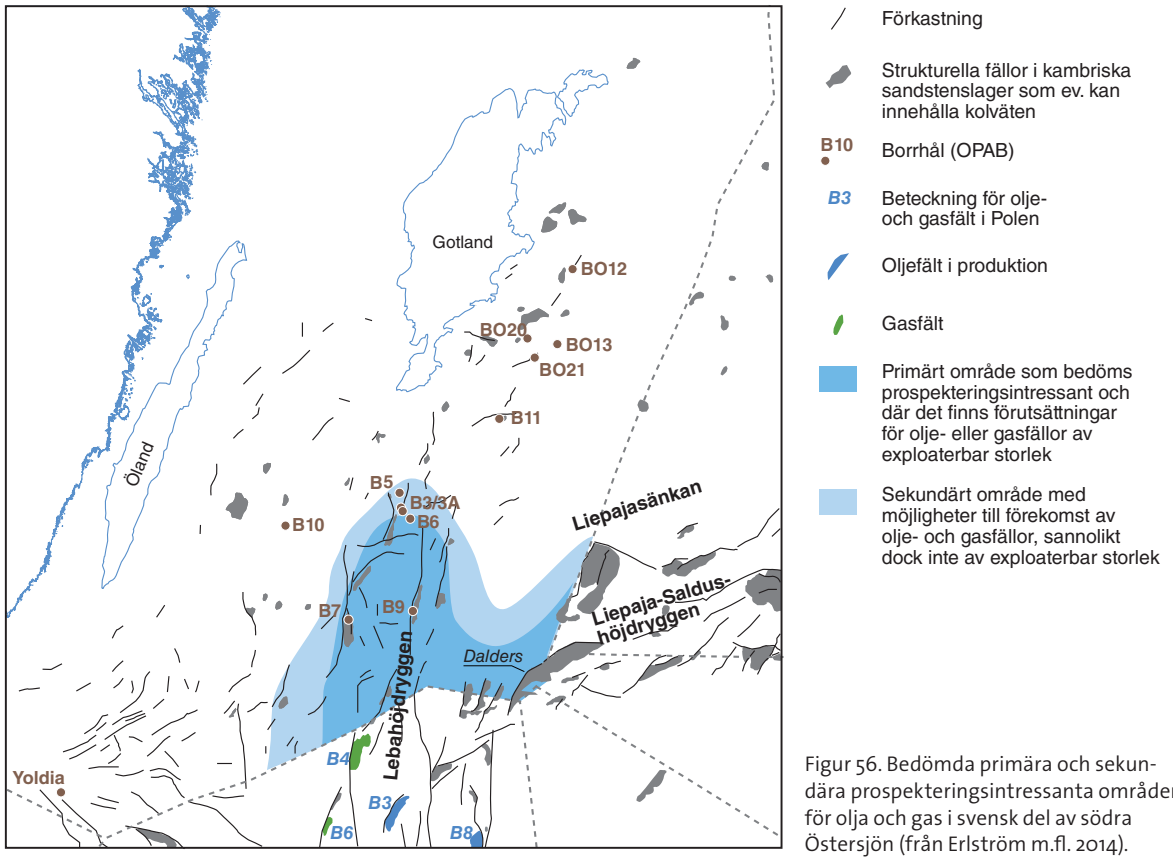


Figur 55. Översiktlig strukturgeologisk karta över den paleozoiska berggrunden, verifierade större olje- och gasförekomster, moderbergarternas mogenhet samt alunskifferns mäktighet (från Erlström m.fl. 2014).

Förekomster på svensk kontinentalsockel

De större bekräftade och förmodade olje- och gasfällorna i södra Östersjön är lokaliserade till Liepaja-Saldushöjdryggen och Lebahöjdryggen, se figur 56. I dessa båda höjdryggar förekommer strukturer som kan vara olje- och gasförande (t.ex. Daldersstrukturen). Inom övrig del av svenskt område i södra och centrala Östersjön är berggrunden relativt homogent lagrad. Här finns endast få mindre, domliknande strukturer som skulle kunna utgöra olje- och gasfällor. Öster om Gotland finns några större strukturer som bedöms vara av mindre intresse dels eftersom den kambriska reservoaren är sämre i området, dels beroende på att det finns en mycket stor osäkerhet om strukturernas existens eftersom det saknas moderna geofysiska data av hög kvalitet. Dessa möjliga strukturer ligger också på relativt stort avstånd från det primära området med olje- och gasbildning i södra Östersjön. Det kan inte uteslutas att den olja som påträffas i ordoviciska mounds på Gotland kan komma från Liepajasänkan eller från en lokal moderbergart. Det bedöms inte i detta område finnas samma strukturella förutsättningar att olja ska stanna i fällor i den kambriska sandstenen som i Lebahöjdryggen och Liepaja-Saldushöjdryggen.

Reservoarbergarten i Östersjön utgörs av kambrisk sandsten, framför allt den mellankambriska Faluddensandsten eller Deimenasandsten. Denna är på svenskt område ca 50 m mäktig i borrningen B9 och i Daldersområdet men avtar snabbt i mäktighet norrut mot Gotland. På södra Gotland är den 15–20 m mäktig medan den saknas helt på norra Gotland och väster om en nord–sydlig linje mellan Gotland och Öland. Resultat från borrningar på Gotland, utförda av OPAB, visar att det med största sannolikhet inte förekommer kommersiella mängder olja i den utkilande delen av Faluddensandstenen under Gotland. Det bedöms därför som sannolikt att kommersiella mängder olja och gas på svenskt område endast kan förekomma i de strukturella fällorna söder om Gotland, i anslutning till Lebahöjdryggen och i Daldersstrukturen.



Figur 56. Bedömda primära och sekundära prospekteringsintressanta områden för olja och gas i svensk del av södra Östersjön (från Erlström m.fl. 2014).

Viklau- och Närsandstenarna som ligger under Faluddensandstenen bedöms inte vara lika goda reservoarbergarter, eftersom de allmänt har lägre porositet och inte är lika homogena som Faluddensandstenen.

Den kambriska sandstenen

I den kambriska lagerföljden i södra Östersjön finns ett antal porösa sandstenslager som utgör de viktigaste reservoarerna för olja och gas i området. På svenskt område benämns dessa sandstensenheter för Viklau, När och Faludden (fig. 35). Den senare motsvaras av den s.k. Deimenssandstenen på Baltiskt område. Denna sandstensenhet är uppemot 50 m mäktig i den svenska delen av Östersjön. Den har en porositet på 12–18 procent och bedöms vara den bästa reservoaren av de kambriska sandstensenheterna. Söder och sydväst om Gotland påträffas sandstenen på 600–1 000 m djup. På djup under ca 1 200 m avtar porositeten på grund av kiselutfällningar i porutrymmet. På svenskt område har borrningarna bekräftat gasförekomst i sandstenen men inga oljefynd har gjorts här.

Faluddensandstenen som är den övre av de tre sandstensenheterna överlagras delvis inom området av alunskiffer och en ca 100 m mäktigt sekvens med mer eller mindre leriga kalkstenar. Sandstenslagren stupar åt söder och sydsydost vilket medför att kolväten bildade i djupare delar av berggrunden söder om svensk territorium migrerar uppåt mot svenskt område och fastnar på vägen i strukturella fällor antingen i den kambriska sandstenen eller i de ordoviciska reven (eng. *mounds*), se figur 57–58. Ett stort antal strukturella fällor har identifierats. Dessa består antingen av veck, förkastningsavgränsade fällor eller domliknande strukturer. Storleken på dessa varierar kraftigt och den volym kolväten som kan förekomma påverkas av porositet, strukturens höjd (amplitud) och utbredning samt mäktigheten på reservoaren. Merparten av de strukturer som finns på svenskt vatten har en liten höjd (amplitud) vilket kraftigt begränsar den mängd olja eller gas som kan finnas i strukturen. De största strukturerna finns i de mest distala delarna av svenskt vatten, i Lettland, Polen och i Litauen (fig. 59–60). Här finns också den största potentialen att finna ekonomiskt intressanta fyndigheter.

Ordoviciska rev

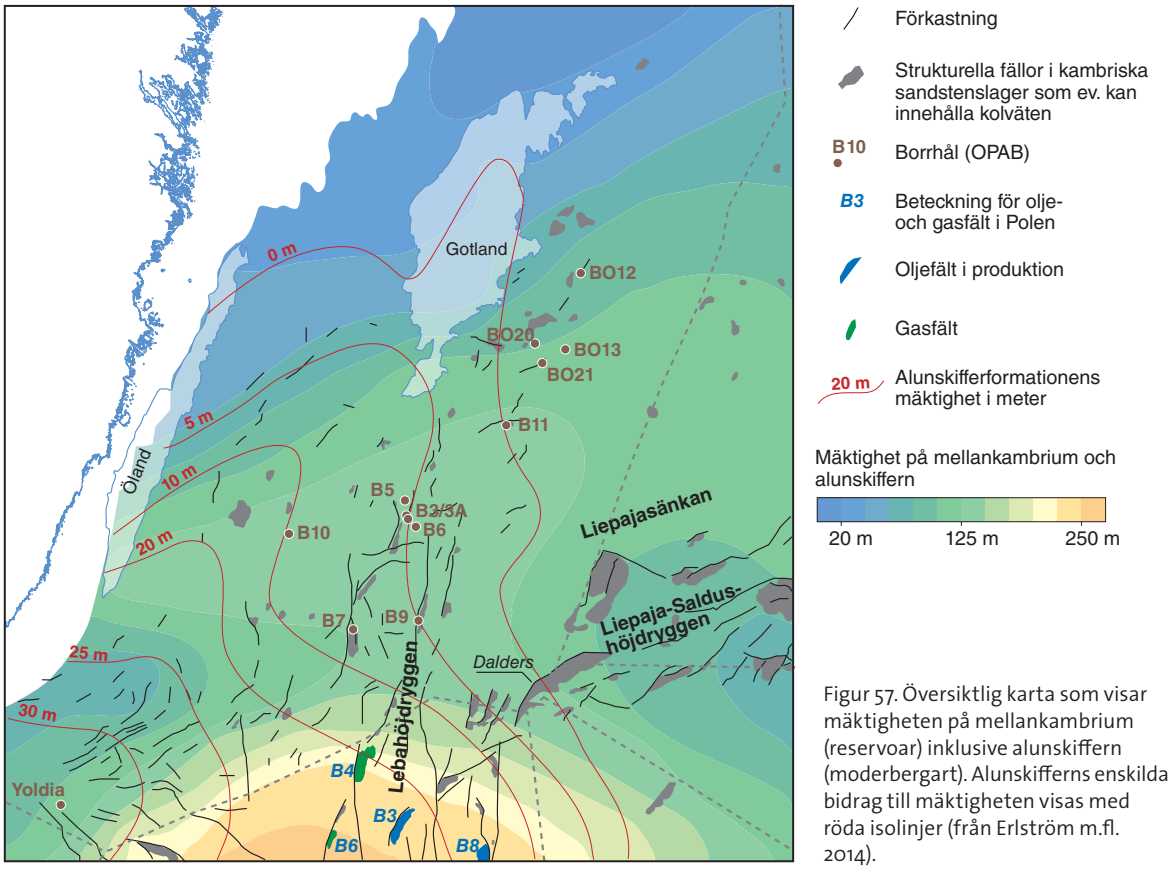
Förutom den kambriska sandstenen förekommer olja i den 100 m mäktiga ordoviciska lagerföljden. Denna domineras av lagrad kalksten men lokalt förekommer revliknande strukturer (eng. *mounds*) med sprickor och hålrum där olja kunnat ansamlas, se figur 59. Mounds kan jämställas med slamhögar, dvs. ansamling av slam på havsbottnen. Dessa förs stratigrafiskt, enligt OPABs indelning, till Klasenkalkstenen.

Klasenkalkstenen är i mycket generella ordalag uppbyggd av två typer av kalkstenar. Den dominerande typen är en heterogen kalksten med olika typer av leriga kalkstenar som varierar i färg från gröngrå till gråröd och rödbrun. Upp till 30 cm tjocka skiffriga lager förekommer i kalkstenen. Den andra kalkstenstypen är en extremt ren kalksten med ett mycket lågt lerinnehåll. Kalkstenens färg varierar från ljusgrå till vit ibland skär och brun. Sprickor och hålrum är vanligt förekommande. Det är i denna kalkstenstyp som är bildad av slamhögar, eller mounds, på havsbotten som olja påträffas.

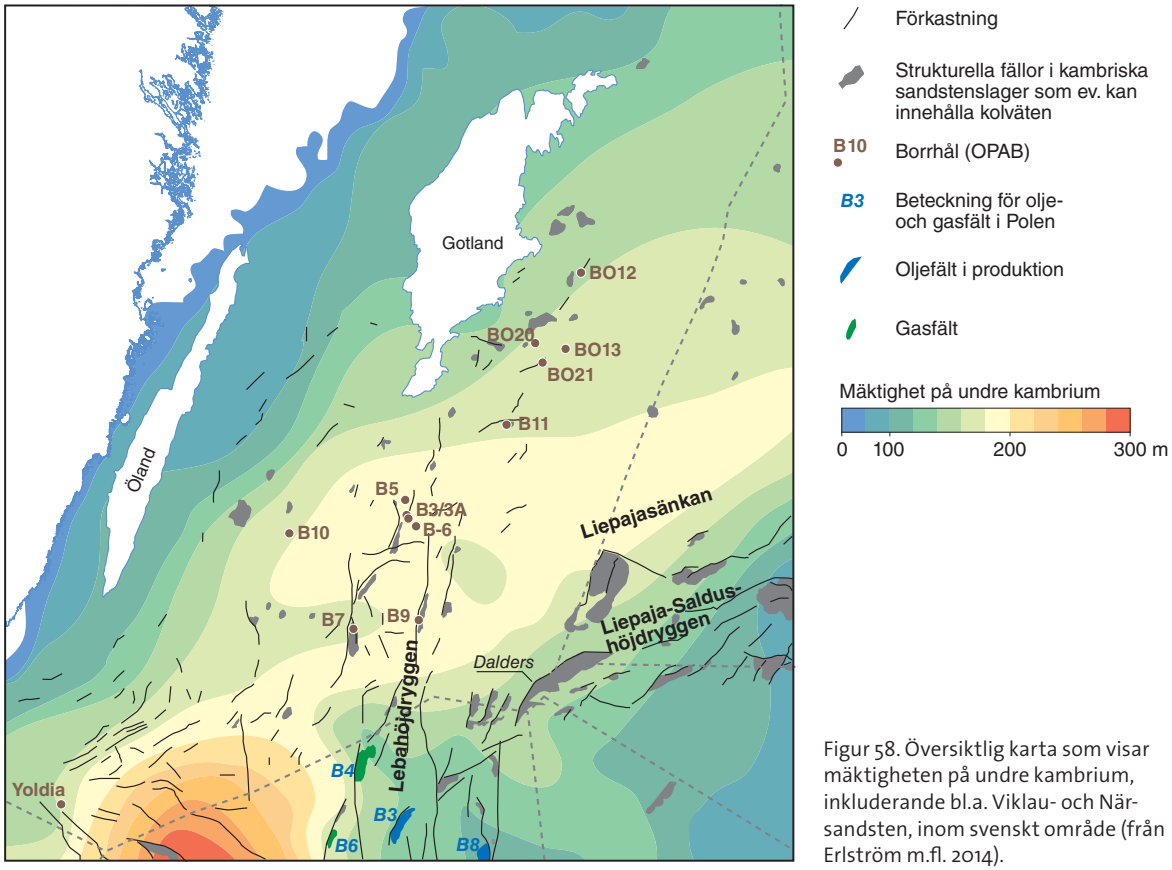
De oljeförande strukturerna (eng. *mounds*) är ganska lätta att identifiera vid seismiska undersökningar. Det är oftast ovala till cirkelformade strukturer med en höjd som kan uppgå till några tiotal meter, diametern kan variera mellan 200–800 m (fig. 59).

Oljan förekommer i de porösa delarna av kalkstenen, mestadels av cm-stora hålrum och öppna sprickor. Oljefällorna avgränsas av täta bergarter märgel/märgelsten, vilket medför att oljan inte kan migrera vidare i berggrunden.

På marint område indikerar geofysiska mätningar (seismik) att det förekommer liknande strukturer i den ordoviciska berggrunden öster och sydost om Gotland, se figur 60. Data visar ett område med revstrukturer som sträcker sig från området utanför Hoburgen och vidare i nordostlig riktning. En viss ökning av antalet strukturer är indikerade i samma rikting. Det bör poängteras att underlagsdata inte har tillräckligt hög kvalitet för en mer exakt identifiering av förekomsterna, speciellt inte i det kustnära



Figur 57. Översiktlig karta som visar mäktigheten på mellankambrium (reservoar) inklusive alunskiffern (moderbergart). Alunskifferns enskilda bidrag till mäktigheten visas med röda isolinjer (från Erlström m.fl. 2014).



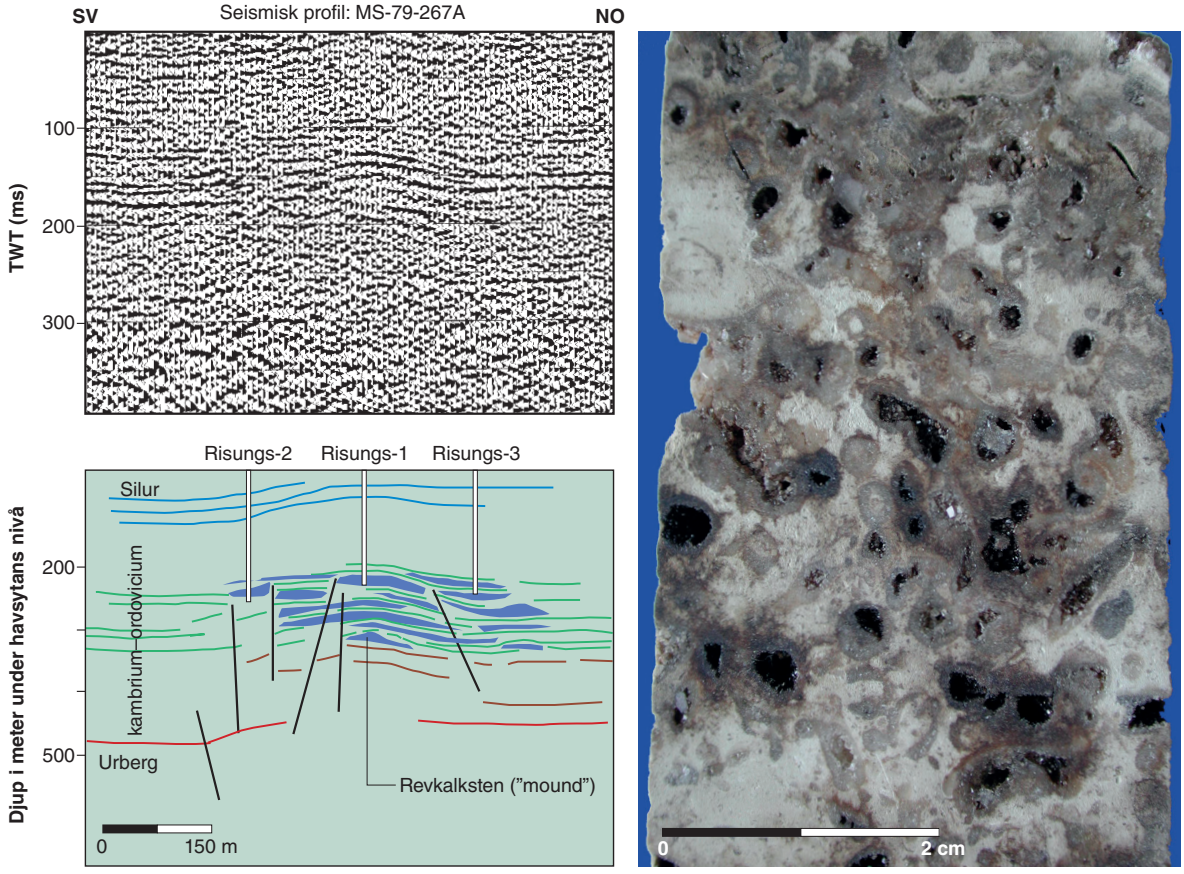
Figur 58. Översiktlig karta som visar mäktigheten på undre kambrium, inkluderande bl.a. Viklau- och När-sandsten, inom svenskt område (från Erlström m.fl. 2014).

området och på enskilt vatten runt Gotland. Strukturerna i havet har samma storlek och uppbyggnad som på land, dvs. de utgör mycket små potentiella reservoarer, och de bedöms alltför små för att vara lönsamma att exploatera till havs. Med tanke på att en stor del av de strukturer som borrats på Gotland inte innehållit olja är utfallet dessutom för dåligt för en havsbaserad exploatering.

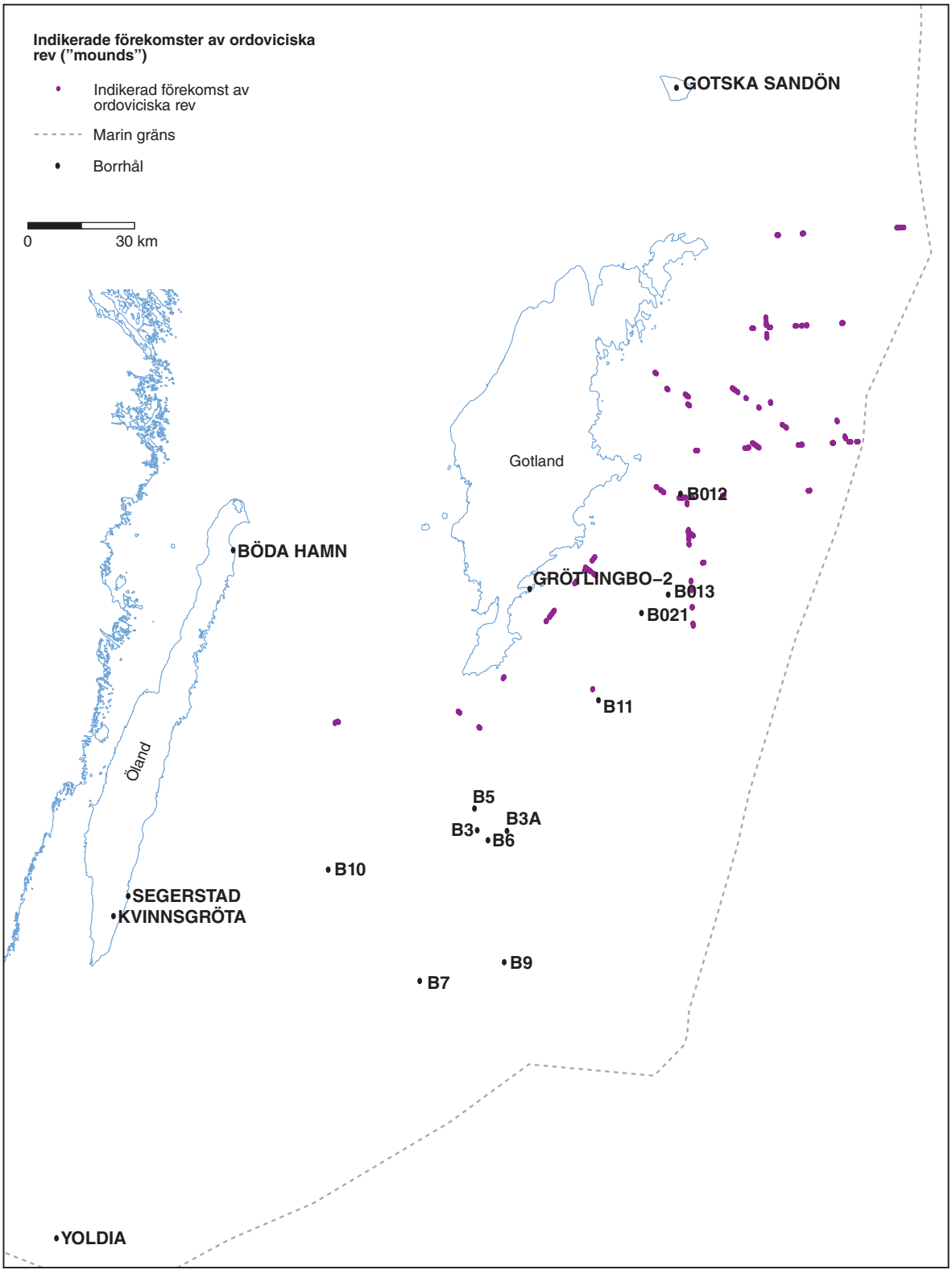
Siluriska rev och sandsten

Mindre mängder kolväten har påträffats i hålrum i siluriska bergarter. På Fårö uppger t.ex. Hedström (1928) förekomst av bergbeck i silurisk kalksten.

I en borrning vid Malmhagen, ca 10 km öster om Visby, har olja påträffats i sprickor vid kontakten mellan silurisk kalksten och lersten. I bl.a. borrningen Faludden-1 på södra Gotland registrerades olja och gas i siluriska karbonatcementerade siltstenar. I en annan borrning, Klasen-1, registrerades gas i ett siluriskt konglomerat. Borrningarnas mål var djupare liggande lager och inga egentliga undersökningar utfördes på de siluriska lagren.



Figur 59. Till vänster visas den strukturella uppbyggnaden av Risungsstrukturen på norra Gotland. Det är en av de bättre olje-producerande revstrukturerna i den ordoviciska lagerföljden. Fotografiet visar oljefyllda hålrum i en borrkärna av kalksten från Risungs (från Erlström m.fl. 2014).



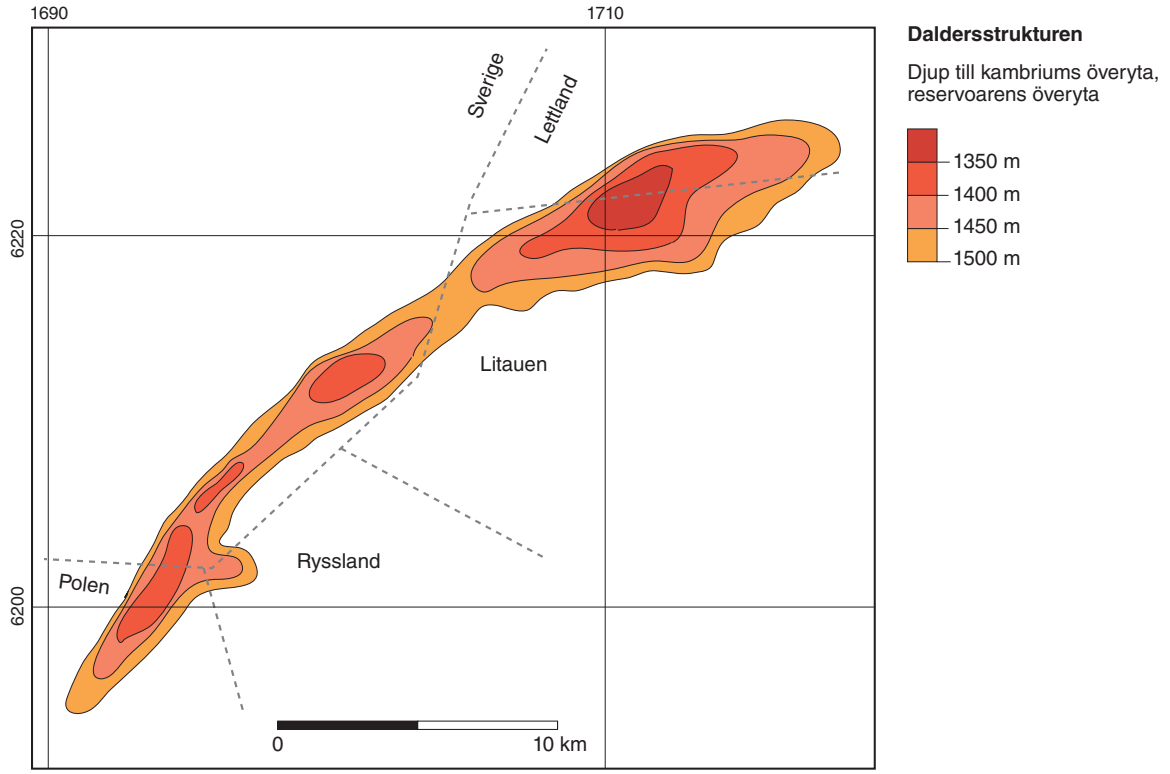
Figur 60. Indikerade förekomster av ordoviciska rev från seismiska mätningar till havs (från Erlström m.fl. 2014).

Dalders

Längst i sydöst finns den större, ryggformade Daldersstrukturen. Den är ca 38 km lång, sträcker sig i en svag båge från polsk kontinentalsockel i sydväst, via svensk sockel in på litauiskt och lettiskt sockelområde i nordöst. Ryggen har en bredd av ca 4–6 km och en höjd av upp till 150 m, se figur 61. OPAB har värderat Daldersstrukturen ur ett petroleumperspektiv baserat på:

- yt- och volymberäkningar utförda på basis av seismiska undersökningar av strukturen
- bergartsinformation inhämtad från borrningar utförda på svenskt område öster och söder om Gotland
- att olja i ekonomiskt utvinningsbar mängd förekommer och utvinns ur liknande strukturer i angränsande polskt och ryskt område.

OPAB har dels bedömt sannolikheten för att strukturen innehåller olja, dels kalkylerat den oljevolym det kan vara frågan om. Värderingen utfördes enligt de standardmetoder som tillämpas av företaget och indikerar att sannolikheten för fynd av olja är 30 procent, vilket bedöms vara relativt högt, samt att den utvinningsbara volymen i strukturen som helhet kan vara 210–350 miljoner fat eller, omräknat, 33–56 miljoner Sm^3 (standard kubikmeter). Den svenska delen av strukturen bedöms svara för en tredjedel av den totala volymen, 11–19 miljoner Sm^3. Den enligt ovan bedömda potentialen gör Daldersstrukturen väl jämförbar med oljefält i Nordsjön.



Figur 61. Detalj av Daldersstrukturen. Källa: OPAB och Sopher m.fl. 2014 (från Erlström m.fl. 2014).

Prospektering och utvinning av olja och gas i anslutning till svensk kontinentalsockel

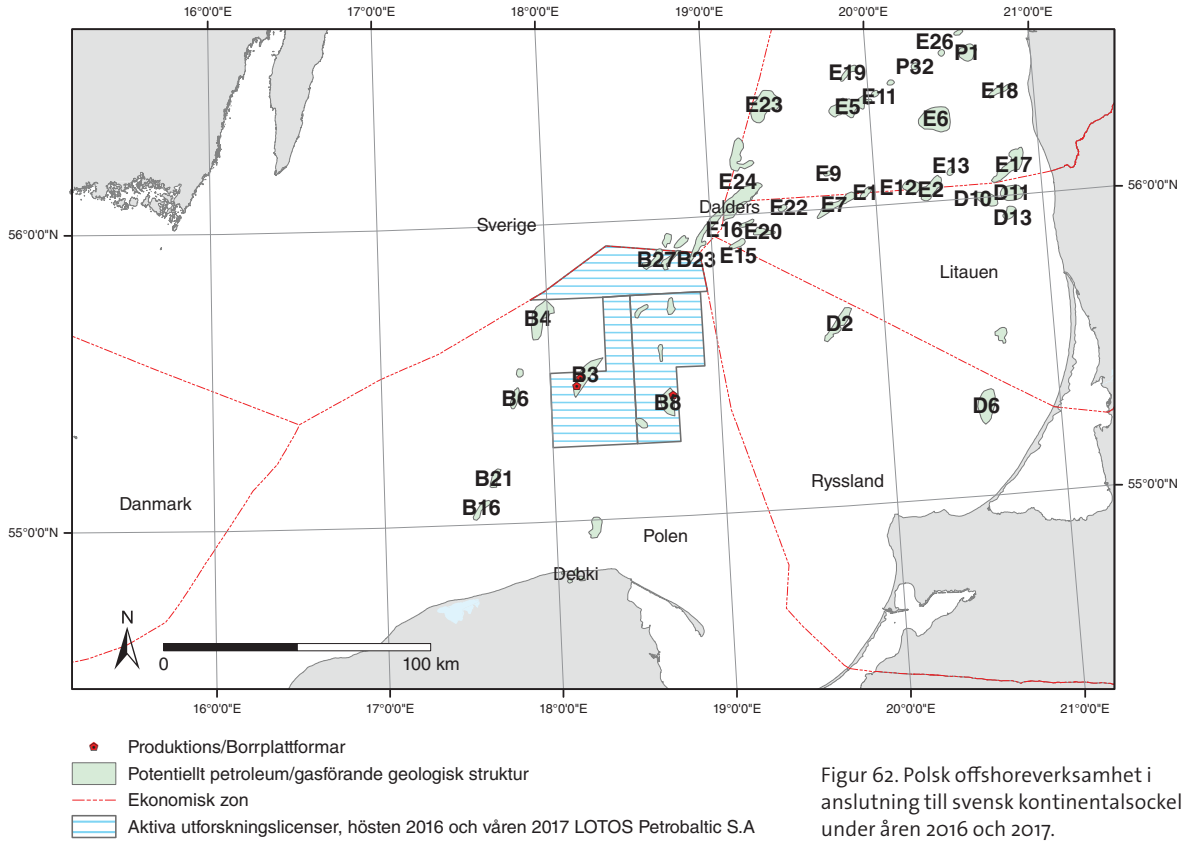
Verksamhet i polsk sektor

Ansvarig myndighet under 2017: *Ministry of the Environment, Department of Geology and Geological Concession.*

Polen har geologiska förutsättningar för olje- och gasutvinning både på land och till havs (Östersjön) och bedriver en aktiv petroleumverksamhet. Tillstånd till såväl prospektering som utvinning av olja och gas hanteras av ”*Department of Geology and Geological concessions*” vid ”*Ministry of the Environment*”. Beslut om tillstånd fattas av miljöministern. Områden med hög olje- och gaspotential annonseras internationellt för öppen budgivning i och med att de görs tillgängliga. För andra områden tillämpas en ”Öppen dörr”-process. Prospekteringstillstånd ges normalt för 3–6 år, utvinningstillstånd för 25–30 år. Innan utvinningstillstånd ges krävs godkännande av den finansministern, av chefen för den statliga gruvmyndigheten samt av relevanta lokala myndigheter. Tillståndsprocessen regleras av Polens geologi och gruvlag (eng. *Geological and Mining Law*).

Inom polskt kontinentalsockelområde finns ett antal kända potentiellt olje- och gasförande geologiska stukturer, de idag viktigaste är B3 (olja), B4 (gas), B6 (gaskondensat) och B8 (olja och gas).

I Polen har utvinning vid oljefälten B3 och B8 samt förberedelser för utvinning vid gasfälten B4 och B6 utförts av företaget LOTOS Petrobaltic, under 2016 och 2017, se figur 62. Licensen för utvinning av olja vid B3-fältet är giltig till 2026. Licensen för utvinning av olja och gas vid B8-fältet är giltigt till 2031. Licenser för att utvinna gas från B4- och B6-fälten är giltiga till 2032. Företaget LOTOS Petrobaltic har även, för närvarande, utforskningslicenser för tre områden belägna i den nordöstra delen av polsk ekonomisk zon (fig. 62).



Figur 62. Polsk offshoreverksamhet i anslutning till svensk kontinentalsockel under åren 2016 och 2017.

Verksamhet i rysk (Kaliningrad) sektor

Ansvarig myndighet under 2017: Federala myndigheten för naturresursanvändning i Ryssland (ROSNEDRA).

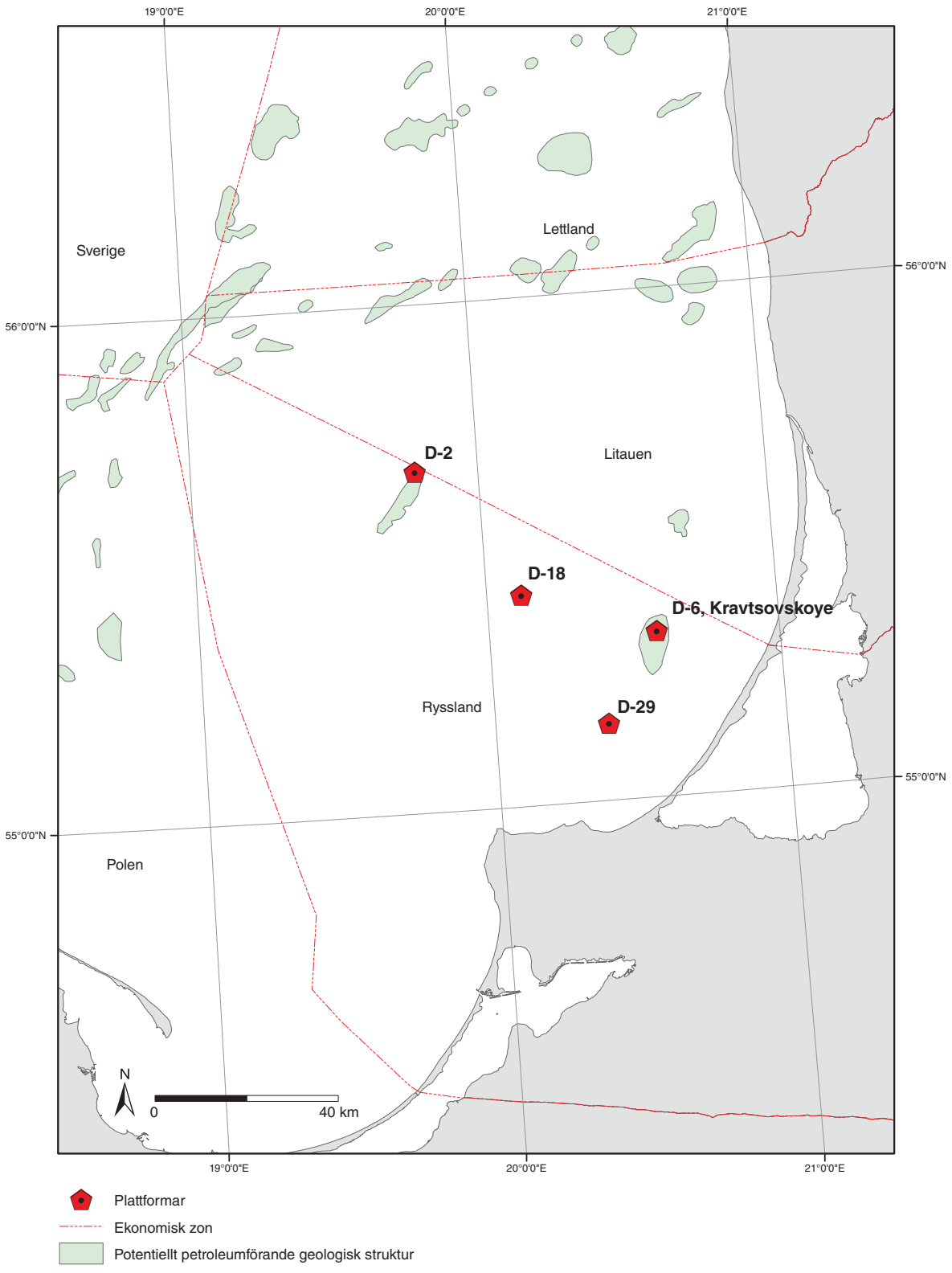
ROSNEDRA är ansvarig myndighet för bland annat prospektering och utvinning av olja och naturgas i Ryssland, inklusive landets kontinentalsockelområden.

Prospektering efter och utvinning av olja och naturgas inom Ryska federationen kräver licenser som utfärdas enligt en fastställd ordning. Fyndigheter på kontinentalsockeln betraktas som fyndigheter av federal betydelse. Licens för utvinning av olja och naturgas på Ryska federationens kontinentalsockel ges endast till företag som har mer än fem års erfarenhet av verksamhet på kontinentalsockeln och där statens andel av aktiekapitalet är större än 50 procent. För utvinning av olja i Östersjön ställs hårda miljökrav. Utvinningen ska ske med ”nollutsläpp”.

Inom den ryska Kaliningradenklaven finns geologiska förutsättningar för olje- och gasutvinning både på land och på kontinentalsockelområdet. Inom den marina delen av Kaliningradenklaven finns, i huvudsak, fyndigheterna: D-6 Kravtsovskoje, D-18, D-29, D-41 och D-33 och C9 Kaliningradskoje. D-6 är i produktion, C9 är ännu inte utdelad.

På land har olje- och gasutvinning pågått sedan mitten av 1970 talet. År 2004 påbörjade företaget Lukoil-Kaliningradmorneft utvinning av olja från fältet D-6 (Kravtsovskoye) beläget på rysk kontinentalsockel, se figur 63. Enligt en artikel i tidskriften Oil of Russia, No 4, 2012, hade så mycket som 80 procent av de initiala reserverna i de producerande fälten då utnyttjats. Prospekteringsmognaden anges vara 60 procent på land och 20 procent inom kontinentalsockelområdet. Framtiden för företaget Lukoil-Kaliningradmorneft är, enligt artikeln, beroende av fortsatt prospektering till havs och utvinning från nya fyndigheter på kontinentalsockeln.

Under februari 2016 blev företaget LUKOIL tilldelat licenser av ryska myndigheter för utforskning samt utvinning på rysk kontinentalsockel, i områden där formationerna D-6 Yuzhnoye, D-18, D-29, D-33 och D-41 är belägna. D-6 Yuzhnoye, D-29 och D-41 är i nämnd ordning belägna söderut mot fastlandet medan D-18 och D-33 är belägna mot nordväst från D-6 (Kravtsovskoye), se figur 63. D-29 är uppskattat enligt LUKOIL att ha oljereserver upp till ca 2,1 miljoner ton, D-41 upp till ca 2 miljoner ton samt D-33 upp till ca 21,2 miljoner ton. Formationerna D41, D33 och D6-Yuzhnoye blev upptäckta under 2015. Lukoil har använt jack-up borriggen ”Arkticheskaya” som ägs av företaget Gazprom-Flot för utforskning av oljefälten. Denna oljerigg har under våren 2017 befunnit sig vid formationen D-18 (fig. 63). Lukoil har intentioner att från de fyra fälten D-41, D-29, D-6 Yuzhnoye och D-2 till år 2027 ha en årlig produktion av 2,15 miljoner ton. Av den anledningen planerar Lukoil fortsätta prospektera och provborra inom dessa fem block.



Figur 63. Rysk offshoreverksamhet i anslutning till svensk kontinentalsockel år 2017.

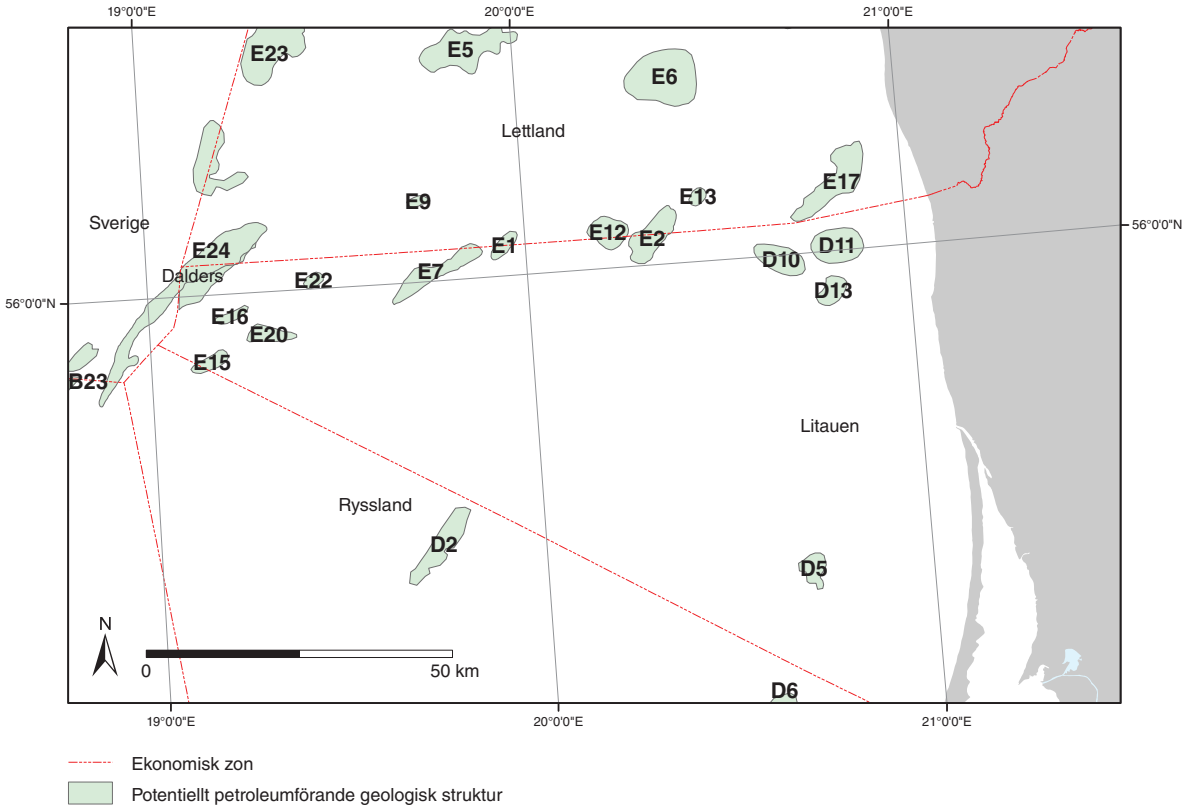
Verksamhet i litauisk sektor

Ansvarig myndighet under 2017: *Lithuanian Geological Survey*

Utvinning av olja och gas bedrivs på land i Litauen. Man har också öppnat områden på land för anbud avseende skiffergasprospektering (eng. *shale gas*). Tillstånd till prospektering och utvinning av kolväten petroleum hanteras av Litauens geologiska undersökning (LGT) under Miljöministeriet. Tillstånd till all prospektering och utvinning ska enligt lag ske via ett öppet anbudsförfarande. Litauens regering har utsett LGT som ansvarig myndighet för den processen. Tillstånd ges för geografiskt definierade licensblock. Blocken definieras på basis av resultaten av en ”*Strategical Environment Impact Assessment*” och inte utifrån ett i förväg skapat systematiskt rutnät.

Inom Litauens kontinentalsockelområde finns ett antal potentiellt petroleumförande geologiska strukturer, identifierade under sovjettiden, se figur 64. Litauen har dock, till del baserat på miljöhänsyn, för närvarande inga planer på att öppna marina områden för prospektering och utvinning.

Under 2016 och 2017 har inga aktiviteter förekommit eller licenser tilldelats relaterade till olja/gassektorn inom Litauens kontinentalsockelområde. Under 2015 gjorde dock företaget Gripen Oil & Gas AB förfrågningar om hur ansökningsproceduren är för ansökan om tilldelning av licens för utforskning och utvinning av kolväte.



Figur 64. Potentiellt petroleumförande geologiska strukturer inom Litauens kontinentalsockelområde.

Verksamhet i lettisk sektor

Ansvarig myndighet: *Ministry of Economics, Energy Market and Infrastructure Department*.

Olja och gas utvinns på det lettiska fastlandet och prospekteras inom det lettiska kontinentalsockelområdet. Ansvarig myndighet för tillstånd till förstudier, prospektering och utvinning är Lettlands *Ministry of Economics* som också ansvarar för administrativ tillsyn av tillståndsgiven verksamhet. Fram till år 2006 användes ett rikstäckande licensblockschema (rutnät) för att ange tillståndens (licensernas) geografiska lägen. Efter 2006 används ett annat system som medger att tillståndsgivna områden definieras med koordinater. Beslut om att öppna områden för olje- gasverksamhet fattas av Lettlands regering efter förslag från ekonomiministeriet. Verksamheten regleras via ”*Law on Subterranean Depths*”, ”*Law on Environmental Impact Assessment*”, ”*Construction Law*”, ”*Protection Zone Law*”, förordningar samt EU-lagstiftning.

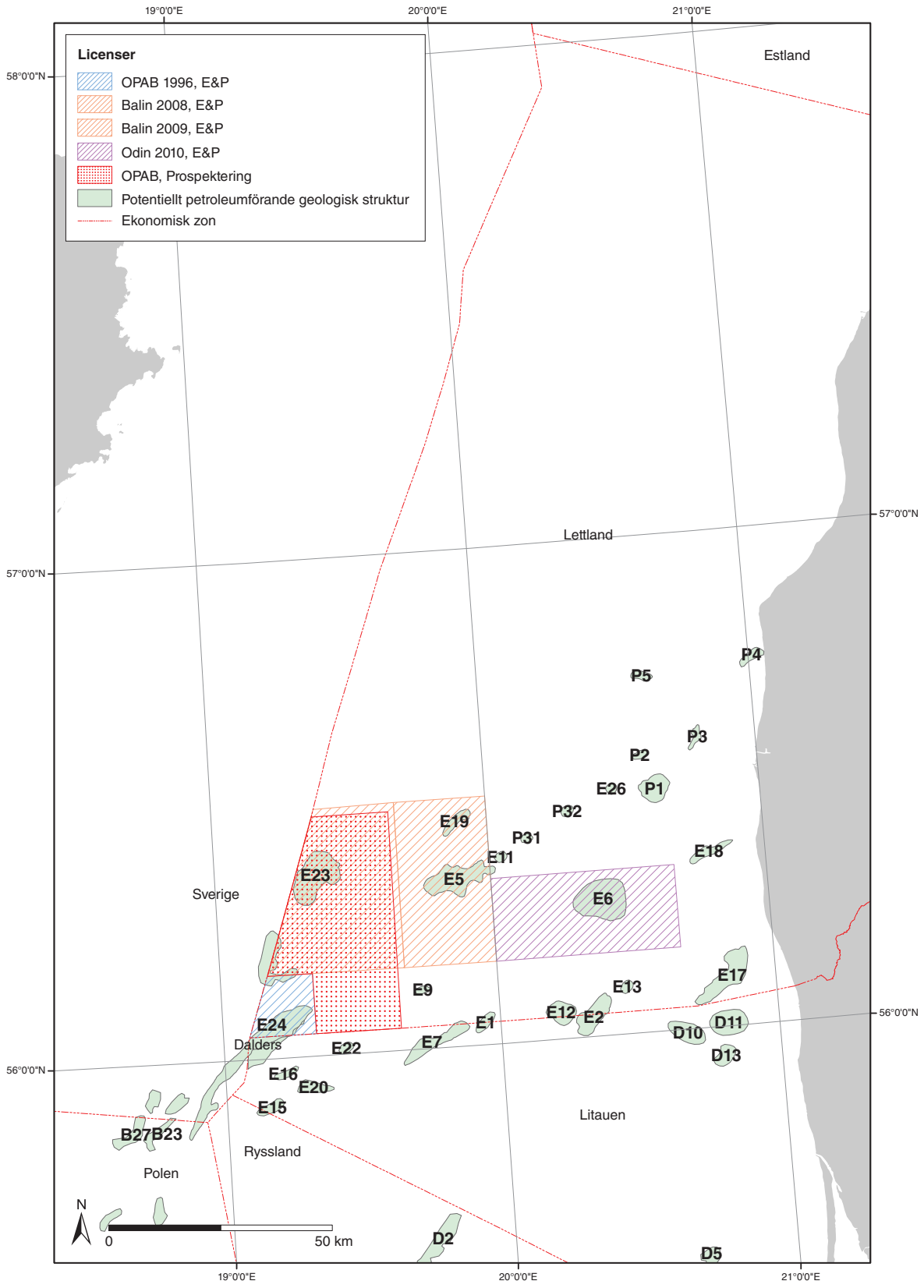
Under sovjettiden identifierades ett antal potentiellt olje- och/eller gasförande geologiska strukturer inom Lettlands kontinentalsockelområde. Då ingen utvinning av olja eller gas från lettisk kontinentalsockel hittills utförts saknas dock säkra data om vilka mängder och typer av kolväten dessa strukturer kan innehålla.

Tidigare har företagen Oljeprospektering AB, Balin Energy SIA, och Odin Energi Latvija Ltd. tilldelats prospekterings och utvinningstillstånd (eng. *exploration and production licenses*), se figur 65. Det prospekterings- och utvinningstillstånd som tilldelats Oljeprospektering AB (OPAB) träder inte i kraft förrän ett förhandlat avtal om havsgränsen mellan Lettland och Litauen godkänns.

Under 2010 genomförde Balin Energy Ltd. 3D seismik över sina licensområden.

Lettland arbetar för närvarande med nya ansökningsprocedurer och licenser för offshore prospektering och utvinning. Ännu har inga prospekteringsborrningar utförts på lettiskt territorialvatten. Det verkar som om intresserade företag väntar på att dessa nya ansökningsprocesser samt tillhörande licensområden ska bli fastlagda och nya licenser tilldelas.

Ministry of Economics har inte under 2016 och 2017 utdelat några licenser för prospektering eller utvinning.



Figur 65. Lettisk offshoreverksamhet i anslutning till svensk kontinentalsockel.

DISKUSSION OCH KOMMENTARER

Efter några år med lägre aktivitet har antalet CCS-projekt som startats i världen ökat kraftigt. Enligt GCCSI *(the Global CCS Institute)* fanns det 2016 globalt 40 storskaliga CCS-projekt, där 17 av dessa är i drift och ytterligare fem väntas vara driftsatta under slutet av 2017 eller under 2018. Dessutom finns det för närvarande 47 pilot- och demonstrationsprojekt varav 30 av dessa är i drift. På dessa lagringsplatser lagrades under 2016 sammanlagt 40,3 miljoner ton koldioxid. Enligt IEAs (2016) bedömning är detta bara början. Fram till år 2050 kommer en gradvis ökning av mängden lagrad koldioxid att behövas för att nå Parisavtalets tvågradersmål. Med denna ökning kommer det år 2050 globalt att behöva avskiljas och lagras uppemot 6 000 miljoner ton koldioxid årligen. Totalt sett behöver det enligt denna bedömning avskiljas och lagras ca 94 000 miljoner ton koldioxid i tidsperioden fram till år 2050; fördelat på 52 000 miljoner ton koldioxid från energisektorn, 29 000 miljoner ton koldioxid från processindustrin och 13 000 miljoner ton koldioxid från gas- och biobränsleprocesser och produktion (IEA 2016).

Ännu har inga pilotanläggningar startat i Sverige men översiktliga värderingar av potentialen att lagra koldioxid i den svenska berggrunden har de senaste decennierna redovisats i ett antal studier. Dessa har utförts med information och data från främst olje- och gasprospektering vilket gör att dessa inte är helt användbara för studier avseende koldioxidlagring. Oftast saknas viktiga data på bland annat takberggrundens uppbyggnad och reservoarens hydrauliska egenskaper.

Gemensamt för ett antal studiers bedömningar (Erlström m.fl. 2011, Sopher m.fl. 2014, Elforsk 2014, Mortensen m.fl. 2016) är att det finns geologiska förutsättningar och god potential för geologisk lagring av koldioxid i Sverige. De lagringsenheter som hittills bedömts som mest intressanta är Faluddensandstenen i sydöstra Östersjön och Arnagergrönsanden i sydvästra Skåne. Beräkningar och modelleringar visar på en god potential för koldioxidlagring i dessa enheter. Det ska dock påtalas att resultaten från olika modelleringar redovisar en stor spridning (jfr tabell 16). Den stora spridningen på

Tabell 16. Resultat från olika studier (Erlström m.fl. 2011, Sopher m.fl. 2014, Elforsk 2014, Mortensen m.fl. 2016) för beräknad kapacitet för lagring av koldioxid under 800 m djup inom Faludden och Arnagergrönsand, där S_{eff} är lagringsfaktorn (mer information finns i avsnittet *Statiska beräkningar för lagringskapacitet*). De olika studierna har olika utbredningsområden, bl.a. sträcker Bastor 2-studien (Elforsk 2014) sig utanför svenskt territorium och representerar samtliga kambriska reservoarenheter (från Mortensen 2016).

Studie	Metod	Kommentar	Kapacitet (Mt)
		Strukturella fällor Faludden	
SGU	US DOE	>800 m	<100
Sopher m.fl. 2014	US DOE	>850 m, S_{eff} 11,5–31,5 %	64,2–159,1
BASTOR 2	GeoCapacity	hela kambrium, utöver svenskt territorium	743
NORDICCS	SEMI	inkl. förkastningar >800 m	70
NORDICCS	SEMI	utan förkastningar >800 m	10
		Lagringsenheten Faludden	
SGU	US DOE	>800 m, S_{eff} 1–10 %	450–4 500
Sopher m.fl. 2014	US DOE	>850 m, S_{eff} 3,8–14,4 %	2 499–4 395
BASTOR 2	GeoCapacity	hela kambrium, utöver svenskt territorium	16 222
NORDICCS	US DOE	>800 m, S_{eff} 2 %	745
NORDICCS	ECLIPSE	Dynamisk migration >800 m	250
		Strukturella fällor Arnagergrönsand >800 m	
SGU		fällor ej definerad	n.d.
NORDICCS	SEMI	inkl. förkastningar	115
NORDICCS	SEMI	utan förkastningar	10
		Lagringsenheten Arnagergrönsand >800 m	
SGU	US DOE	S_{eff} 10 %	5 000
NORDICCS	US DOE	S_{eff} 2 %	521
NORDICCS	ECLIPSE	Dynamisk migration	250

mängden koldioxid som bedöms kunna lagras beror framförallt på modelleringsmetod samt kvaliteten och omfattningen av indata som använts.

I projektet NORDICCS (Mortensen 2016, NORDICCS 2016) uppskattades det att de bäst lämpade lagringsenheterna i Norden tillsammans har en teoretisk lagringskapacitet för mer än 86 000 miljoner ton koldioxid. Detta motsvarar geologisk lagring av koldioxid i den nordiska regionen i mer än 500 år.

För att kunna ta fram bättre och säkrare bedömningar av lagringspotentialen för de identifierade lagringsenheterna krävs insamling av ny och kompletterande information med fokus på koldioxidlagring. Detta innebär stora satsningar av bl.a. industrin, universitet och andra aktörer med bl.a. borrningar med tillhörande tester och undersökningar, som är anpassade till insamling av de parametrar som behövs för en säkrare bedömning av lagringspotentialen. Möjligheter finns att med landbaserade borrningar kunna öka säkerheten i de bedömningar som gjorts, för bland annat Faluddensandstenen. Projekt med borrning och tester (pilotanläggning) på södra Gotland har föreslagits av bland annat forskare från universiteten i Uppsala, Lund och Luleå men ännu har finansieringen inte lösts.

Ombearbetning av OPABs äldre seismiska linjer i södra Östersjön har visat sig avsevärt ökat kvaliteten på data, vilket möjliggör att bättre tolkningar kan göras, främst avseende de strukturgeologiska förhållandena och förekomsten av förkastningar (se Sopher m.fl. 2016). Eftersom förkastningar och sprickzoner utgör potentiella läckagevägar är det avgörande att det finns en god kännedom om deras förekomst och utbredning. Den kunskap vi har idag baseras till merparten på den äldre seismiken. En ny tolkning av ombearbetad seismik bedöms kunna höja kvaliteten på kartläggningen av förkastningar och djupnivåer för olika berggrundslager. Med fördel kan detta även vara kopplat till en 3D-kartläggning. Förutom ombearbetad och ny tolkning av seismiken kan det kärnmaterial som SGU förvaltar, främst från gotländska borrningar, användas mer än vad som hittills gjorts. Av speciellt värde är att öka kunskapen om takbergarternas uppbyggnad samt att öka värdemängden avseende porositets- och permeabilitetsdata för både reservoar- och takbergarter.

Under ett antal år har Sverige genom medverkan i olika nätverk och forskningsprojekt, t.ex. Mustang, CO_2GeoNet, CGS-Europé, SwedSTORECO2 och NORDICCS, byggt upp en nationell kompetens om CCS där SGU är en viktig del. I samband med SGUs medverkan i de olika forskningsprojekten och interna FoU-verksamheter har det tagits fram en mängd geo-information som t.ex. underlagsmaterial (borrhål, seismik, analysdata m.m.), tolkningar och kartor med koppling till koldioxidlagring i Sverige. Med tanke på det tillsynsansvar som SGU har är det viktigt att kompetens behålls och utvecklas för att möta både dagens och framtidens krav på bedömningar av möjligheten till lagring i svensk berggrund. Dessutom kommer det, även om lagring inte sker i Sverige, att krävas bedömningar av andra möjliga alternativ för svensk basindustri att lagra koldioxid i framtiden. Detta avser främst kompetens inom sedimentär berggrundsgeologi, reservoargeologi, strukturgeologi, modellering, geokemi, geofysik (seismisk tolkning), bergmekanik, GIS och 3D-kartläggning samt juridisk kompetens kring CCS-direktivet och annan berörd lagstiftning. Det är svårt för SGU att upprätthålla en kompetens inom samtliga dessa områden men ett ökat samarbete med universitet och högskolor kan bidra med värdefull forskningsrelaterad kunskap. SGUs bas är regionalgeologisk kunskap om berggrundens uppbyggnad och dess egenskaper samt kunskap om den stora datamängd som redan finns från tidigare undersökningar. Av denna anledning är SGUs kunskapsunderlag av största vikt som utgångspunkt för industrins och andra aktörers arbete med att hitta lämpliga platser för geologisk lagring av koldioxid. Det ska också framhållas att SGUs eventuella engagemang i framtida samarbeten och forskningsprojekt behöver balanseras gentemot SGUs roll i tillstånds- och tillsynsprocesserna. Ett huvudansvar för att utveckla fördjupade kunskapsunderlag faller därför till stor del på de aktörer som planerar lagra koldioxid, eventuellt med stöd av akademin.

Innan geologisk lagring av koldioxid kan komma till stånd krävs ett aktivt agerande av ett antal aktörer. Bl.a. krävs att lämpliga lagringsplatser har lokaliserats. Här kan SGU bistå projektören eller det ansvariga företaget genom att, under samrådsprocessen, jämföra och tillhandahålla de underlag om geologin som SGU har. När en ansökan om tillstånd enligt miljöbalken inkommit till miljö-

prövningsdelegationen eller mark- och miljödomstolen kommer SGU, i egenskap av tillsynsmyndighet och den myndighet som besitter kunskap om geologin, att utgöra en mycket viktig remissinstans. Efterföljande ett eventuellt tillstånd har SGU ansvaret för tillsyn av verksamheten.

SGU har inga möjligheter att själv initiera verksamheter som gör att geologisk lagring av koldioxid ska bli en realitet. För att geologisk lagring av koldioxid ska kunna ske krävs att det finns lämpliga verksamhetsutövare som väljer att agera och investera i denna typ av verksamhet. För en komplett CCS-anläggning krävs även att verksamhetsutövare skapar de nödvändiga anläggningar för uppsamling av koldioxid, samt eventuell infrastruktur för transport till den utvalda lagringsplatsen.

Pågående olje- och gasverksamhet i södra Östersjön bekräftar att det lokalt finns utvinningsbara mängder av olja och gas i strukturella fällor i främst den kambriska sandstenen, dvs. samma reservoar som bedöms lämplig för koldioxidlagring. Även på svenskt område har gas påvisats i enstaka marina djupborrningar i den kambriska sandstenen samt olja i den ordoviciska kalkstenen under Gotland. I samband med eventuella borrningar för forskning, pilotprojekt eller kommersiell lagring av koldioxid i Östersjöområdet är det därför möjligt att det påträffas olja eller gas. Sannolikheten för detta bedöms vara störst vid borrning på eller i direkt anslutning till ett fåtal mindre strukturella fällor i den allra sydligaste delen av Sveriges ekonomiska zon. Det kan vara ekonomiskt och lagringsmässigt fördelaktigt för en verksamhetsutövare att utvinna dessa olje- och gasförekomster. Den trycksänkning som uppstår i samband med sådan lokal utvinning av olja eller gas möjliggör bl.a. säkrare injektering och effektivare lagring av koldioxid i reservoaren.

Vid denna publikations utgivning är det enligt gällande lagstiftning inte fastställt hur fynd av gas och olja i samband med koldioxidlagringsprojekt skall hanteras. I den ändring som infördes i kontinentalsockellagen och minerallagen den 1 juli 2015 får inte tillstånd meddelas för olje- och gasverksamhet till havs. Gränsen mellan kommersiell utvinning och mindre utvinning kopplat till koldioxidlagringsprojekt är dock oklart för verksamhetsutövare. SGU har i underlag till regeringens proposition rörande Olje- och gasdirektivet (2014/15:64) samt i SGUs regeringsuppdrag *Konsekvenser av förbud mot landbaserad utvinning av olja och gas på land* (Åberg 2017) påtalat konsekvensen som ett förbud mot utvinning av olja och gas kan skapa för koldioxidlagringsprojekt. Även om sannolikheten för olje- och gasfynd är liten kan ändå oklarheten om hur eventuella fynd ska hanteras skapa problem och osäkerheter vilket i sin tur kan leda till att koldioxidprojekt inte påbörjas. Detta kan negativt påverka möjligheterna att nå de klimatmål Sverige har satt upp. Ett förtydligande av hur olje- och gasfynd ska hanteras i samband med borrningar för undersökning, tester eller lagring av koldioxid bör därför göras.

REFERENSER

Aagaard, P., Anthonsen, K.L., Mortensen, G.M., Bergmo, P., & Snæbjörnsdóttir, S.Ó., 2014: Screening and ranking of aquifer formations, storage units and traps. *NORDICCS Technical report D.6.2.1301*, NORDICCS, 44 s.

Ahlberg, A., Sivhed, U., & Erlström, M., 2003: The Jurassic of Skåne, southern Sweden. I: Surlyk, F. & Inesson, J.R. (red): The Jurassic of Denmark and Greenland. *Geology of Greenland Survey Bulletin 186*, 527–542.

Anderegg, H.J., Norling, E., Skoglund, R., 1968: SGUs oljegeologiska arbeten 1967–68. *Sveriges geologiska undersökning SGU-rapport,* 67 s.

Anheden, M., Burchhardt, U., Ecke, H., Faber, R., Jidinger, O., Giering, R., Kass, H., Lysk, S., Ramström, E. & Yan, J., 2011: Overview of Operational Experience and Results from Test Activities in Vattenfall's 30 MWth Oxyfuel Pilot Plant in Schwarze Pumpe. *Energy Procedia 2011;4*, 941–950.

Anthonsen, K.L., Aagaard, P., Bergmo, P.E.S., Gislason, S.R., Lothe, A.E., Mortensen, G.M., & Snæbjörnsdóttir, S.Ó., 2014: Characterisation and selection of the most prospective CO_2 storage sites in the Nordic region. *Energy Procedia 2014;63*, 4884–4896.

Anthonsen, K.L., Mortensen, G.M., Sundal, A., Aagaard, P., Snæbjörnsdóttir, S.Ó., Bergmo, P., & Lothe, A., 2015a: Geological description of the best Nordic CO_2 storage sites. *NORDICCS Memo AD6.1402*, NORDICCS, 100 s.

Anthonsen, K.L., Snæbjörnsdóttir, S.Ó., Mortensen, G.M., Sundal, A., & Aagaard, P., 2015b: Geological stratigraphy for all basins and areas. *NORDICCS Memo D.6.1.1502*, NORDICCS, 40 s.

Bergelin, I., 2006: 40Ar/39Ar geochronology of basalts in Scania, S Sweden: evidense for two pulses at 191–178 Ma and 110 Ma, and their relation to the breakup of Pangea. *Examensarbeten i Geologi vid Lunds Universitet – Berggrundsgeologi 205*, Lunds universitet, 28 s.

Bergmo, P.E.S., 2013: Method for ranking storage sites in NORDICCS WP6. *NORDICCS Memo*, NORDICCS, 10 s.

Bergmo, P. & Emmel, B.U., 2015: Guidelines for CO_2 storage in the Nordic region (D24). *NORDICCS Technical report D.6.2.1501 (D24)*, NORDICCS, 40 s.

Bergström, S. M., Löfgren, A. & Grahn, Y., 2004: The stratigraphy of the Upper Ordovician carbonate rev in the subsurface of Gotland. *GFF 126*, 289–296.

Bjerkéus, M. & Eriksson, M., 2001: Late Silurian reef development in the Baltic Sea. *GFF 123*, 169–179.

Bjørnsen, D., Kjærstad, J., Langlet, D., Mathisen, A.,Aagaard, P. & Anundskås, A., 2012: Carbon Capture and Storage in the Skagerrak/Kattegat region. *Interreg-ÖKS EU, Final report*, 113 s.

Bradshaw, J., Bachu, S., Bonijoly, D., Burruss, R., Holloway, S., Christensen, N.P., & Mathiassen, O.M., 2007: CO2 storage capacity estimation: Issues and development of standards. *International Journal of Greenhouse Gas Control, 2007:1*, 62–68.

Buchardt, B., Nielsen, A.T. & Schovsbo, N.H., 1997: Alunskiferen i Skandinavien. *Geologisk Tidsskrift 1997:3*, 1–30.

Calner, M., Lehnert, O. & Nõlvak, J., 2010: Paleokarst evidence for widespread regresion and subaerial exposure in the middle Katian (Upper Ordovician) of Baltiscandia: Significance for global climate. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 296*, Lunds universitet, 235–247.

Chadwick, A., Arts, R., Bernstone, C., May, F., Thibeau, S., & Zweigel, P., 2008: Best practice for the storage of CO_2 in saline aquifers – observations and guidelines from the SACS and CO2STORE projects. *British Geological Survey Occasional Publication, 14*, British Geological Survey, Nottingham, UK, 267 s.

Chadwick A., Clochard V., Delépine N., Labat K. (IFP), Sturton S., Buddensiek M.L., Dillen M. & Nickel M., 2010: Quantitative analysis of time-lapse seismic monitoring at the Sleipner CO_2 storage operation. *Leading Edge 29*, 170–177.

DNV GL, 2015: Håndtering av produsert vann – erfaringer fra norsk sokkel. *Norsk olje og gass. DNV GL, Report No. 2015-4277, Rev. 0*, DNV GL, 44 s.

ECLIPSE 100, 2007: *Eclipse reference manual, Schlumberger Information Solutions*.

Elforsk, 2014: CCS in the Baltic Sea region - Bastor 2. *Elforsk report 14:50*, Elforsk, 66 s.

Elforsk, 2015: Processindustrin och nollvisionen, CCS – en nyckel till ambitiösa klimatmål. *Elforsk rapport 2015:138,* Elforsk, 28 s.

ENDESA, CIUDEN, Foster Wheeler, 2014: OXYCFB300 Compostilla, Carbon Capture and Storage Demonstration Project. *Knowledge Sharing FEED Report*. CIUDEN, 130 s. <http://ccsnetwork.eu/publications/oxycfb300-compostilla-carbon-capture-and-storage-demonstration-project-knowledge-sharing-feed-report> åtkommen 2017-09-18.

Erlström, M., 1994: Evolution of Cretaceous sedimentation in Scania. *Lunds universitet, Publications in Geology, No 122*, Lunds universitet, 37 s.

Erlström, M., 2016: Litologisk och geokemisk karaktärisering av berggrundsavsitt på södra Öland. *Sveriges geologiska undersökning SGU-rapport 2016:15,* 37 s.

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.

Erlström, M. & Sivhed, U., 2012: Pre-Rhaetian Triassic strata in Scania and adjacent offshore areas – stratigraphy, petrology and subsurface characteristics. *Sveriges geologiska undersökning Rapporter och meddelanden 132*, 54 s.

Erlström, M., Sivhed, U., Wikman, H., & Kornfält, K.-A., 2004: Beskrivning till berggrundskartorna 2D Tomelilla NV, NO, SV SO, 2E Simrishamn NV, SV, 1D Ystad NV, NO, 1E Örnahusen NV. *Sveriges geologiska undersökning serie Af, Nr 212–215*, 141 s.

Erlström, M., Persson, L., Sivhed, U., & Wickström, L., 2009: Beskrivning till regional berggrundskarta över Gotlands län. *Sveriges geologiska undersökning Serie K, 221,* 60 s.

Erlström, M., Frediksson, D., Juhojuntti, N., Sivhed, U., & Wickström, L., 2011: Lagring av koldioxid i berggrunden – krav, förutsättningar och möjligheter, 2011. *Sveriges geologiska undersökning Rapporter och Meddelanden 131,* 96 s.

Erlström, M., Elhammer, A. & Zillén Snowball, L., 2014: Bedömning av olja och gas i berggrunden inom svenskt marint territorium och ekonomisk zon, främst Östersjön. *Sveriges geologiska undersökning SGU-rapport 2014:26,* 1–46.

Europeiska kommissionen, 2003: *Europaparlamentets och rådets direktiv 2003/87/EG av den 13 oktober 2003 om ett system för handel med utsläppsrätter för växthusgaser inom gemenskapen och om ändring av rådets direktiv 96/61/EG.*

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 och 2008/1/EG samt förordning (EG) nr 1013/2006 (CCS-direktivet).*

Europeiska kommissionen, 2009: *Europaparlamentets och rådets beslut 406/2009/EG av den 23 april 2009 om medlemsstaternas insatser för att minska sina växthusutsläpp i enlighet med gemenskapens åtaganden om minskning av växthusgasutsläppen till 2020.*

Flodén, T., 1981: Seismic stratigraphy and bedrock geology of the cental Baltic. *Stockholm Contributions in Geology 35*, 240 s.

Flodén T, 1984: Der strukturbau im Seegebiet von Schweden. *Zeitschrift* für *angewandte geologie 30*, 2–16.

Flodén, T., Söderberg, P., Tuuling, I. & Wahlberg, M., 1995: The Östergarn reef – recontruction of a Silurian baarier reef complex east of Gotland, Baltic Sea. *Proceedings of the third Marine Geological Conference. "The Baltic",* 37–43.

Gammer, D., Green, A.; Holloway, S. &Smith, G., 2011: The Energy Technologies Institute's UK CO2 storage appraisal project (UKSAP). I: *SPE Offshore Europe Oil and Gas Conference, Aberdeen, Scotland, 6-8 Sept 2011, SPE Number 148426*. Society of Petroleum Engineers, 14 s.

Gassnova 2016: Feasibility study for full-scale CCS in Norway. Gassnova, 63 s. <*http://www.gassnova.no/en/Documents/Feasibilitystudy_fullscale_CCS_Norway_2016.pdf* > åtkommen 2017-09-18.

Gielen, D., 2003: The future role of CO2 Capture and Storage Results of the IEA-ETP model. *IEA/EET Working Paper EET/2003/04, Paris*, 48 s.

Global CCS Institute, 2016: The Global Status of CCS: 2016. *Summary Report, Australia*. The Global CCS Institute, 26 s.

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.*

Godec, M., Koperna, G. & Gale, J., 2014: CO_2-ECBM: Review of its Status and Global Potential. *Energy Procedia 63*, 5858–5869.

Goodman, A., Hakala, A., Bromhal, G., Deel, D., Rodosta, T., Frailey, S., Small, M., Allen, D., Romanov, V., Fazio, J., Huerta, N., McIntyre, D., Kutchko, B., & Guthrie, G., 2011: U.S. DOE methodology for the development of geologic storage potential for carbon dioxide at the national and regional scale. *International Journal of Greenhouse Gas Control 2011;5*, 952–965.

Grigelis, A. & Norling, E., 1999: Jurassic geology and foraminiferal faunas in the NW part of the East European Platform, A Lithuanian – Swedish geotraverse study. *Sveriges geologiska undersökning serie Ca 89*, 101 s.

Halland, E.K., Gjeldvik, I.T., Johansen, W.T., Magnus, C., Meling, I.M., Pedersen, S., Riis, F., Solbakk, T., & Tappel, I., 2011: CO_2 Storage Atlas Norwegian North Sea. *Norwegian Petroleum Directorate*, 71 s.

Halland, E.K., Bjørnestad, A., Magnus, C., Riis, F., Meling, I.M., Gjeldvik, I.T., Tappel, I.M., Mujezinović, J., Bjørheim, M., Rød, R.S., & Pham, V.T.H., 2014: Compiled CO_2 Atlas for the Norwegian Continental Shelf. *Norwegian Petroleum Directorate*, 163 s.

Hedström, H., 1928: Om asfaltit och några andra mineral från Gotlands silurlager. *Geologiska Föreningens i Stockholm Förhandlingar 50*, 443–448.

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: Avike 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., Tchelepi, H.A. & Orr, F.M., 2006: Scaling analysis of the migration of CO2 in saline aquifers. *Paper SPE 102796 presented at SPE Annual Technical conference and Exhibition*, San Antonio, Texas, 12 s.

IEA, 2016: CO_2 Emissions from Fuel Combustion, ISBN 978-92-64-25855-6, International Energy Agency, 533 s.

IEA 2016: Energy Technology Perspectives 2016, Towards Sustainable Urban Energy Systems, ISBN 978-92-64-25234-9. *OECD & IEA*, Paris, 418 s.

IEA Greenhouse Gas R&D Programme (IEAGHG), 2013: Potential Implications on Gas Production from Shales and Coals for Geological Storage of CO_2. *Report No. 2013/10*, IEAGHG, 159 s.

IEA Greenhouse Gas R&D Programme (IEAGHG), 2009: CCS Site Characterisation Criteria. *Technical study, Report No. 2009/10*, IEAGHG, 130 s.

Ivandic, M., Juhlin, C., Lüth, S., Bergmann, P., Kashubin, A., Sopher, D., Ivanova, A., Baumann, G. &Henninges, J., 2015: Geophysical monitoring at the Ketzin pilot site for CO2 storage: New insights into plume evolution. *International Journal of Greenhouse Gas Control 32*, 90–105.

Joodaki, S., Niemi, A., Juhlin, C., Sopher, D., Ivandic, M., & Erlström, M., 2013: Simulation of CO_2 injection into a Baltic Sea saline aquifer and seismic monitoring of the plume. *Energy Procedia 40 (2013)*, 355–364.

Kjellström, G., 1971: Ordovician microplankton (Baltisphaerids) from the Grötlingbo borehole No1 in Gotland, Sweden. *Sveriges geologiska undersökning C 655*, 75 s.

Kotarba, M.J., Kosakowski, P., Więclaw, D., Wróbel, M. & Kowalski, A., 2010: Petroleum system and potential of hydrocarbon exploration in the Lower Papaeozoic strata of the Polish Baltic Basin. *Proceedings from the International Conference Baltic Petrol 2010,* 9–10.

Kumpas, M., 1978: Distribution of sedimentary rocks in the Hanö Bay and S. of Öland, S. Baltic. *Stockholm Contributions in Geology 31*, 95–103.

Lindström, S. & Erlström, M., 2011: Basin analysis of the uppermost Triassic to Lower Cretaceous, Danish Basin, Biostratigraphy and log correlation. *GEUS Rapport 2011/82*, GEUS, 63 s.

Lothe, A., 2014: Selection of aquifer storage cases. *NORDICCS Technical report D.6.3.1201* & *D6.3.1301*, NORDICCS, 15 s.

Martens, S., Liebscher, A., Möller, F., Henninges, J., Kempka, T., Lüth, S., Norden, B., Prevedel, B., Szizybalski, A., Zimmer, M., Kühn, M., Ketzin Group, 2013: Koldioxidlagring på Ketzin Pilot Site, Tyskland: Fjärde året för injektion, övervakning, modellering och verifiering. *Energiprocedure 37, 6434-6443. DOI: 10,1016 / j.egypro.2013.06.573*.

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*, 13 s.

Meissner, R., Snyder, D., Balling, N. & Starosé, E., (red.) 1993: *The BABEL project – First status report*. European Commission. Directorate General XII. Science, Research and Development. R&D programme non-nuclear energy. Office for Publications of the European Communities. Luxemburg, 155 s.

Meissner, R., Blundell, D., Snyder, D. & McBride, J., (red.) 1996: *The BABEL project – final status report. Area Deep reservoir geology*. European Commission. Directorate General XII. Science, Research and Development. R&D programme non-nuclear energy. Office for Publications of the European Communities. Luxemburg. 173 s.

Metz, B., Davidson, 0., de Coninck, H., Loos, M. & Meyer, L., (red.) 2005: IPCC special report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United, 442 s.

Mortensen, G.M., 2014: CO2 Storage Atlas for Sweden - a contribution to the Nordic Competence Centre for CCS, NORDICCS. *31st Nordic Geological Winter Meeting, Lund; 2014.*

Mortensen, G.M., Bergmo, P.E.S., & Emmel, B.U., 2016: Characterization and estimation of CO_2 storage capacity for the most prospective aquifers in Sweden. *Energy Procedia 2016;86*, 352–360.

Mortensen, G.M., 2016: Koldioxidlagring i Sverige – sammanställning och resultat från NORDICCS. *Sveriges geologiska undersökning SGU-rapport 2016:20*, 52 s.

Männik, P., Loydell, D. K., Nestor, V. & Nõlvak, J., 2015. Integrated Upper Ordovician-lower Silurian biostratigraphy of the Grötlingbo-1 core section, Sweden. *GFF 137*, 226–244.

Naturvårdsverket 2017: Listor över rapporterade utsläpp och tilldelade utsläppsrätter per år för de anläggningar som ingår i systemet för handel med utsläppsrätter. <www.naturvardsverket.se/Miljoarbete-i-samhallet/Miljoarbete-i-Sverige/Uppdelat-efter-omrade/Utslappshandel/Resultat-och-uppfoljning/Listor-over-utslapp-och-tilldelning/> åtkommen 2017-09-14.

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

Niemi, A., Gouze, P. & Bensebat, J. (eds.), 2016a: Characterization of formation properties for geological storage of CO2 - Experiences from the Heletz test injection site and other example sites from the EU project MUSTANG. *Special edition of the International Journal of Greenhouse Gas Control 48,* 1–186.

Niemi, A., Bensabat, J., Shtivelman, V., Edlmann, K., Gouzee, P., Luquot, L., Hingerl, F., Bensong, S. M., Pezarde, P. A., Rasmusson, K., Lianga, T., Fagerlund, F., Gendler, M., Goldberg, I., Tatomir, A., Lange, T., Sauter, M. & Freifeld, B., 2016b: Heletz experimental site overview, characterization and data analysis for CO_2 injection and geological storage. *International Journal of Greenhouse Gas Control 48*, 3–23.

NORDICCS, 2016: Building Nordic Excellence in CCS. NORDICCS – The Nordic CCS Competence Centre. *Top-level Research Initiative. Nordforsk, Oslo, Norway, 2016*, NORDICCS, 104 s.

Norling, E., Ahlberg, A., Erlström, M., & Sivhed, U., 1993: Guide to Upper Triassic and Jurassic geology of Sweden. *Sveriges geologiska undesökning Serie Ca 82,* 71 s.

O'Connor W. K., Rush, G. E. & Dahlin D. C., 2003: Laboratory studies on the carbonation potential of basalt; applications to geological sequestration of CO2 in the Columbia River Basalt Group. *AAPG Annual Meeting Expanded Abstracts 12*, 129.

Oelkers, E.H., Gislason, S.R. & matter, J., 2008: Minereral Carbonation of CO2. *Elements 4*, 333–337.

OPAB, 1976a: Baltic Sea, Exploration activities 1971–1976. *Geology and Petroleum prospects, 1976.*

OPAB, 1976b: Gotland, Exploration activities 1972–1976. *Geology and Petroleum prospects, 1976.*

Ortiz, G., Kovacs, T., Poulussen, D. F. & de Dios, C., 2015: Hontomin reservoir characterisation test - Final technical report. *Global CCS Institute report.* GCCSI, 48 s.

OSPAR, 2013: Background Document concerning Techniques for the Management of Produced Water from Offshore Installations. *Offshore industry series*, OSPAR, 70 s.

Regeringskansliet, 2017: Faktablad: Lagrådsremiss om ett klimatpolitiskt ramverk för Sverige.

Sivhed, U., Wikman, H., & Erlström, M., 1999: Beskrivning till berggrundskartorna 1C Trelleborg NV och NO samt 2C Malmö SV, SO, NV och NO. *Sveriges geologiska undersökning serie Af Nr 191, 192, 193, 194, 196, 198,* 143 s.

Sivhed, U., Erlström, M., Bojesen-Koefoed J.A. & Löfgren, A., 2004: Upper Ordovician carbonate rev on Gotland, central Baltic Sea. Distribution,composition and reservoir characteristics. Journal of Petroleum Geology 27, 115–140.

Sliaupa, S., Shogenova, A., Shogenov K., Sliaupienne, R., Zabele, A. & Vaher R., 2008: Industrial carbon dioxide emissions and potential geological sinks in the Baltic states. *Oil Shale 25*, 465–484.

Snäll, S., 1978: Silurian and Ordovician bentonites of Gotland. *Stockholm Contributions in Geology 31*, 1–80.

Sopher, D. & Juhlin, C., 2013. Processing and Interpretation of vintage 2D marine seismic data from the outer Hanö Bay Area, Baltic Sea. *Journal of Applied Geophysics. 95*, 1–15.

Sopher, D., Juhlin, C., & Erlström, M., 2014: A probabilistic assessment of the effective CO2 storage capacity within the Swedish sector of the Baltic Basin. *International Journal of Greenhouse Gas Control 2014;30*, 148–170.

Sopher, D., Erlström, M., Bell, N., & Juhlin, C., 2016: The structure and stratigraphy of the sedimentary succession in the Swedish sector of the Baltic Basin: New insights from vintage 2D marine seismic data. *Tectonocphysics 676 (2016)*, 90–111.

Sylta, Ø., 2004: Hydrocarbon migration modelling and exploration risk. NTNU Trondheim.

SÖ 1974:8, Konventionen om förhindrande av havsföroreningar till följd av dumpning av avfall.

SÖ 1993:13, Förenta nationernas ramkonvention om klimatförändringar (UNFCCC).

SÖ 2000:48, 1996 års protokoll till 1972 års konvention (SÖ 1974:8) om förhindrandet av havsföroreningar till följd av dumpning av avfall och annat material.

Tian, L., Yang, Z., Jung, B., Joodaki, S., Erlström, M., Zhou, Q. & Niemi, A., 2016: Integrated simulations of CO2 spreading and pressure response in the multilayer saline aquifer of south Scania Site, Sweden. *Greenhouse Gases Science and Technology 6*, 531–545.

Tuuling, I. & Flodén, T., 2000: Late Ordovician carbonate build-ups and erosional features northeast of Gotland, northern Baltic Sea. *GFF 122*, 237–249.

Vangkilde-Pedersen, T., Vosgerau, H.J., Willscher, B., Neele, F., Van der Meer, B., Bossie-Codreanu, D., Wojcicki, A., Le Nindre, Y-M., Kirk, K., & Anthonsen, K.L., 2009: Capacity standards and site selection criteria. *EU GeoCapacity report D26, 2009*, 48 s.

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.

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_2 storage site (Sleipner area, North Sea). *I* R.H. Worden & S. Baines (red.): Geological storage for CO2 emissions reduction. Geological Society, London, Special Publications, 233, 165–180.

Åberg, A., 2017: Redovisning av regeringsuppdrag: Konsekvenser av förbud mot utvinning av olja och gas. *Sveriges geologiska undersökning RR2017:05*.

BILAGA 1. LÄNKAR TILL PROJEKT SOM NÄMNS RAPPORTEN

Mer information om projekt som nämns i rapporten finns att hitta med hjälp av nedanstående länkar. Länkar åtkomna 170912.

EneRG
www.energnet.eu

SACS (Saline Aquifer CO2 Storage)
cordis.europa.eu/project/rcn/51587_en.html

GESTCO
cordis.europa.eu/project/rcn/54394_en.html

CASTOR
www.cgseurope.net/Sections.aspx?section=491.492.502

CO2STORE
www.co2store.org

CO2ReMoVe
www.co2remove.eu

CO_2GeoNet
www.co2geonet.com/home

ULCOS
cordis.europa.eu/project/rcn/80229_en.html

EU GeoCapacity
www.geocapacity.eu

CO2SINK
www.co2sink.org

ECO2
www.eco2-project.eu

CCS – Kattegat/Skagerrak
interreg-oks.eu

MUSTANG
www.co2mustang.eu

CGS Europé
www.cgseurope.net

CO2Care
www.co2care.org

SiteChar
cordis.europa.eu/project/rcn/96066_en.html

ULTimateCO2
www.ultimateco2.eu

BIGCCS
bigccs.no

NORDICCS
www.sintef.no/projectweb/nordiccs

SwedSTORECO2
www.energimyndigheten.se/forskning-och-innovation/forskning/industri/avskiljning-och-lagring-av-koldioxid-ccs

BASTOR 2
www.elforsk.se/Rapporter/?rid=14_50_

CO2StoP
ec.europa.eu/energy/en/studies/assessment-co2-storage-potential-europe-co2stop

PANACEA
panacea-co2.org

BASRECCS
www.bcforum.net

TRUST
www.trust-co2.org

EN STRATEGISK FORSKNINGS- OCH INNOVATIONSAGENDA
energiforskmedia.blob.core.windows.net/media/18530/processindustrin-och-nollvisionen-energiforskrapport-2015-138.pdf

ESTMAP
www.estmap.eu/home.html

STEM-CCS
www.stemm-ccs.eu

ENOS
cordis.europa.eu/project/rcn/205169_en.html

EERA
www.eera-set.eu

CCSP – CLIC Innovation Oy's Carbon Capture and Storage R&D Program (Finland)
www.ccsp.fi

Den nordiska lagringsatlasen
data.geus.dk/nordiccs/map.xhtml

Polens lagringsatlas
skladowanie.pgi.gov.pl/co2polska/polska.phtml

Tysklands lagringsatlas
www.bgr.bund.de/EN/Themen/Nutzung_tieferer_Untergrund_CO2Speicherung/Projekte/CO2Speicherung+Nutzung/Abgeschlossen/speicherkataster_en.html?nn=7981658

Pågående koldioxidlagringsprojekt
www.globalccsinstitute.com

SGU Rapporter och meddelanden 142

Geologisk lagring av koldioxid i Sverige – Lägesbeskrivning avseende förutsättningar, lagstiftning och forskning samt olje- och gasverksamhet i Östersjöregionen

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

Uppsala 2017
ISSN 0349-2176
ISBN 978-91-7403-399-1
Tryck: Elanders Sverige AB