

Rapportering av regeringsuppdrag

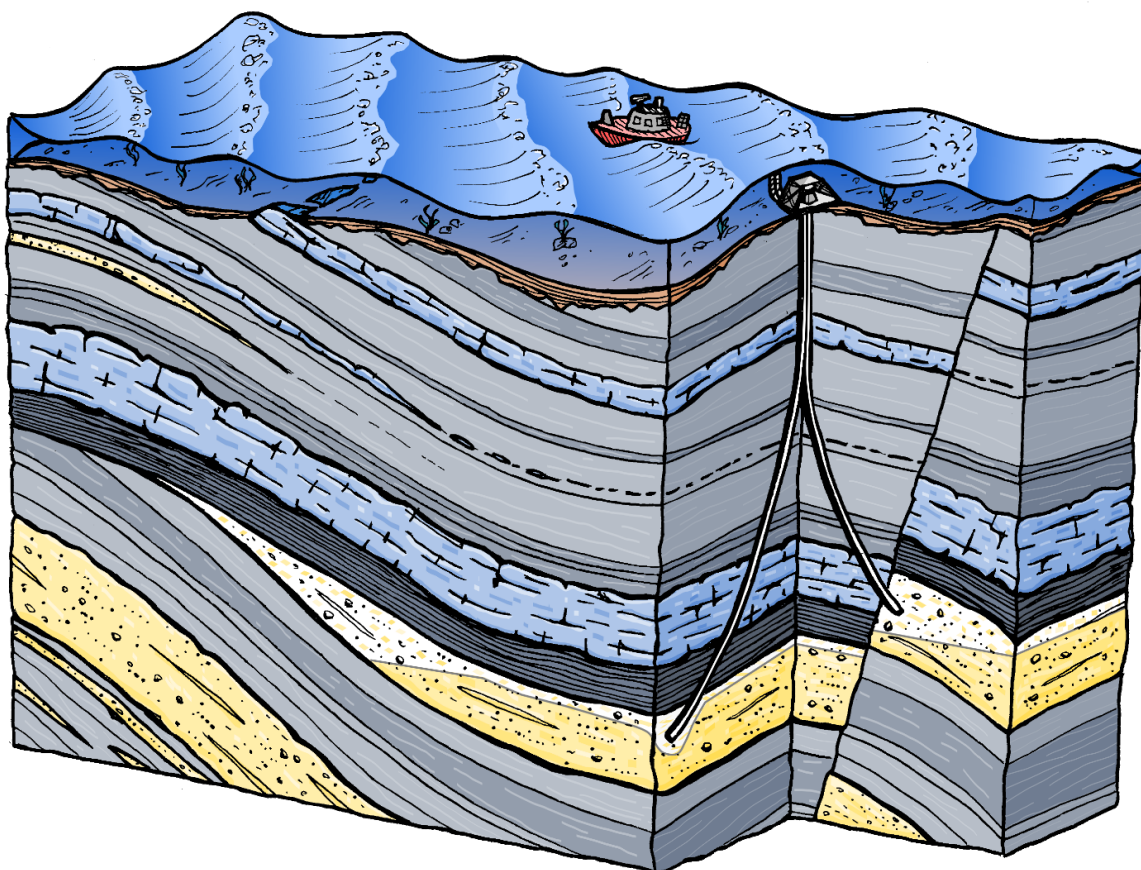
Geologisk lagring av koldioxid i Sverige och i grannländer – status och utveckling

Gry Møl Mortensen & Daniel Sopher

december 2021

SGUs diarie-nr: 21-2825/2020

RR 2021:04



Omslagsbild: Schematisk bild av Östersjöns geologi med lagring av koldioxid inom den mest lovande lagringsenheten (Faludden). Lagring visas i både strukturella och stratigrafiska fällor. Observera att bilden inte är skalenlig.
Illustratör: Daniel Sopher, SGU

Författare: Gry Møl Mortensen och Daniel Sopher
Ansvarig enhetschef: Mugdim Islamovic
Granskad av: Olof Taromi Sandström
Regeringsuppdragets fullständiga namn: Koldioxidlagring
Redaktör: Johan Sporrang
Sveriges geologiska undersökning
Box 670, 751 28 Uppsala
tel: 018-17 90 00
e-post: sgu@sgu.se
www.sgu.se

INNEHÅLL

Förord	5
Sammanfattning	6
Inledning	6
Hur lagras koldioxid?	8
CCS-kedjan	8
Avskiljning	8
Transport	9
Lagring	9
Pågående CCS-projekt	12
Sverige	13
Norge	14
Danmark	15
Island	16
Storbritannien	17
Nederländerna	18
Nationell och internationell samverkan	19
CO ₂ GeoNet	19
BASRECCS	20
GCCSI	20
IEAGHG	20
Gassnova, CLIMIT	21
Universitt Hamburg	21
GEUS	21
Uppsala universitet	22
Luleå tekniska universitet	22
Profu	23
Övrigt	23
Geologisk lagring av koldioxid i djupa akviferer i Sverige	23
Identifierade lagringsmöjligheter i Sverige	23
Sydöstra Östersjön	24
Sydvästra Skåne	27
Undersökningar fr bedömning av lagringsplatser	31
Områdesspecifika undersökningar	31
Kompetens	32

Kompetenshöjande insatser.....	32
Utmaningar och hinder.....	33
Tillståndsprocess för undersökning och publicering av marina data.....	34
Naturreservat och användning av havsmiljön.....	34
Lagstiftning.....	35
Internationella konventioner	36
Behov.....	36
Moderna och öppna data	36
Pilotprojekt.....	38
Resursförstärkning	38
Diskussion och slutsatser	38
Referenser.....	40
Bilaga 1. Länkar till projekt och samarbeten som nämns i rapporten	42
Bilaga 2. Stratigrafisk modell för sydöstra Östersjön.....	45
Bilaga 3. Stratigrafisk modell för sydvästra Skåne	46
Bilaga 4. Kursplaner	47
Introduktion till seismiska data.....	47
Tolkning av seismiska data.....	48

FÖRORD

Geologisk lagring av koldioxid utgör den sista delen av CCS-kedjan (eng. *Carbon Capture and Storage*) där koldioxiden efter avskiljning och transport till ett koldioxidlager injekteras och lagras i den djupt liggande reservoarberggrunden. FNs mellanstatliga klimatpanel och det internationella energirådet pekar ut CCS som en nyckelåtgärd för att kunna nå klimatmålen. I Sverige får avskiljning och lagring av koldioxid av fossilt ursprung, enligt propositionen Ett klimatpolitisk ramverk (prop. 2016/17:146), räknas som en åtgärd där rimliga alternativ saknas, och avskiljning och lagring av koldioxid av biogent ursprung (bio-CCS) kan användas som en så kallad kompletterande åtgärd. Men all lagring av koldioxid är betydelsefullt, både av fossil och biogen koldioxid.

Att CCS är nödvändigt uppmärksammas från flera håll, och i Sverige har ett antal företag börjat analysera och testa förutsättningarna för avskiljning av koldioxid på deras verksamhet. Denna koldioxid behöver lagras, och i Sverige finns det geologiska förutsättningar och god potential för geologisk lagring i djupt liggande salina akviferer i sydöstra Östersjön och sydvästra Skåne.

För att kunna säkerställa en effektiv och säker lagring behövs fördjupad kunskap om de reservoar- och takbergarter som kan bli aktuella för koldioxidlagring, och för detta krävs tillgång till nya, moderna djupseismiska data och kompletterande borrhålsdata. Det finns även ett antal hinder och utmaningar som behöver hanteras, både i ett nationellt och ett internationellt perspektiv. Dessutom är det i dag mycket långa handläggningstider för tillståndprocessen vilket innebär att ett svenskt koldioxidlager kan ta uppemot 30 år att etablera.

Denna rapport redovisar CCS-aktiviteter i Sverige och i våra grannländer, samt vad som behövs för att Sverige ska kunna implementera koldioxidlagring som åtgärd för att nå klimatmålen. Enligt IEAs hållbarhetsscenarier behöver CCS utgöra cirka 15 % av de samlade åtgärderna för nollutsläpp 2070. Detta innebär att miljarder ton koldioxid behöver fångas in, avskiljas, och lagras i berggrunden, och att alla potentiella koldioxidlager behöver undersökas och användas. Sverige kan bidra till detta genom nya kompletterande undersökningar av identifierade potentiella lagringsenheter i sydöstra Östersjön och sydvästra Skåne, samt undanröjning av hinder som har identifierats i relation till exempelvis Offshore-direktivet, CCS-direktivet, Helsingforskonventionen, och långa handläggningstider för tillståndprocesser.

Rapporten har utarbetats av berggrundsgeolog Gry Møl Mortensen och geofysiker Daniel Sopher.

Uppsala, december 2021

Anneli Wirtén

Generaldirektör

SAMMANFATTNING

CCUS (eng. *Carbon Capture Utilisation and Storage*), tekniken för avskiljning, användning och lagring av koldioxid, är en av de nyckelåtgärder som har identifierats av bland andra IEA (Internationella energirådet) och IPCC (FNs mellanstatliga klimatpanel) för att åstadkomma de utsläppsminskningar som behövs för att möta klimatmålen, globalt och i Sverige. I denna rapport lägger vi inte vikt på *Utilisation* utan fokuserar enbart på CCS, inklusive bio-CCS, vilket innebär avskiljning, transport och lagring av koldioxid, både från fossila och biogena källor. Under de senare åren har aktiviteter rörande CCS ökat betydligt, och nödvändigheten av CCS för att uppnå utsläppsminskningar i samband med grön omställning uppmärksammas från flera håll. I Sverige har olika typer av verksamheter (exempelvis kraftvärmeverk och petrokemi- och cementindustri) börjat undersöka och pilot-testa metoder för infångning av koldioxid. Inledningsvis uppmärksammas koldioxidlagringsprojekt utanför Sveriges gränser, exempelvis CCS-projektet Langskip i Norge. Ett flertal studier har visat att det finns geologiska förutsättningar och god potential för geologisk lagring av koldioxid i Sverige. Mest lämpliga platser för geologisk lagring av koldioxid i Sverige finns inom två geografiska områden, sydöstra Östersjön och sydvästra Skåne. Inom dessa områden finns sedimentära berggrundssekvenser som kan utgöra reservoarbergarter med mäktiga överlagrande takbergarter. För att säkerställa säker och effektiv lagring behöver identifierade lagringsplatser i Sverige dock mognas, vilket bland annat innebär behov av geologiska modeller baserade på omfattande undersökningsverksamhet som resulterar i nya, moderna data. Att behålla en möjlighet till nationell lagring har geopolitisk betydelse och kommer på längre sikt innebära minskade kostnader och utsläpp från transporter av infångad koldioxid till lagringsplatserna.

Mogenhet är ett begrepp som används i relation till koldioxidlagring vid bedömning av lagringskapacitet och lämplighet för injektering av koldioxid. Ökad mängd data, modelleringar och kunskaper ger högre grad av mogenhet (Bradshaw m.fl. 2007).

Sveriges geologiska undersökning redogör i detta regeringsuppdrag för CCS-kedjan och olika lagringsmetoder, pågående CCS-projekt i Sverige och i våra grannländer, nationell och internationell samverkan kring CCS, samt lagringsmöjligheter i Sverige. Inom sistnämnda redovisas även vilka behov samt utmaningar och hinder det i dag finns för att geologisk lagring av koldioxid ska kunna aktualiseras inom svenskt territorium. Inom ramarna för detta uppdrag har det även gjorts kompetenshöjande insatser rörande hantering och tolkning av djupseismiska data. Två interna kurser har genomförts med fokus på teoretiska och praktiska aspekter av seismisk datahantering och tolkning.

INLEDNING

IPCC publicerade i augusti 2021 en uppdaterad rapport (IPCC 2021) om klimatförändringarna och de åtgärder som är nödvändiga för att bromsa dessa. Rapporten poängterar att klimatförändringarna sker med alldeles för hög hastighet, men att det fortfarande finns utrymme att genomföra insatser för att bromsa förändringarna och deras konsekvenser för jorden och dess befolkning. En nyckelåtgärd för att åstadkomma utsläppsminskningar är CCUS. Enligt IEAs scenarier för hållbar utveckling för energisektorn (eng. *SDS, Sustainable Development Scenario*) behöver CCUS utgöra runt 15 % av de totala åtgärder som behövs för att uppnå globalt nettonollutsläpp till 2070. Bidraget från CCUS bedöms öka över tid, och redan till 2030 behöver det globalt sett årligen infångas 0,8 miljarder ton koldioxid och till 2070 behöver det årligen infångas

10,4 miljarder ton koldioxid, jämfört med de 40 miljoner ton som årligen fångas in och lagras i dag (IEA 2020, 2021).

I juli 2018 tillsatte regeringen en särskild utredare med uppgift att föreslå en strategi för hur Sverige enligt sina långsiktiga klimatmål kan uppnå negativa utsläpp av växthusgaser efter 2045. En expertgrupp med 34 medlemmar från näringsliv, intresseföreningar, akademier och myndigheter i Sverige biträdde utredaren i den klimatpolitiska vägvalsutredningen. Utredningen delades in i fem kategorier: *En strategi för negativa utsläpp av växthusgaser*, *Ökad kolsänka i skog och mark*, *Avskiljning, transport och lagring av koldioxid*, *Verifierade utsläppsminskningar i andra länder*, samt *Andra tekniska åtgärder för upptag av växthusgaser*. Resultatet blev Vägen till en klimatpositiv framtid, Betänkande av Klimatpolitiska vägvalsutredningen (SOU 2020:4) med förslag till strategi och handlingsplan för det framtida arbetet med kompletterande åtgärder för att uppnå negativa växthusutsläpp i Sverige. Målen för de kompletterande åtgärderna är att Sverige till 2030 ska åstadkomma en minskning av utsläppen som motsvarar minst 3,7 miljoner ton koldioxid per år, och till 2045 ska denna minskning successivt uppgå till minst 10,7 miljoner ton koldioxid per år. I utredningens tredje kategori, *Avskiljning, transport och lagring av koldioxid*, bedöms potentialen för koldioxidlagring i Sverige som betydande, men på grund av nuvarande långa handläggningstider blir det nödvändigt med lagring av svensk koldioxid utanför Sverige om bio-CCS ska kunna tillämpas på svenska utsläppskällor i närtid. Därför rekommenderar utredningen i första hand att titta på bilaterala avtal för CCS i Norge, men även i Nederländerna och Storbritannien, som alla planerar för fullskaliga CCS-anläggningar med utrymme för import av koldioxid. Utredningen rekommenderar även att samtidigt se till att svensk förmåga bibehålls och utvecklas och att legala hinder för CCS undanröjs för att på så sätt att behålla ett svenskt koldioxidlager som handlingsalternativ. För Sveriges del gör utredningen bedömningen att en realiserbar potential för enbart bio-CCS uppgår till minst 10 miljoner ton biogen koldioxid årligen till 2045. Mot bakgrund av detta föreslår utredningen att det vid Statens energimyndighet (Energimyndigheten) ska finnas ett nationellt centrum för frågor som gäller CCS, inklusive bio-CCS, samt att Sveriges geologiska undersökning (SGU) ska få i uppdrag att identifiera vad ett beslutsunderlag om en svensk lagringsplats för koldioxid behöver innehålla och hur ett sådant skulle kunna tas fram. I uppdraget föreslås att SGU ska redovisa vilka undersökningar, datamängder och modelleringar som krävs, samt uppskatta vad insatserna innebär i form av resurser och tid.

Ett nationellt CCS-centrum ska enligt utredningens betänkande ha till uppgift att *”främja en ändamålsenlig tillämpning av CCS samt tillhandahålla en plattform för dialog och kunskapsutbyte mellan myndigheter, aktörer och intressenter”*. Energimyndigheten fick i sitt regleringsbrev för 2021 bland annat i uppdrag av regeringen att inrätta ett nationellt centrum för avskiljning och lagring av koldioxid med syfte att möjliggöra och underlätta en utveckling och utbyggnad av CCS i Sverige. Med uppdraget får Energimyndigheten även ett samordningsansvar för CCS-frågor som inte faller inom någon annan myndighets ansvarsområde. SGU har under 2021 vid tre tillfällen träffat representanter från Energimyndigheten och dess nationella CCS-centrum. Träffarna har haft status som uppstartsmöten och har fokuserat på diskussioner kring syfte och mål med CCS-centrumet.

SGU fick i sitt regleringsbrev för 2021 bland annat uppdraget Koldioxidlagring (uppdrag 5) med följande innehåll:

”SGU ska under 2021 inom sitt ansvarsområde fortsätta arbetet med omvärldsbevakning och interna kompetenshöjande insatser för hantering, bearbetning och tolkning av seismiska djupdata avseende koldioxidlagring med utgångspunkt i Klimatpolitiska vägvalsutredningen (SOU 2020:4). SGU ska aktivt delta i nationell och internationell samverkan och särskilt bevaka CCS-aktiviteter för att bibehålla och utveckla svensk förmåga inför framtagande av en handlingsplan med mål att påbörja undersökningar av potentiella svenska lagringsplatser. Uppdraget ska redovisas till regeringen (Näringsdepartementet) senast den 15 december 2021”.

I detta uppdrag har SGU identifierat tre aktiviteter: omvärldsbevakning, interna kompetenshöjande insatser gällande seismiska djupdata, samt aktivt deltagande i nationell och internationell samverkan. Dessa kopplar alla till de olika avsnitten i denna rapport.

Utöver dessa aktiviteter tog SGU, på uppdrag av Näringsdepartementet i mars 2021, fram ett förslag på regeringsuppdrag för 2022–2024 gällande undersökning av områden i Sverige för geologisk lagring av koldioxid.

I den här rapporten kommer begreppet CCS främst att användas som samlingsbegrepp, inklusive Bio-CCS (även kallat BECCS). Bio-CCS används dock när det specifikt är tal om detta.

HUR LAGRAS KOLDIOXID?

I detta avsnitt ges en översiktlig beskrivning av vad CCS är och hur geologisk lagring av koldioxid kan ske. För en fördjupad genomgång se Mortensen m.fl. (2017).

CCS-kedjan

CCS-kedjan består av tre steg: avskiljning av koldioxid från rökgas, transport till lagringsplatsen, och lagring i en geologisk enhet. När CCS kombineras med biomassa som bränsle (bio-CCS) resulterar det i negativa utsläpp. Det finns inga principiella skillnader mellan CCS och bio-CCS eftersom processen är den samma oavsett koldioxidens ursprung. Nedan ges en genomgång av CCS-kedjans tre steg.

Avskiljning

Avskiljning är den process där koldioxiden infångas från rökgaserna. Olika typer av anläggningar har olika sammansättning på rökgaser avseende koldioxidhalt och andra kemiska komponenter. Olika avskiljningstekniker påverkar också sammansättningen av den infångade rökgasen. Gemensamt för alla avskiljningstekniker är att de försöker få till en så hög andel koldioxid som möjligt i den rökgas som tas ut från anläggningen. De mest använda metoderna för avskiljning av koldioxid kan delas in i tre olika tekniker:

- Avskiljning före förbränning (eng. *pre-combustion*). Denna teknik innebär att kolet i bränslet tas bort genom förgasning och då omvandlas bränslet till koldioxid och vätgas. Koldioxiden kan då avskiljas och vätgasen kan användas till andra ändamål. Tekniken är möjlig att tillämpa på industriella processer.
- Avskiljning av koldioxid ur rökgaser (eng. *post-combustion*). Denna teknik avskiljer koldioxiden efter förbränningen med någon form av absorptionsteknik, exempelvis aminer eller HPC (het kaliumkarbonat). Tekniken är den enda som går att tillämpa på samtliga typer av utsläppskällor.
- Syrgasförbränning (eng. *oxyfuel*). Denna teknik baseras på förbränning i en atmosfär av ren syrgas och återcirkulerad rökgas och medför att rökgasen från processen utgörs av vatten, koldioxid och inerta gaser (gaser som inte reagerar kemiskt med sin omgivning). Efter kondensering återfinns en nästan ren koldioxid. Tekniken kan tillämpas på kraftverk och i cementindustrin.

I de olika teknikerna arbetas det även med möjligheter för att driva delar av avskiljningsprocessen med restvärme, vilket kan sänka kostnaderna för avskiljningen. Kostnaden för avskiljningsprocessen minskar med ökad koncentration koldioxid i rökgasen och med större flöde. Det forskas mycket i att sänka kostnaden för avskiljningssteget i CCS-tekniken. Exempel på olika alternativ man i dag tittar på är så kallad kemcyklisk förbränning (eng. *chemical looping combustion*) som är en

variant av oxyfuel-tekniken, samt varianten Kalcium looping-processen där avskiljningen dock sker efter förbränning (Johnsson & Kjärstad 2019).

Transport

När koldioxiden har avskilts ska den transporteras till en lagringsplats. För att kunna transporteras behöver den avskilda koldioxiden komprimeras kraftigt. Komprimeringen sker vid högt tryck som gör att koldioxidgasen förvätskas och minskar i volym, där koldioxiden övergår till ett superkritiskt tillstånd. Transport av koldioxid kan ske i rörledning, med båt, tåg eller lastbil, men är det tal om större volymer, vilket oftast är fallet med CCS, brukar rörledning eller båt vara det bästa alternativet. För längre avstånd är transport med båt oftast det mest kostnadseffektiva (NORDICCS 2016).

I takt med att tillämpningen av CCS-tekniken ökar behöver infrastrukturen byggas ut. Det krävs regionala nätverk med gemensamma anslutningar för olika infångningskällor (kluster) till bland annat rörledningssystem, samt terminaler med mellanlager och hamnar för fartygsankomst.

Lagring

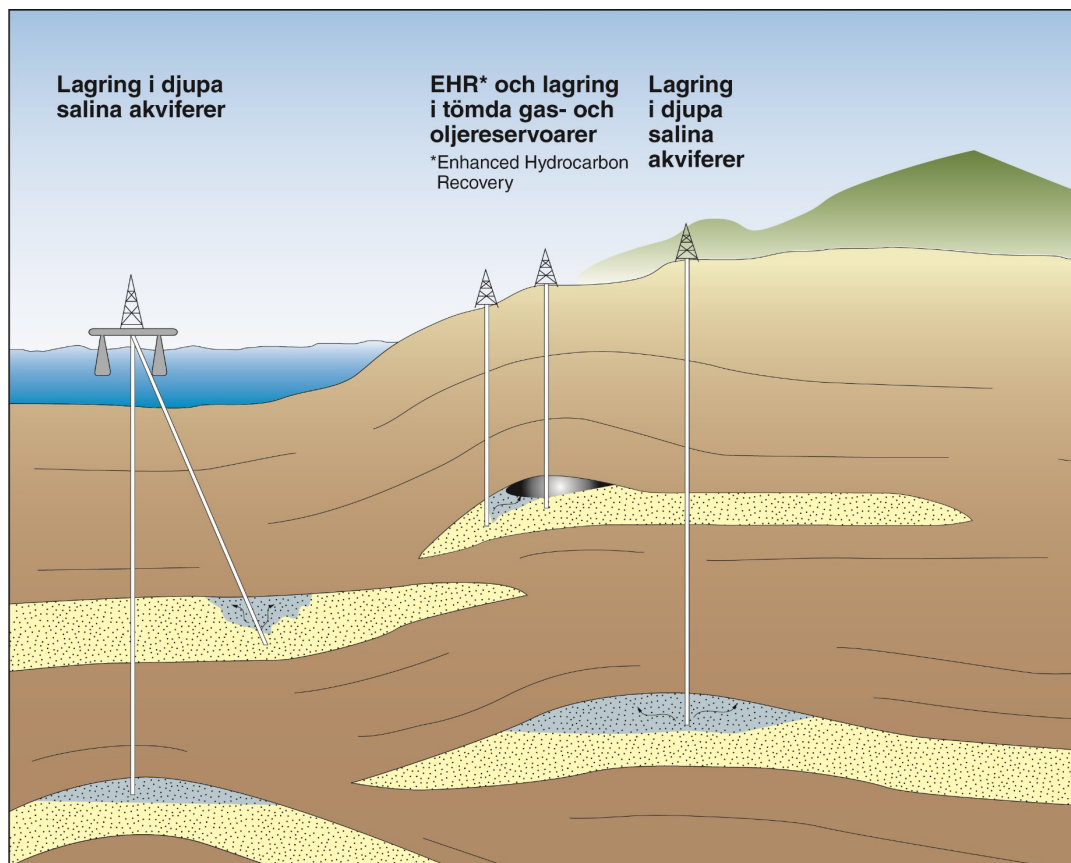
En framtida lagringsplats måste värderas utifrån några grundläggande faktorer. Först och främst ska ett lager ha kapacitet att ta emot stora mängder koldioxid. Som exempel kan nämnas att ett större koleldat kraftverk genererar 5–10 miljoner ton koldioxid per år vilket motsvarar 200–400 miljoner ton under en driftperiod på 40 år. Motsvarande mängder för de större koldioxidkällorna i Sverige är cirka 100 000–500 000 ton koldioxid, och enbart ett fåtal anläggningar har årsutsläpp på mer än 500 000 ton koldioxid. Geologisk lagring av koldioxid kan ske på olika sätt. Lagring kan exempelvis ske i djupa salina akviferer, ibland i samband med utvinning av olja eller gas (eng. *Enhanced Hydrocarbon Recovery*, EHR) där koldioxid injekteras och genom tryckupbyggnad trycker ut kolväten, eller i porösa basiska bergarter, som till exempel basalt.

En akvifer definieras som en regionalt utbredd men ändå geometriskt och strukturellt avgränsad berggrundsstruktur som är tillräckligt permeabel och porös för att kunna hålla stora mängder vatten.

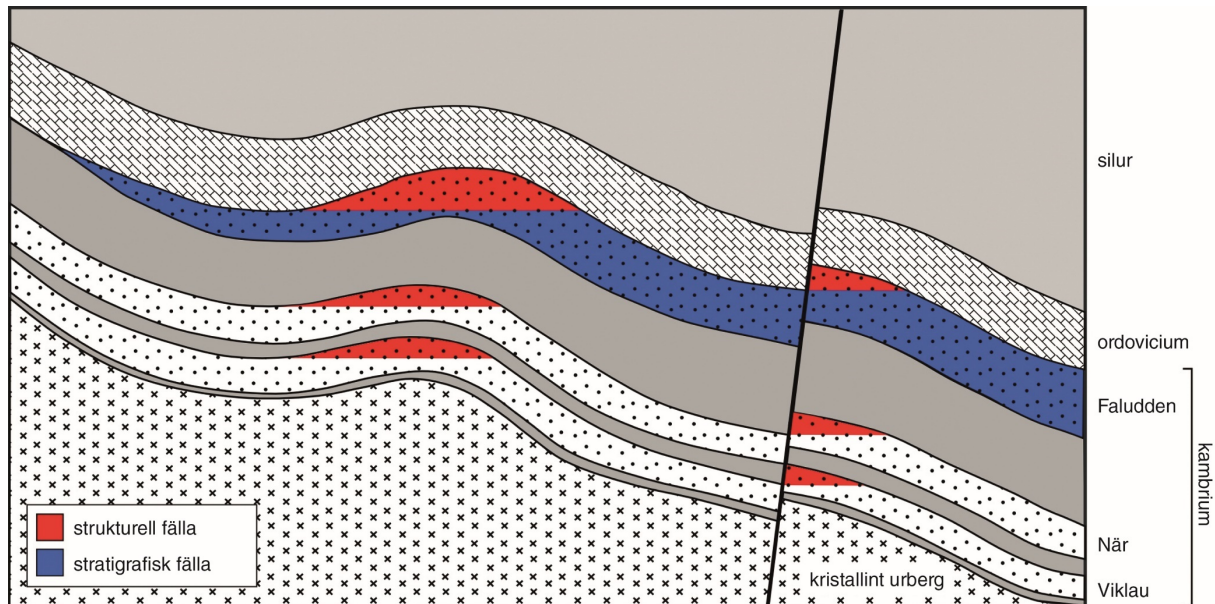
Djupa salina akvifer innehåller fossilt eller relict vatten, vilket är grundvatten som har varit inestängt i akviferen under tusentals till miljontals år, med salthalter (salinitet) på mer än 3 %.

Lagring av koldioxid i porösa basiska bergarter sker genom mineralisering av koldioxiden genom kemiska reaktioner med exempelvis basalt. Denna form av lagring görs på Island i projektet Carbfix som sedan 2012 har injekterat koldioxid löst i vatten i porösa basalter. Testarna på Island har visat på mycket lovande resultat, bland annat genom att mineraliseringen sker mycket snabbare än förväntat. Läs mer om detta i följande avsnitt om Island på sidorna 16–17.

Lagring i djupa salina akviferer, med eller utan EHR, anses ha den största potentialen globalt och utpekas även som mest lämplig i CCS-direktivet, se figur 1. Från EHR finns internationell mångårig praktisk erfarenhet från olje- och gasindustrin, där tekniken möjliggjort ett ökat utbyte av olja och gas från reservoaren. Praktiska erfarenheter från våra grannländer kan exempelvis dras från Sleipner- och Snøhvitfälten i norska Nordsjön där man med framgång har lagrat koldioxid i samband med utvinning av naturgas sedan 1996 respektive 2008. Eftersom EHR inte är aktuellt för svensk del fokuseras här på lagring i djupa salina akviferer utan EHR.



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



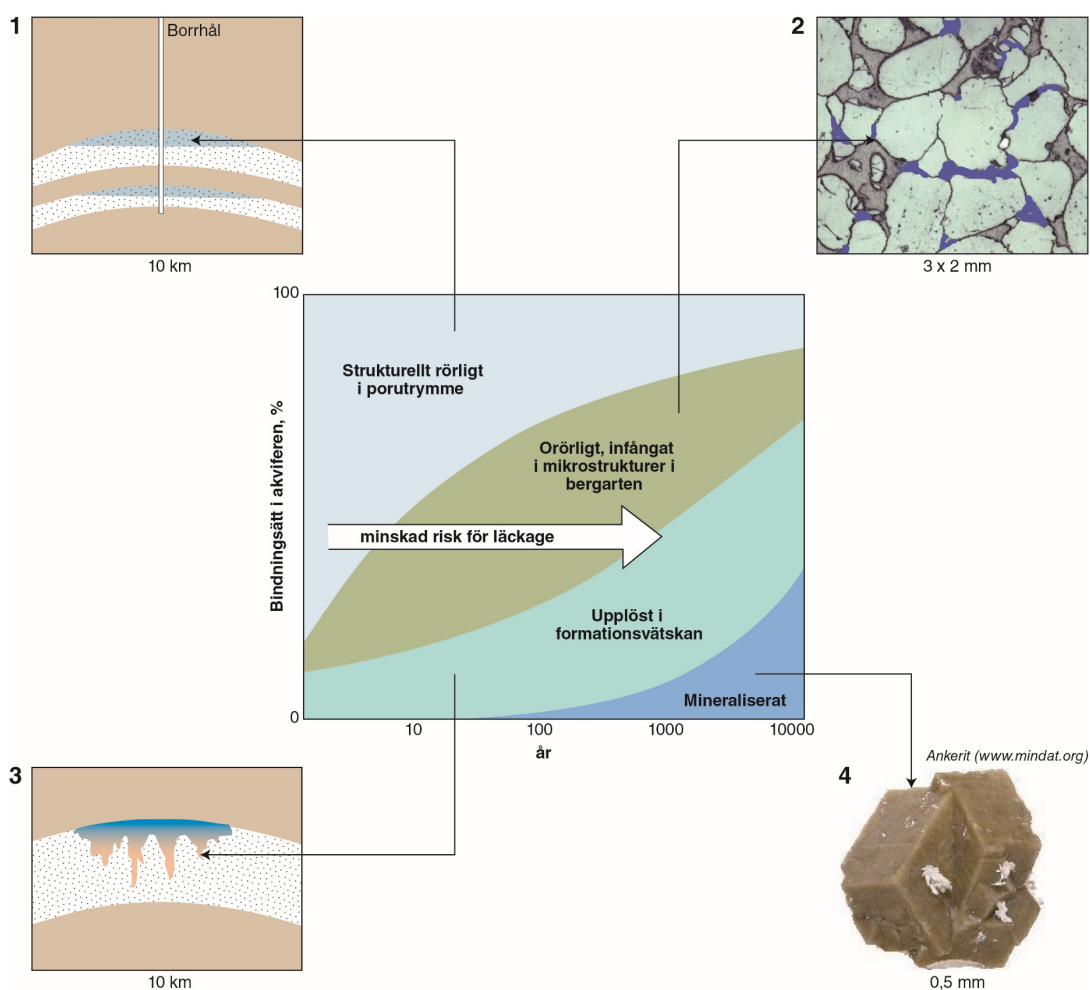
Figur 2. Definition av strukturell och stratigrafisk fälla illustrerad som schematisk profil från sydöstra Östersjön. En stratigrafisk fälla är ett resultat av laterala och vertikala variationer i porositet och permeabilitet som resultat av ett skift i bergartstyp. En strukturell fälla är ett resultat av en konvex deformation av reservoarbergarten (modifierad från Sopher m.fl. 2014).

Med djupa salina akviferer menas sådana akviferer som förekommer på tillräckligt stora djup (minst 800 m) för att möjliggöra lagring av koldioxid i superkritiskt tillstånd. I lagringssammanhang pratas det om lagringssammanhang, som är den del av komplexet som är lämplig för lagring av koldioxid. En lagringssammanhang kan innehålla både stratigrafiska och strukturella fällor, se figur 2.

Lagringspotentialen är främst beroende på akviferens storlek samt akviferbergartens porositet och permeabilitet. Porositet mäts i procent och anger hur stor andel av akviferbergarten som utgörs av porer (hålrum). Permeabilitet (även kallad hydraulisk konduktivitet) är ett mått på bergartens genomsläpplighet och anges oftast i millidarcy (mD). Hög porositet (mer än 10 %) ger bättre förutsättningar för att bergarten har utrymme att ta emot och lagra koldioxid. Hög permeabilitet ger bättre förutsättningar för att injektera koldioxid och för att den injekterade koldioxiden kan sprida ut sig inom akviferen. En lämplig akviferbergart kan exempelvis utgöras av en porös sandsten.

Koldioxid i superkritiskt tillstånd som injekteras i en salin akvifer kan bindas på fyra olika sätt som varierar över tid och förekommer samtidigt i olika omfattning, se figur 3:

1. Ansamling i porutrymmen. Eftersom den injekterade koldioxiden är 30–50 % lättare än formationsvattnet inom akviferen stiger det uppåt och ansamlas under en överliggande takbergart. Denna process är relativt snabb och dominerar den första lagringsfasen.
2. En stor del av den injekterade koldioxiden binds eller fastnar mikrostrukturellt i akviferbergarten i samband med att den sprider ut sig inom akviferen.
3. Successivt löser sig koldioxiden i formationsvattnet som då ökar lite i densitet och långsamt förflyttar sig nedåt i akviferen.
4. Koldioxiden reagerar kemiskt med akviferbergartens mineral och nybildar olika karbonat-mineral.



Figur 3. Generell beskrivning av den injekterade koldioxidens olika bindningssätt över en tidsperiod på 10 000 år. Över tid kommer alltmer koldioxid att bindas och mängden rörlig koldioxid minskar (modifierad från Erlström m.fl. 2011).

Tabell 1. Schematisk framställning av avgörande förutsättningar för en identifierad lagringsplats, för säker och effektiv lagring av koldioxid (modifierad från Bergmo 2013).

Reservoaregenskaper	Optimal	Osäker	Försiktighet tillrådes	Anmärkningar
Djup	> 800–2500 m	600–800 m		Beroende på temperaturgradient inom området
Porositet	> 20 %	10–20 %	< 10 %	
Permeabilitet (gas)	> 100 mD	10–100 mD (eller extrapolerat*)	< 10 mD (eller ingen data)	*extrapolerade värden från närliggande borrhål genom samma reservoar
Heterogenitet	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/Net sand	> 50 m	20–50 m	< 20 m	
Förkastningsintensitet	Låg, N/G > 0,4	Moderat	Hög, N/G < 0,1	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, evaporiter	Kritkalksten (beroende av fysikaliska egenskaper)	Högt innehåll av silt eller sand	
Säkerhet/risk	Optimal	Osäker	Försiktighet tillrådes	
Seismicitet	Låg, N/G > 0,4	Moderat	Hög	
Förorening av grundvatten	Nej	Osäkert	Ja	
Mogenhet/Data-tillgänglighet	Optimal	Osäker	Försiktighet tillrådes	
Borrhålsdata	Borrhål genom lagringsenhet eller fälla	Borrhål genom ekvivalent geologisk formation	Ingen borrhålsdata	
Seismiska undersökningar	3D-seismik	2D-seismik yngre än 1970	2D-seismik äldre än 1970, eller enbart få data	

För att säkerställa att den injekterade koldioxiden stannar i akviferen utan risk för att migrera upp till ytan, behövs en eller flera överlagrande takbergarter som kan utgöra en ogenomtränglig barriär mellan akviferen och markytan eller havsbotten. Takbergarten behöver vara tät och tillräckligt mäktigt och kan utgöras av exempelvis lera, lersten, lerskiffer eller lerig kalksten.

Det finns alltså en rad förutsättningar av avgörande betydelse för säker och effektiv lagring av koldioxid, vilka listas i tabell 1 där grönt indikerar önskvärde förhållanden, gult indikerar osäkra, men i vissa fall acceptabla, förhållanden, och rött indikerar att försiktighet tillrådes.

PÅGÅENDE CCS-PROJEKT

Intresset för CCS och antalet CCS-projekt i världen ökar. Globalt finns det i dag 27 driftsatta CCS-anläggningar fördelade på tolv i USA, fyra i Kanada, en i Brasilien, tre i Europa, tre i Förenade Arabemiraten och Saudiarabien, tre i Kina och en i Australien. Dessutom är ytterligare fem CCS-anläggningar under uppbyggnad, och mer än hundra framtida projekt befinner sig i olika stadier av planering (GCCSI 2021). Traditionellt sett har EHR (eng. *Enhanced Hydrocarbon Recovery*) varit en ekonomisk drivkraft för tillämpning av CCS, men nu ser man att särskilt ett område med CCS i samband med produktion av vätgas, så kallad blå vätgas, växer.

I Sverige finns det bra tekniska förutsättningar för tillämpning av CCS i olika industrier och i kraftvärmeverk. Särskilt för cement-, kemi- och raffinaderiindustrin kommer CCS bli nödvändigt för att uppnå så nära nollutsläpp som möjligt. Det finns potential hos avfallskraftvärmeverk som eldar en blandning av biomassa, avfalls- och fossilbaserade bränslen. Då en del av den utsläppta koldioxiden härrör från biomassa kan den räknas som negativa utsläpp om den fångas in och lagras (Johnsson & Kjärstad 2019).

Nedan beskrivs de CCS-projekt som just nu pågår i Sverige samt i länder nära Sverige och som inom en nära framtid kan bli aktuella för transport av svenskt koldioxid med syfte för lagring i deras geologiska koldioxidlager. Presenterad information kommer i huvudsak från respektive projekts webbplats (bilaga 1), samt genom muntlig kommunikation med projektens projektledare.

Sverige

CCS-projekt i Sverige har fram till nu fokuserat på infångningstekniken där två företag, Stockholm Exergi och Preem, har gjort de första pilotstudierna för infångning av koldioxid på deras anläggningar i Stockholm och i Lysekil. Cementa har kommit långt i deras planering gällande CCS och har en målsättning att ha en driftsatt anläggning för infångning av koldioxid till 2030. Förståelsen för nödvändigheten av CCS-tillämpningar på existerande industriverksamheter för att nå klimatmålen har ökat de senaste åren. Enligt konsult- och forskningsföretaget Profu finns det ytterligare ett antal företag i Sverige som analyserar förutsättningarna för koldioxidavskiljning i anslutning till deras verksamheter. Exempel på sådana företag är Öresundskraft, Växjö Energi, Söderenergi, Mälarenergi, Sysav, Vattenfall, Renova, Göteborg Energi, ST1, och Stora Enso (Jenny Gode, Profu, muntlig kommunikation, 2021-10-21).

Stockholm Exergi installerade, med stöd från Energimyndigheten, under 2019 en pilot-forskningsanläggning för infångning och avskiljning av koldioxid på biobränsleeldade kraftvärmeverket i Värtan, Stockholm. Pilotanläggningen var i drift från december 2019 till och med juni 2020. Under hösten 2020 beviljades projektet ytterligare finansiering från Energimyndigheten för att expandera anläggningen och fortsätta med ytterligare test. Beräkningar utförda av Stockholm Exergi visar på potential att fånga in uppemot 800 000 ton koldioxid årligen vid biokraftvärmeverket i Värtan. Målsättningen för Stockholm Exergi är en storskalig anläggning för infångning av koldioxid på biokraftvärmeverket i Värtan. Gällande lagring av den infångade koldioxiden från biokraftvärmeverket i Värtan har Stockholm Exergi undertecknat en avsiktsförklaring med norska företaget Equinor, som företräder projektet Northern Lights, som projekterar transport och lagring av koldioxid i berggrunden i norska Nordsjön (se mer på sidorna 14–15). Då Stockholm Exergis kraftvärmeverk i Värtan använder biobränsle klassificeras projektet som bio-CCS vilket bidrar till negativa utsläpp.

Förutom bio-CCS-projektet arbetar Stockholm Exergi även med att producera biokol som är en annan metod för att skapa negativa utsläpp. Den produceras i moderna kolmilor där den infångade koldioxiden binds och lagras stabilt i biokolen. Biokol används som jordförbättringsmedel och utgör en kolsänka. Anläggningen för produktion av biokol finns i Högdalen och har byggts av Stockholm Vatten och Avfall.

Preem startade under 2019 ett pilotprojekt för infångning av koldioxid från deras raffinaderi i Lysekil. I testanläggningen fångades koldioxiden in från raffinaderiets vätgasanläggning och övergick till en demonstrationsfas i maj 2020 som pågick under cirka ett halvår. Målet är att testerna ska skapa underlag för en storskalig CCS-anläggning. Projektet som kallas Preem CCS sker i samarbete med Chalmers tekniska högskola, norska forskningsinstitutet Sintef, Aker Solutions och Equinor, och finansieras av både Energimyndigheten i Sverige och av norska forsknings- och utvecklingsprogrammet CLIMIT. Projektet undersöker hela CCS-kedjan med infångning, transport och lagring av koldioxiden i berggrunden i norska Nordsjön. Preems vision är att ha en

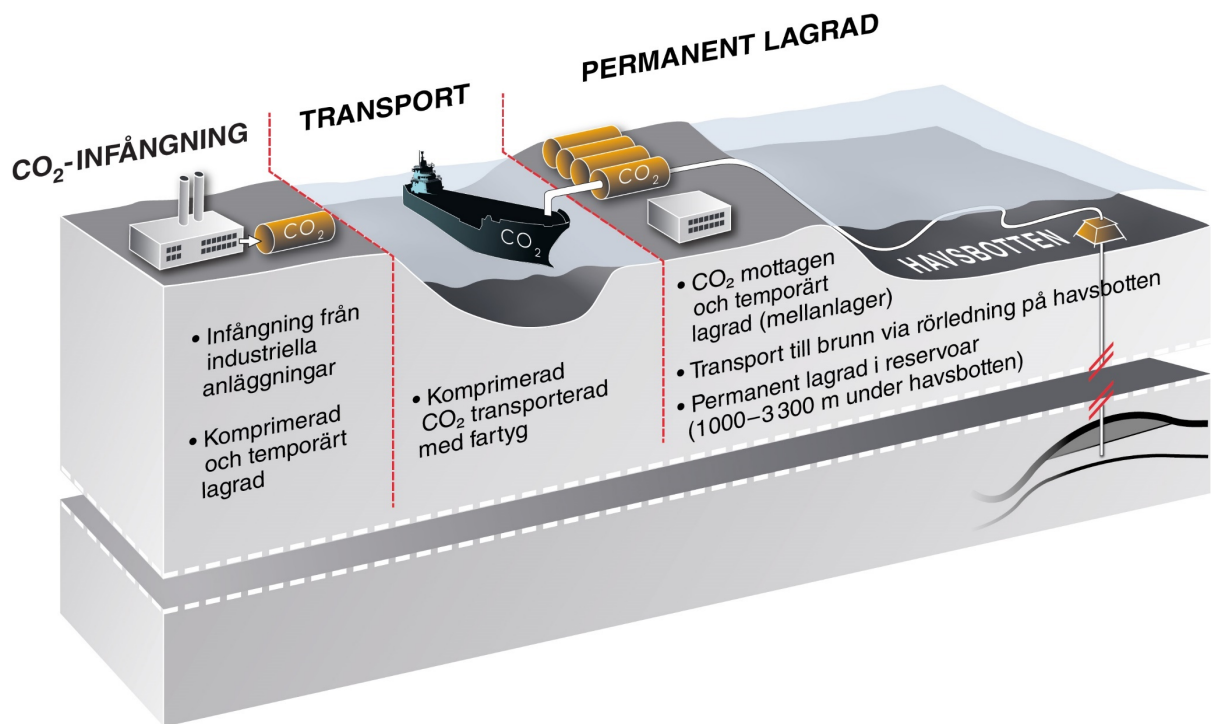
storskalig CCS-anläggning i drift 2025 där målet är en årlig infångning av uppemot 500 000 ton koldioxid vilket utgör cirka en fjärdedel av raffinaderiets totala utsläpp. Preem har skrivit förhandsavtal med Northern Lights gällande transport och lagring av infångat koldioxid vid det norska fullskaliga CCS-projektet Langskip (läs mer om Langskip nedan).

Cementa har under våren 2021 inlett en förstudie för en CCS-satsning vid anläggningen i Slite på Gotland. Projektet som kallas Slite CCS ska bland annat bygga på erfarenheter från Norcem's CCS-projekt i Brevik, Norge, och har som mål att bli världens första klimatneutrala cementfabrik i stor skala. Enligt planeringen ska anläggningen vara i drift 2030 där den förväntas kunna infånga runt 1,8 miljoner ton koldioxid årligen, vilket motsvarar cirka 3 % av Sveriges totala årliga koldioxidutsläpp. Då anläggningen samtidigt ökar sin andel biobränslen kommer en del av den infångade koldioxiden att kunna räknas in som negativa utsläpp.

CinfraCap är ett samverkansprojekt mellan Göteborg Energi, Nordion Energi, Preem, St1, Renova och Göteborgs Hamn AB. Projektet har undersökt möjligheterna för ett CCS-infrastrukturkluster i Göteborgs hamn med fokus på själva transporten av koldioxiden som infångats vid respektive verksamhet ner till hamnen. Projektet bedöms kunna fånga in 2 miljoner ton koldioxid årligen från parternas anläggningar som sedan transporteras till hamnterminalen i Göteborg via rörledningar, väg och järnväg, och vidare med båt för geologisk lagring till havs. Om projektet blir av planeras infrastrukturen vara öppen för tredjepartanslutning vilket då ökar potentialen för hantering av koldioxid i regionen.

Norge

Langskip är det första fullskaliga CCS-projekt i Norge som ska demonstrera hela CCS-kedjan med infångning, transport och lagring av koldioxid 3 000 m under havsbotten i lagringsstrukturen Aurora, väster om Bergen. Projektets mål är en kostnadseffektiv lösning för CCS i full skala med öppen tillgång till transport- och lagringsinfrastruktur baserat på EUs CCS-direktiv (Europeiska kommissionen 2009). Langskip planerar att bidra till de långsiktiga klimatmålen i Norge och EU och att tillföra teknikutveckling i ett internationellt perspektiv. Transport och lagringsdelen av projektet planeras i två faser. Första fasen förväntas påbörja injekteringar av koldioxid 2024 och bedöms ha en kapacitet på 1,5 miljoner ton koldioxid per år under en drifttid på 25 år. Andra fasen är en uppskalningsfas och är beroende av finansieringsbeslut (FID, *Final Investment Decision*). Om finansieringsbeslut kommer på plats, och det finns intressenter, förväntas den andra fasen kunna påbörjas innan 2030 och då med en förväntad kapacitet på 5 miljoner ton koldioxid injekterad årligen. Langskip-projektet kommer att kunna ta emot koldioxid från norra Europa med en uppskattad kostnad för transport och lagring på 30–55 euro per ton koldioxid. Den infångade koldioxiden kommer att transporteras med båt till en mellanlagerterminal på Kollsnes i Øygarden där den kommer att lagras i trycktankar innan den pumpas i rörledning 80 km på havsbotten till en injekteringsbrunn, se figur 4. Mellanlagret har utvecklats med tanke på en framtida utökning, och det finns även möjlighet att koppla ytterligare injekteringsbrunnar till rörledningssystemet.



Figur 4. Modell över projektet Langskip (modifierad från Equinor/Northern Lights 2021).

I projektet Langskip har man mot bakgrund av tidigare erfarenheter med CCS-projekt gjort separata avtal mellan olika industrier och staten inom de olika delarna av CCS-kedjan. Detta för att säkerställa att de industriella parterna enbart ansvarar för de delar de själva har kontroll över. I projektet ingår en till två aktörer gällande infångning, Norcem som ägs av Heidelberg Cement, och Fortum Oslo Varme, som dock förutsätter en viss egenfinansiering, samt finansiering från EU eller andra källor, för att kvalificera sig som aktör. För transport- och lagringsdelen ansvarar Northern Lights som ägs av Equinor, Shell och Total. Den norska staten har ingått separata avtal med de tre aktörerna. Gassnova ansvarar för koordinering av aktiviteterna i kedjan, inklusive tidsplaner och gränssnitt. Kostnaderna för projektet delas mellan den norska staten och de industriella parterna, där den norska staten har beviljat totalt 16,8 miljarder norska kronor till projektet. Totala kostnader för projektet har anslagits till 25,1 miljarder norska kronor, vilket inkluderar både investeringar och en driftsperiod på tio år. Projektets styrgrupp utgörs av medlemmar från Gassnova och från Olje- och energidepartementet.

Danmark

Greensand är ett CCS-projekt i samarbete mellan industri (Ineos, Maersk Drilling, Wintershall DEA) och GEUS (*De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland*) där man undersöker de tekniska och ekonomiska förutsättningarna för koldioxidlagring i uttömda olje- och gaslager i danska delen av Nordsjön. Målet för Greensand är att till 2030 skapa ett fullskaligt CCS-projekt med etablering av en infrastruktur för transport och lagring av uppemot 4–8 miljoner ton koldioxid årligen i danska Nordsjön. I projektets första fas (2020–2021), som finansieras av danska motsvarigheten till Energimyndigheten, undersöks de tekniska förutsättningar i det uttömda Nini-fältet. Projektet planerar för de första injekteringarna av koldioxid 2025 med runt 0,5–1 miljoner ton årligen. Transport av koldioxid kommer ske med båt med injektering via befintlig borrhälsplattform och infrastruktur. Den injekterade koldioxiden kommer sedan lagras i uttömda olje- och gaslager 1 500 m under havsbotten. Sandreservoaren som planeras bli framtida lager för koldioxid har en 800 m mäktig överlagrande lersten som kommer fungera som takbergart och förhindra läckage av koldioxid till ytan. Då lagring sker i uttömda olje- och gaslager finns det redan ett solid dataset,

samt erfarenheter från reservoaren från mer än 20 års produktion. Detta kan säkerställa säker och effektiv lagring av den injekterade koldioxiden. Vid full skala förväntas Greensand-projektet kunna stå för cirka 40 % av Danmarks totala mål för minskning av koldioxidutsläpp. I projektet kommer man även ta emot utländsk koldioxid, där ett uppskattat pris för transport och lagring bedöms bli runt 65–70 euro per ton koldioxid (Johan Byskov Svendsen, Ineos, muntlig kommunikation, 2021-10-14).

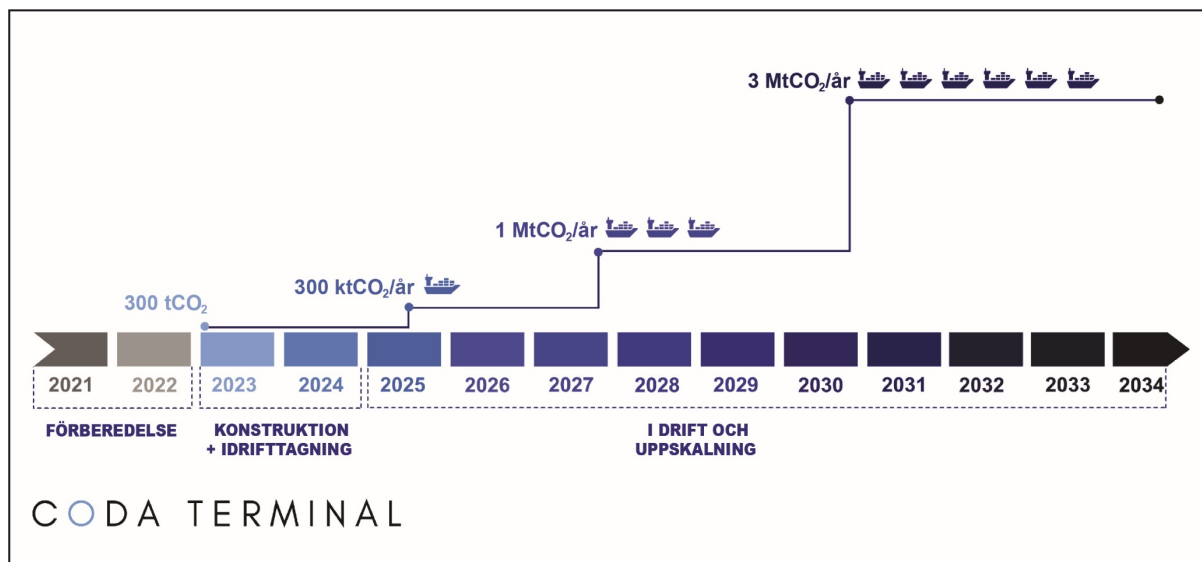
C4 – Carbon Capture Cluster Copenhagen utgörs av nio verksamheter (Ørsted, ARC, Høfor, Vestforbrænding, Argo, Biofos, CMP, CTR och Veks) i Köpenhamn som tillsammans ingår i ett klustersamarbete kring infångning och lagring av koldioxid. Målet för C4-klustersamarbetet är att fånga in 3 miljoner ton koldioxid årligen som sedan ska användas inom CCUS. Det motsvarar cirka 15 % av det totala danska reduktionsmålet på 70 % till 2030. Deltagarna i klustret ligger geografiskt nära varandra i Köpenhamnsområdet och det är därför möjligt att utnyttja ett gemensamt rörledningssystem för transport till hamnterminal. CMP (Copenhagen Malmö Port) har gjort en förstudie gällande etablering av terminal och mellanlager för koldioxid för efterföljande båttransport till aktuellt koldioxidlager. Anläggningen planeras att etableras på Prøvestenen, en konstgjord ö öster om Amager i Köpenhamn. Den förväntas kunna stå klar i slutet av 2025 med möjlighet för lastning var 5–7 dag på fartyg med kapacitet för cirka 7 500 ton koldioxid med möjligheter för uppskalning. Prøvestenen har också potential som mellanlager och terminal för transport av koldioxid infångat i Skåne.

Island

Carbfix CCS-projekt startades på Island 2007 som ett samarbete mellan industri och akademi. Under projektets första år fokuserade man på metodutveckling, laboratorietester, karaktärisering av den basaltiska berggrunden där injekteringen skulle ske, modellering, samt infångning av koldioxid samtidigt som man fick alla nödvändiga licenser på plats. De första pilotinjekteringarna av koldioxid i berggrunden påbörjades 2012, inte långt från kraftanläggningen Hellisheiði i sydvästra Island. De första testerna gjordes med ren koldioxid där 175 ton injekterades på 500 m djup. Därefter testade man en blandning av 75 % koldioxid och 25 % svavelväte (H₂S) direkt från Hellisheiði-anläggningen, och injekterade 73 ton av blandningen på samma djup. Testerna visade att mer än 95 % av koldioxiden har mineraliserats efter mindre än två år (Matter m.fl. 2016) och i stort sett allt svavelväte har mineraliserats inom fyra månader efter injektering (Snæbjörnsdóttir m.fl. 2017). Redan 2014 hade Carbfix-projektet utvecklats till en driftsatt, kostnadseffektiv och hållbar industriell process som fångar in koldioxid och svavelväte från Hellisheiði-anläggningen för permanent lagring i berggrunden. Just nu arbetar Carbfix tillsammans med ON Power (dotterbolag till Reykjavík Energi) med att skala upp och optimera infångningsprocessen för att fånga in och lagra 34 000 ton koldioxid årligen, jämfört med de 12 000 ton koldioxid som i dag fångas in och lagras årligen. Projektet förväntas vara i drift 2025 och kommer då minska utsläppen vid Hellisheiði med 95 %.

Carbfix infångningsprocess där man låter svavelväten stanna kvar i sin form och sedan injekterar den tillsammans med koldioxiden innebär stora ekonomiska fördelar jämför traditionella infångningsmetoder där man avskiljer svavel. Carbfix metoden för infångning och avskiljning går också att applicera på andra industrier som exempelvis avfallshantering, stål, och cement.

Carbfix har i dag ett flertal pågående projekt, båda nationella och internationella, som handlar om uppskalning, utveckling av befintliga metoder och processer, pilotprojekt på andra geotermala- och avfallsanläggningar på Island, anslutning av DACCS (eng. *Direct Air Carbon Capture and Storage*), kunskapsdelning och projektsamarbeten med liknande anläggningar i bland annat Turkiet, Italien, Tyskland och Storbritannien. Ett övergripande mål för Carbfix är att totalt sett, inklusive anslutande underprojekt, ha fångat in och lagrat 1 miljard ton koldioxid innan 2040.



Figur 5. Tidslinje för CODA-terminalens planering (modifierad från Carbfix 2021).

Som ett resultat av succén i Carbfix-projektet har man på Island nu påbörjat byggnationen av en ny landbaserad lagringsanläggning för koldioxid. Terminalen kallas CODA och planerar att ta emot koldioxid med båt från Nordeuropa för att därefter injektera den i berggrunden. Terminalen kommer att placeras i Straumsvík i sydvästra Island där det redan i dag finns en industrihamn. CODA-terminalen kommer att bli det första storskaliga landbaserade geologiska lagringsprojektet i Europa och förväntas vid full aktivitet 2030 att lagra 3 miljoner ton koldioxid årligen, både från lokal industri, DACCS, och från norra Europas utsläppskällor. Förberedelserna för terminalen påbörjades under 2021 och pilottester planeras att starta under 2022. Driftstart av CODA-terminalen planeras till 2025 och full aktivitet förväntas innan 2030, se figur 5. Den totala investeringen för projektet är 220–250 miljoner euro inklusive driftskostnader och kapitalkostnader. Kostnaden för transport och lagring av koldioxiden vid CODA-terminalen bedöms bli 29–66 euro per ton koldioxid.

SGU har följt Carbfix-projektet sedan 2011 i ett då gemensamt nordiskt forskningsprojekt, NordiCCS (2011–2015) och därefter genom direkt uppföljning med projektledare samt genom bevakning av publicerade nyheter och vetenskapliga artiklar.

Storbritannien

Acorn är ett CCS-kusterprojekt i Aberdeenshire i nordöstra Skottland som i en första fas planerar att fånga in cirka 300 000 ton koldioxid årligen från gasterminalen St Fergus och transportera den infångade koldioxiden i befintliga rörledningar från gasproduktionen till ett koldioxidlager 2 500 m under havsbotten i Nordsjön cirka 100 km från land. Projektet planerar även för att kunna ta emot koldioxid från andra CCS-projekt i Storbritannien och Europa, samt för produktion av blå vätgas. Acorn-projektet har hittills finansierats av industriella parter tillsammans med Storbritanniens regering och EU. Acorn leds av Pale Blue Dot Energy med Shell som teknisk utvecklare.

Zero Carbon Humber är ett CCUS-kusterprojekt med ett antal industrier kopplade till sig i Yorkshire- och Humberregionen i Norra England. Humber är det mest karbonintensiva industriella klustret i Storbritannien. Med detta projekt siktar de mot att bli världens första nettonollutsläpp-industriella kluster till 2040. Regionen kommer att fånga in koldioxid från elproducerande kraftverk, vätgasproduktion och andra industrier med olika uppstartstider med start från och med mitten av 2020. Den infångade koldioxiden kommer att lagras i geologiska formationer under Nordsjön och användas för blå vätgasproduktion. Den initiala infångningskapaciteten beräknas till 17 miljoner ton koldioxid årligen.

Net Zero Teessides CCUS-projekt är placerat i Teessides industriella kluster i nordöstra England och drivs av NEP (*Northern Endurance Partnership*) som utgörs av BP, ENI, Equinor, Shell och Total. Projektet planeras vara i drift 2030 med en målsättning om infångning och lagring av uppemot 10 miljoner ton koldioxid årligen från klustret. Den infångade koldioxiden kommer transporteras i rörledning för lagring i Nordsjön.

Det pågår ett samarbete mellan Zero Carbon Humber och Net Zero Teesside som med hjälp av CCUS-tekniken tillsammans kommer att kunna minska utsläppen med nästan 50 % från Storbritanniens totala utsläpp från industriella kluster. Samarbetet kallas the East Coast Cluster och kommer förutom att lagra den infångade koldioxiden också att producera blå vätgas motsvarande cirka 70 % av Storbritanniens samlade mål för vätgasproduktion till 2030.

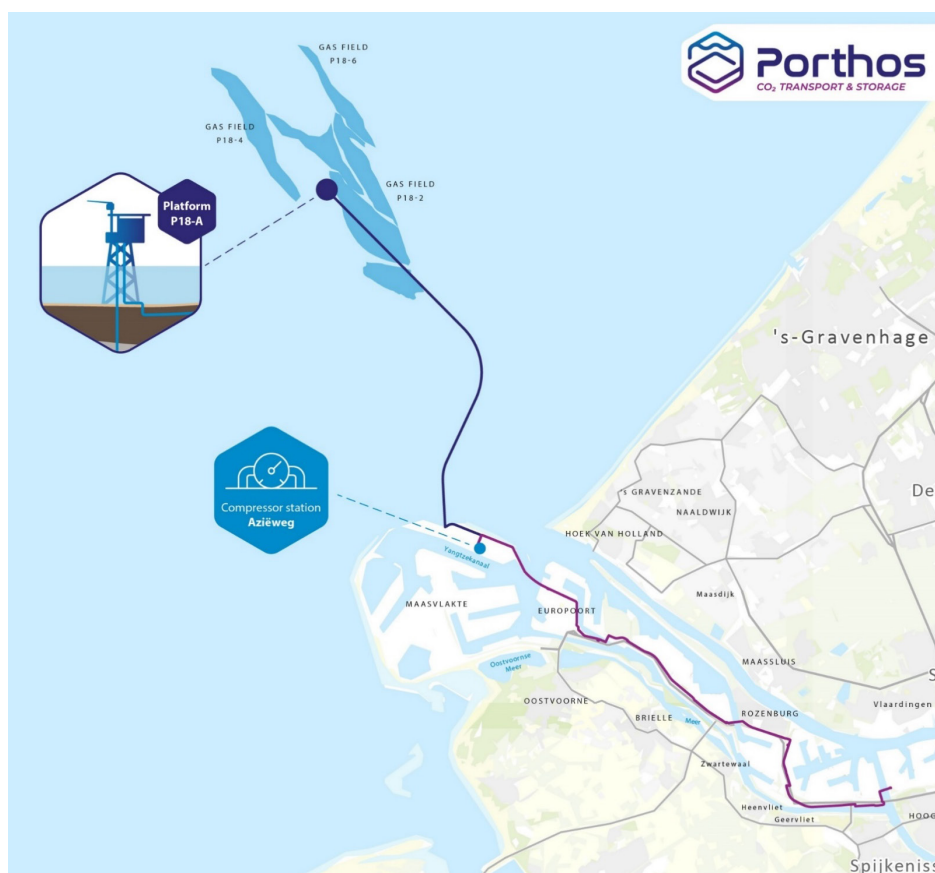
I oktober 2021 meddelade Storbritanniens regering finansiering för the East Coast Cluster, vilket innebär att detta kluster nu kan gå vidare med fas 1 i planeringen.

HyNet North West-projektet är ett CCUS-projekt initierat av Heidelberg Cements dotterbolag Hansson som har gått ihop med andra industrier i det nordvästliga England och norra Wales för att skapa ett lokalt kluster. Klustret bedöms att till 2030 ha potential att fånga in 10 miljoner ton koldioxid årligen för lagring i Nordsjön och produktion av blå vätgas. HyNet kommer att uppgradera och använda befintlig infrastruktur kombinerad med ny infrastruktur som förväntas vara i drift 2025.

I oktober 2021 meddelade Storbritanniens regering finansiering för HyNet vilket innebär att även detta kluster nu kan gå vidare med fas 1 i planeringen.

Nederländerna

Porthos står för *Port of Rotterdam CO2 Transport Hub and Offshore Storage* och är ett CCS-projekt som ska fånga in koldioxid från industrin i hamnområdet i Rotterdam, transportera den till och lagra den i uttömda gasfält under nederländska delen av Nordsjön. Infångningsdelen kommer att utföras av ett antal olika aktörer, som sedan kopplar den individuellt infångade koldioxiden till en gemensam rörledning som löper genom Rotterdam till en kompressionsanläggning längst ute i hamnområdet. Den komprimerade koldioxiden transporteras med rörledning på havsbotten till en plattform 20 km från kusten. Slutligen pumpas koldioxiden till ett uttömt gaslager 3 000 m under havsbotten. Projektet använder existerande infrastruktur gällande plattformar och rörledningar, men ser även ett behov för möjlighet till transport med båt eller lastbil, se figur 6. Porthos-projektet bedöms i uppstartsfasen kunna lagra runt 2,5 miljoner ton koldioxid per år. Projektet behöver ett slutligt investeringsbeslut (FID) som väntas tas under 2022, samt ytterligare utveckling av transport- och lagringsinfrastruktur, miljökonsekvensbeskrivning och tillstånd, samt avtal med industrin gällande leverans av koldioxid. Efter investeringsbeslutet kan byggandet av infrastrukturen äga rum och anläggningen förväntas kunna vara i drift 2024.



Figur 6. Modell över infrastrukturen i Porthos-projektet (från Porthos 2021).

NATIONELL OCH INTERNATIONELL SAMVERKAN

Som en del av SGUs omvärldsbevakning gällande CCS har SGU under ett antal år ingått i ett flertal nationella och internationella samverkansprojekt och nätverk, samt i olika institutioner för kunskapsuppbyggnad och -delning. Genom deltagande i nätverk, workshoppar, konferenser och webinarier får SGU möjlighet att behålla och utveckla sin kompetens, samt öka sin insikt gällande pågående CCS-aktiviteter världen över. För tillfället ingår SGU inte i några forskningssamarbeten gällande CCS. De samverkan och nätverk som SGU är mest aktiva inom beskrivs nedan.

CO₂GeoNet

CO₂GeoNet initierades av den Europeiska kommissionen 2004 som ett expertnätverk under det sjätte ramprogrammet FP6. Nätverket är en plattform för utbyte av kunskap, vetenskaplig rådgivning, upplärning av studenter och gemensamma forskningsaktiviteter inom området geologisk lagring av koldioxid. CO₂GeoNet är en icke vinstdriven vetenskaplig organisation och innefattar numera 26 forskningsinstitutioner från 20 europeiska länder som representerar mer än 300 forskare med olika bakgrund relaterad till koldioxidlagring. CO₂GeoNet håller årligen i ett öppet forum där experter och intressenter från hela världen deltar. SGU har deltagit i merparten av tillfällena. Under covid-19-pandemin har det öppna forumet utförts som ett antal webinarier, där SGU har deltagit i samtliga.

2020–2021 har CO₂GeoNet lett sammanställningen av en europeisk rapport om CCS-läget i Europa. Rapporten som heter *State-of-play on CO₂ geological storage in 32 European countries – an update* (CO₂GeoNet 2021) presenterar bidrag från länder i Europa, inklusive Sverige där SGU har lett den svenska sammanställningen.

BASRECCS

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*. Deltagare i nätverket består av akademi och industri samt intressenter från lokal och regional politik, civilsamhällsorganisationer med flera. Under de senare åren har fokus vidgats till att inkludera transport och användning av koldioxid (CCUS) där fokus nu ligger på att utveckla infrastrukturen och skapa ett naturligt geografiskt område för samarbete kring gränsöverskridande transport, användning och lagring av koldioxid i regionen. BASRECCS öppnar möjligheter för ett brett samarbete genom bland annat kunskapsdelning och gemensamma forskningsprojekt med sikte på framtida pilot- och demonstrationsprojekt i de kambriska sandstenarna i Östersjöområdet. En gång årligen håller BASRECCS i *Baltic Carbon Forum* som en del av nätverkets långsiktiga strategi för att skapa förutsättningar för utbredningen av CCUS inom Östersjöregionen. Forumet finansieras av det nordiska ministerrådet och NER (*the Nordic Energy Research*).

SGU är aktiv medlem i BASRECCS och deltar årligen i nätverkets *General Assembly* samt *Baltic Carbon Forum* där vi ett antal gånger har presenterat vårt arbete gällande geologisk lagring av koldioxid i södra Sverige.

GCCSI

GCCSI står för *the Global CCS Institute* och är en internationell tankesmedja med syfte att öka spridningen av CCS. Organisationen utgörs av ett antal experter inom alla delar av CCS som arbetar utifrån en plattform för datainsamling, kunskapsuppbyggnad, rådgivning och stöd. GCCSI utgörs av regeringar, organisationer, företag, forskningsinstitutioner och civilsamhällsorganisationer från hela världen. Varje år insamlar och rapporterar GCCSI den globala statusen om CCS och har dessutom den mest omfattande databasen med globala CCS-aktiviteter, från planeringsfas till driftsfas. Databasen är tyvärr numera enbart öppen för medlemmar. GCCSI erbjuder regelbundna kunskapsuppbyggande webinarier med olika teman inom CCS och publicerar varje år en rad rapporter, alla med öppen tillgång. Som en viktig del av SGUs omvärldsbevakning gällande CCS deltar vi i merparten av dessa webinarier och tar del av ett flertal av de publicerade rapporterna från GCCSI.

GCCSI har tillsammans med *Pale Blue Dot Energy* och OGCI (*The Oil and Gas Climate Initiative*) och gjort en *CO₂ Storage Resource Catalogue* (www.ogci.com). Katalogen är en oberoende global utvärdering av geologisk lagringspotential och är tänkt att bidra till att öka spridningen av CCUS i världen. Katalogen har undersökt 715 koldioxidlagringsområden inom 18 olika länder och regioner i relation till SRMS (*the SPE Storage Resources Management System*) och inkluderar både olje- och gasfält samt salina akviferer. Inom de undersökta lagringsprojekten bedömer man att det finns lagringsutrymme för 89,9 miljarder ton koldioxid, vilket utgör bara en liten del av de beräknade 12 958 miljarder ton totala lagringsutrymmen i världen. Eftersom EHR-projekt inte räknas med i SRMS-systemet har projektet enbart registrerat aktiva kommersiella projekt i Australien, Kanada, Norge och USA. Enligt GCCSI finns det i dag 27 driftsatta CCS-projekt i världen och ytterligare 5 CCS-anläggningar är under uppbyggnad (GCCSI 2021).

IEAGHG

IEAGHG står för *the IEA Greenhouse Gas R&D Programme* och bildades 1991 som ett oberoende ramverk inom det internationella energirådet (IEA). Huvudmålet för IEAGHG är att genom samarbete med förande forskningsinstitutioner och tekniska experter från hela världen ta fram de bästa och mest kostnadseffektiva teknikerna för att minska utsläpp av växthusgaser. Huvudfokus

ligger på tekniker för infångning, användning och lagring av koldioxid (CCUS/CCS). Resultat från IEAGHG:s arbete publiceras på deras webbplats och är publikt tillgängligt. IEAGHG håller även i frekventa webinarier för kunskapsdelning och -uppbyggnad. SGU deltar i merparten av dessa som en del av myndighetens omvärldsbevakning och kunskapsuppbyggnad. IEAGHG är även med och samordnar en återkommande *International Workshop on Offshore Geologic CO₂ Storage* som SGU har medverkat i och bidragit till sedan uppstarten 2016.

Gassnova, CLIMIT

Gassnova är en myndighet i Norge och regeringens närmaste rådgivare för CO₂-hantering och agerar under Olje- och energidepartementet. Gassnova arbetar för att främja CCS både nationellt och internationellt och har bland annat som mål att effektivisera kostnaderna för CCS, bland annat genom erfarenheterna från Langskip-projektet. Gassnova har bildat CCS Norway för att dela kunskaperna från Langskip-projektet med industrier, andra regeringar och övriga intressenter. Gassnova är genom den norska staten delägare med 73,9 % i Teknologicenter Mongstad (TCM) som är ett testcenter för verifiering av teknologier för infångning av koldioxid. Gassnova äger TCM tillsammans med industrin (Equinor, Shell och Total) och Equinor är operatör på centret. Huvudsyftet för TCM är att testa, verifiera och demonstrera olika teknologier för att främja en kostnadseffektiv infångning av koldioxid i full skala. TCM används både i nationella och internationella projekt. Gassnova arrangerade i februari 2019 en myndighetsresa för SGU, Energimyndigheten och Naturvårdsverket till Oslo med besök hos Olje- och energidepartementet och Equinor. Syftet med myndighetsresen var information och samarbete kring CCS i Norge och Sverige.

CLIMIT är Norges nationella program för forskning, utveckling och demonstration av teknologi för CO₂-hantering. CLIMIT finansierar utveckling av kunskap, teknologi och lösningar som kan bidra till att sänka kostnaderna för CCS samt sprida användningen av CCS globalt. Programmet är ett samarbete mellan Gassnova och Norges forskningsråd där Forskningsrådet stödjer delen med forskning och utveckling och Gassnova stödjer demonstrationsdelen. Gassnova ansvarar för koordinering och är ledare av programmets sekretariat. CLIMIT riktar sig till nationella och internationella forsknings- och demonstrationsprojekt som kan främja kommersialiseringen av CCS. Vart annat år håller CLIMIT en konferens där pågående projekt presenterar sina resultat. SGU har deltagit på konferensen i Oslo 2019 och digitalt 2021.

Universitöt Hamburg

Hamburgs universitet i Tyskland är aktiva inom marin forskning i Östersjön. Sedan 2016 har universitetet i flera omgångar bland annat samlat in moderna reflektionsseismiska data i svenska, finska, estniska och lettiska delar av Östersjön. Fokus på forskningen är att förbättra förståelsen av berggrundgeologin och marina sediment på havsbotten i Östersjön. I dessa arbeten har Hamburgs universitet samarbetat med universitet, myndigheter och institutioner från de nordiska och baltiska länderna, inklusive SGU.

Genom att samla in nya moderna seismiska data med högre upplösning, blir det möjligt att karaktärisera berggrundgeologin i större detalj än det har varit tidigare med befintlig prospekteringsdata från 1960- och 70-talet. Med nya data och forskning från Hamburgs universitet öppnas en möjlighet att förbättra förståelsen av delar av den sedimentära berggrunden i Östersjön som är relevant avseende geologisk lagring av koldioxid i Sverige.

GEUS

GEUS är *De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland*, och har lång erfarenhet med frågor som rör CCS. SGU har länge haft ett brett samarbete med GEUS, och har gällande CCS

och specifikt geologisk lagring av koldioxid ingått i exempelvis NORDICCS (2011–2015) tillsammans med bland annat GEUS.

GEUS har genom sin geologiska expertis bidragit till att ta fram en dansk färdplan för CCUS (www.innovationsfonden.dk) och arbetar just nu med att undersöka vilka geologiska strukturer i Danmark som har bäst potential som geologiska lager för koldioxid. Målet är att intensifiera datainsamlingen för utvalda strukturer i syfte att mogna dessa för eventuell senare lagring av koldioxid. GEUS är även partner i Greensand-projektet.

Uppsala universitet

Uppsala universitet har under de senaste 10 åren varit mycket aktiva inom forskning som rör koldioxidlagring, och har deltagit i och lett ett antal projekt inklusive MUSTANG, TRUST, PANACEA och CO2QUEST. Merparten av dessa forskningsprojekt har fokuserat på Heletz, en CCS-pilot i Israel där man har genomfört testinjekteringar av koldioxid. Forskningen har fokuserat på utveckling av metoder för bevakning och modellering av den injekterade koldioxiden inom reservoarformationen. Universitetet har även varit involverat i ett flertal ansökningar för att etablera en pilotlagringsplats i Sverige. Man har arbetat mycket med tillämpningen av seismiska metoder för att karaktärisera och bevaka lagringsplatser. Exempelvis var det Uppsala universitet som samlade in och bearbetade 3D-seismiska data från pilotprojektet Ketzin i Tyskland.

SGU har länge varit en aktiv samarbetspartner med Uppsala universitet och har ingått i en rad forskningssamarbeten samt olika internationella nätverk som exempelvis BASRECCS och CO₂GeoNet tillsammans med dem.

Luleå tekniska universitet

SGU har genom nätverkande med LTU (Luleå tekniska universitet) fått kännedom om och insikt i ett relevant projekt de arbetar med just nu. Projektet kallas CO₂-INSURANCE (Nyttjande av industriell bi-produkt för ett effektivt geologiskt BECCS) och finansieras inom klimatsatsningen Industriklivet via Energimyndigheten under 2020–2024. Projektet har som mål att utveckla en mer energieffektiv teknik för infångning av koldioxid från industrin för framtida lagring i svensk berggrund. Projektet fokuserar på infångning av biogen koldioxid som bildas vid förbränningen på förpackningsföretaget BillerudKorsnäs produktionsenhet i Karlsborg utanför Kalix, och klassificeras därför som ett bio-CCS projekt. För att minska kostnaden för infångning av koldioxiden, som i dag är det mest kostsamma steget i CCS-processen, ska projektet utveckla en ny infångningsteknik som blir mer energieffektiv än befintliga tekniker. Detta görs genom utveckling av enzymbaserad teknik på förpackningsföretagets egna biprodukter som kommer användas för att fånga in koldioxiden. Gällande lagring av den infångade koldioxiden kommer LTU i detta projekt titta på lagringsmöjligheter i svenska basalter på land. Geologisk lagring av koldioxid i basalter sker genom att lösa upp koldioxiden i vatten som sedan pumpas ner för lagring i den basaltiska berggrunden där den inom ett fåtal år övergår till karbonatmineral. Denna typ av koldioxidlagring har sedan 2012 testats på Island med framgång (se tidigare avsnitt om CCS-projekt, sidorna 16–17), men har inte tidigare undersökts i Sverige där man främst har undersökt möjligheterna för geologisk lagring av koldioxid i djupt liggande salina akviferer (se till exempel Erlström m.fl. 2011, Elforsk 2014, Sopher m.fl. 2014, Mortensen m.fl. 2016). Utmaningen med geologisk lagring av koldioxid i svenska basalter är att dessa är mycket äldre och därmed tätare än den basaltiska berggrunden på Island. Projektet kommer därför utföra geologiska provtagningar på ett tiotal platser i Sverige för att undersöka att rätt förutsättningar för koldioxidlagring finns.

Under 2021 har SGU tillsammans med LTU bland annat bidragit till det Profu-ledda projektet Bio-CCS i fjärrvärmesektorn i form av föredrag och kunskapsdelning om möjligheter för geologisk lagring av koldioxid i Sverige. SGU följer LTUs CO₂-INSURANCE-projekt tätt.

Profu

Profu är ett oberoende konsult- och forskningsföretag som arbetar med energi, avfalls- och transportfrågor. Företaget har sitt ursprung från Energisystemteknik på Chalmers tekniska högskola i Göteborg, vilka de fortfarande har ett nära samarbete med. Profu leder projektet Bio-CCS i fjärrvärmesektorn (oktober 2020–december 2021) som ska ta fram underlag till och utveckla en färdplan som visar hur den svenska fjärrvärmesektorn med hjälp av bio-CCS kan bidra till att Sverige senast 2045 uppnår nettonollutsläpp av växthusgaser och därefter negativa utsläpp. Projektet finansieras av fjärrvärme- och avfallsbranschen genom forsknings- och kunskapsorganisationen Energiforsk, samt av Energimyndigheten och Stiftelsen IVL (Svenska miljöinstitutet). Under 2021 har SGU på inbjudan av Profu deltagit i ett antal workshoppar under projektets arbetspaket 3 (AP3) som omfattar infrastruktur för transport och lagring, inklusive tillståndprocesser och klustret Skåne/Danmark. SGU har förutom aktiva diskussioner bidragit med en föreläsning om potentialen för geologisk lagring av koldioxid i Sverige.

Övrigt

Under senare år har SGU jobbat med ett antal kommunikationsinsatser i syfte att bättre nå ut med kunskap och information om geologisk lagring av koldioxid. Insatserna har bland annat inkluderat uppdatering av SGUs egna webbplats för att göra informationen där så enkel och tillgänglig som möjligt. Som ett led i detta spelade SGU under våren 2021 in ett podcastavsnitt om just geologisk lagring av koldioxid och möjligheter och utmaningar i samband med detta, se www.sgu.se – sök på CCS koldioxidlagring.

Förutom egna kommunikationsinsatser har SGU även samverkat med ett antal nationella aktörer och medier för att sprida information om CCS och geologisk lagring av koldioxid. SGU har bland annat bidragit med information och kunskapsdelning i form av föreläsningar hos exempelvis KVA (Kungliga vetenskapsakademien) samt IVA (Kungliga Ingenjörsvetenskapsakademien) och KLIMPO (forum för klimatpositivt och kolsänkor). SGU har även spelat in ännu en podcast i informationssyfte, på uppdrag av Midroc i samband med deras podcastkanal CCS Panelen. Podcasten finns publicerad på både Midrocs webbplats (se www.midroc.se – sök på CCS-panelen) samt på Spotify. Ytterligare har SGU under 2021 ställt upp på ett antal intervjuer med bland andra Sveriges Radio Ekot och SVT kring CCS med särskilt fokus på geologisk lagring av koldioxid.

GEOLOGISK LAGRING AV KOLDIOXID I DJUPA AKVIFERER I SVERIGE

Ett antal studier (Erlström m.fl. 2011, Vernon m.fl. 2013, Anthonsen m.fl. 2013, Sopher m.fl. 2014, Elforsk 2014, Mortensen 2016) visar på potentialen för geologisk lagring av koldioxid i djupa salina akviferer i Sverige. Två geografiska områden i Sverige utpekas som mest lämpliga för koldioxidlagring, sydöstra Östersjön och sydvästra Skåne med intilliggande havsområden.

Identifierade lagringsmöjligheter i Sverige

Inom de två geografiska områdena i södra Sverige som tolkas som lämpliga avseende geologisk lagring av koldioxid identifierades åtta potentiella lagringsenheter, tre i sydöstra Östersjön och fem i sydvästra Skåne med havsområden (Erlström m.fl. 2011, Sopher m.fl. 2014, Mortensen 2014). Samtliga identifierade lagringsenheter finns i djupa salina akviferer och flertalet sträcker sig även utanför svensk ekonomisk zon. Nedan ges en schematisk presentation av de identifierade lagringsenheterna inklusive uppskattade lagringskapaciteter, se tabell 2 och 3. I tabellerna presenteras olika lagringskapaciteter baserade på olika beräkningssätt. Teoretisk lagringskapacitet motsvarar den uppskattade totala porvolymen inom reservoaren. I praktiken är det inte möjligt att fylla hela porvolymen med koldioxid, så därför justeras den teoretiska kapaciteten med en så kallad

lagringskoefficient (eng. *storage efficiency factor*) som tar hänsyn till vissa praktiska begränsningar under lagringsprocessen. Kapacitetsberäkningar som görs med hjälp av lagringskoefficient kallas för effektiv kapacitet, och i det här fallet har en lagringskoefficient på 2 % använts enligt metod från U.S.DOE (*United States Department of Energy*) för beräkning av lagringskapacitet för öppna akviferer (Goodman m.fl. 2011). I tabellerna redovisas även resultat från dynamiska reservoarsimuleringar för två av lagringsenheterna, Faludden i sydöstra Östersjön och Arnagergrönsand i sydvästra Skåne. Gemensamt för de olika typerna av kapacitetsberäkningar är att de har gjorts utifrån en relativt begränsad datamängd. Med mer fullständiga data kan detta göras bättre med säkrare bedömningar av lagringspotential för alla reservoarer. En mer detaljerad beskrivning av de olika kapacitetsberäkningarna och scenarierna som simuleras inom dynamiska modelleringar finns i Mortensen (2016) och Mortensen m.fl. (2017).

Förutom en schematisk presentation av de potentiella lagringsenheterna ges också en översiktlig geologisk beskrivning av de två utpekade geografiska delområdena, sydöstra Östersjön och sydvästra Skåne med intilliggande havsområden, inklusive potentiella lagringsenheter. För varje geografiskt delområde presenteras de potentiella lagringsenheterna från de yngsta till äldsta. Mer information om åldrar och stratigrafi finns i bilaga 2 och 3. Presenterade siffror i tabellerna och i de geologiska beskrivningarna bygger på ett begränsat antal prov vilket resulterar i en del uppskattningar. Alla fysikaliska parametrar härrör från djup på mer än 800 m. De geologiska beskrivningarna nedan är översiktliga, för en detaljerad redovisning av de åtta lagringsenheterna hänvisas till tidigare rapport (Mortensen m.fl. 2017).

Tabell 2. Fysikaliska parametrar och uppskattade kapaciteter för de tre potentiella lagringsenheterna i sydöstra Östersjön.

Lagringsenhet	Djup, m	Mäktighet, m	N/G sand	Porositet, %	Permeabilitet, mD	Teoretisk kapacitet, Mt CO ₂	Effektiv kapacitet, 2 %, Mt CO ₂	Dynamisk simulering, Mt CO ₂
Faludden	830	45	0,90	14	147	37 271	745	250
När	817	36	0,65	10	50	21 294	426	-
Viklau	865	57	0,65	8	30	27 631	553	-

Mt = miljoner ton.

Tabell 3. Fysikaliska parametrar och uppskattade kapaciteter för de fem potentiella lagringsenheterna i sydvästra Skåne.

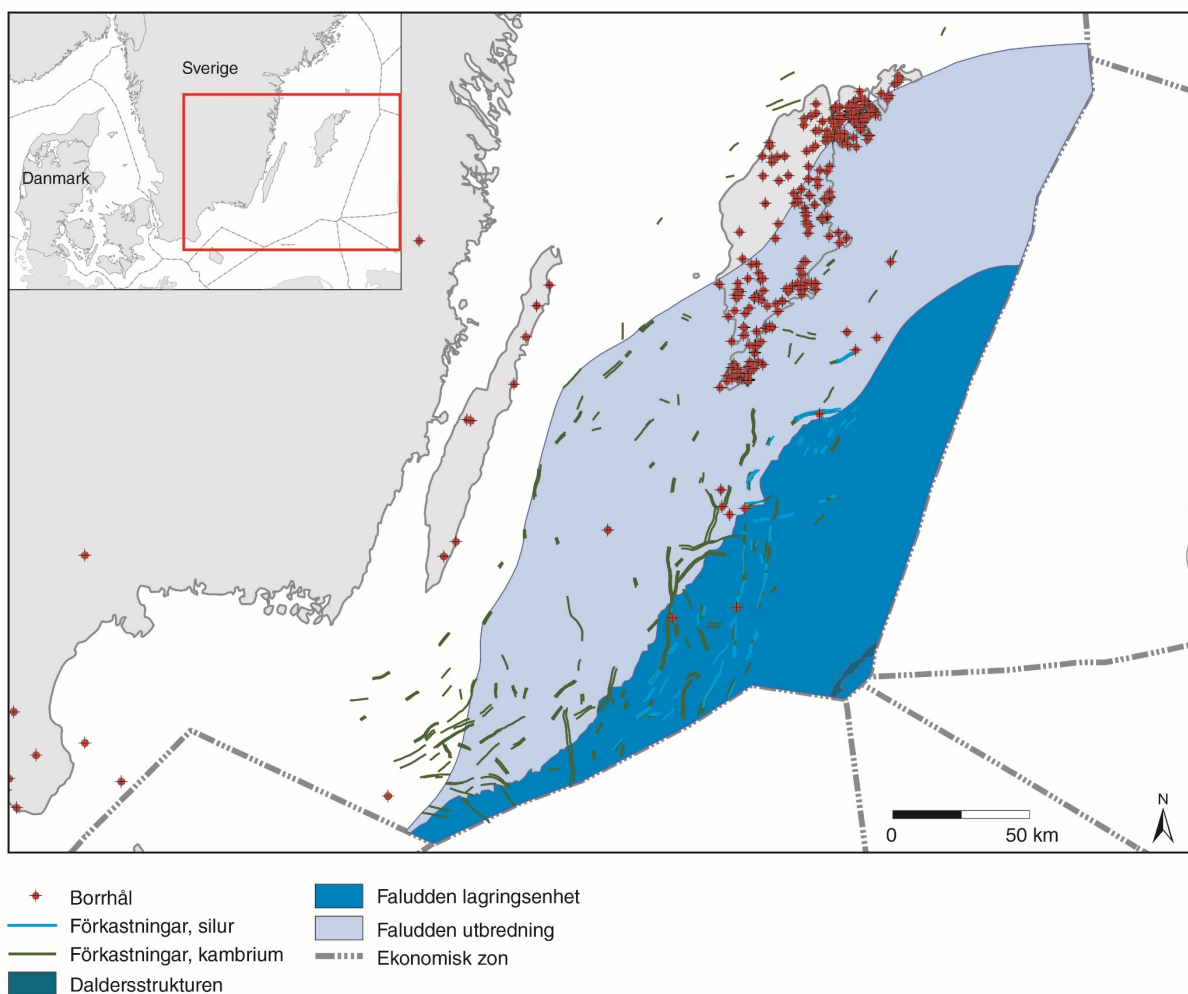
Lagringsenhet	Djup, m	Mäktighet, m	N/G sand	Porositet, %	Permeabilitet, mD	Teoretisk kapacitet, Mt CO ₂	Effektiv kapacitet, 2 %, Mt CO ₂	Dynamisk simulering, Mt CO ₂
Arnagergrönsand	946	39	0,80	26	681	26 050	521	250
Undre krita A	965	29	0,65	25	200	16 523	330	-
Undre krita B	776	200	0,65	25	200	5 753	115	-
Höganäs-Rya	976	180	0,51	23	200	27 127	543	-
Bunter	1 509	137	0,67	12	300	8 268	165	-

Mt = miljoner ton.

Sydöstra Östersjön

Den sedimentära berggrunden i sydöstra Östersjön består av en paleozoisk lagerföljd, där tre potentiella lagringsenheter finns inom den kambriska lagerföljden. Enheternas namn relaterar till de stratigrafiska avsnitt de härrör ifrån, se bilaga 2. Inom och i anslutning till svensk ekonomisk zon mot sydöst finns även en strukturell fälla, den så kallade Daldersstrukturen, vilken samtliga tre enheter är en del av. Lagringsenheterna i sydöstra Östersjön överlagras av mer än 800 m av leriga kalk- och mörkelbergarter som kan utgöra primära takbergarter. De tre potentiella lagringsenheterna representerar alla öppna salina akviferer med stor lateral spridning.

Faludden: Faluddensandstenen är en stratigrafiskt avgränsad, delvis öppen, salin akvifer. Sandstenen kilar ut mot nordväst längs med en linje från norra Gotland till sydöst om Öland, och på motsatt håll ökar sandstenens mäktighet i sydöstlig riktning där den fortsätter in under de

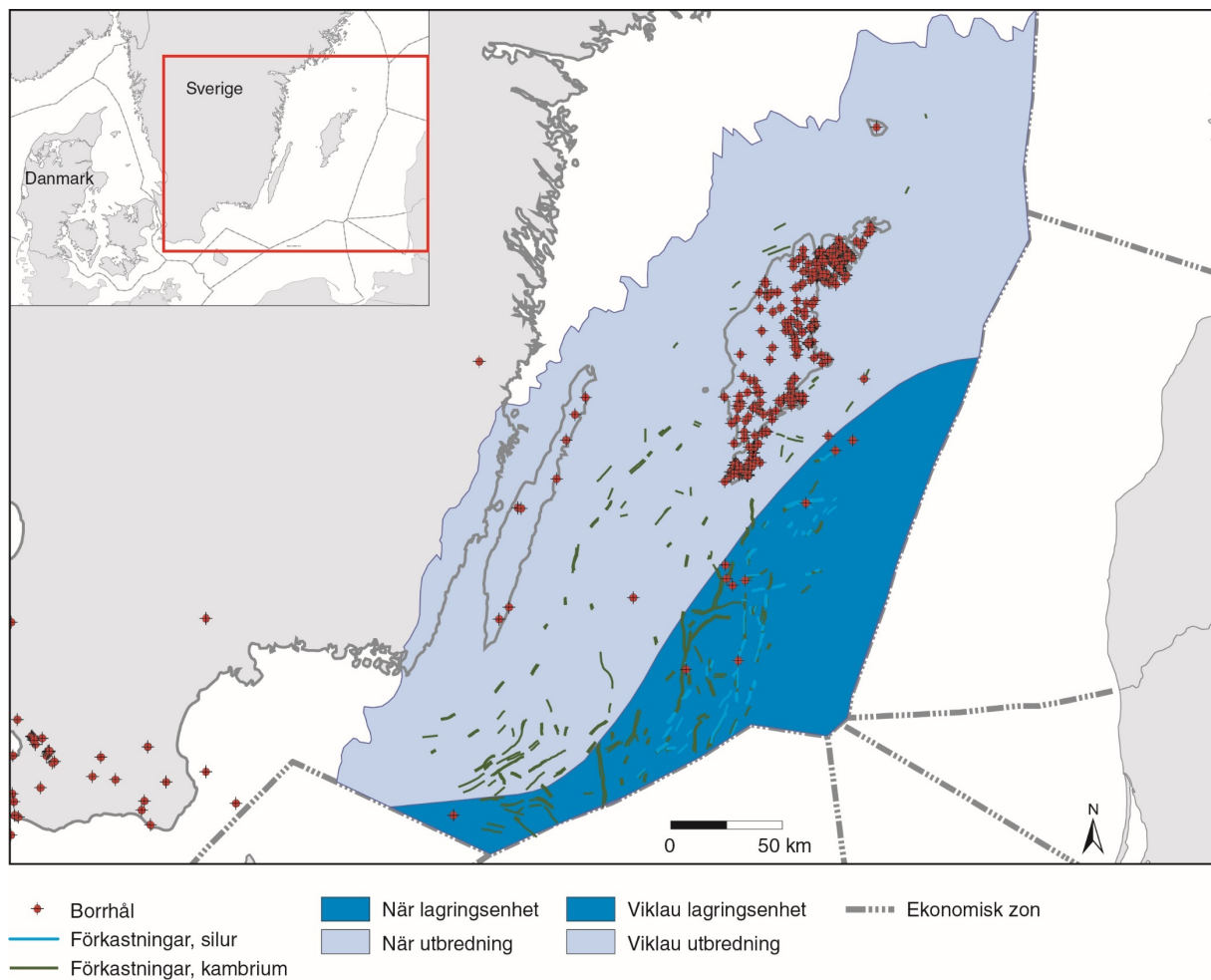


Figur 7. Faluddens utbredningsområde inom svensk ekonomisk zon, hela ledets utbredning i ljusblått och lagringsenheten i mörkare blått (modifierad från Anthonsen m.fl. 2015a).

baltiska länderna, här som Deimenaformationen. Faluddensandstenen är en vit till ljusgrå, fin- och medelkornig, karbonatcementerad, väl sorterad kvartssandsten med tunna inslag av skiffer och siltsten. Uppskattade genomsnittsvärden för den del av Faluddensandstenen som befinner sig djupare än 800 m motsvarar en porositet på 14 % och en permeabilitet på 147 mD. Lagringsenheten Faludden representerar den del av Faluddensandstenen som finns på mer än 800 m djup i den sydöstliga del av utbredningsområdet där den täcker en yta på cirka 11 000 km² inom svensk ekonomisk zon, se figur 7.

När: Närsandstenen är en öppen, salin akvifer med stor lateral utbredning. Sandstenen påträffas som ytberggrund i Kalmarundsområdet, fortsätter sin utbredning mot sydöst och påträffas även som ytberggrund i de baltiska länderna. Närsandstenen domineras av fin- och medelkornig sandsten med slamstens- och siltstenslager. Porositeten uppskattas till 10 % och permeabiliteten till 50 mD. Lagringsenheten När representerar den del av Närsandstenen som finns på mer än 800 m djup i den sydöstliga delen av utbredningsområdet där den täcker en yta på cirka 15 000 km² inom svensk ekonomisk zon, se figur 8.

Viklau: Viklaudet är en öppen, salin akvifer med ungefär samma utbredning som Närsandstenen, se figur 8. Viklaudet består av fin- och medelkornig kvartssandsten (den så kallade Viklausandstenen) mellanlagrad av en bioturberad siltsten eller laminerad mörkgrön skiffer. Den undre delen av Viklausandstenen är delvis arkosisk och konglomeratförande. Utbredningen av de



Figur 8. När och Viklaus utbredningsområde inom svensk ekonomisk zon, tolkat med samma utbredningsområde. Ledens totala utbredning i ljusblått och lagringsenheterna i mörkare blått (modifierad från Anthonsen m.fl. 2015a).

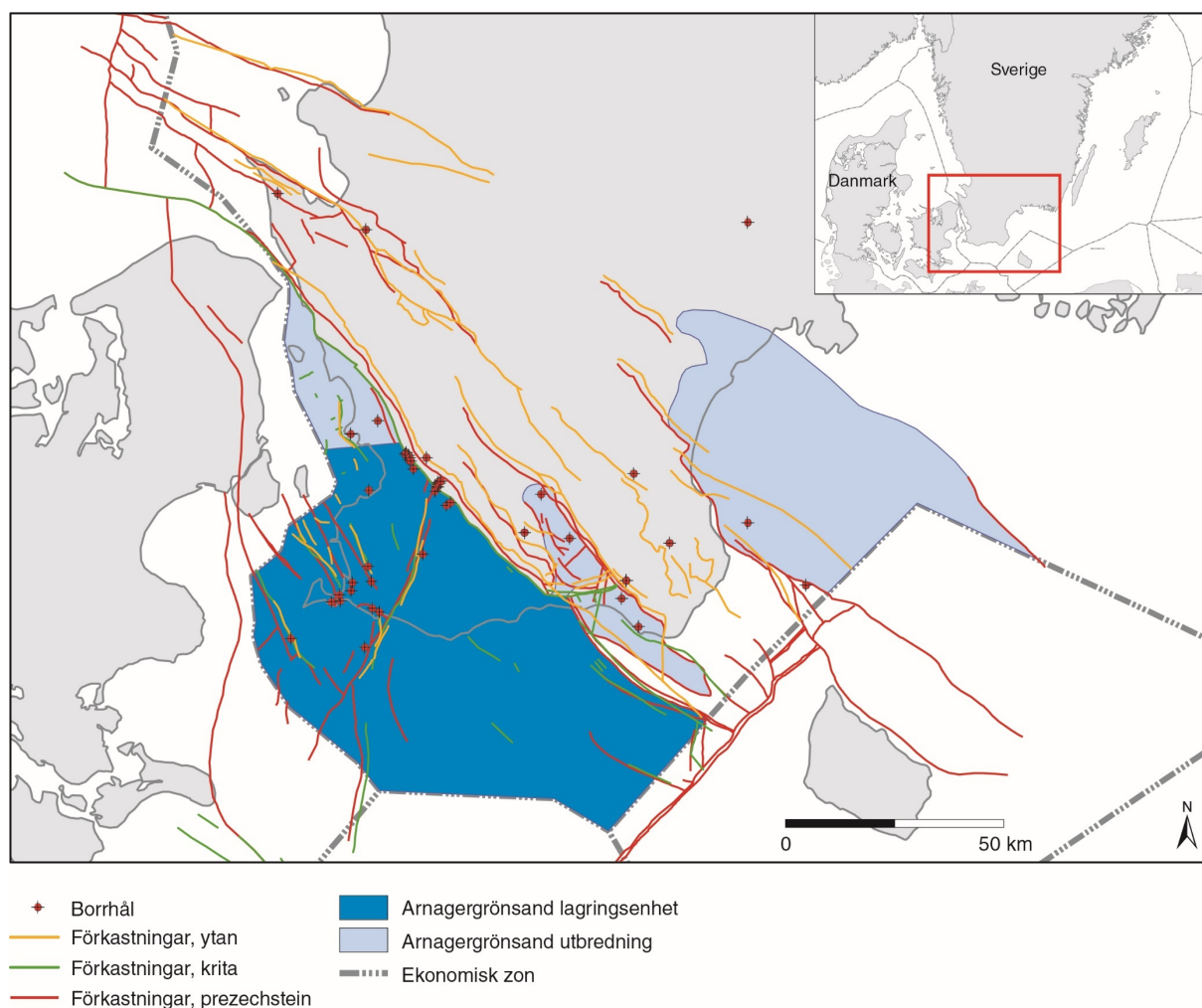
individuella sandstenslagren inom lagringsenheten karaktäriseras som separata linser med varierande lateral utbredning. Det finns mycket begränsad information om Viklausandstenens porositet och permeabilitet, men dessa bedöms ligga på runt 8 % respektive 30 mD.

Baserad på ett antal fysikaliska parametrar, samt olika kapacitetsberäkningar som genomförts i tidigare studier (Erlström m.fl. 2011, Vernon m.fl. 2013, Anthonsen m.fl. 2013, Sopher m.fl. 2014, Elforsk 2014, Mortensen 2016), bedöms lagringsenheten Faludden som den mest lovande inom sydöstra Östersjön. Faludden har också en fördel i att kila ut mot nordväst och på så sätt agera stratigrafisk fälla (fig. 2) med minskad risk för läckage.

Sydvästra Skåne

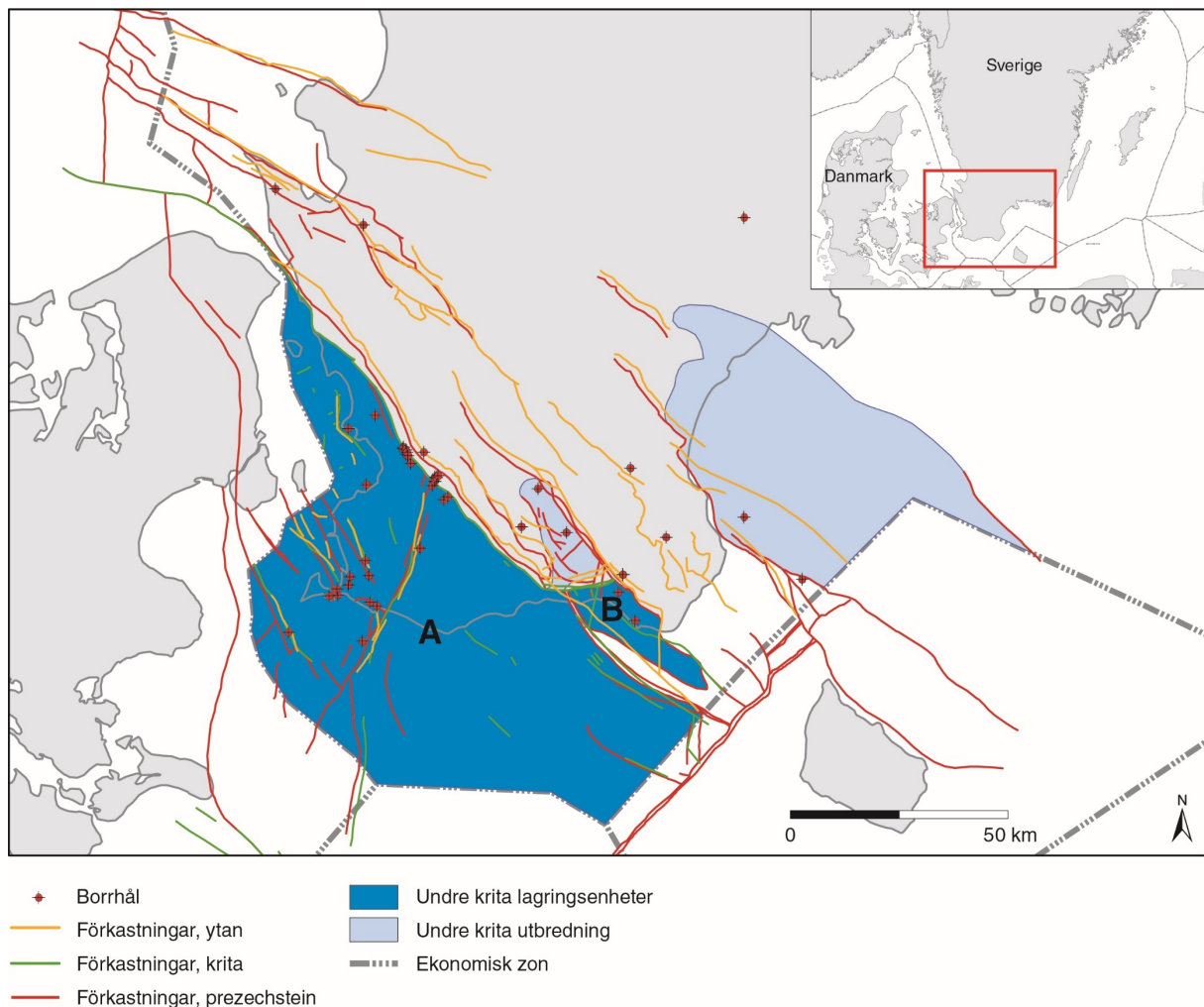
Den sedimentära berggrunden i sydvästra Skåne med intilliggande havsområden består av en mesozoisk och kenozoisk lagerföljd, där de fem potentiella lagringsenheterna finns inom den mesozoiska delen. Lagringsenheternas namn relaterar till de stratigrafiska avsnitt de härrör ifrån, se bilaga 3. Lagringsenheterna i sydvästra Skåne överlagras av mer än 1 200 m lerig kalksten som kan utgöra primär takbergart. De potentiella lagringsenheterna i sydvästra Skåne är i hög grad förkastningsbetingade enheter, vilket innebär att de till stor del är definierade och begränsade av de förkastningar som kantar dem.

Arnagergrönsand: Arnagergrönsand är en öppen, salin akvifer med stor lateral utbredning. Formationen har en regional utbredning i Skåne söder om Romeleåsens förkastningszon med fortsättning mot väst och syd in i Danmark och Tyskland, i Vombsänkan och i Kristianstadsbassängen, se figur 9. Arnagergrönsanden utgörs av dåligt konsoliderad, fin- och medelkornig glaukonitisk kvartssandsten (Sivhed m.fl. 1999). Sanden har mycket varierande fysikaliska egenskaper, men uppskattade genomsnittsvärden för porositet och permeabilitet är 26 % respektive 681 mD. Lagringsenheten Arnagergrönsand representerar den del av formationen som finns på mer än 800 m djup, söder om Romeleåsens förkastningszon, där den täcker en yta på cirka 5 200 km² inom svensk ekonomisk zon.



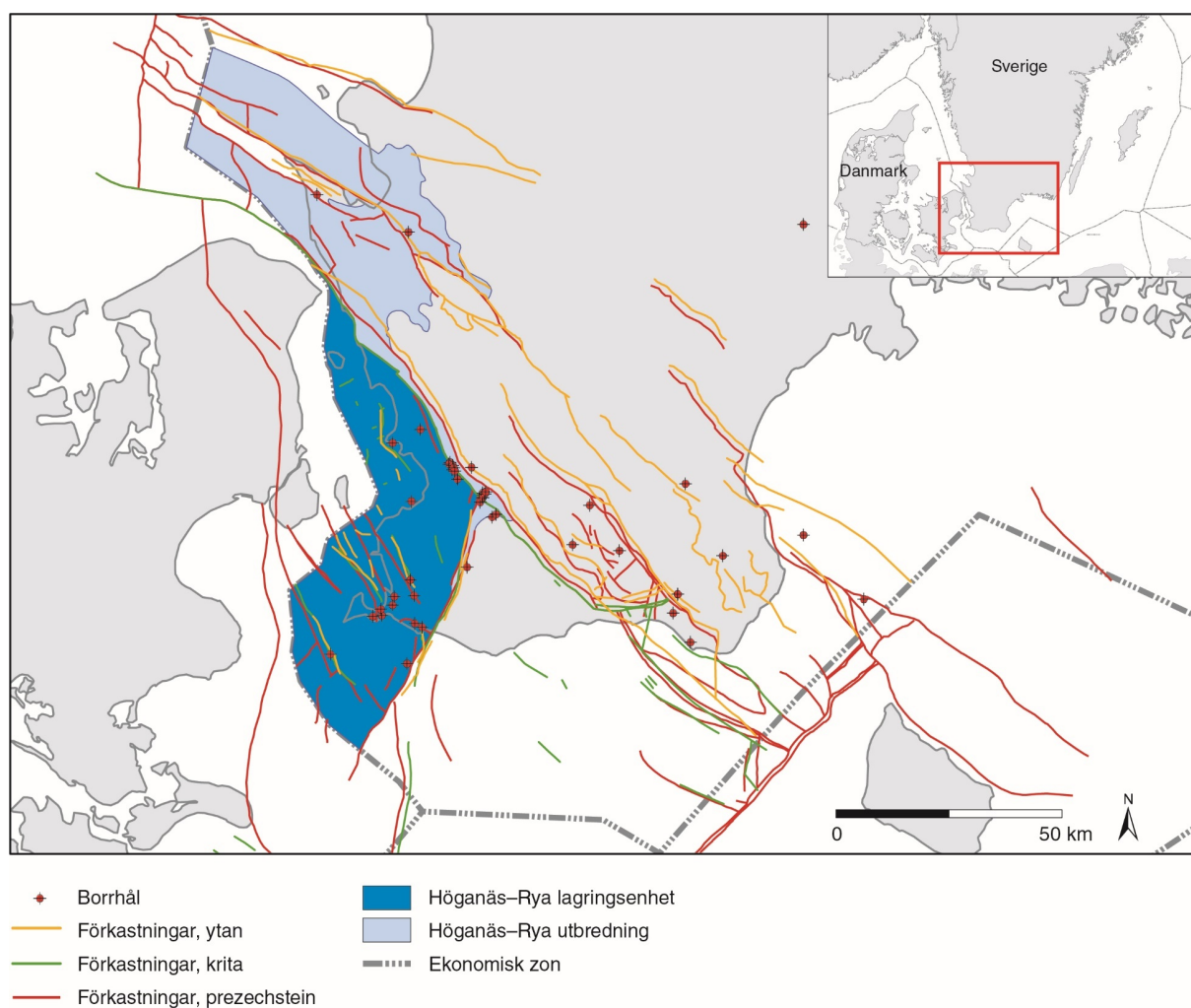
Figur 9. Arnagergrönsandens utbredningsområde inom svensk ekonomisk zon, hela formationens utbredning i ljusblått och lagringsenheten i mörkare blått (modifierad från Anthonsen m.fl. 2015a).

Undre krita: Den del av undre krita-sekvensen som har potential för geologisk lagring av koldioxid kan indelas i två geografiska lagringsenheter: A som är en delvis öppen salin akvifer lokaliserad söder om Romeleåsens förkastningszon, och B som är en delvis stängd, förkastningsbetingat salin akvifer lokaliserad inom den södra delen av Vombsänkan, se figur 10. Lagringsenheterna Undre krita har ingen formell stratigrafisk definition och består av kvartssandsten med mellanlager av silt- och lersten (Erlström 1994, Lindström & Erlström 2011). Sandstenslagren har lokala variationer, men uppskattningsvis bedöms medelporositeten till 25 % och medelpermeabiliteten till 200 mD. Undre krita har ungefär samma utbredningsområde som Arnagergrönsand, där lagringsenhet A täcker en yta på cirka 5 600 km² inom svensk ekonomisk zon, och lagringsenhet B täcker en yta på cirka 300 km².



Figur 10. Undre krita-enheternas utbredningsområden inom svensk ekonomisk zon, hela sekvensens utbredning i ljusblått och lagringsenheterna i mörkare blått (från Mortensen 2016).

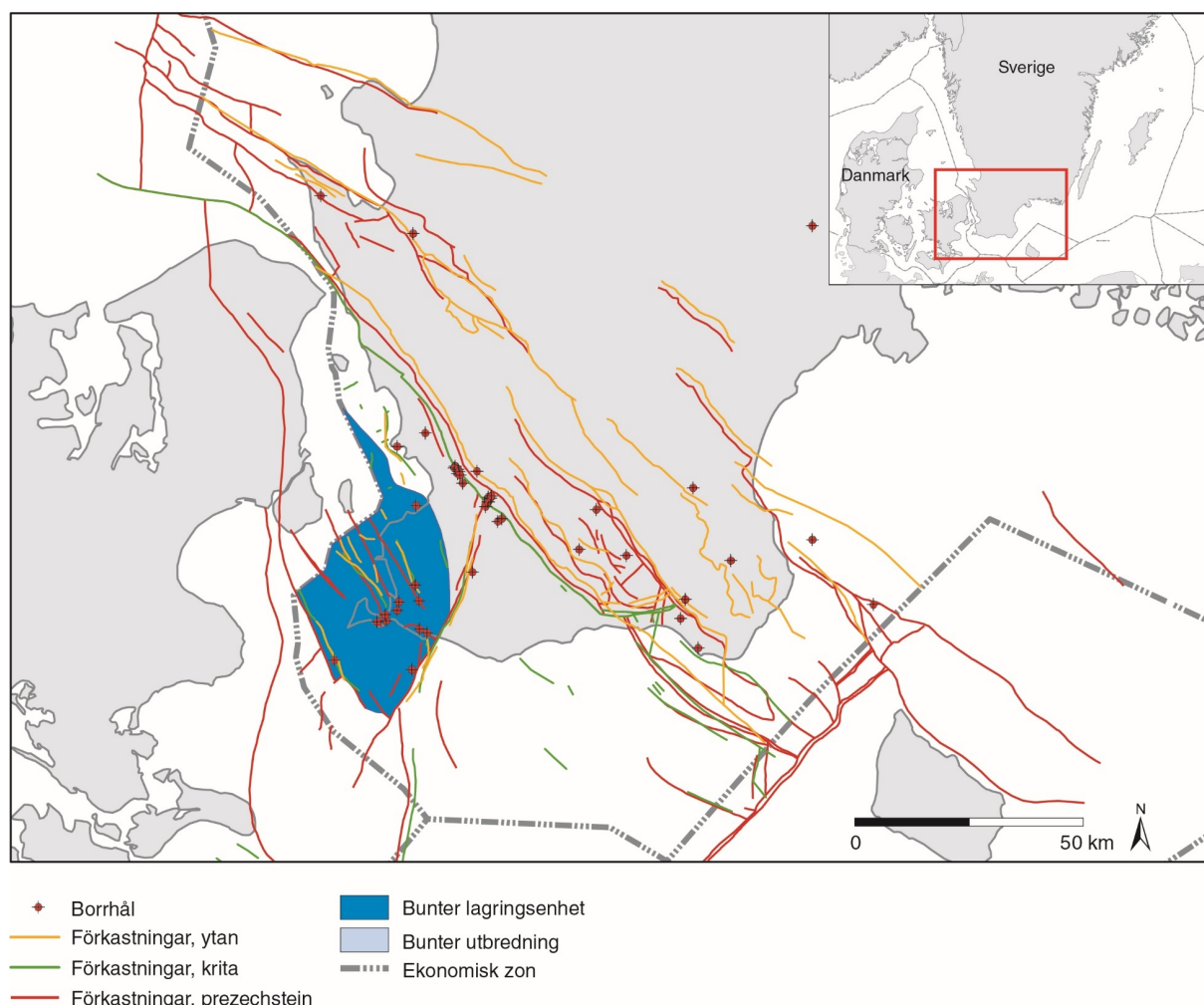
Höganäs–Rya: Höganäs–Rya är en delvis förkastningsbetingad, delvis öppen, flerlagrad, salin akvifer. Sekvensen utgörs av Höganäsformationen och delar av Ryaformationen, och påträffas i västra Skåne inom svensk ekonomisk zon, men förekommer även i Danmark, Norge och Tyskland. Höganäs–Rya består av en växellagrad sekvens med sandsten, siltsten, lersten och kol, där sandavsnitten är linsformade med stor lateral utbredning och mäktighet. På grund av heterogeniteten är det stor variation i porositet och permeabilitet, men genomsnittsvärden för sandavsnitten har uppskattats till 23 % respektive 200 mD. Lagringsenheten Höganäs–Rya representerar den del av formationen som finns på mer än 800 m djup, söder om Romeleåsens förkastningszon, där den omfattar en yta på cirka 2 100 km² inom svensk ekonomisk zon, se figur 11.



Figur 11. Höganäs–Ryas utbredningsområde inom svensk ekonomisk zon, hela formationens utbredning i ljusblått och lagringsenheten i mörkare blått (modifierad från Anthonsen m.fl. 2015a).

Bunter: Bunter är en delvis förkastningsbetingad, delvis öppen, salin akvifer. I lagrings-sammanhang används Bunter som ett samlingsnamn för de triassiska sandstensavsnitt som inom svensk stratigrafi (Erlström & Sivhed 2012) tillhör Ljunghusensandstenen och Hammar-formationen. Sandstensavsnitten som här beskrivs är ekvivalenta till delar av den dansk-tyska *Buntsandstein*, eller *Bunter Sandstone*. Den undre delen av Bunter är en mycket väl sorterad, medel- och grovkornig, homogen kvartssandsten, och den övre delen en finkornig gråvacka mellanlagrad av grovkornig arkosisk sandsten där även mellanlager med siltsten förekommer. Medelporositet och medelpermeabilitet har uppskattats till 12 % respektive 300 mD, men det kan variera mycket. Lagringsenheten Bunter är inom svensk ekonomisk zon begränsad till Höllvikengravsänkan där den täcker en yta på cirka 1 100 km², se figur 12, men den fortsätter dock sin utbredning över den svenska gränsen mot Tyskland i söder och Danmark i väster.

Baserad på fysikaliska parametrar samt kapacitetsberäkningar bedöms Arnagergrönsanden vara den mest lovande lagringsenheten i sydvästra Skåne och intilliggande havsområden (Erlström m.fl. 2011, Anthonsen m.fl. 2013, Mortensen 2016).



Figur 12. Bunters utbredningsområden inom svensk ekonomisk zon, där lagringsenheten är tolkad som sammanfallande med den totala utbredningen (från Mortensen 2016).

Undersökningar för bedömning av lagringsplatser

För att kunna bedöma om en identifierad lagringsplats är lämplig för geologisk lagring av koldioxid behövs en noggrann undersökning som säkerställer en effektiv och säker lagring. Vad som ska ingå i en undersökning regleras av CCS-direktivet (Europeiska kommissionen 2009) och i enlighet med direktivets femte artikel krävs det undersökningstillstånd om nya undersökningar ska utföras (exempelvis borrhning och geofysiska mätningar). Nedan presenteras en kortfattad sammanfattning av de underlagsdata och information som ska ingå i resultatet av en undersökning. Resultatet 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 borrhningar och borrhålsgeofysiska undersökningar kring berggrundens uppbyggnad, med information om bland annat utbredning, djup, 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 borrhningar. Syftet är att utveckla en geologisk modell som underlag för att 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.

I Sverige finns det numera ett antal delområden som pekats ut som speciellt lämpliga för geologisk lagring av koldioxid, och där rekommenderas det att det görs kompletterande plats- och områdes-specifika undersökningar.

Områdesspecifika undersökningar

CCS-direktivet ger instruktion om 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. Lagringskomplexet utgör hela den geologiska formationen, eller akviferen, som innehåller lagringsenheten, samt tillhörande yta och injekteringsfaciliteter. Då ingår även takbergarternas egenskaper och hydrologiskt sammanlänkade områden. Många av dessa egenskaper samlas in genom information från nya, kompletterande kärnborrhningar och geofysiska undersökningar, inklusive djupseismiska mätningar. Egenskaper hos lagringskomplexet som enligt direktivet ska undersökas är:

- geologisk och geofysisk uppbyggnad och karaktär
- hydrogeologiska egenskaper (speciellt med avseende på grundvatten för dricksvatten)
- akvifergeologiska egenskaper (porositet, 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 (exempelvis 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, exempelvis Natura 2000-områden, kolväten och drickbart grundvatten
- befintliga verksamheter kring lagringskomplexet och eventuell inverkan på dessa.

Steg 2: Geologisk och hydrogeologisk modellering i rum och tid

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

- den fysiska fällans geologiska struktur
- 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 rum och tid.

Kompetens

Traditionellt sett har SGU inte arbetat mycket med djupseismiska data. Orsaken till detta är dels att djupseismiska metoder inte är lämpliga för att karaktärisera den kristallina berggrunden som dominerar i Sverige, dels att man i SGUs befintliga marina verksamhet har mer fokus på havsbotten och de lösa sediment som täcker berggrunden. Kompetensen på SGU gällande djupseismiska data är i dag därför relativt begränsad. För att SGU på bästa sätt ska kunna axla sitt uppdrag som berednings- och tillsynsmyndighet samt som remissinstans gällande geologisk lagring av koldioxid i Sverige behöver kunskapen om geologiska djupdata därför utvecklas. I regeringsuppdraget som redovisas i denna rapport har SGU gjort kompetenshöjande insatser gällande hantering, bearbetning och tolkning av just seismiska djupdata.

Djupa seismiska mätningar är en av de viktigaste metoderna för att undersöka den sedimentära berggrunden som kan vara aktuell för geologisk lagring av koldioxid. Metoden används inom reservoargeologin och har utvecklats mycket under de senaste 50 åren. Marina seismiska data samlas in av en båt med en seismisk signalkälla och en mätkabel (kabel med hydrofoner) som dras bakom båten. Motsvarande insamling av seismiska data på land görs genom markbaserade seismiska ljudkällor och mätkablar. När en signalkälla aktiveras kan reflektioner från olika lager i berggrunden mätas. Efter bearbetning av insamlade data skapas en seismisk bild av berggrundens uppbyggnad. Utifrån den bearbetade bilden kan man kartlägga, karaktärisera och modellera intressanta geologiska lager i berggrunden, som till exempel reservoarbergarter och takbergarter, med relevans för koldioxidlagring. Med samma data är det även möjligt att identifiera sprickzoner och förkastningar där det kan finnas risk för läckage av den injekterade koldioxiden. Djupseismiska data har även stor betydelse för övervakning av lagringsplatser i drift, då man genom upprepade mätningar kan få en bild av hur den injekterade koldioxiden rör sig inom reservoaren över tid.

Kompetenshöjande insatser

Inom regeringsuppdragets ramar har det genomförts intern utbildning i hantering och tolkning av djupseismiska data. Utbildningen delades in i två separata kurser som både togs fram och leddes av en erfaren SGU-medarbetare som tidigare doktorerat i bearbetning och tolkning av reflektionsseismiska data från Östersjöområdet. Första kursen gav en introduktion till seismiska data, och den andra kursen fokuserade på hantering och tolkning av djupseismiska data. Utbildningen gav deltagarna större förståelse för geofysik med inriktning mot seismiska mätningar och data, samt tolkning av dessa. Nedan ges en översiktlig beskrivning av de två kurserna, mer information finns i bilaga 4.

Introduktion till seismiska data: Grundläggande introduktion till djupseismiska data och tolkningsarbete, riktad mot medarbetare som arbetar inom området koldioxidlagring samt andra arbetsområden med behov av användning av seismiska data för geologisk tolkning. Kursen

genomfördes under mars 2021 där en medarbetare (geolog) deltog. Syftet med kursen var att ge en grundläggande förståelse för vad reflektionsseismiska data är, hur de samlas in och hur de kan användas för att undersöka berggrunden. På kursen diskuterades hur seismiska data kan användas för att hitta, utvärdera och övervaka en möjlig lagringsplats för koldioxidlagring. Begränsningar och nackdelar för seismiska data diskuterades också, samt SGUs befintliga seismiska databas. Kursen genomfördes under fem dagar och utgjordes av ett antal lektioner med tillhörande övningar.

Tolkning av seismiska data: Fördjupad kurs kring tolkning av djupseismiska data, riktad mot medarbetare som kan få framtida myndighetsuppgifter som remissinstans samt med tillståndsberedning och tillsyn av geologisk lagring av koldioxid. Kursen genomfördes under oktober 2021 där fem medarbetare (geologer och geofysiker) deltog. Syftet med kursen var att ge en djupare förståelse av reflektionsseismiska data och tolkning av dessa, samt större förtrogenhet med praktiska rutiner och arbetsflöden för tolkningsarbete. Kursen fokuserade på seismiska data från Östersjön och Skåne vilka representerar de mest lovande lagringsplatserna för koldioxid i Sverige. Den typiska seismiska responsen från dessa områden diskuterades tillsammans med deras geologi. Det gavs även en genomgång av arbetsflödet för seismisk tolkning och geologisk tolkning av seismiska data i relation till undersökningar för möjligheter avseende koldioxidlagring. Kursen bestod av ett antal lektioner där teoretiskt material presenterades. Deltagarna arbetade därefter med praktiska övningar med tolkning av seismiska data från Östersjön och Skåne. Dessutom genomgicks och tolkades 3D-seismiska data från pilotprojektet Ketzin i Tyskland där deltagarna kartlade projektets lagringsenhet för koldioxid och tittade på upprepade seismiska mätningar för visualisering och kartläggning av den i projektet injekterade koldioxiden. Till kursen användes gratisversionen av tolkningsmjukvaran OpendTect.

Mer detaljerade kursbeskrivningar finns i bilaga 4. Allt kursmaterial, inklusive bakgrundslitteratur, kursanteckningar, data för övningar och lathund för övningar har sparats och finns kvar på SGU för framtida fördjupning och träning.

Utmaningar och hinder

Det finns i dag ett antal utmaningar och hinder för att geologisk lagring av koldioxid inom svenskt territorium ska kunna genomföras. Utmaningar finns exempelvis i förhållande till behovet av öppen tillgång till moderna data, långa handläggningstider gällande tillståndsprocesser, samt utpekade Natura 2000-områden på samma platser som utpekade potentiella lagringsplatser för koldioxid. Det finns även hinder som mestadels relaterar till lagstiftning, både nationell och internationell, samt internationella konventioner.

Enligt kontinentalsockellagen har SGU rätt att ta del av tredje parts insamlade marina data. I enlighet med denna bestämmelse har SGU därför mottagit och arkiverat en betydande samling marina data som har tagits fram i samband med undersökningstillstånd inom svenska marina områden. Data varierar i typ, ålder samt kvalitet och inkluderar marina djupseismiska data som har relevans för bedömning av koldioxidlagringsmöjligheter i Sverige. Det finns dock oklarheter gällande SGUs rättigheter att använda eller skapa produkter utifrån denna data. Detta kan leda till att värdefulla data stannar kvar i SGUs arkiv utan att komma till användning. För att undanröja detta hinder bör det därför utredas hur SGU får använda data från tredje part utifrån krav på exempelvis spridningstillstånd.

SGU har tidigare gjort en bedömning av tidslinje för ansökan, tillstånd och anläggning av geologiskt lager för koldioxid i Sverige (Åberg 2019). Bedömningen bygger på erfarenheter från internationella satsningar inom området, samt inhemska erfarenheter från mineralprospektering, vindkraftverk till havs, och gasledningar. Tidsredovisningen omfattar pilotprojekt på land (5–6 år), undersökningsverksamhet till havs inklusive bearbetning av insamlade data (4–6 år), samt ansökan (uppemot 8 år) och byggande av anläggning för koldioxidlagring till havs (6–10 år). Sammantaget

är bedömningen att den totala tiden för uppförande av ett svenskt koldioxidlager är 23–30 år där enbart ansökan, projektering och anläggning bedöms ta 14–18 år.

Tillståndprocess för undersökning och publicering av marina data

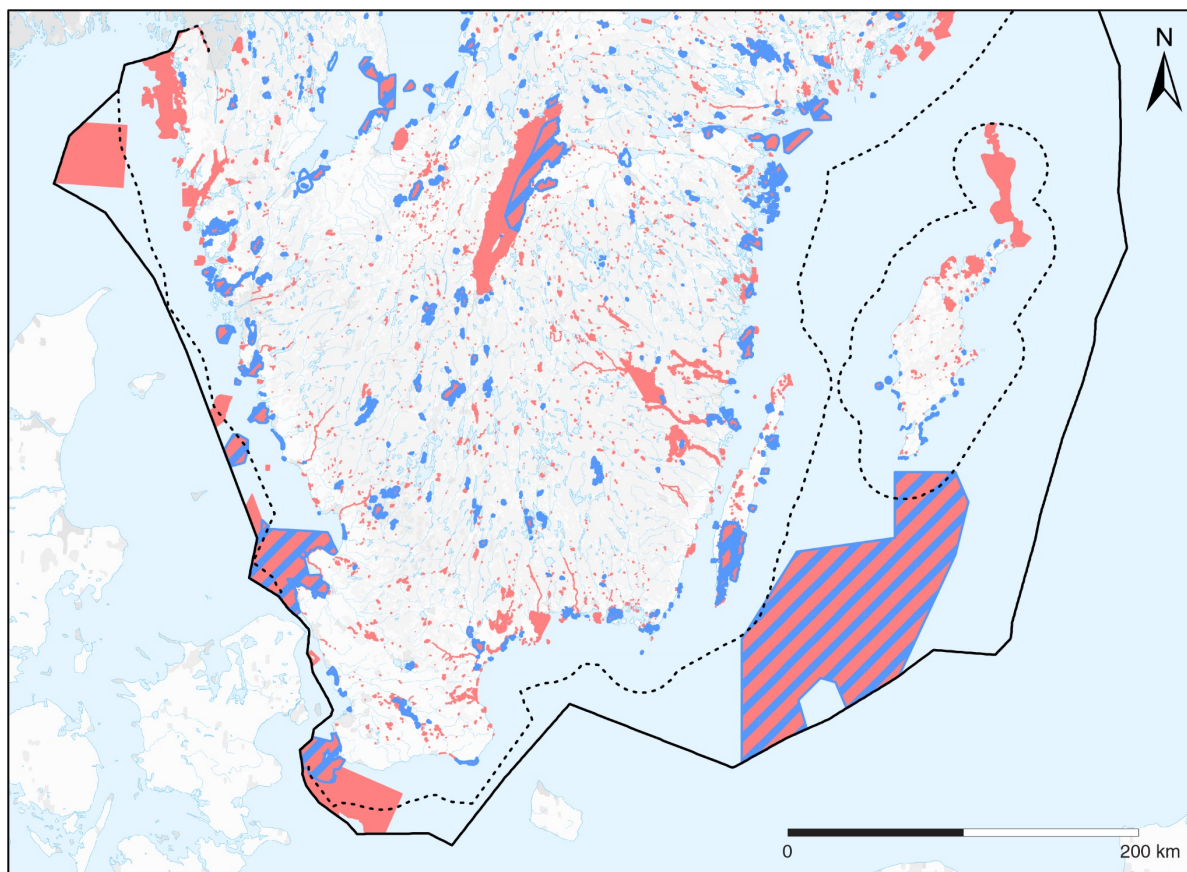
För att samla in nödvändiga data behövs det undersökningstillstånd. Som det ser ut i dag är tillståndprocessen för att samla in seismik eller borrar borrhål inom marint område på svenskt territorium ganska komplex och tidskrävande, vilket ger väldigt långa handläggningstider. För icke-statliga och utländska aktörer och institutioner behövs i första hand undersökningstillstånd enligt kontinentalsockellagen vilka ofta har handläggningstider på ett till två år innan beslut. Det kan även behövas tillstånd från länsstyrelsen för att samla in data inom eller i närheten av naturreservat som exempelvis Natura 2000-områden. Dessutom kan det behövas tillstånd från kustbevakningen, vilket kan ta ytterligare uppemot ett år innan beslut.

Publicering av data som härrör från svenskt sjöterritorium (en zon ungefär 0–20 km från kusten, se figur 13) kräver spridningstillstånd. Detta gäller även för delning av data från svenskt sjöterritorium med annan part. Ansökningar avseende spridningstillstånd handläggs av Sjöfartsverket där handläggningstiden kan vara uppemot två år innan beslut.

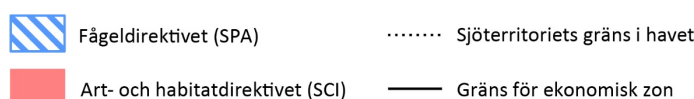
Långa handläggningstider gällande tillståndprocesser är ett hinder och kan resultera i att olika aktörer och forskningsinstitutioner som planerar för insamling av data för att undersöka möjligheter för geologisk lagring av koldioxid i Sverige i stället avstår från detta. Om det dessutom behövs långa handläggningstider för spridningstillstånd av publicerade data och resultat kan även detta bli ett hinder.

Naturreservat och användning av havsmiljön

För att använda havsmiljön i Sverige krävs det hänsyn till ett stort antal överväganden. Detta kan påverka undersökningsverksamhet och eventuell utbyggnad av infrastruktur gällande transport och geologisk lagring av koldioxid inom svenska havsområden. Inom svenskt farvatten finns i dag många områden som är utpekade som naturreservat, riksintresse för sjöfart, yrkesfiske, rekreation, fornlämningsobjekt, vindkraft eller riksintresse för totalförsvaret, exempelvis sjöövningssområden. Det finns även områden som tidigare har använts som dumpningsområden och som kan innehålla odetonerad ammunition. Relaterade tillståndprocesser för undersökningsverksamhet eller byggnation av infrastruktur inom dessa områden varierar i omfattning och handläggningstid, men oftast krävs minst en miljökonsekvensbeskrivning (MKB). Det finns en mängd olika typer av naturreservat till havs. De som i störst utsträckning sammanfaller med utpekade potentiella lagringsplatser för koldioxid, är Natura 2000-områden, vilka omfattas av Fågeldirektivet (SPA) samt Art- och habitatdirektivet (SCI), se figur 13. Dessa zoner kan komma att påverka eventuella aktiviteter kopplade till undersökningsverksamhet och utveckling av koldioxidlager i Sverige.



Natura 2000-områden



Figur 13. Natura 2000-skyddade områden i södra Sverige, inklusive gräns för Sveriges sjöterritorium och ekonomisk zon.

Lagstiftning

Offshore-direktivet har implementerats i svensk rätt i 17 kapitel 4 § minerallagen och 3 § kontinentalsockellagen med innebörden att tillstånd inte får meddelas för utvinning av olja eller gas till havs i Sverige. I enstaka borrhål till havs i sydöstra Östersjön har gas påvisats, dock anses inte mängden av gas eller andra kolväten vara av utvinningsbara mängder. I samband med eventuella borrhningar för forskning, pilotprojekt eller kommersiell lagring av koldioxid i sydöstra Östersjön är det därför möjligt att olja eller gas kan påträffas. Sannolikheten för detta är störst i samband med borrhning i eller i anslutning till ett fåtal mindre strukturella fällor i de sydöstligaste delarna av området. I lagringssammanhang är det fördelaktigt att utvinna eventuell olja eller gas för att på så sätt att uppnå en trycksänkning som möjliggör en säkrare injektering av koldioxid, och en effektivare lagring av koldioxid i reservoaren. I gällande lagstiftning är det dock inte fastställt hur eventuella fynd av olja eller gas i samband med koldioxidlagringsprojekt ska hanteras, och gränsen mellan kommersiell utvinning och utvinning i samband med injektering av koldioxid behöver därför klargöras. Även om sannolikheten för olje- eller gasfynd är liten kan oklarheter om hur eventuella fynd ska hanteras skapa osäkerhet, vilket kan leda till att koldioxidlagringsprojekt inte påbörjas.

CCS-direktivet syftar till att skapa en rättslig ram för en säker geologisk lagring av koldioxid i syfte att bidra till att bekämpa klimatförändringar. Direktivet är tillämpligt inom medlemsstaternas territorium, i deras ekonomiska zoner och på deras kontinentalsocklar. Denna uppräknings 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. Som tidigare beskrivits i denna rapport, se sidorna 25–26, har de identifierade lagringsenheterna i sydöstra Östersjön (Faludden, När och Viklau) en utbredning som går över den svenska ekonomiska zonen mot de baltiska länderna, inklusive Ryssland. Enligt CCS-direktivet innebär detta att det kambriska lagringskomplexet sträcker sig utanför medlemsstaternas uppräknade områden, och att koldioxidlagring då inte är tillåtet inom detta lagringskomplex. Det bör dock noteras att om koldioxidlagring skulle påbörjas i Sverige eller nära svensk ekonomisk zon, innebär lagerföljdens lutning mot öst–sydöst att injikerad koldioxid kommer migrera mot nordväst och alltså mot svenskt territorium. Det kan även nämnas att det inom nätverket BASRECCS, där även ryska representanter deltar, finns ett önskemål om gemensam lagring av koldioxid inom sydöstra Östersjön, och att mot bakgrund av det borde kunna göras överenskommelser kring detta lagringskomplex.

Internationella konventioner

Londonprotokollet förbjuder i dag gränsöverskridande transport av koldioxid för lagringsändamål, men tillägget till artikel 6 från 2009 gör ett undantag för transport av koldioxid i syfte för geologisk lagring under havsbotten. För att träda i kraft behöver tillägget ratificeras av två tredjedelar av de 51 medlemsländerna, och i nuläget har bara ett fåtal länder ratificerat tillägget, häribland Sverige, Norge, Storbritannien, Nederländerna, Finland och Iran. 2019 antogs dock en preliminär applikation till tillägget som tillåter transport av koldioxid för lagringsändamål, i väntan på att tillräckligt med medlemsländer ska ratificera tillägget till artikel 6.

Helsingforskonventionen omfattar enbart Östersjöområdet, inklusive Kattegatt, och har som mål att återställa miljön i Östersjöområdet och att bevara dess ekologiska balans. Konventionen behandlar bland annat frågor om dumpning, och undersökning av havsbotten, vilket i koldioxidlagringssammanhang innebär att dumpning av koldioxid, som i detta sammanhang jämförs med avfall, inte är tillåten i havet. Det finns dock oklarheter gällande olika medlemsländers översättning av denna bestämmelse vilket innebär att vissa länder tolkar det som förbud mot dumpning av koldioxid *på* havsbotten, andra *i* havsbotten, och andra *under* havsbotten. Det behövs därför en förtydligad överenskommelse mellan medlemsländerna kring vad som egentligen ska gälla.

Behov

Som det står beskrivet i betänkandet från den klimatpolitiska vägvalsutredningen (SOU 2020:4) är det sannolikt att Sverige i ett första skede kommer transportera och lagra infångad koldioxid utanför Sveriges gränser. Enligt IEA (IEA 2020) behövs det en kraftfull uppskalning av samtliga åtgärder för att åstadkomma nödvändiga utsläppsminskningar, vilket inkluderar ett mål om kraftig ökning av CCS-anläggningar runt om i världen där det finns lämplig geologi för koldioxidlager. Sverige har möjlighet att bidra till det målet genom att öppna för geologisk lagring av koldioxid inom svenskt territorium. För att kunna påbörja koldioxidlagring i svenska reservoarer behövs en ökad kunskap om reservoar- och takbergarter. Detta kan nås genom tillgång till nya, moderna djupseismiska data och kompletterande borrhningar med nya borrhålsdata, testning av reservoar- och takbergartsegenskaper genom pilotprojekt med testinjekteringar av koldioxid, samt ökad kompetens inom områden av betydelse för geologisk lagring av koldioxid. Nedan finns en beskrivning av dessa behov.

Moderna och öppna data

För att stödja framsteg med implementering av CCS och samtidigt säkerställa en framtida effektiv och säker geologisk lagring av koldioxid inom svenskt territorium, finns behov av kompletterande geologiska underlag från utpekade potentiella lagringsplatser i sydöstra Östersjön och sydvästra

Skåne. Som expert- och förvaltningsmyndighet behöver SGU ha tillgång till moderna och öppna data som är tillgängliga för de aktörer som planerar att ge sig in på området koldioxidlagring. Merparten av de data som finns på SGU i dag samlades in på 1960- och 70-talet som en del av olika oljeprospekteringsarbeten. Dessa har hittills spelat en viktig roll för att skapa en förståelse för lagringsmöjligheterna i Sverige och den aktuella berggrunden. Det finns dock vissa utmaningar:

- **Kvalitet:** Då befintliga data är av äldre datum är de av sämre kvalitet jämfört med moderna data. Särskilt seismiska data från befintlig datamängd är av sämre kvalitet än motsvarande skulle vara om den samlades in i dag med modern teknik. Merparten av de seismiska data SGU har i dag är i analogt format och behöver digitaliseras innan de kan användas vilket innebär att mycket av befintliga data är påverkad av en otillräcklig konversionsprocess.
- **Ofullständiga data:** På grund av åldern på befintliga data saknas ofta viktiga meta-data eller rå-data vilket begränsar möjligheterna till användning. Gällande prospekteringsborrhål till havs, saknas det borrhälsdata för merparten av borrhålen vilket begränsar möjligheter till att utföra moderna analyser avseende reservoar- och takbergarternas egenskaper. Dessutom har viktiga undersökningar avseende koldioxidlagring, exempelvis undersökningar för injektivitet eller transmissivitet, inte kunnat utföras på dessa borrhål.
- **Rättigheter:** Merparten av data ägs av privata företag som även har de kommersiella rättigheterna, vilket begränsar tillgänglighet, användning och publicering av data och tolkningar baserade på dessa.

Genom användandet av befintliga data finns det i dag en bra grundförståelse av regionalgeologin inom de två utpekade områdena som kan bli aktuella gällande koldioxidlagring. För att kunna genomföra en säkrare bedömning av lagringspotential samt reservoar- och takbergarternas säkerhet och integritet behövs nya data insamlade med fokus på just koldioxidlagring. Med väl planerade och nya djupseismiska data är det möjligt att få en högre upplöst bild av reservoarer och takbergarter. Nya, moderna data möjliggör kartläggning av potentiella strukturella fällor för lagring samt förbättrad kartläggning av förkastningar och sprickzoner som kan utgöra riskfaktorer i förhållanden till läckage av den injekterade koldioxiden. Med nya borrhålsdata blir det möjligt att testa ett antal fysikaliska och geokemiska parametrar samt att testa injektivitet och dynamiska reservoaregenskaper. Det innebär stora satsningar med både djupseismiska mätningar och borrhålsdata med tillhörande tester anpassade till koldioxidlagring:

- **Djupseismiska data:** Ett heltäckande nätverk av moderna djupseismiska profiler över nyckelområdena för geologisk lagring av koldioxid. Nya data är av högre kvalitet än befintliga data vilket innebär möjlighet för mer detaljerade tolkningar och modelleringar, samt förbättrad förståelse av geometri och utbredning av reservoarer och takbergarter. Inom nyckelområden kan det även vara lämpligt med tätare insamling inom specifika områden, som exempelvis strukturella fällor för en mer detaljerad karaktärisering.
- **Borrhålsdata:** Kompletterande borrhålsdata med ny borrhålsdata från reservoar- och takbergarter. Kompletterande borrhålsdata förbättrar förståelsen av reservoar- och takbergartsegenskaper genom geofysisk loggning samt kemisk och petrografisk analys av borrhälsdata. Dessutom kan nya borrhål öppna möjligheter för dynamisk testning av injektivitet och ge ytterligare värdefull information om reservoarerens lämplighet och möjlighet för koldioxidlagring.

Med ett heltäckande statligt ägt, modernt dataset kan Sverige säkerställa kvalitet och syfte för den data som ska ligga till grund för de geologiska underlag som är nödvändiga för att hitta och bedöma de lämpligaste lagringsplatserna i Sverige. Nya data utgör nödvändiga underlag för geologiska tolkningar och modeller för reservoar- och takbergarter i arbetet med att säkerställa en framtida effektiv och säker lagring av koldioxid i Sverige. Underlagen behövs för att det ska bli kommersiellt intressant för eventuella framtida aktörer inom svensk koldioxidlagring.

Pilotprojekt

Pilotanläggningar är ett viktigt steg i utvecklingen av processer och metoder som rör koldioxidlagring. Genom ett svenskt pilotprojekt för geologisk lagring av koldioxid inhämtas värdefull information om lämplighet hos de geologiska lagringsenheterna och associerade takbergarter. I ett pilotprojekt kan reservoaren bland annat testas avseende injekterbarhet och hur den injekterade koldioxiden beter sig i reservoaren. Pilotprojekt spelar även en viktig roll för publikt förtroende och acceptans för en fullskalig anläggning. Etablering av ett pilotprojekt för hela CCS-kedjan är ett viktigt steg i utveckling och implementering av CCS i Sverige.

Resursförstärkning

Inom ramarna för detta regeringsuppdrag har det bland annat genomförts insatser gällande kompetenshöjning avseende hantering och tolkning av djupseismiska data. Då geologisk lagring i Sverige inte är aktuell i nuläget finns det i dag mycket begränsade resurser på SGU för arbete med denna fråga och det har därför enbart varit möjligt för ett fåtal av SGUs personal att delta i denna insats. Ämnet koldioxidlagring har aktualiserats väsentligt de senare åren, inte minst i samband med rapporter från IEA och IPCC. Denna aktualisering har även märkts av på SGU som har efterfrågats gällande intervjuer i olika medier och för att hålla föredrag inom ämnet på workshoppar och konferenser, både nationellt och internationellt. Ytterligare ett område där aktualiseringen av CCS har märkts är det ökande intresset från olika aktörer avseende lagringsmöjligheter inom svenskt territorium, bland andra norska Equinor och tyska Wintershall DEA.

På kort sikt är det rimligt att anta att SGU kan axla sin roll som expert- och tillsynsmyndighet avseende geologisk lagring av koldioxid. På längre sikt bör man förbereda sig på högre aktivitet gällande CCS och inhemsk lagring av koldioxid vilket kommer att ställa högre krav på SGUs förmåga att jobba med djupseismiska data och borrhålsdata, regional geologi, strukturgeologi, reservoargeologi och modellering, juridiska frågor kopplade till CCS och geologisk lagring av koldioxid, och inte minst att SGU har tillgång till moderna och öppna djupseismiska data och borrhålsdata från relevanta områden. I det fall koldioxidlagring blir aktuellt i Sverige behöver SGU med sitt tillsynsansvar bygga upp handläggningskapaciteten då myndigheten i dag inte har några resurser att tillgå i det hänseendet.

DISKUSSION OCH SLUTSATSER

SGU har i denna rapport beskrivit CCS-kedjan och hur geologisk lagring av koldioxid kan ske. Pågående CCS-projekt i Sverige och i våra grannländer med särskilt fokus på de som kommer att erbjuda lagring av extern koldioxid har redovisats tillsammans med nationell och internationell samverkan rörande CCS. Ytterligare ges en översiktlig beskrivning av hittills identifierade lagringsmöjligheter i Sverige inklusive genomgång av platsspecifika undersökningar, kompetenser, utmaningar och hinder, samt behov.

Aktiviteter i relation till delar av CCS eller fullskaliga CCS-projekt ökar runt om i världen, och inte minst inom Europa. Ett antal CCS-anläggningar och koldioxidlager har startat i flera av våra grannländer, men fler geologiska koldioxidlager behövs om IEAs mål om infångning av lagring av 0,8 miljarder ton koldioxid till 2030 och mer än 10 miljarder ton koldioxid till 2070 ska kunna nås. Inom norra Europa arbetar man med att skapa kluster som i samband med infångning och avskiljning av koldioxid kan dela infrastruktur rörande transport och geologisk lagring av koldioxiden. Exempel på detta finns i Norge, Danmark, Island, Storbritannien och Nederländerna som alla har kommit långt i planering och uppbyggnad av fullskaliga CCS-anläggningar med syfte att ta emot koldioxid inte bara från det egna landet, utan även från närliggande länder. I Sverige ökar intresset bland olika verksamheter för att använda sig av CCS i den gröna omställningen. Stockholm Exergi och Preem har redan genomfört pilotprojekt med infångning av deras

verksamhetens koldioxid och planerar nu för uppskalning med sikte mot att i första hand lagra den infångade koldioxiden i det norska Langskip-projektet.

Då infångningsprojekten i Sverige blir fler och behoven för geologisk lagring av den infångade koldioxiden ökar är det betydelsefullt att undersöka och mogna identifierade lagringsplatser i Sverige. Alla lagringsplatser behövs för att nå IEAs mål om lagring av mer än 10 miljarder ton koldioxid årligen till 2070 och kostnader och utsläpp i samband med transporterna av den infångade koldioxid behöver reduceras och optimeras.

För att möjliggöra att koldioxidlagringsprojekt kan påbörjas i Sverige finns det en rad behov som behöver tillgodoses, men även en rad utmaningar och hinder som behöver adresseras. Överenskommelser på internationell nivå behöver förtydligas och justeras.

Det finns geologiska förutsättningar och god potential för geologisk lagring av koldioxid i Sverige. De mest lämpliga lagringsplatser har identifierats inom sydöstra Östersjön och i sydvästra Skåne med intilliggande havsområden. Baserat på tidigare studier och befintliga data bedöms de potentiella lagringsenheterna Faludden och Arnagergrönsand som mest lovande. Det behövs nya moderna seismiska data och borrhålsdata för att göra bättre och säkrare bedömningar av lagringspotentialen och för att säkerställa en framtida effektiv och säker lagring. Nya data behöver vara öppna och tillgängliga så att inte bara SGU, men även andra myndigheter, forskningsinstitutioner och aktörer kan arbeta obehindrat med data för ett så brett och nyanserat arbete som möjligt gällande undersökning av lagringsmöjligheter i Sverige. Förutom empiriska arbeten och forskning bör det även inkluderas ett eller flera pilot-koldioxidlagringsprojekt där de potentiella lagringsenheternas egenskaper och dynamik testas genom injektering av mindre mängder koldioxid. För att SGU framöver ska kunna axla sin roll som expert- och tillsynsmyndighet för geologisk lagring av koldioxid behövs ytterligare kompetens avseende hantering och tolkning av seismiska data.

Det finns flera utmaningar och hinder gällande CCS, med betoning på lagringen av koldioxiden, i Sverige. Det är vår uppfattning, och förhoppning, att man genom nationell och internationell dialog och överenskommelser kan uppnå de nödvändiga justeringar och förtydliganden av direktiv och konventioner som behövs för tillämpning av geologisk lagring av koldioxid i Sverige och i våra närmaste grannländer. Inom Sverige bör man även se över de långa handläggningstiderna gällande undersökningstillstånd och eventuellt framtida tillstånd för lagring av koldioxid inom svenskt territorium. Effektivisering av tillståndsprocesser underlättar för aktörer som har viljan att investera i och undersöka lagringsmöjligheter i Sverige.

I betänkandet från den Klimatpolitiska vägvalsutredningen (SOU 2020:4) rekommenderas det bland annat att SGU får i uppdrag att identifiera vad ett beslutsunderlag om en svensk lagringsplats för koldioxid behöver innehålla och hur ett sådant kan tas fram. I uppdraget föreslås att SGU ska redovisa vilka undersökningar, datamängder och modelleringar som krävs, samt uppskatta vad insatserna innebär vad gäller resurser och tid. I mars 2021 tog SGU på uppdrag av Näringsdepartementet fram ett förslag på regeringsuppdrag för 2022–2024 gällande undersökning av områden i Sverige för geologisk lagring av koldioxid. För att effektivisera ett sådant uppdrag och samtidigt tillgodose vägvalsutredningens rekommendation bör SGU 2022 få i uppdrag att göra en omfattande redovisning av vilka undersökningar, datamängder och modelleringar som krävs för att etablera ett koldioxidlager inom svenskt territorium, samt uppskatta vilka resurser och tid detta kommer att ta i anspråk. Ett sådant uppdrag kommer att ha en hög grad av komplexitet och utöver SGUs egna resurser kommer det att finnas behov av externa resurser och expertis, vilket inte kommer kunna genomföras inom SGUs normala anslag. Uppdraget kan utgöra en förstudie inför det treåriga uppdraget som föreslogs i våras.

REFERENSER

- Ahlberg, A., Sivhed, U. & Erlström, M., 2003: The Jurassic of Skåne, southern Sweden. I: Surlyk, F. & Inesson, J.R., 2003: The Jurassic of Denmark and Greenland. *Geology of Greenland Survey Bulletin* 186, 7–10, 1–15.
- Anthonsen, K.M., Aagaard, P., Bergmo, P.E.S., Erlström, M., Fareide, J.I., Gislason, S.R., Mortensen, G.M. & Snæbjörnsdóttir, S.Ó., 2013: CO₂ storage potential in the Nordic region. *Energy Procedia* 37, 5080–5092.
- Anthonsen, K.M., Mortensen, G.M., Sundal, A., Aagaard, P., Snæbjörnsdóttir, S.Ó., Bergmo, P.E.S. & Lothe, A., 2015a: Geological description of the best Nordic CO₂ storage sites. *NORDICCS Memo AD6.1402*, NORDICCS, 100 s.
- Anthonsen, K.M., 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: evidence 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, 28 s.
- Bergmo, P.E.S., 2013: Methods for ranking storage sites in NORDICCS WP6. *NORDICCS Memo*, NORDICCS, 10 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.
- CO₂GeoNet, 2021: State-of-play on CO₂ geological storage in 32 European countries – an update, CO₂GeoNet Report, 325 s. DOI: 10.25928/co2geonet_eu32-o21u.
- Elforsk, 2014: CCS in the Baltic Sea region – Bastor 2. *Elforsk report* 14:50, Elforsk, 66 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 Örnähusen NV. *Sveriges geologiska undersökning Af* 212–215, 141 s.
- Erlström, M., Persson, L., Sivhed, U., & Wickström, L., 2009: Beskrivning till regional berggrundskarta över Gotlands län. *Sveriges geologiska undersökning K* 221, 60 s.
- Erlström, M., Fredriksson, D., Juhojuntti, N., Sivhed, U., & Wickström, L., 2011: Lagring av koldioxid i berggrunden – krav, förutsättningar och möjligheter, 2011. *Rapporter och meddelanden* 131. Sveriges geologiska undersökning, 96 s.
- Erlström, M. & Sivhed, U., 2012: Pre-Rhaetian Triassic strata in Scania and adjacent offshore areas – stratigraphy, petrology and subsurface characteristics. *Rapporter och meddelanden* 132. Sveriges geologiska undersökning, 54 s.
- 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)*.
- Global CCS Institute, 2021: Global Status of CCS 202. CCS Accelerating to Net Zero. *The Global CCS Institute, Australien*, 43 s.
- 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 Ca* 89, 101 s.

- Helsingforskonventionen, 1974: Konvention om skydd av Östersjöområdet marina miljö.
- IEA, 2020: Energy Technology Perspectives 2020. Special Report on Carbon Capture Utilisation and Storage, CCUS in Clean Energy Transitions. *IEA report*, 171 s.
- IEA, 2021: World captured CO₂ by source in the Sustainable Development Scenario, 2020–2070, IEA, Paris <<https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/world-captured-co2-by-source-in-the-sustainable-development-scenario-2020-2070>> åtkommen den 17 november 2021.
- IPCC, 2021: AR6 Climate Change 2021: The Physical Science Basis. <<https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>> åtkommen den 17 november 2021.
- Johnsson, F. & Kjärstad, J., 2019: Avskiljning, transport och lagring av koldioxid i Sverige. Behov av forskning och demonstration, 2019. *Chalmers tekniska högskola*, 91 s.
- Matter, J.M., Stute, M., Snæbjörnsdóttir, S.Ó., Oelkers, E.H., Gislason, S.R., Aradóttir, E.S., Sigfusson, B., Gunnarsson, I., Sigurdardóttir, H., Gunnlaugsson, E., Axelsson, G., Alfredsson, H.A., Wolff-Boenisch, D., Mesfin, K., Fernandez, de la Reguera, Taya, D., Hall, J., Dideriksen, K. & Broecker, W.S., 2016: Rapid carbon mineralization for permanent and safe disposal of anthropogenic carbon dioxide emissions. *Science*, 2016:352, 1312–1314.
- 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., 2016: Koldioxidlagring i Sverige – sammanställning och resultat från NORDICCS. *SGU-rapport 2016:20*. Sveriges geologiska undersökning, 52 s.
- Mortensen, G.M., Bergmo, P.E.S. & Emmel, B.U., 2016: Characterization and estimation of CO₂ storage capacity for the most prospective aquifers in Sweden. *Energy Procedia* 2016:86, 352–360.
- Mortensen, G.M., Erlström, M., Nordström, S. & Nyberg, J., 2017: Geologisk lagring av koldioxid i Sverige – Lägesbeskrivning avseende förutsättningar, lagstiftning och forskning samt olje- och gasverksamhet i Östersjöregionen, 2017. *Rapporter och meddelanden 142*. Sveriges geologiska undersökning, 119 s.
- 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.
- NORDICCS, 2016: Building Nordic Excellence in CCS. NORDICCS – The Nordic CCS Competence Centre. *The Top-level Research Initiative. Nordforsk, Oslo, Norway*, 104 s.
- Norling, E., Ahlberg, A., Erlström, M. & Sivhed, U., 1993: Guide to Upper Triassic and Jurassic geology of Sweden. *Sveriges geologiska undersökning Ca 82*, 71 s.
- 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 Af 191, 192, 193, 194, 196, 198*, 143 s.
- Snæbjörnsdóttir, S.Ó., Oelkers, E.H., Mesfin, K., Aradóttir, E.S., Dideriksen, K., Gunnarsson, I., Gunnlaugsson, E., Matter, J.M., Stute, M. & Gislason, S.R., 2017: The chemistry and saturation states of subsurface fluids during the in situ mineralisation of CO₂ and H₂S at the CarbFix site in SW-Iceland. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2017:58, 87–102.
- Sopher, D., Juhlin, C. & Erlström, E., 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.
- Vernon, R., O’Neil, N., Pasquali, R. & Nieminen, M., 2013: Screening of prospective sites for geological storage of CO₂ in the Southern Baltic Sea. I: *Espoo 2013, VTT Technology*, 101 s.
- Åberg, A., 2019: Bedömning av tidslinje för ansökan, tillstånd och anläggning av geologiskt lager för koldioxid i Sverige. Internt PM, Sveriges geologiska undersökning 2019-01-28, 10 s.

BILAGA 1. LÄNKAR TILL PROJEKT OCH SAMARBETEN SOM NÄMNS I RAPPORTEN

Mer information om projekt och samarbeten som nämns i rapporten finns att hitta med hjälp av nedanstående länkar. Länkar åtkomna 211117.

Acorn

<https://theacornproject.uk/>

BASRECCS

<https://bcforum.net/>

Carbfix

<https://www.carbfix.com/>

CinfraCap

<https://www.goteborgshamn.se/hamnens-projekt/cinfracap/>

Cementa, Slite CCS

<https://www.cementa.se/sv/slite-ccs>

CLIMIT

<https://climit.no/>

CO2GeoNet

<http://www.co2geonet.com/home/>

CO2-INSURANCE

<https://www.ltu.se/research/subjects/Malmgeologi/Forskningsprojekt/CO2-INSURANCE>

CO2QUEST

<https://www.co2quest.eu/>

East Coast Cluster

<https://eastcoastcluster.co.uk/>

Gassnova

<https://gassnova.no/>

Global CCS Institute (GCCSI)

<https://www.globalccsinstitute.com/>

Greensand

<https://projectgreensand.com/>

HyNet North West

<https://hynet.co.uk/>

Innovationsfonden. The Green CCUS Roadmap - Towards a fossil free future

https://innovationsfonden.dk/sites/default/files/2021-08/Appendix%20%20_%201112-00004A%20-%20Mission%20CCUS%20%E2%80%93%20a%20roadmap%20for%20Carbon%20Capture%20C%20Utilisation%20and%20Storage.pdf

International Workshop on Offshore Geologic CO₂ Storage

<https://ieaghg.org/2-uncategorised/665-international-workshop-on-offshore-geological-co2-storage>
<https://www.beg.utexas.edu/gccc/4th-international-offshore-workshop-stem-ccs>

Internationella Energirådets Greenhouse Gas R&D Programme (IEAGHG)

<https://ieaghg.org/>

Pilotprojektet Ketzin

<https://www.co2ketzin.de/startseite>

KLIMPO

<https://www.klimpo.se/>

Kungliga Ingenjörsvetenskapsakademien

<https://www.iva.se/>

Kungliga Vetenskapsakademien (KVA)

<https://kva.se/sv/startside>

Luleå tekniska universitet, CO₂-INSURANCE

<https://www.ltu.se/research/subjects/Malmgeologi/Forskningsprojekt/CO2-INSURANCE>

Midroc, CCS Panelen

<https://www.midroc.se/om-midroc/ansvarsfulla-affarer/ccs/ccs-panelen>

MUSTANG

<http://www.zeroco2.no/projects/mustang-co2-storage-project>

Net Zero Teesside

<https://www.netzeroteesside.co.uk/>

NordiCCS

<https://www.sintef.no/en/projects/2011/nordiccs-nordisk-ccs-kompetansesenter/>

Northern Lights

<https://northernlightsccs.com/>

PANACEA

<http://www.panacea-co2.org/>

Porthos

<https://www.porthosco2.nl/en/>

Preem

<https://www.preem.se/om-preem/hallbarhet/ccs/>

Profu

<https://www.profu.se/>

Sveriges geologiska undersökning (SGU), koldioxidlagring

<https://www.sgu.se/samhallsplanering/ccs-koldioxidlagring/>

Stockholm Exergi

<https://www.stockholmexergi.se/minusutslapp/#>

TRUST

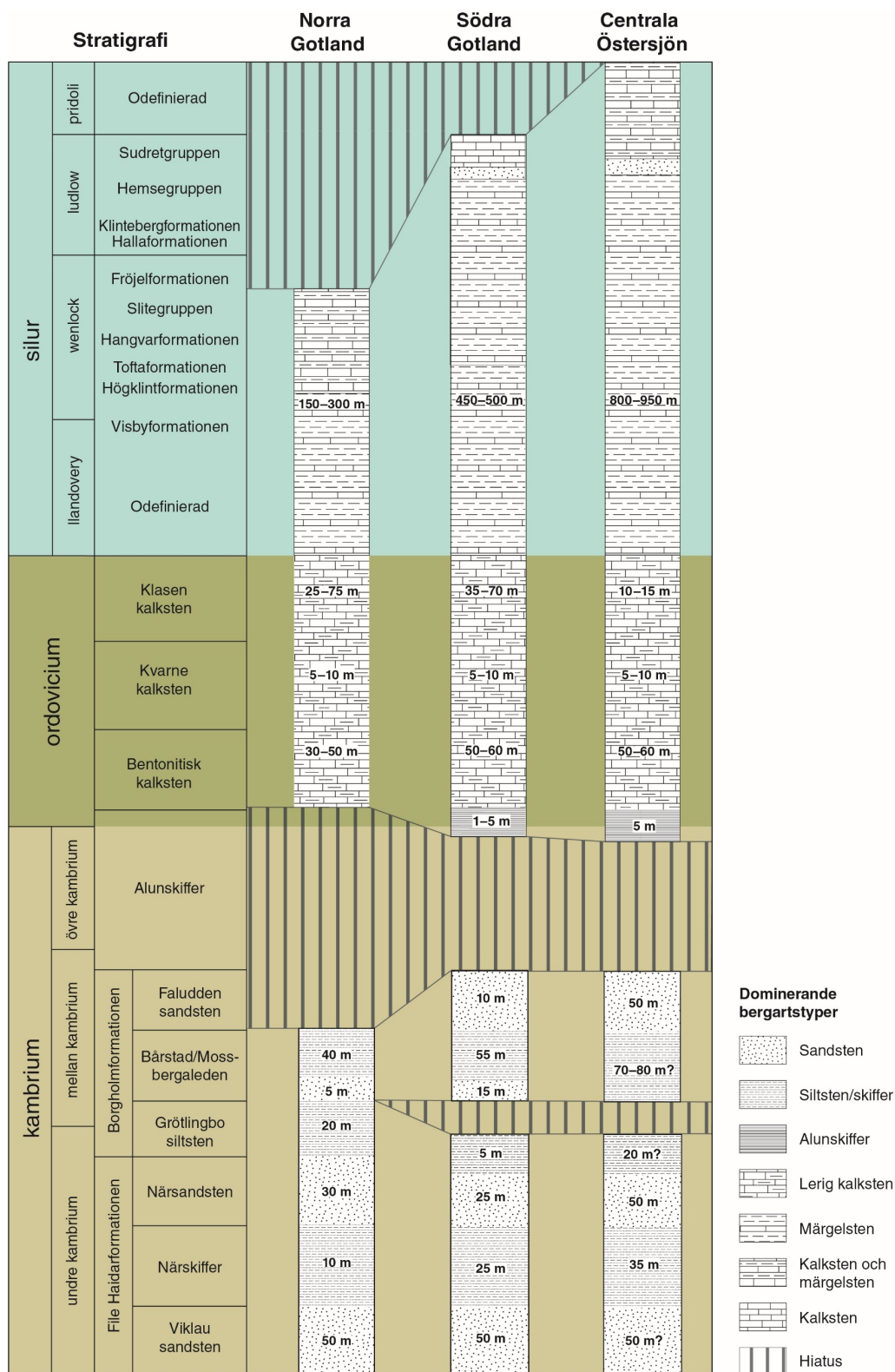
<https://cordis.europa.eu/project/id/309067/reporting>

Zero Carbon Humber

<https://www.zerocarbonhumber.co.uk/>

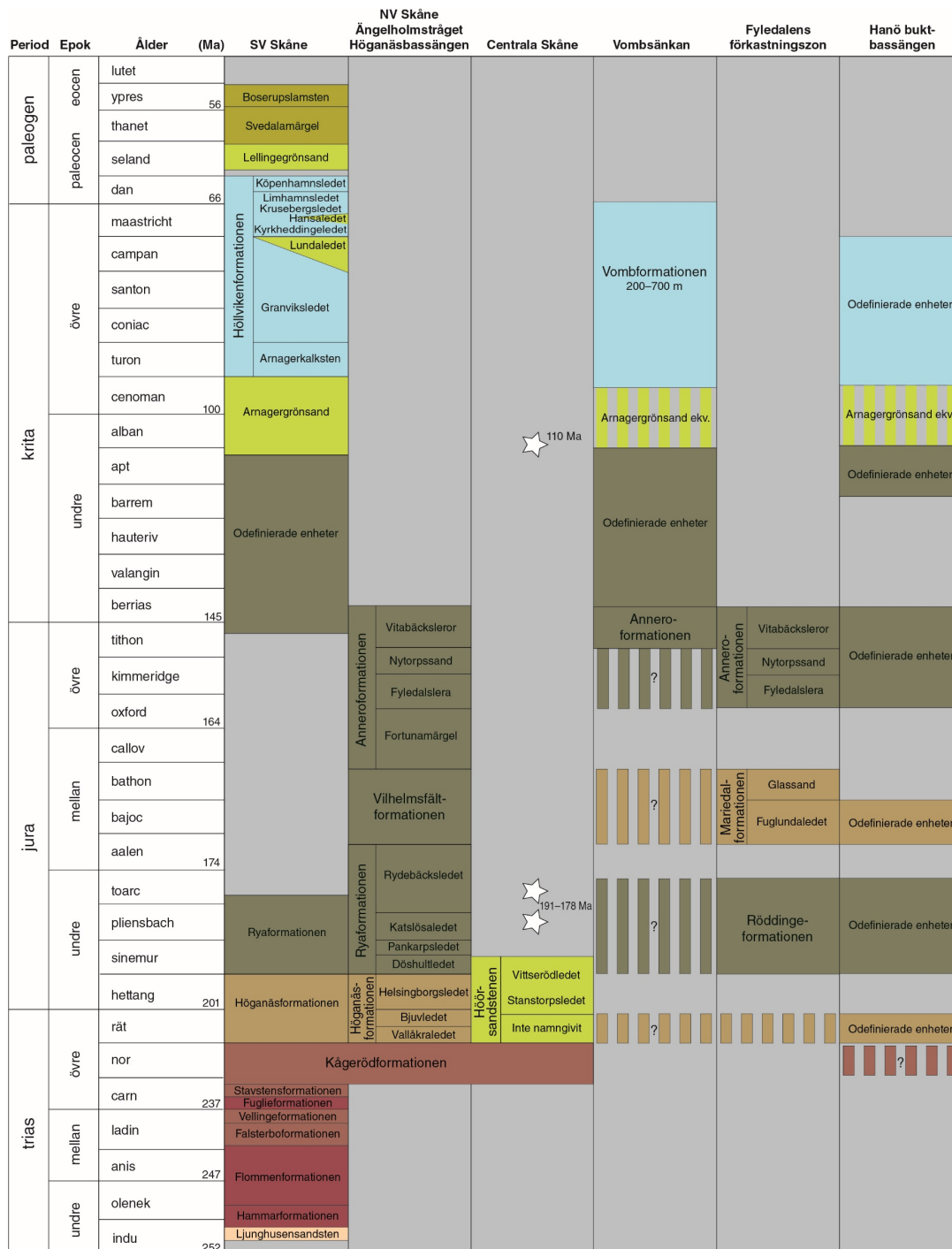
BILAGA 2. STRATIGRAFISK MODELL FÖR SYDÖSTRA ÖSTERSJÖN

Schematisk stratigrafisk modell för den paleozoiska berggrunden inom svensk ekonomisk zon 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 och Schovsbo (2007) (modifierad från Anthonsen m.fl. 2015b).

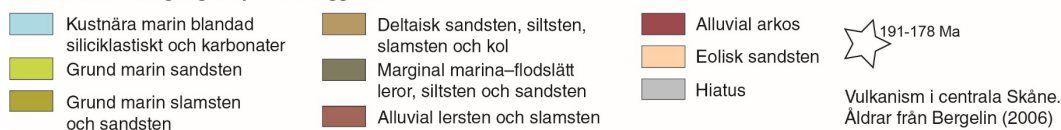


BILAGA 3. STRATIGRAFISK MODELL FÖR SYDVÄSTRA SKÅNE

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



Dominerande avlagringsmiljö och berggrund



BILAGA 4. KURSPLANER

Nedan finns en detaljerad beskrivning av innehållet på de två interna kurserna som genomfördes på SGU under 2021 som en del av kompetenshöjande insatser avseende djupseismiska data. Båda kurserna genomfördes på engelska.

Introduktion till seismiska data

Grundläggande introduktion till djupseismiska data och tolkningsarbete, för medarbetare som arbetar med koldioxidlagring.

Tid allokerad för kursen:

Undervisningstid: 20 timmar

Övningstid: 5 timmar

Syfte: Att ge deltagarna en grundläggande kunskap om teorin avseende seismiska metoder, inklusive huvudaspekterna i relation till datainsamling, bearbetning och tolkning av seismiska data, samt en grundläggande kunskap avseende borrhålsloggning. Kursen ger den grund som behövs för att kunna delta i efterföljande fördjupade kurs "Tolkning av seismiska data".

Kursbeskrivning: Merparten av kursen utgörs av föreläsningar, kompletterad med övningar där deltagarna kan tillämpa deras nya kunskap med att exempelvis göra en enkel tolkning av en reflektionsseismisk profil.

Föreläsningsmaterial:

- **Introduktion**

- Vad är Geofysik? Tillämpningar och exempel.
- Måltavla och anomalier i geofysiska metoder.
- Geofysisk modellering.
- Olika metoder i Geofysik.
- Fysikaliska egenskaper av bergarter och jordarter.
- Viktiga koncept i geofysisk datainsamling:
 - mätfrekvens och *aliasing*,
 - signal och brus,
 - datainsamlingsgeometri.

- **Introduktion till seismiska metoder**

- Vad är seismiska metoder? Tillämpningar och exempel.
- Olika sorter av seismiska vågar.
- Viktiga fysikaliska egenskaper (seismisk hastighet och densitet).
- Förhållanden mellan våglängd, frekvens och hastighet.
- Vågfronter och strålningsvägar.
- Principer av vågrörelse (Huygens och Fermats princip).
- Brus, spridning och försvagning.
- Seismisk datainsamling (datainsamlingsgeometri, ljudkällor och mottagare).
- Seismisk refraktion och Snells lag.
- Kritisk refraktion.
- Seismisk refraktionsteori (2 lagar).

- **Seismiska reflektionsmetoder**

- Vad är seismisk reflektion? Tillämpningar och exempel.
- Seismisk reflektion teori (2 lagar).
- Seismisk reflektionsteori (flera lagar).

- Seismisk amplitud.
- Partitionering av energi vid ett gränssnitt mellan två material.
- En Seismisk *trace*.
- Syntetiska seismogram från borrhålsdata.
- Seismisk reflektionsbearbetning:
 - *CDP*, *shot gathers* och bearbetade seismiska sektioner,
 - viktiga steg i arbetsflöde för bearbetning,
 - 2D-, 3D- och 4D-seismiska data.
- Vertikal och horisontal upplösning i seismisk reflektionsdata.
- Tolkning av seismiska data:
 - principer i seismisk tolkning,
 - seismisk stratigrafi,
 - tolkning under olika geologiska förhållanden.
- Djupkonvertering av data.
- Fallstudie: Marin data från Östersjön.
- **Geofysiska borrhålsloggningar**
 - Vad är borrhålsloggning? Tillämpningar och exempel.
 - Resistivitetsloggning.
 - Induktionsloggning.
 - SP loggning.
 - Loggning av naturliga Gammastrålar.
 - *Neutron-gamma* loggning.
 - Loggning av P-vågshastighet.
 - Temperaturloggning.
 - Vertikala seismiska profiler.

Tolkning av seismiska data

Fördjupad kurs för medarbetare som kan komma ha myndighetsuppgifter som remissinstans och med tillsyn av koldioxidlagring i Sverige.

Tid allokerad för kursen:

Undervisningstid: 8 timmar

Övningstid: 32 timmar

Syfte: Att ge deltagarna grundläggande teoretiska kunskaper för att tolka djupseismiska data. Kursen ger insyn i typiska seismiska responser från de mest lämpliga lagringsplatserna i Sverige, det vill säga Östersjön och Skåne. Genom övningar med seismiska data och modern seismisk tolkningsmjukvara får deltagarna lära sig hur man importerar, hanterar och tolkar seismiska data, i relation till borrhålsdata.

Kursbeskrivning: Kursen utgörs av både föreläsningar och praktiska övningar. Under de praktiska övningarna använder deltagarna sig av en gratisversion av tolkningsmjukvaran OpendTect för att importera och tolka seismiska data.

Föreläsningsmaterial:

- **Grundläggande teori**
 - Amplitud av seismiska reflektioner.
 - Djupkonvertering.

- Seismiska *traces* i seismisk data.
- Vertikal och horisontal upplösning.
- *Tuning* av seismiska reflektioner.
- **Tolkning av seismiska data**
 - Vad är seismisk tolkning? Tillämpningar och exempel.
 - Arbetsflöde för att skapa modeller eller produkt från seismiska data.
 - Tolkning i *extensional* geologiska förhållanden.
 - Tolkning i *compressional* geologiska förhållanden.
 - Tolkning i område med salttektonik.
 - Seismisk stratigrafi.
 - Brus och artefakter:
 - olika sorter brus och artefakter i seismiska data,
 - *Multiples*,
 - påverkan av marina kanaler i seismiska data.
 - Arbetsflöde för tolkning av seismiska data:
 - definition av tolkningsproblemet
 - utveckla förståelse för data (polaritet, bearbetning osv.)
 - undersöka geologin i tolkningsområdet
 - importera seismisk data och borrhålsdata till mjukvara
 - jämföra seismisk data med borrhålsdata (syntetiskt seismogram)
 - utforska data
 - tolka förkastningar och sprickzoner
 - tolka seismiska reflektioner
 - skapa *grids* av tolkade reflektioner
 - djupkonvertering
 - kartlägga olika lagers mäktighet.
- **Geologi och typisk seismisk respons från Östersjön och Skåne**
 - Östersjöns geologiska historia.
 - Borrhålsdata från Östersjön.
 - Typisk seismisk respons från Östersjön.
 - Exempel på seismiska data från Östersjön.
 - Faluddenreservoaren.
 - Skånes geologiska historia.
 - Borrhålsdata från Skåne.
 - Typisk seismisk respons från Skåne.
 - Exempel på seismiska data från Skåne.
- **Seismiska data tillgängliga på SGU**
 - Beskrivning av de olika data som finns på SGU.
 - Jämförelse av datakvalitet.
 - Beskrivning av nya seismiska data insamlad av Hamburg universitet.
 - Datarättigheter.
 - Spridningstillstånd.
- **Exempel på tillämpningar av seismiska data avseende koldioxidlagring**
 - Exempel på karaktärisering
 - Exempel på bevakning (monitorering):
 - 4D-seismiska data
 - reflektionsamplitud
 - tidsskiftningar.

Övningar: Genomfördes med gratisversion av mjukvaran OpendTect och seismiska data från SGUs dataarkiv. Data från Ketzin tillgängliggjordes via Uppsala universitet. Tillvägagångssätt för alla övningar gjordes i dokumentform som sparades för eventuella senare övningsarbeten. Övningar gjordes mestadels tillsammans i grupp ledd av kursledaren, men det fanns även tid för eget arbete och fördjupning. De olika övningar finns beskrivet nedan.

1. Tolkning av 2D-data från Östersjön

Under den här övningen gick deltagarna genom processen för att importera seismiska data och borrhålsdata. När data hade importerats till mjukvara tolkades förkastningar och en stark reflektion från den ordoviciska kalksten genom hela datasetet.

Deltagarna lärde sig:

- hur man importerar 2D-seismiska data och borrhålsdata
- format och innehåll av en SEG-Y-fil,
- hur man tolkar förkastningar
- hur man tolkar seismiska reflektioner
- att känna igen en typisk seismisk respons från Östersjön.

2. Tolkning av 2D-data från Skåne

Under den här övningen arbetade deltagarna med ett dataset från Skåne, nära Malmö, där reflektionen från Arnagerkalkstenen tolkades genom hela datasetet.

Deltagarna lärde sig:

- att självständigt importera 2D-seismiska data och borrhålsdata
- att självständigt tolka 2D-data
- att känna igen en typisk seismisk respons från Skåne.

3. Tolkning av 3D- och 4D data från pilotprojektet Ketzin

Under den här övningen arbetade deltagarna med ett 3D-dataset från pilotprojektet Ketzin i Tyskland. Deltagarna började med att importera data och generera några seismiska attribut. Därefter tolkades förkastningar och reflektioner genom hela datasetet. Avslutningsvist extraherade deltagarna amplitud och tidskiftesignatur från den injekterade koldioxid i reservoaren.

Deltagarna lärde sig:

- att importera 3D-seismiska data
- att tolka 3D-seismiska data
- att generera och arbete med seismiska attribut
- hur man hanterar seismiska data med flera mätomgångar
- hur man kan visualisera amplitudändringar och tidskiftningar som ett resultat av injekterad koldioxid.