

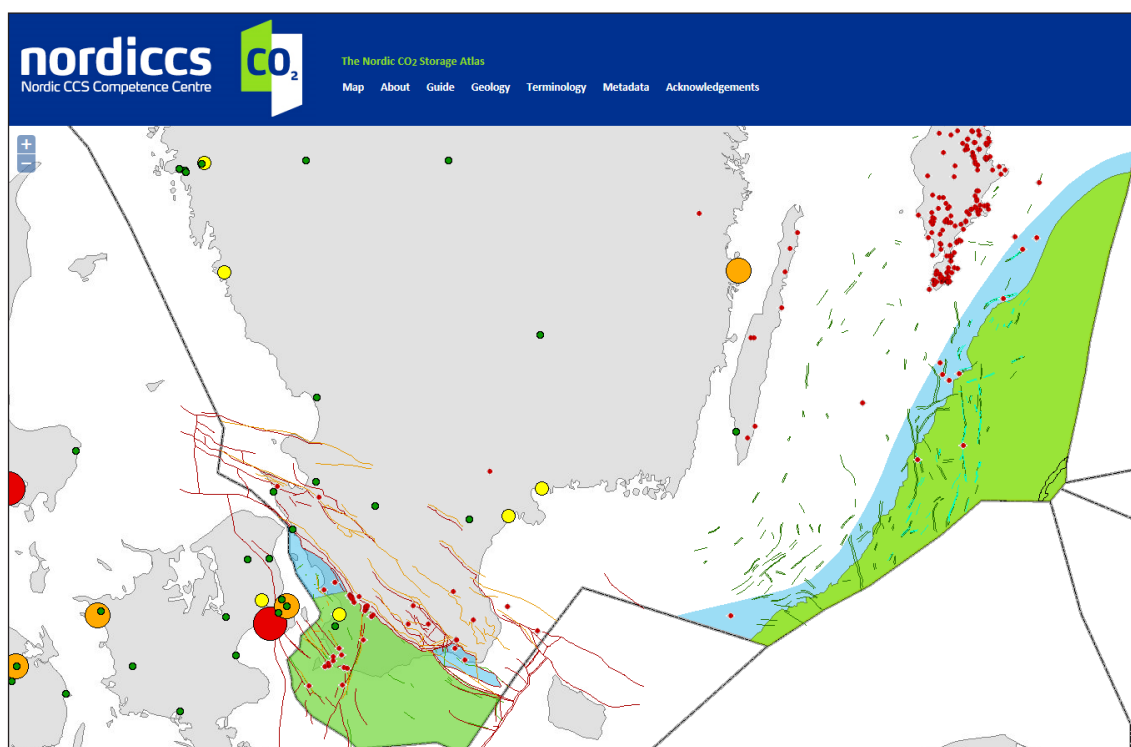
Koldioxidlagring i Sverige

– sammanställning och resultat från NORDICCS

Gry Møl Mortensen

december 2016

SGU-rapport 2016:20



SGU

Sveriges geologiska undersökning
Geological Survey of Sweden

Omslagsbild: Exempel på visning från den nordiska CO₂-lagringsatlasen, *The Nordic CO₂ Storage Atlas*, som web-GIS på: <https://data.geus.dk/nordiccs/> där olika skikt kan slås på och av. Bilden visar exempel på lagringsenheter och -fälla samt förkastningar, borrhål och utsläppskällor.

Sveriges geologiska undersökning
Box 670, 751 28 Uppsala
tel: 018-17 90 00
fax: 018-17 92 10
e-post: sgu@sgu.se
www.sgu.se

Granskad av: Mikael Erlström och Kärstin Malmberg Persson.
Ansvarig enhetschef: Mugdim Islamovic.

INNEHÅLL

Sammanfattning	5
Summary	6
Tidigare arbeten avseende koldioxidlagring i Sverige	6
NORDICCS	7
Karaktärisering av lagringsenheter	10
Sydöstra Östersjön	10
Faludden	11
När	13
Viklau	15
Sydvästra Skåne	17
Arnagergrönsand	19
Undre krita	20
Höganäs–Rya	20
Bunter	22
Karaktärisering av takbergarter	25
Sydöstra Östersjön	26
Ordovicisk kalksten	26
Silurisk märgelsten	26
Sydvästra Skåne	27
Höllvikenformationen	27
Vombformationen	27
Beräkning av lagringskapacitet	28
Statisk	28
Dynamisk	28
Resultat för Faludden	30
Resultat för Arnagergrönsand	32
Klassning och urval av potentiella lagringsplatser	33
Kunskapsluckor	35
Diskussion och slutsatser	39
Referenser	42
Bilaga 1. Ordlista	46
Bilaga 2. Leveranser inom NORDICCS som SGU har medverkat till	51
Bilaga 3. Vetenskapliga publikationer inom NORDICCS som SGU har medverkat till	52

SAMMANFATTNING

Resultaten från NORDICCS visar att det inom Norden finns en avsevärd potential för geologisk lagring av koldioxid. En sammanställning (Bergmo & Emmel 2015) visar att de 18 bäst lämpade lagringsplatserna för koldioxid inom Norden tillsammans har en teoretisk lagringskapacitet som är mer än 86 Gt. Enligt utsläppsstatistiken uppgick de samlade årliga nordiska koldioxidutsläppen (>100 kt CO_2) 2011 till 152,8 Mt CO_2 . (Onarheim m.fl. 2015). Detta betyder att med samma utsläppstakt skulle 564 års utsläpp av koldioxid kunna lagras inom den nordiska regionen (Bergmo & Emmel 2015). Analyser inom NORDICCS visar, inte överraskande, att de lagringsplatser inom Norden som i nuläget har bästa möjligheterna för implementering av geologisk lagring av koldioxid finns i Norge. I Norge har det sedan länge pågått en omfattande prospektering efter olja och gas, och det finns därför avsevärd mängd data lämplig för koldioxidlagring. Resultaten från NORDICCS tillsammans med liknande studier i Sverige (Erlström m.fl. 2011, Elforsk 2014, Sopher m.fl. 2014) visar att det i södra Sverige finns en betydande potential för geologisk lagring av koldioxid. Dock indikerar stora skillnader i resultat samt analyser från NORDICCS att kompletterande data och forskning på potentiella svenska lagringsenheter är nödvändiga innan implementering av koldioxidlagring kan genomföras. Ökad data och kunskap kan bl.a. nås genom studier av sparade borrhälskärnor från lagringsplatser samt förnyad och modern processning på existerande 2D seismiska data.

NORDICCS (the Nordic Competence Centre for CCS) startades i oktober 2011 och pågick fram till december 2015. SGU deltog i arbetsgruppen WP6 som hade till uppgift att samla och dokumentera den kunskap och data som finns kring koldioxidlagring inom de nordiska länderna. För SGUs arbete var Gry Møl Mortensen projektledare. Mikael Erlström, Sven-Olof Linder och Sverker Olsson har i olika delar och omfattning medverkat i projektet. Inom NORDICCS har SGU medverkat i ett antal vetenskapliga publikationer, interna rapporter samt med bearbetad data till NORDICCS web-GIS plattform, se bilaga 2 och 3. Merparten av publikationer och rapporter finns tillgängliga på NORDICCS webbsida, <http://www.sintef.no/nordiccs>. Huvudprodukten för WP6 var den interaktiva nordiska CO_2 -lagringsatlasen, *The Nordic CO_2 Storage Atlas*, publicerad som ett web-GIS publikt tillgängligt på <https://data.geus.dk/nordiccs/>.

I denna rapport presenteras resultaten som berör Sveriges bidrag till NORDICCS arbetsgrupp WP6. Resultaten baseras till merparten på tidigare SGU-utredningar kring geologisk lagring av koldioxid i Sverige (Erlström m.fl. 2011) samt på information från seismiska undersökningar, borrhålsrapporter och borrhålsgeofysik samt diverse opublicerade OPAB-rapporter (t.ex. OPAB 1976a, b). Rapporten redogör kort för karaktäriseringen av de identifierade potentiella lagringsenheter och deras takbergarter i Sverige och är på så sätt ingen strikt stratigrafisk eller geologisk beskrivning. Karaktäriseringen är en ingenjörsgelogisk beskrivning där de fysikaliska egenskaperna definierar de geologiska ramarna, och lagringsenheter presenteras inom varje region med den primära enheten först och efterföljande neråt i lagerföljden. Dessutom presenteras olika metoder för beräkning av lagringskapaciteten i de identifierade lagringsenheter, både statiskt och dynamiskt. Inom NORDICCS definierades ett antal parametrar för klassning och urval av de bäst lämpade lagringsenheter samt en metodik för identifiering av kunskapsluckor. Dessa studier, tillsammans med lagringsatlasen, kan vara med och underlätta för framtida planering och bedömning av lagringsenheter för implementering av CCS (*Carbon Capture and Storage*, infångning och lagring av koldioxid) inom de nordiska länderna.

I följande text utgör lagringsplatsen (*storage site*) den del av akviferen, eller reservoarbergarten, som anses lämplig för koldioxidlagring, och kan innehålla flera lagringsenheter och fällor. En lagringsenhet (*storage unit*) är en djupavgränsad volym inom ett definierat stratigrafiskt intervall, och kan innehålla fällor. Namn på lagringsenhet refererar oftast till den eller de stratigrafiska intervaller den inkluderar, t.ex. Höganäs–Rya. Fällor (*traps*) utgörs av stratigrafiskt

avgränsade enheter eller konvexa deformationer av reservoarbergarten och är ofta avgränsade av förkastningar. I förklarande syfte, samt för att uppnå en gemensam nomenklatur inom NORD-ICCS, blev det utarbetat en lista med definitioner av koncepter och termer som används inom ämnet koldioxidlagring (Anthonsen 2014, Anthonsen m.fl. 2015c). Ordlista baserat på denna sammanställning finns som bilaga 1 och förklarar använda termer i denna rapport.

SUMMARY

A great potential for geological storage of CO₂ has been shown to exist within the Nordic region. In NORDICCS, the 18 most prospective storage sites within the Nordic region have together shown to have a theoretical CO₂ storage capacity of more than 86 Gt (Bergmo & Emmel 2015). According to estimations from 2011 (Onarheim et al. 2015), the total Nordic emissions were 152.8 Mt CO₂ per year, corresponding to a total capacity for geological storage of CO₂ in the Nordic region for 564 years (Bergmo & Emmel 2015). Analyses made within NORDICCS show that Norway has the best possibilities for implementing geological storage of CO₂. Although, results from NORDICCS together with former studies in Sweden (Erlström et al. 2011, Elforsk 2014, Sopher et al. 2014) shows that a considerable potential exists for geological storage of CO₂ in southern Sweden. Large gaps in results together with analyses from NORDICCS indicate that additional data and research are necessary before CO₂ storage at Swedish storage sites can be realised.

The Nordic CCS Competence Centre – NORDICCS went on from October 2011 until December 2015. SGU was participating in the WP6 work package which gathered and documented knowledge and data regarding CO₂ storage within the Nordic countries. SGU contributed to 17 deliverables comprising internal technical reports and Swedish GIS data for the Nordic CO₂ Storage Atlas, and to 11 scientific publications, see appendix 2 and 3. A majority of the reports and publications are available at the NORDICCS web site, <http://www.sintef.no/nordiccs>. Key outcome for the WP6 group was the large web based Nordic CO₂ Storage Atlas available at <https://data.geus.dk/nordiccs/>.

This report gives an overview and presentation of the Swedish results from the NORDICCS WP6 group. Results are based on earlier SGU studies (Erlström et al. 2011) together with seismic, well data and -reports from mainly OPAB (OPAB 1976a, b). This report summarizes site characterisations for the identified storage sites and caprocks in Sweden and is by such not a strict stratigraphic or geological description. Furthermore, estimations for storage capacity in Sweden, both static and dynamic, are described. Within NORDICCS, a process with parameters for ranking and selection of the most prospective storage units was defined together with a methodology for identifying knowledge gaps. This, together with the Nordic CO₂ Storage Atlas, can facilitate future planning for implementation of CCS (Carbon Capture and Storage) in the Nordic region.

TIDIGARE ARBETEN AVSEENDE KOLDIOXIDLAGRING I SVERIGE

Under 1970 och -80-talen genomfördes en omfattande prospektering efter kolväten i Sverige. Mest omfattande undersökningar gjordes i Skåne och södra Östersjön samt på Gotland. Undersökningarna utfördes till merparten av Oljeprospektering AB (OPAB). Deras undersökningar omfattade seismiska undersökningar samt ett 20-tal djupborrningar i södra Östersjön och sydvästra Skåne. Seismisk data och borrhålsdata samt ett visst kärnmaterial och borrhålsdata från dessa undersökningar finns lagrade hos Sveriges geologiska undersökning. Det är resultat från dessa undersökningar som ligger till grund för studier avseende koldioxidlagring i Sverige. Nedan ges en kort sammanfattning av några av de större projekt som genomförts avseende geologisk lagring av koldioxid i Sverige:

SGU gjorde inom ramen för sin interna FoU-verksamhet under 2010–12 en studie avseende möjligheterna till geologisk lagring av koldioxid (Erlström m.fl. 2011, Erlström & Sivhed 2012). Tre potentiella berggrundsområden identifierades, samtliga lokaliserade i södra Sverige. De identifierade potentiella lagringsområdena var sydöstra Östersjön, sydvästra Skåne och södra Kattegatt (Erlström m.fl. 2011). I dessa områden förekommer såväl sandstensakviferer och takbergarter med egenskaper som i SGUs studie bedöms intressanta för fortsatta studier.

MUSTANG var ett fyraårigt EU-finansierat projekt som koordinerades av Uppsala Universitet, med deltagande av SGU. Projektet avslutades 2013 och syftade främst till karaktärisering och reservoarmodellering av djupa saltvattenakviferer för lagring av koldioxid. Projektet innefattade bl.a. en beskrivning av vilka parametrar som behövs för modellering av potentiella lagringsplatser. Ett antal potentiella akviferer med olikartad uppbyggnad användes som exempel bl.a. från Sverige, Israel, Tyskland, Spanien och Rumänien (<http://www.co2mustang.eu/>).

Bastor 2 var ett tvåårigt svenskt forskningsprojekt som avslutades 2014. Projektet undersökte förutsättningar för transport och geologisk lagring av koldioxid i Östersjöregionen. Bastor 2-projektet var huvudsakligen finansierat av Energimyndigheten och The Global CCS Institute samt partner från svensk industri. Eftersom fokus i projektet låg på Östersjöområdet inriktades projektet på karaktärisering och bedömning av den mellankambriska Faluddensandstenen. Till skillnad från SGUs undersökning som enbart berörde Sveriges berggrund ingick även de mellankambriska sandstensavsnitten på den Baltiska sidan i Bastor 2-projektets studie (Elforsk 2014). SGU deltog inte i Bastor 2-projektet.

Potentiella platser för geologisk lagring av koldioxid i Norden har sedan 90-talet kartlagts inom ett antal europeiska forskningsprogram. Danmark och Norge har medverkat i projekten JOULE-II 1993–1995 (Holloway m.fl. 1996), GESTCO 1999–2003 (Christensen & Holloway 2004), EU GeoCapacity 2006–2009 (Nielsen m.fl. 2008), CO2StoP (2013) och norska CO₂-lagringsatlasen (Halland m.fl. 2011, 2014). Sverige har dock inte deltagit eller bidragit med information till något av dessa projekt.

NORDICCS

År 2011 samlades ministrar från de fem nordiska länderna i syfte att öka kunskap och kännedom om möjligheten för geologisk lagring av koldioxid inom den nordiska regionen. Resultatet blev the Nordic Competence Centre for CCS – NORDICCS, som skulle pågå över de följande fyra åren. NORDICCS verkade under Toppforskningsinitiativet (TRI) och finansierades av Nordic Innovation under Nordiska rådet tillsammans med R&D-partner från relevant industri. NORDICCS hade som målsättning att skapa ett hållbart expertnätverk och genom sammanställning av kunskap och data demonstrera hur CCS kan bidra till lösningar för klimatförändringar samt skapa förutsättningar för att göra de nordiska länderna till pionjärer inom storskalig implementering av CCS. NORDICCS var uppdelat i sex arbetsgrupper (*work packages, WPs*), vilka tillsammans representerade hela CCS-kedjan med infångning och lagring, samt transport och kommunikation (<http://www.sintef.no/nordiccs>), se figur 1.

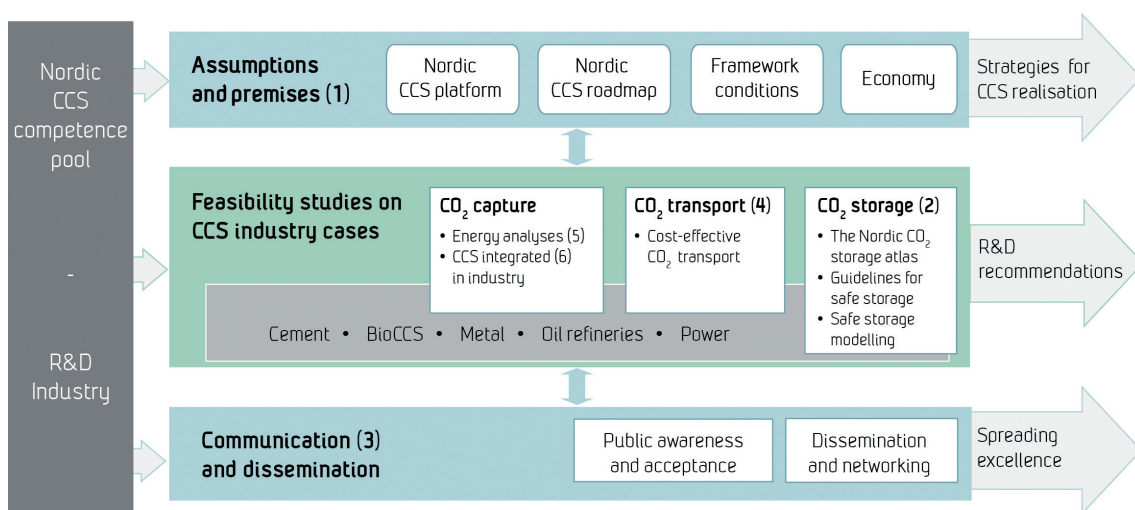
SGU var Sveriges representant i arbetsgruppen WP6, där slutprodukten skulle bli den nordiska CO₂-lagringsatlasen (<https://data.geus.dk/nordiccs/>). Vägen dit skulle nås genom genomgång och uppdatering av existerande information om potentiella lagringsplatser för respektive land. En nyhet i förhållande till tidigare studier var att det inom NORDICCS även skulle särskiljas tydligt mellan lagring i geologiska formationer eller led, och geologiska strukturer eller fällor. Dessutom var inkludering av tillhörande takbergarter nytt i ett europeiskt perspektiv.

WP6 innefattade tre definierade uppgifter:

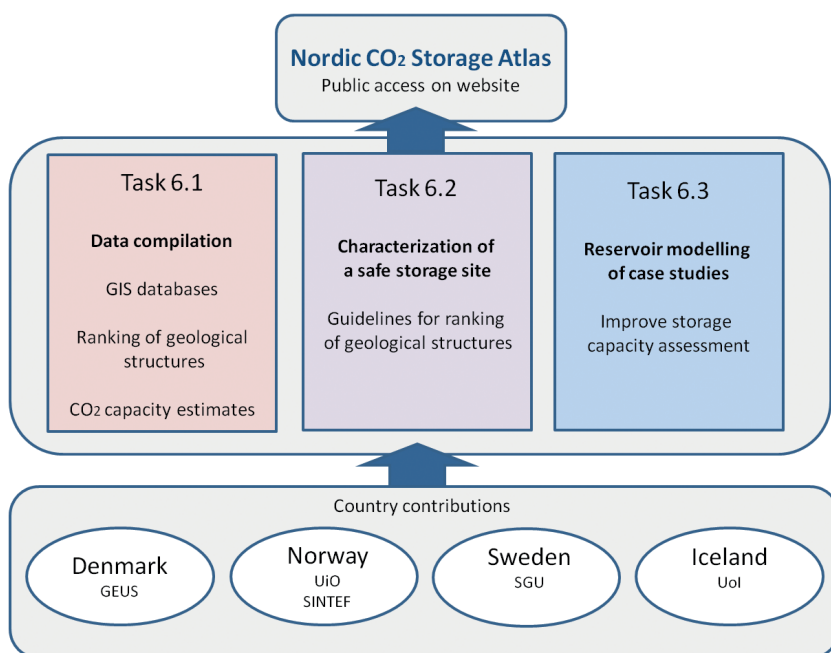
- Data till lagringsatlasen.
- Områdeskaraktärisering och riktlinjer för säker lagring.
- Modellering av utvalda lagringsenheter.

Inom arbetsgruppen medverkade de nordiska geologiska undersökningarna, samt universitet och forskningsinstitutioner, se figur 2.

Förutom definierade aktivitetsområden fick arbetsgruppen WP6 genom utdelning av extra finansiering från intern reservfond möjlighet att göra så kallade *Additional activities*. Dessa bestod av framtagning av metodik för identifiering och urval av de bäst lämpade lagringsom-



Figur 1. Schematisk illustration av NORDICCS koncept. Definierade aktiviteter enligt kontrakt i parentes (©SINTEF).



Figur 2. Schematisk illustration av arbetsgruppen WP6 med definierade aktiviteter (©SINTEF).

rådena, med efterföljande kompletterande geologisk beskrivning och dynamisk modellering, i syfte att ta fram optimerade beräkningar för lagringskapacitet. Resultatet blev ett dokumenterat urval av de 20 bäst lämpade lagringsplatserna (Anthonsen 2015), samt geologiska beskrivningar till lagringsatlasen (Anthonsen m.fl. 2015a, <https://data.geus.dk/nordiccs/>).

Inom NORDICCS uppdaterades årligen en arbetsplan med överenskommelser för leveranser. Följande aktiviteter och leveranser utfördes enligt arbetsplanen inom WP6:

2011–2012 inventerades och dokumenterades befintliga data av betydelse för uppgiften (Anthonsen m.fl. 2012, Anthonsen m.fl. 2013), och behovet för ett optimerat forskningsprogram blev kartlagt (Bergmo m.fl. 2013). Syftet med detta var även att uppmärksamma brist på data och kunskap. Det blev i detta skede beslutat att Finland p.g.a. begränsade möjligheter för koldioxidlagring (Teir m.fl. 2010) inte skulle medverka i arbetet till lagringsatlasen och därmed inte heller i WP6-arbetsgruppen. Inledningsvis togs det även fram ett dokument med definitioner av begrepp och termer i syfte att skapa en gemensam förståelse för tekniska termer inom området för koldioxidlagring (Anthonsen 2014, Anthonsen m.fl. 2015c), se ordlistan i bilaga 1.

2013 påbörjades det huvudsakliga arbetet med produktion och inlagring av data till lagringsatlasen. Huvuduppgiften var att i kartform sammanställa potentiella lagringsområden, indelat i geologiska formationer eller led, lagringsenheter, och eventuella strukturella fällor. Informationen lagrades successivt i en gemensam geodatabas i en webGIS-applikation (<https://data.geus.dk/nordiccs/>). Under 2013 identifierades även de parametrar som är av störst betydelse för att kunna ta fram en metod för klassning av lagringsplatserna. Dessa parametrar användes sedan som underlag för urval av de bäst lämpade lagringsområdena inom Norden (Lothe 2014, Aagaard m.fl. 2014). Under 2013 sammanställdes även den första huvudrapporten, D25, inom WP6. Rapporten beskriver de första beräkningarna av lagringspotential och kapacitet för utvalda lagringsenheter och -fällor (Lothe m.fl. 2014).

2014 fortsatte arbetet med att sammanställa information till lagringsatlasen. Under året sammanställdes information för takbergarter, förkastningar och borrhål, vilka lades till den gemensamma geodatabasen i det nu etablerade webGIS. Ett annat viktigt arbete under 2014 var genomförandet av dynamisk modellering av utvalda lagringsenheter och fällor i syfte att förbättra beräkningarna av lagringskapaciteterna. Detta arbete dokumenterades i den andra huvudrapporten, D26 (Lothe m.fl. 2015). Med hjälp från NORDICCS partner SINTEF PR genomfördes modellering av två lagringsenheter, i två olika områden i södra Sverige (Mortensen m.fl. 2015, Emmel m.fl. 2015), se avsnittet ”Beräkning av lagringskapacitet – Dynamisk” längre fram i denna rapport. Allt eftersom arbetet pågick identifierades och dokumenterades så kallade kunskapsluckor i syfte att visa inom vilka områden det finns brist på data och kunskap (Aagaard & Sundal 2015). Merparten av arbetet inom de så kallade *Additional activities* pågick även under 2014 (Anthonsen 2015).

2015 arbetades det klart med *Additional activities* (Anthonsen 2015, Anthonsen m.fl. 2015a) och de dynamiska modelleringarna. Dessutom blev lagringsatlasen färdig efter granskning och kvalitetskontroll. Atlasen kompletterades med metadata och geologiska beskrivningar (Anthonsen m.fl. 2015a) samt stratigrafisk information (Anthonsen m.fl. 2015b). Färdigställandet av den nordiska CO₂-lagringsatlasen var WP6s huvudleverans (D23). I samband med NORDICCS Final Conference i november 2015 i Oslo presenterades och publicerades *the Nordic CO₂ Storage Atlas* (<https://data.geus.dk/nordiccs/>), tillsammans med huvudrapporten D24 som innehåller riktlinjer för koldioxidlagring i Norden (Bergmo & Emmel 2015).

I tabell 10 i bilaga 2 listas de leveranser som SGU har varit delaktiga i. Merparten av de tekniska rapporter som har tagits fram inom NORDICCS finns tillgängliga på <http://www.sintef.no/nordiccs>.

Förutom de rapporter som ingick som leveranser inom NORDICCS resulterade arbetet i ett antal publikationer i internationella tidsskrifter och presentationer vid internationella möten och konferenser. De abstract och publikationer som SGU medverkat i finns listade i tabell 11 i bilaga 3.

KARAKTÄRISERING AV LAGRINGSENHETER

Inom NORDICCS blev potentiella lagringsevenheter och fallor med en teoretisk lagringskapacitet på mer än 100 Mt identifierade och dokumenterade. För svensk del baserades arbetet mestadels på tidigare studier (Erlström m.fl. 2011), tolkade seismiska undersökningar och information från geofysisk borrhålsdata. Sammantaget identifierades åtta lagringsevenheter, varav en inkluderar en strukturell fälla: Dalders-strukturen (Mortensen 2014). Samtliga lagringsplatser är i djupa salina akviferer inom två områden i södra Sverige: sydöstra Östersjön och sydvästra Skåne (tabell 1).

För att en salin akvifer bedöms lämplig för koldioxidlagring måste den uppfylla följande krav (baserat på Halland m.fl. 2011):

- **Djupet** ska vara minst 800 m vilket är en förutsättning för att koldioxiden ska förbli i superkritiskt tillstånd.
- **Mäktighet** och arealmässig utbredning har betydelse för lagringskapacitet. Sandavsnittens samlade mäktighet ska vara > 15 m.
- **Net/gross** är ett uttryck för andelen sand och därmed volym lämplig för koldioxidlagring, värdet är optimalt > 0,4.
- **Porositeten** ska vara tillräcklig hög för att det ska finnas lagringsutrymme, vilket ska vara > 10 %.
- **Permeabiliteten** ska vara tillräckligt hög för att koldioxidplymen kan flytta på sig, vilket optimalt sett är > 100 mD.
- **Takbergart** ska finnas som försegling av koldioxiden och hindra migration till ytan. Denna ska optimalt sett utgöras av leriga bergarter och ha en mäktighet på > 50 m.

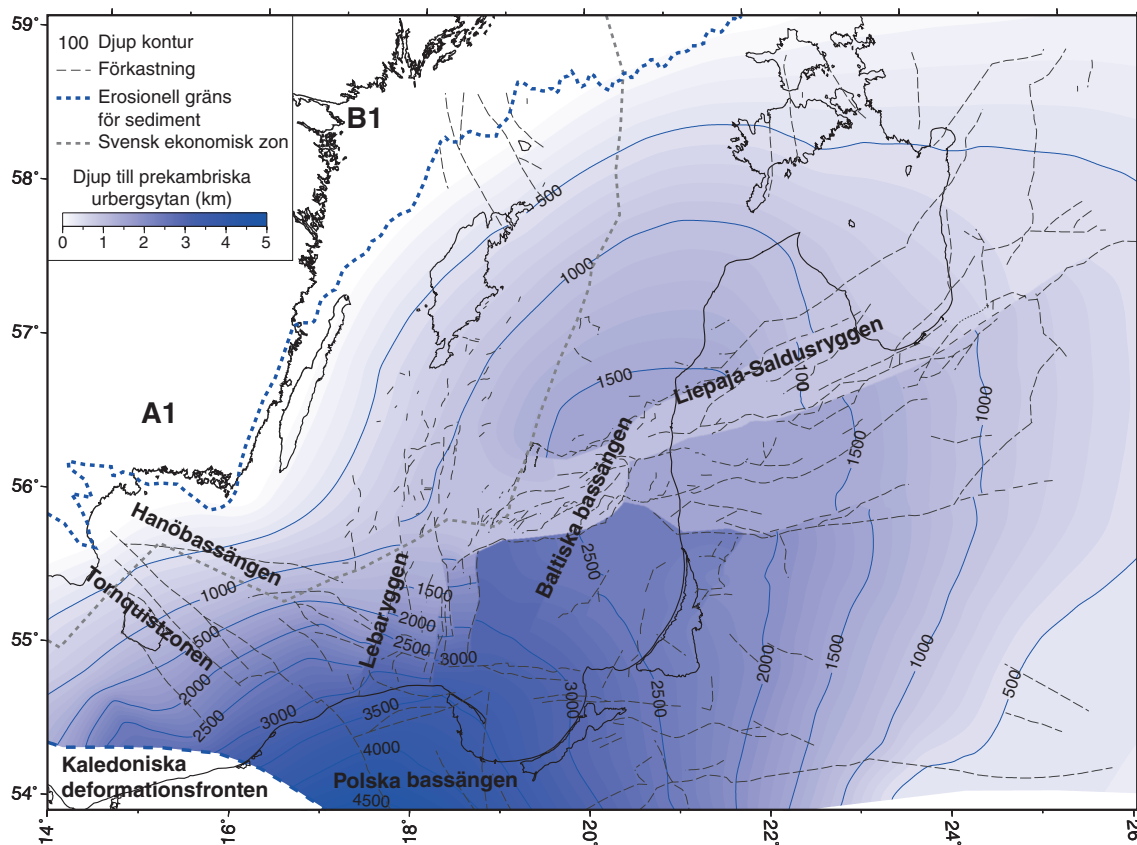
Sydöstra Östersjön

Den paleozoiska sedimentära berggrunden i sydöstra Östersjön tillhör den så kallade Baltiska bassängen, se figur 3. Inom svenskt territorium är den sammanlagda mäktigheten av den sedimentära berggrunden uppemot 2 000 m och domineras av kambrosilurisk berggrund som i de mer distala delarna överlagras av devonska bergarter. Lagerföljden stupar svagt (< 1 °) åt syd-sydöst. För mer information om sediment och sedimentära bassänger, se bilaga 1.

I sydöstra Östersjön har tre potentiella lagringsevenheter identifierats: Faludden, När och Viklau. Vid svensk ekonomisk zon mot sydöst finns en strukturell fälla, den så kallade Dalders-

Tabell 1. Genomsnittliga värden för fysikaliska parametrar för samtliga identifierade lagringsevenheter. Namn på lagringsplats refererar till det eller de stratigrafiska intervall lagringsplatsen spänner över (modifierad från Mortensen 2014, Anthonsen m.fl. 2014).

Namn	Djup (m)	Mäktighet (m)	Net/gross	Porositet (%)	Permeabilitet (mD)
Faludden	830	45	0,90	14	147
När	817	36	0,65	10	50
Viklau	865	57	0,65	8	30
Arnagergrönsand	946	39	0,80	26	400
Undre krita, enhet A	965	29	0,65	25	200
Undre krita, enhet B	776	200	0,65	25	200
Höganäs-Rya	976	180	0,51	23	200
Bunter	1 509	137	0,67	12	300



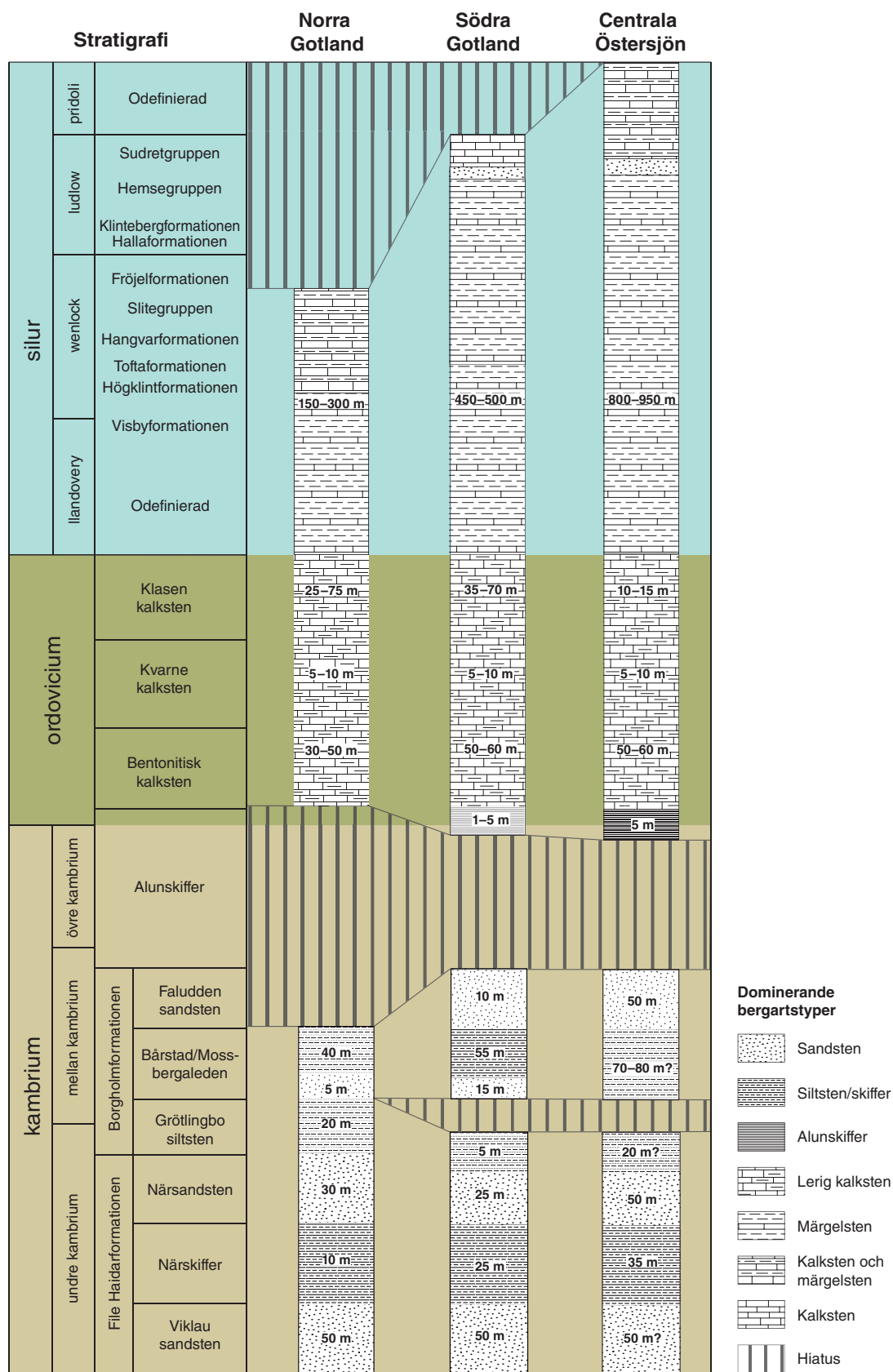
Figur 3. Strukturella element i sydöstra Östersjön (modifierad från Sopher m.fl. 2016).

strukturen (Erlström m.fl. 2011, Mortensen 2014). Lagringsenheterna och den strukturella fällan tillhör två stratigrafiska intervall från kambrisk tid (Anthonsen m.fl. 2015b), se figur 4.

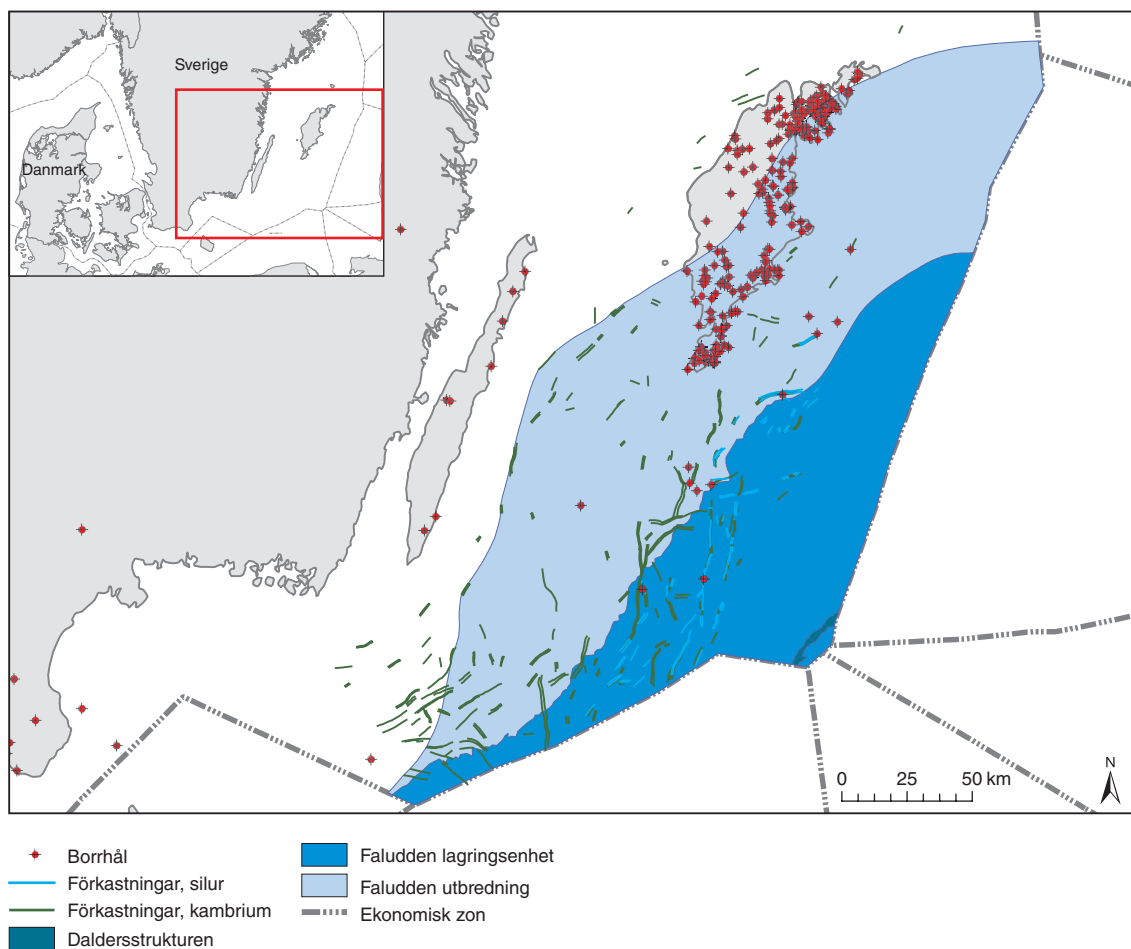
De tre lagringsenheterna, och den strukturella fällan, förekommer även utanför svensk ekonomisk zon. Inom NORDICCS beskrevs enbart de delar som ligger inom svenskt territorium. Det har i OPABs data enbart identifierats ett antal mindre förkastningar i den kambriska och siluriska lagerföljden, och inom NORDICCS ramar har den seismiska aktiviteten inom området bedömts som låg (Anthonsen m.fl. 2014, 2015a).

Faludden

Faludden utgör det övre ledet i Borgholmformationen (Nielsen & Schovsbo 2007), se figur 4. Faluddenledet består av fin- och medelkornig, väl sorterad, karbonatcementerad kvartssandsten, men innehåller även tunna lager med skiffer och siltsten. Sedimenten i Faluddenledet avlagrades under mellersta kambrium. Genomsnittsvärdena för porositet och permeabilitet i Faluddenledet är 14 % respektive 147 mD. Andelen sand i Faluddenledet är hög och sand net/gross uppskattades till 90 %, vilket med en samlad genomsnittlig mäktighet på ca 40 m ger ett sandavsnitt på ca 36 m. Lagringsenheten Faludden representerar den del av Faluddenledet som finns på mer än 800 m djup i den sydöstra delen av utbredningsområdet, se figur 5. Medeldjup till toppen av lagringsenheten ligger på ca 850 m under havsnivå (Mortensen 2014, Anthonsen m.fl. 2014, 2015a, b, Lothe m.fl. 2014).



Figur 4. Schematisk stratigrafisk modell för den paleozoiska berggrunden inom svenskt territorium i sydöstra Östersjön. Den siluriska indelningen är baserad på Gotlands ytberggrund, vilken inte är definierad för de mer distala delarna av Östersjön. Modellen baseras på information från Erlström m.fl. (2009, 2011) samt Nielsen & Schovsbo (2007) (modifierad från Anthonsen m.fl. 2015b).



Figur 5. Faludden, hela ledets utbredning i ljusblått och lagringsenheten i mörkare blått (modifierad från Anthonsen m.fl. 2015a).

Faluddenledet har en regional, kilformad utbredning i sydöstra Östersjön. Ledet kilar ut i en nordöst–sydvästlig riktning från Gotland och till havs mellan Gotland och Öland, och fortsätter sin utbredning mot sydöst och de baltiska länderna, här som *Deimenaformationen*.

Faluddenledet representerar en stratigrafiskt avgränsad, delvis öppen, salin akvifer. Den del inom svenskt territorium som är lämplig för koldioxidlagring har en area på ca 11 000 km² (Mortensen 2014, Anthonsen m.fl. 2015a, b, Lothe m.fl. 2014). Faludden innehåller ett antal mindre antiklina strukturer, där Dalders-strukturen representerar den största (Erlström m.fl. 2011). Eftersom strukturen ingår i lagringsenheten Faludden och OPABs prospekteringsdata rörande strukturen inte varit tillgängliga, är strukturen inte närmare beskriven i denna rapport. Lagringsenheten Faludden överlagras av ca 800 m takbergarter, mestadels silurisk mägersten och ordovicisk kalksten. I de södra delarna av utbredningsområdet överlagras Faludden även direkt av 1–5 m med överkambrisk–underordovicisk alunskiffer.

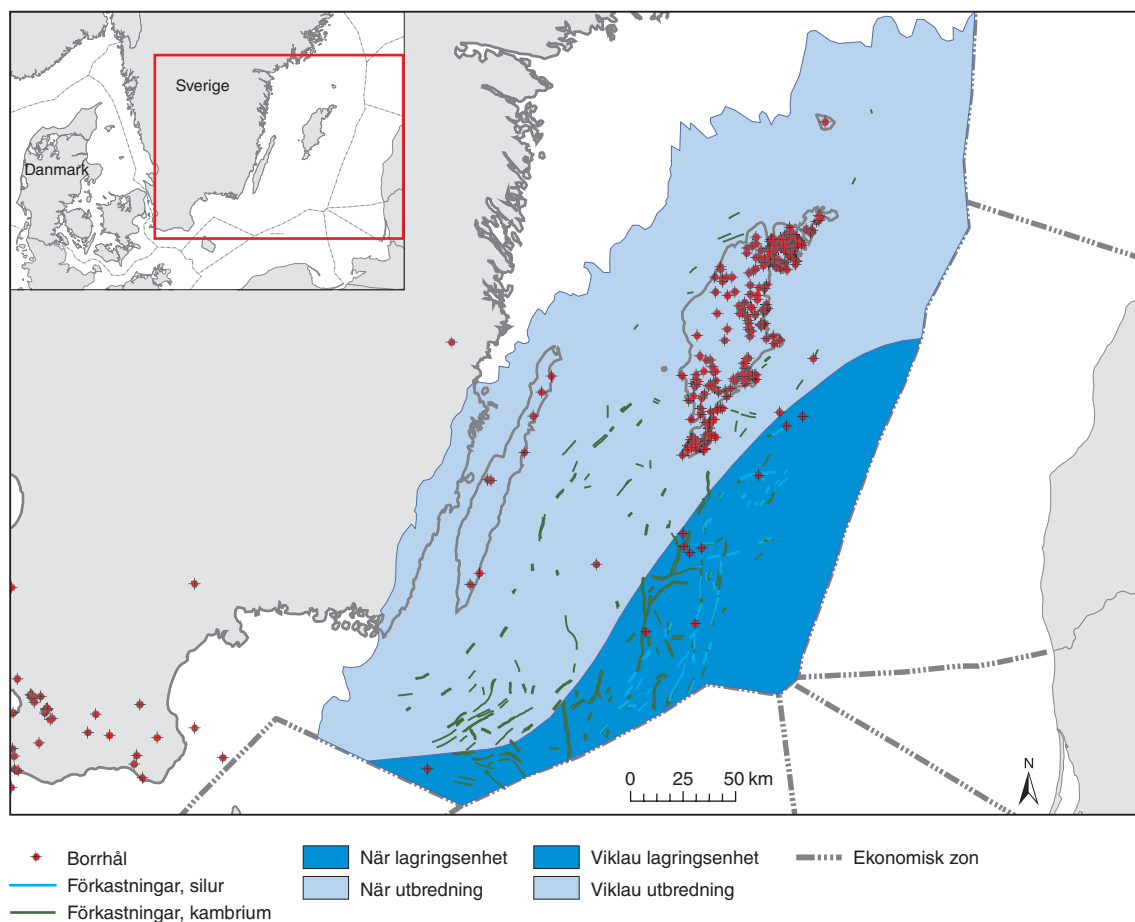
När

Närsandstenen representerar det yngsta ledet i File Haidarformationen (Nielsen & Schovsbo 2007), se figur 4. Sedimenten avsattes sent under tidig kambrium. Närsandstenen domineras av fin- och medelkornig kvartssandsten med mindre mellanlagringar av silt- och lersten. Baserat på de få empiriska mätdata som finns rörande porositet och permeabilitet har dessa egenskaper

bedömts till 10 % respektive 50 mD. Även andelen sandstenslager i sekvensen har varit svårbedömd, men ett net/gross-förhållande på 65 % har bedömts som en rimlig uppskattning. Lagringsenheten När representerar den del av Närsandstenen som finns på djup under 800 m i den sydöstliga delen av utbredningsområdet, till havs sydöst om Gotland, se figur 6. Lagringsenheten har inom svenskt territorium en genomsnittlig mäktighet på 36 m (Mortensen 2014).

Närsandstenen har en regional utbredning i sydöstra Östersjöområdet. Den påträffas som ytberggrund i Kalmarsundsområdet både i de östligaste delarna av Småland–Blekinge och lokalt utmed Ölands västra strand. Likt Faluddenledet, fortsätter Närsandstenen sin utbredning mot sydöst och påträffas även i de baltiska länderna.

Närsandstenen representerar en öppen salin akvifer. Lagringsenheten omfattar ett område på ca 15 000 km² inom svenskt territorium i sydöstra Östersjön, se figur 6. De primära takbergarterna består, som för Faludden, av ordovicisk kalksten och silurisk mörgelsten med en total mäktighet på ca 800 m. Dessutom förekommer det i den kambriska lagerföljden mellan När och Faludden (fig. 7) berggrundsavsnitt som sannolikt även kan ha funktionen som takberggrund p.g.a. en dominans av lersten och välcementerad siltsten. (Mortensen 2014, Anthonsen m.fl. 2015b).



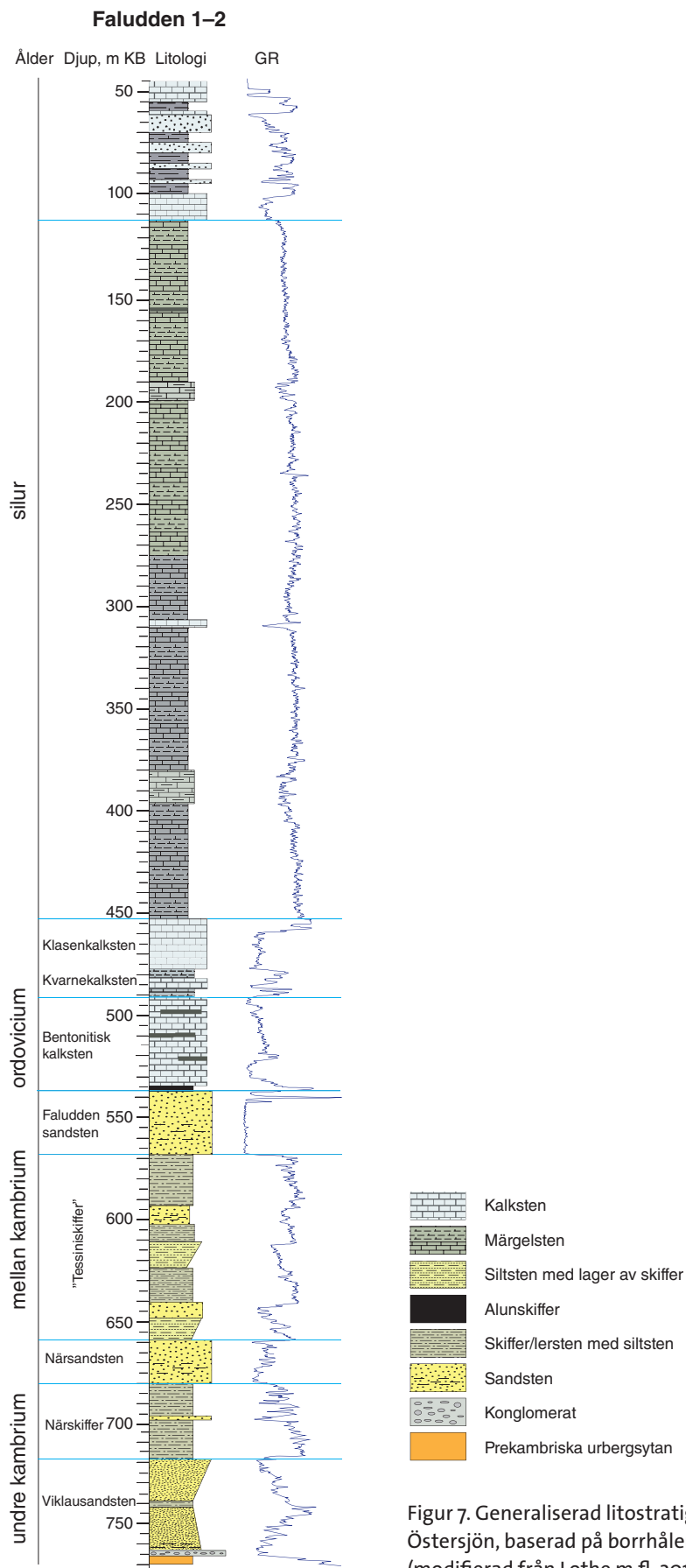
Figur 6. Lagringsenheterna När och Viklau, tolkat med samma utbredningsområde. Total utbredning i ljusblått och lagringsenheter i mörkare blått (modifierad från Mortensen 2014).

Viklau

Sedimenten som bygger upp Viklausandstenen avlagrades under tidig kambrium direkt ovanpå det prekambrika underlaget. Viklausandstenen utgör det äldsta ledet i File Haidarformationen (Nielsen & Schovsbo 2007), se figur 4. Ledet domineras av kvartssandsten, men innehåller även ett bottenkonglomerat samt lager av siltsten och skiffer. Andelen sandstenslager i avsnittet har uppskattats till 65 %. Generellt finns det mycket begränsad information om sandstensens porositet och permeabilitet (OPAB 1976 a, b). Värdena för porositet och permeabilitet uppskattades till 8 % respektive 30 mD. Lagringsenheten Viklau representerar den del av Viklauledet som finns på djup under 800 m i den sydöstra delen av utbredningsområdet, till havs sydöst om Gotland, se figur 6. Lagringsenheten har en genomsnittlig tjocklek på 57 m (Mortensen 2014).

Viklausandstenen har mer eller mindre samma förekomst och utbredning som Närsandstenen, vilket gör att de båda har getts samma areella utbredning i lagringsatlasen (Mortensen 2014), se figur 6. Förutom i södra Östersjön, förekommer ekvivalent till Viklausandstenen även i södra delen av Bottenhavet samt på det svenska fastlandet, dock inte på lämpligt djup för koldioxidlagring (Erlström m.fl. 2011).

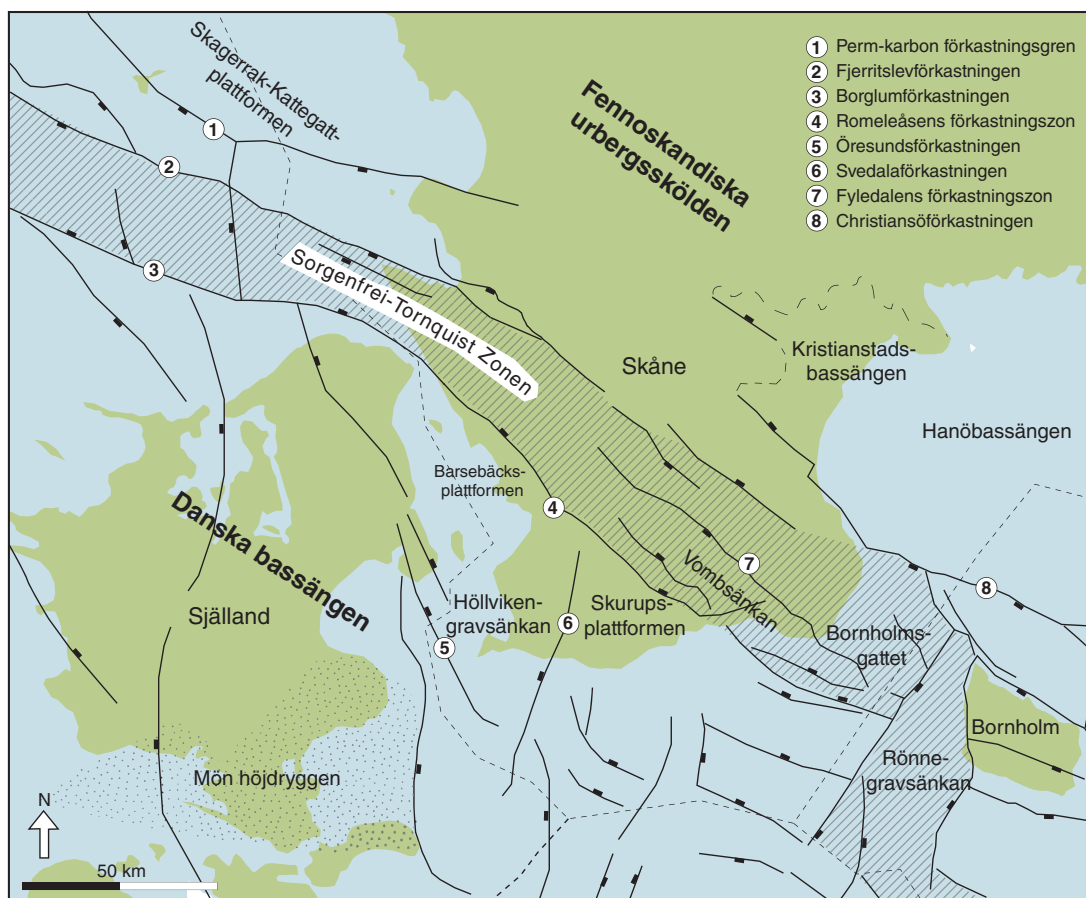
Viklausandstenen representerar en öppen salin akvifer. Lagringsenheten omfattar ett område på ca 15 000 km² inom svenskt territorium i sydöstra Östersjön (Mortensen 2014, Anthonsen m.fl. 2015b). Utbredningen av de individuella sandstenslagren inom lagringsenheten kan karaktäriseras som separata linser med varierande lateral utbredning (M. Erlström, muntlig kommunikation 2014). De primära takbergarterna för lagringsenheten består av samma berggrundsavsnitt som för övriga kambrika lagringsenheter i södra Östersjön. Dessutom förekommer det i den kambrika lagerföljden mellan Viklau och När berggrundsavsnitt med skiffrig bergart som sannolikt även kan fungera som intermediär takberggrund, se figur 7. En generell lagerföljd för södra Östersjön är illustrerad på bakgrund av information från borrhålen Faludden-1 och Faludden-2 i figur 7.



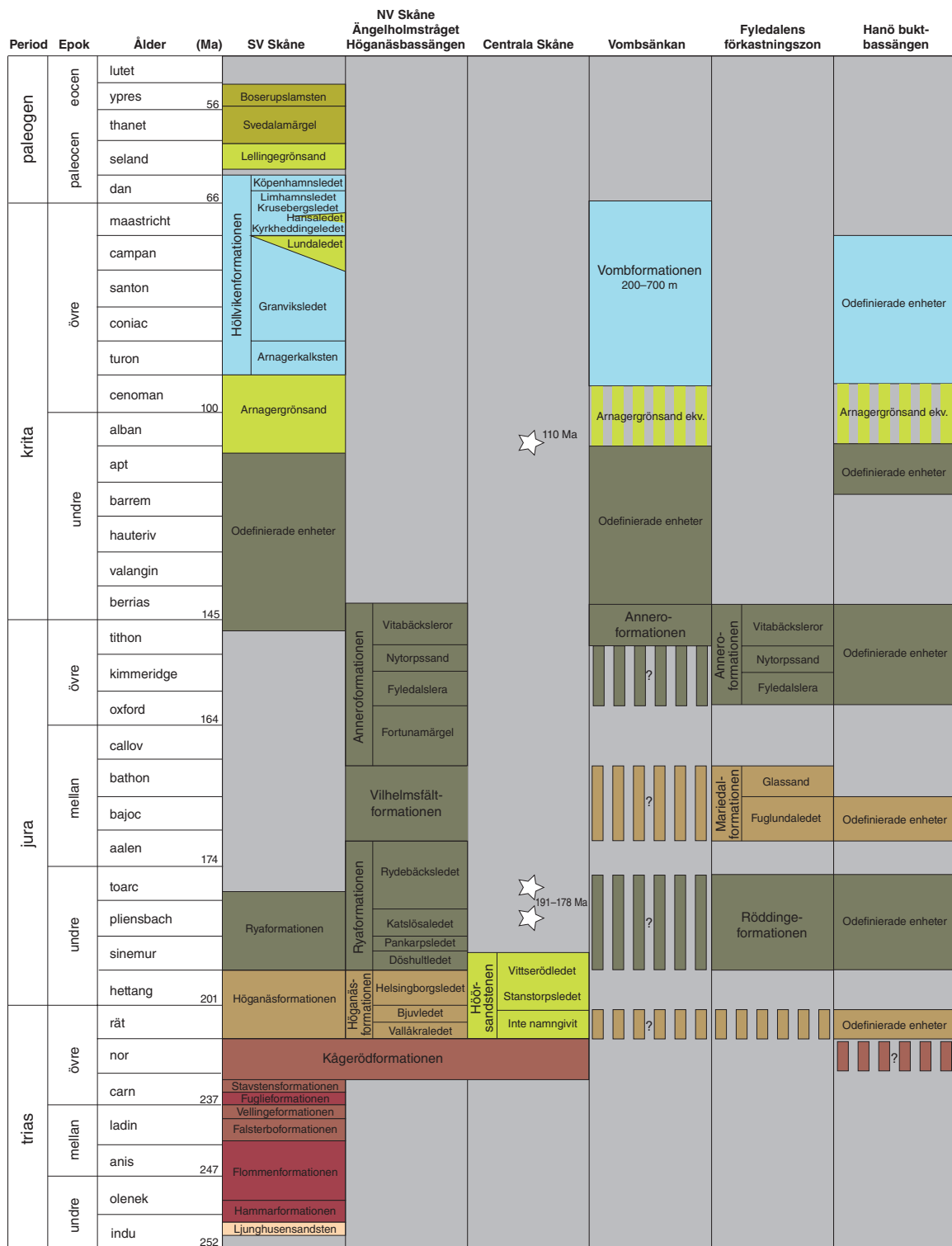
Sydvästra Skåne

Den mesozoiska berggrunden tillhör strukturgeologiskt den östliga delen av Danska Bassängen. Bassängen avgränsas av den Fennoskandiska randzonen som inkluderar Skagerrak-Kattegatt-plattformen och Sorgenfrei-Tornquistzonen där Romeleåsens förkastningszon ingår som dess östliga avgränsning. Strukturellt sett är sydvästra Skåne indelat i Höllvikengravsänkan som avgränsas av Öresundsförkastningen i sydväst och Svedalaförkastningen i öst samt Romeleåsens förkastningszon i nordöst. Den del av sydvästra Skåne som ligger öster om Svedalaförkastningen benämns Skurupsplattformen, se figur 8. Den sedimentära berggrundens mäktighet är uppe mot 3000 m i Höllvikengravsänkan. Inom övriga delar av sydväst Skåne uppgår mäktigheten till ca 2000 m (Sivhed m.fl. 1999). Merparten av lagerserien består av mesozoiska bergarter där den kretaceiska delen är relativt mäktig. Inom Höllvikengravsänkan stupar den paleozoiska och triassiska lagerföljden mot syd-sydväst. Motsatsen gäller för den överlagrande lagerföljden, som i sydvästra Skåne stupar 1–2 ° mot nordöst och mot Romeleåsens förkastningszon.

I sydvästra Skåne är fem potentiella lagringsenheter identifierade: Arnagergrönsand, underkretaceisk sandsten enhet A och B, Höganäs-Rya och Bunter. Lagringsenheterna sträcker sig över fem stratigrafiska intervall (Erlström m.fl. 2011, Mortensen 2014, Anthonsen m.fl. 2015b) med sediment avsatta under tidsperioden trias–krita, se figur 9. Den sedimentära berggrundens uppbyggnad och utbredning i Skåne beror till stor del på tektoniska perioder med antingen tension (trias) eller kompression (krita) i berggrunden, mestadels kopplat till rörelser i de större förkastningssystemen som ingår i den Fennoskandiska randzonen. Den seismiska aktiviteten inom området har i projektet bedömts som låg (Anthonsen m.fl. 2014, 2015a).



Figur 8. Strukturella element i sydvästra Skåne (modifierad från Anthonsen m.fl. 2015b).



Dominerande avlagringsmiljö och berggrund

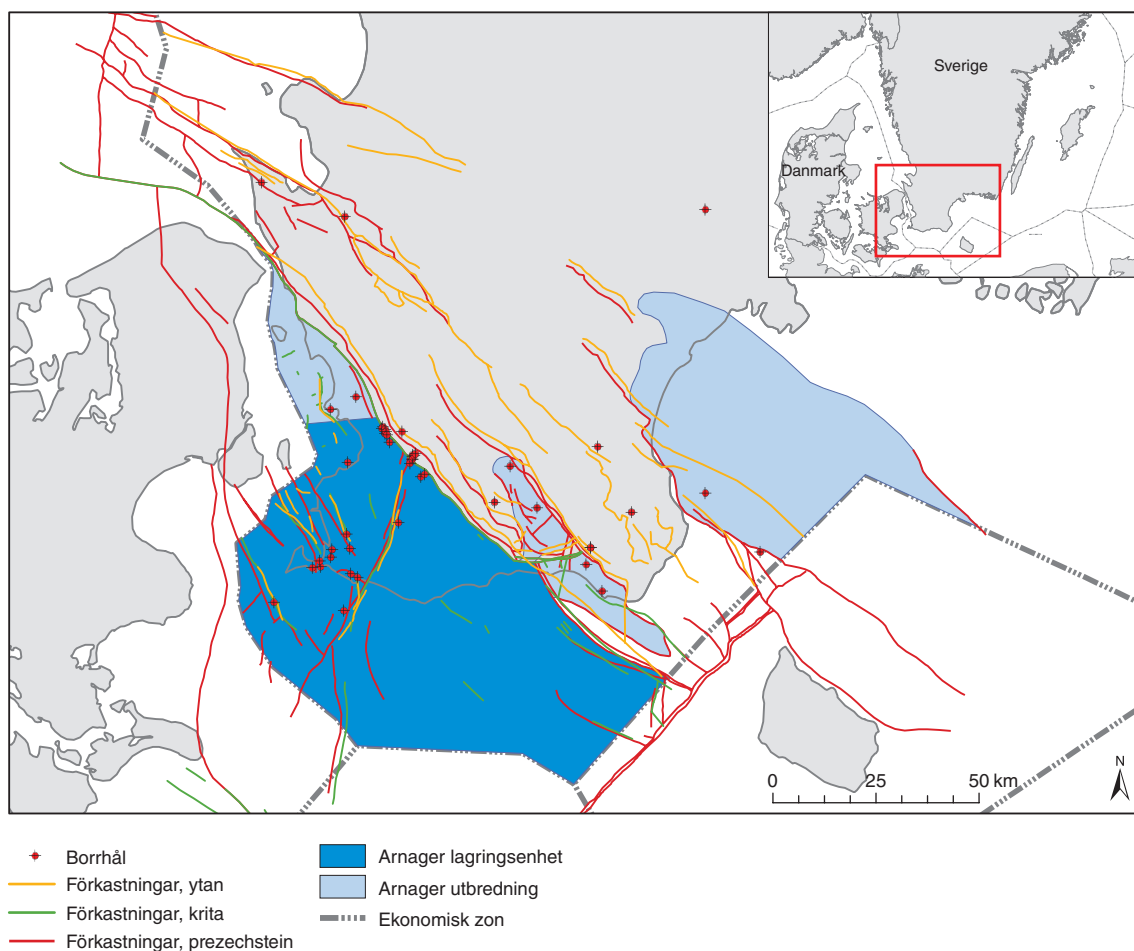
 Kustnära marin blandad siliciklastiskt och karbonater	 Deltaisk sandsten, siltsten, slamsten och kol	 Alluvial arkos	 191-178 Ma Vulkanism i centrala Skåne. Åldrar från Bergelin (2006)
 Grund marin sandsten	 Marginal marina-flodslätt leror, siltsten och sandsten	 Eolisk sandsten	
 Grund marin slamsten och sandsten	 Alluvial lersten och slamsten	 Hiatus	

Figur 9. Schematisk stratigrafisk modell för mesozoisk och kenozoisk berggrund i Skåne. Modellen baseras på information från Norling m.fl. (1993), Grigelis & Norling (1999), Sivhed m.fl. (1999), Erlström m.fl. (2004), Ahlberg m.fl. (2003), Bergelin (2006) samt Erlström & Sivhed (2012) (modifierad från Anthonson m.fl. 2015b).

Arnagergrönsand

Sedimenten i Arnagergrönsand avsattes vid den östliga marginalen till Danska Bassängen under tidsperioden krita, i alban–cenoman. Formationen utgörs av dåligt konsoliderad, fin- och medelkornig glaukonitisk kvartssandsten, med mindre förekomster av pyrit, glimmer, zirkon och fältspat, samt varierande innehåll av karbonat. Lera förekommer i varierande halt i matrix (Sivhed m.fl. 1999). Borrhålsdata indikerar en ganska hög andel sand som uppskattas till 80 %. Arnagergrönsanden har en hög porositet med genomsnittsvärdet 26 % och en, i NORDICCS, uppskattad medelpermeabilitet på 400 mD. Lagringsenheten representerar den del av formationen som finns på djup under 800 m vilket vill säga sydväst om Romeleåsens förkastningszon, se figur 10. Medeldjupet till toppen av lagringsenheten ligger på ca 1200 m under havsnivå, och formationens genomsnittliga tjocklek är 39 m (Mortensen 2014, Anthonsen m.fl. 2014, Anthonsen m.fl. 2015a).

Arnagergrönsanden har en regional förekomst och utbredning i sydvästra Skåne söder om Romeleåsens förkastningszon, i Vombsänkan och Kristianstadbassängen, se figur 10. Förekomsterna av Arnagergrönsand i Kristianstadbassängen och inom Vombsänkan är mindre väl dokumenterade. De uppgifter som finns indikerar mindre mäktigheter och grundare förekomster jämfört med hur förhållandena är i sydvästra Skåne, vilket gör att enheten inte är lämplig för koldioxidlagring i dessa områden (Anthonsen m.fl. 2015b). Den del av Arnagergrönsanden



Figur 10. Utbredning av Arnagergrönsand, hela formationen i ljusblått och lagringsenheten i mörkare blått (modifierad från Anthonsen m.fl. 2015a).

som finns på lämpligt djup för koldioxidlagring finns söder om Romeleåsens förkastningszon, dock med undantag för området kring Landskrona där Arnagergrönsanden utgörs av mer fin-korniga och lågpermeabla sandstenslager. Arnagergrönsanden förekommer i sydlig och västlig riktning även utanför Sveriges territorium, dvs. i Danmark och Tyskland.

Arnagergrönsanden representerar en öppen salin akvifer och delen som är lämplig för koldioxidlagring sydväst om Romeleåsens förkastningszon omfattar en area på ca 5 200 km² inom svenskt territorium. Förekomst av strukturella fällor inom lagringsenheten är mycket begränsad. Lagringsenheten överlagras av en ca 1 200 m mäktig sekvens med takbergarter tillhörande Höllvikenformationen. Takbergarterna domineras av mer eller mindre leriga kalkstenar, se figur 14.

Undre krita

Berggrundsavsnittet som inkluderar de underkretaceiska sandstenslagren som bedöms som potentiella lagringsenheter för koldioxid har ännu inte litostratigrafiskt (se *stratigrafi* i bilaga 1) formellt definierats. Lagren påträffas i stort sett inom samma utbredningsområde som Arnagergrönsanden. Sekvensen från undre krita utgörs av kvartssandsten mellanlagrad av silt- och lersten (Erlström 1994, Lindström & Erlström 2011). Sandstenslagren bedöms ha en medelporositet på 25 %, och en genomsnittlig permeabilitet på 200 mD. Andel sandstenslager i förhållande till lersten bedöms till 65 % (Mortensen 2014, Anthonsen m.fl. 2015b).

Det underkretaceiska sandstensavsnittet har inom projektet delats in i två lagringsenheter på lämpligt djup för koldioxidlagring lokaliserade inom två avgränsade områden: sydvästra Skåne söder om Romeleåsens förkastningszon, enhet A, och södra delen av Vombsänkan söder om Herrestadsförkastningen, enhet B, se figur 11 (Mortensen 2014, Anthonsen m.fl. 2015b).

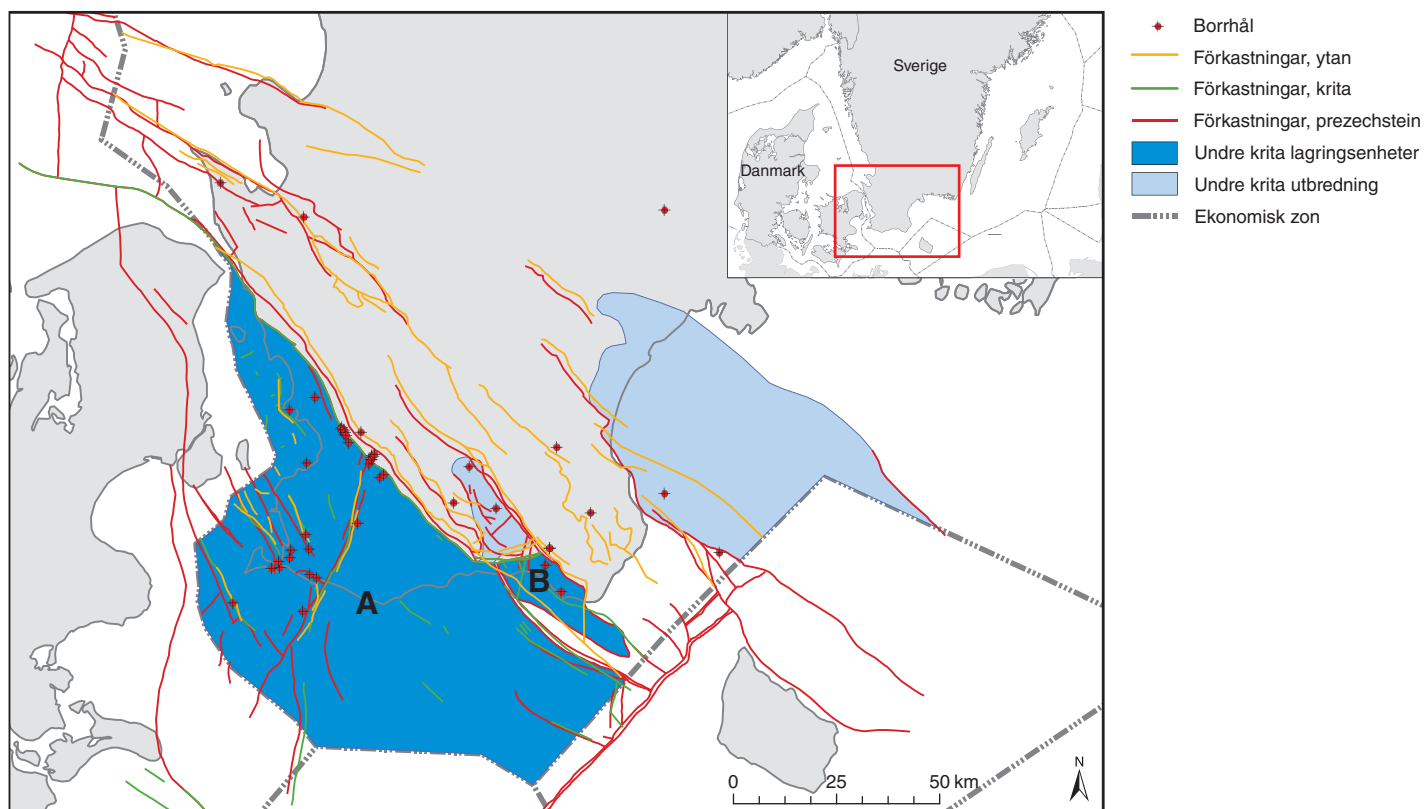
Lagringsenhet A omfattar området söder om Romeleåsens förkastningszon med en area på ca 5 600 km², se figur 11. Lagringsenhet A utgör en delvis öppen salin akvifer som avgränsas mot nordöst av Romeleåsens förkastningszon. Toppen av lagringsenhet A finns på ca 965 m och den genomsnittliga mäktigheten av sekvensen är 29 m (Mortensen 2014, Anthonsen m.fl. 2015b).

Lagringsenhet B i södra delen av Vombsänkan omfattar ett område på ca 300 km², se figur 11. Lagringsenhet B utgör en delvis stängd, förkastningsbetingad enhet, och finns på djup som är mer än 776 m med en genomsnittlig mäktighet på ca 200 m. Det råder en viss osäkerhet kring djup och mäktighet eftersom de litologiska gränserna är mindre väl definierade inom lagringsenhet B (Mortensen 2014, Anthonsen m.fl. 2015b).

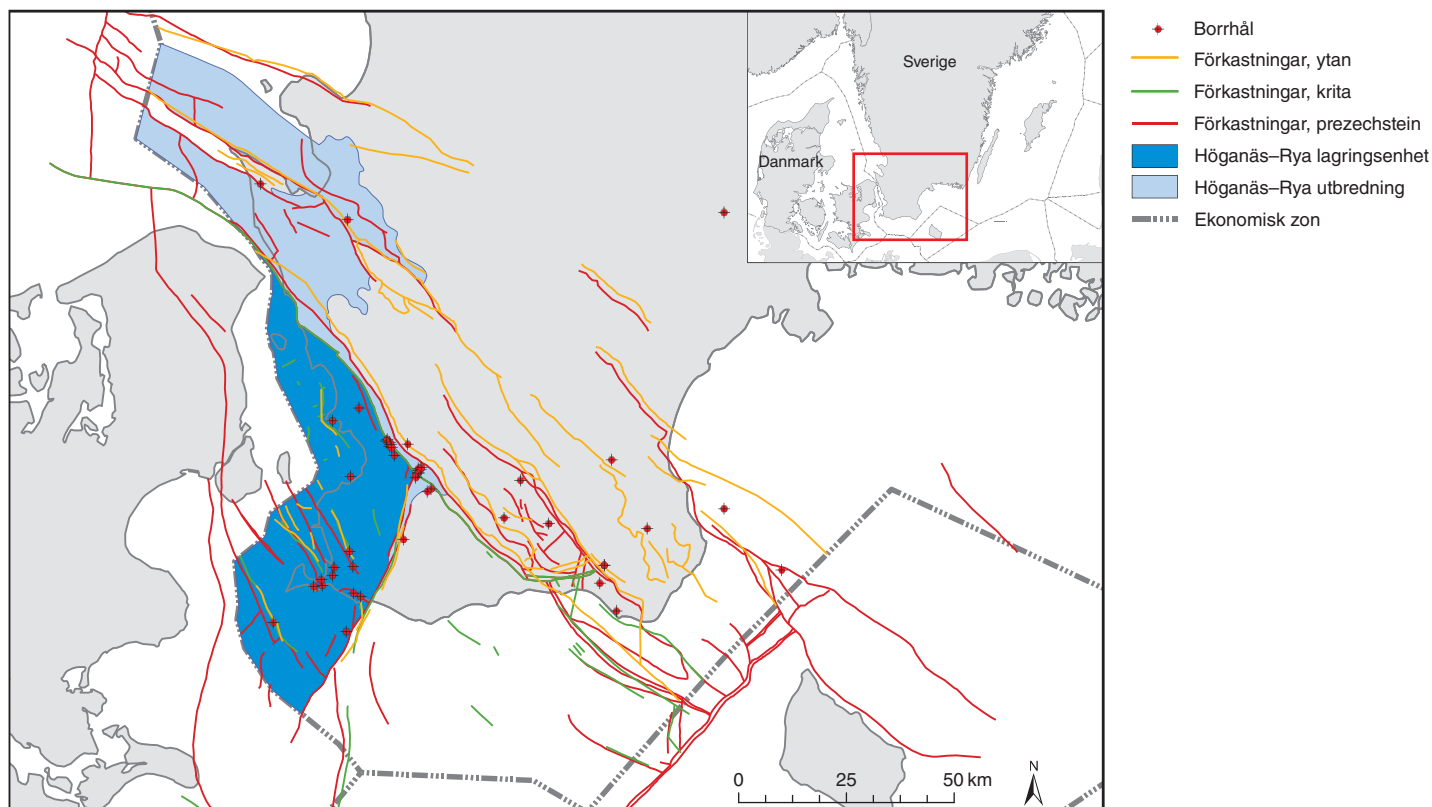
Höganäs–Rya

Lagringsenheten Höganäs–Rya är en heterogen sandstenssekvens som sträcker sig över två formationer: Höganäsformationen och Ryaformationen (Anthonsen m.fl. 2015b), se figur 9. Sedimenten i Höganäs–Rya-sekvensen avlagrades inom den östliga delen av Danska Bassängen under sen rät–tidig jura. Enheten består av en växellagrad sekvens av sand- och lerstenslager med inslag av skiffer och kolhorisonter. Sandavsnittet är linsformade med stor lateral utbredning, där individuella sandavschnitt kan ha en mäktighet på uppemot 20 m och generellt består av fin-kornig, ren kvartssandsten (Erlström m.fl. 2011). På grund av den heterogena litologin finns det stor variation i porositet och permeabilitet. Genomsnittsvärdet för porositet i sandstensavsnitten är 23 %, och medelpermeabiliteten har uppskattats till 200 mD. Minsta djup till toppen av lagringsenheten är 976 m under havsnivå, och den genomsnittliga mäktigheten av sekvensen är 180 m, där sandstenslagren utgör ca 50 % (Mortensen 2014, Anthonsen m.fl. 2014, 2015a, Lothe m.fl. 2014).

Formationerna Höganäs och Rya är lokaliserade i västra Skåne inom svenskt territorium, se figur 12, men finns även delvis representerade i Danmark, Norge och Tyskland, här som ekvivalenten *Gassumformationen*. Den del av Höganäs–Rya-sekvensen som är lämplig för koldioxid-



Figur 11. Undre krita, indelat i lagringsenhet A och lagringsenhet B, total utbredning i ljusblått och lagringsenheter i mörkare blått (modifierad från Mortensen 2014).



Figur 12. Utbredning av Högåns-Rya, formationernas utbredning i ljusblått och lagringsenheten i mörkare blått (modifierad från Anthonsen m.fl. 2015a).

lagring är delvis förkastningsbetingad; i nordöst av Romeleåsens förkastningszon och i sydöst av Svedalaförkastningen. På så sätt är en stor del av lagringsenheten Höganäs–Rya definierad inom Höllvikengravsänkan (Mortensen 2014, Lothe m.fl. 2014, Anthonsen m.fl. 2015a).

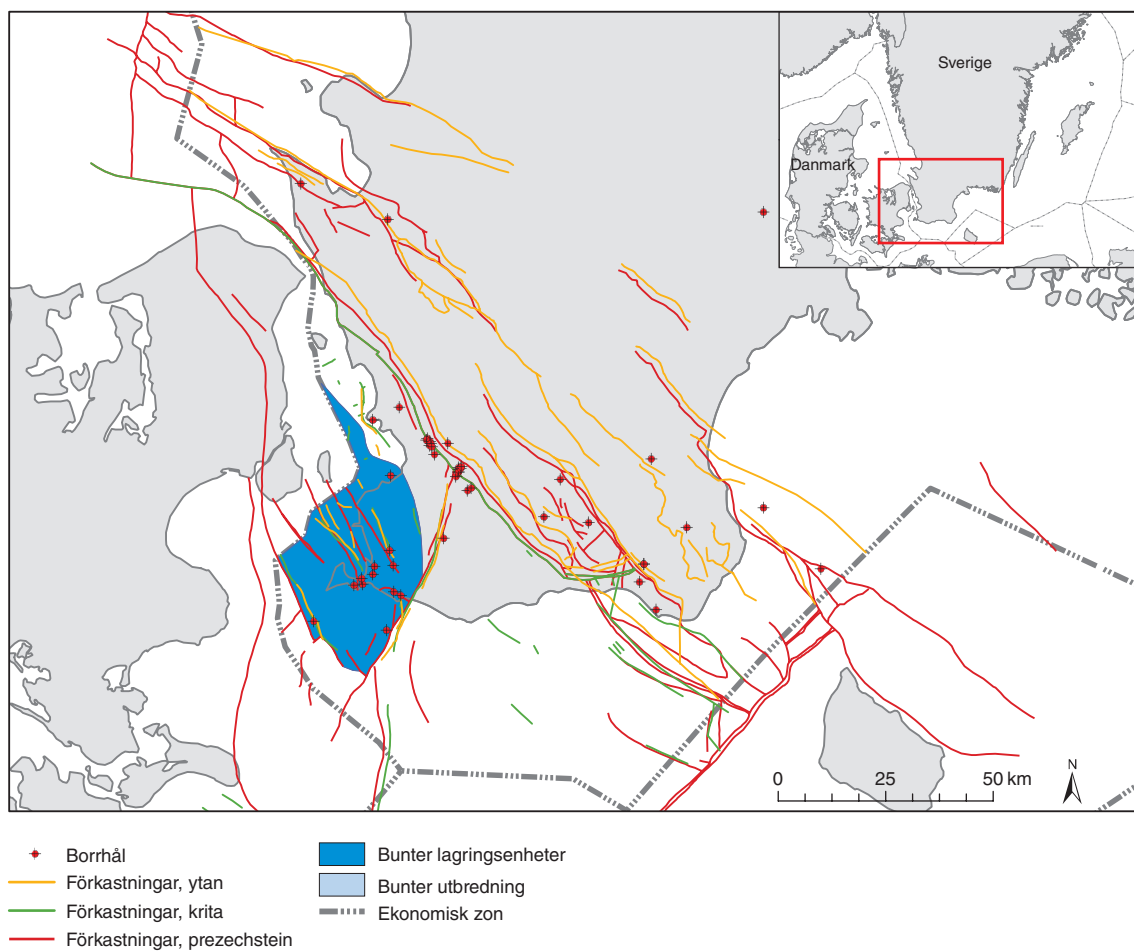
Lagringsenheten Höganäs–Rya representerar en delvis förkastningsbetingad, delvis öppen salin akvifer, där delen som är lämplig för koldioxidlagring omfattar en area på ca 2 100 km² inom svenskt territorium (Mortensen 2014, Anthonsen m.fl. 2015b). Lagringsenheten inkluderar inga kända strukturella fällor, dock kan det finnas möjlighet för att individuella linsformade sandavsnitt kan fungera som stratigrafiska fällor (Erlström m.fl. 2011). Primär takbergart för Höganäs–Rya-lagringsenheten är Höllvikenformationen med en mäktighet på ca 1 200 m, se figur 9.

Bunter

Inom NORDICCS, och därmed även i denna rapport, används samlingsnamnet ”Bunter” för de triassiska sandstensavsnitt som inom svensk stratigrafi tillhör Ljunghusensandstenen och Hammarformationen, se figur 9. Sandstensavsnitten är ekvivalenta till delar av den dansk-tyska *Buntsandstein* (eng. *Bunter Sandstone*, Erlström & Sivhed 2012). Sedimenten i undre delen av lagringsenheten, motsvarande Ljunghusensandstenen, avsattes i tidig trias under indu (Erlström & Sivhed 2012). Denna del av lagringsenheten finns enbart representerad i de djupaste delarna av Höllvikengravsänkan och utgörs här av väl sorterad, medel- och grovkornig kvartssandsten med en rödaktig ton. Mellanliggande lager med siltsten förekommer. Uppåt i enheten sker en gradvis övergång till lerigare sandstenar, vilket motsvarar övergången till Hammarformationen med sediment avsatta under indu–olenek. Denna del av sekvensen utgörs av grön- och rödaktig, finkornig gråvacka som mellanlagras av grovkornig, röd arkosisk sandsten (Erlström & Sivhed 2012), se figur 14.

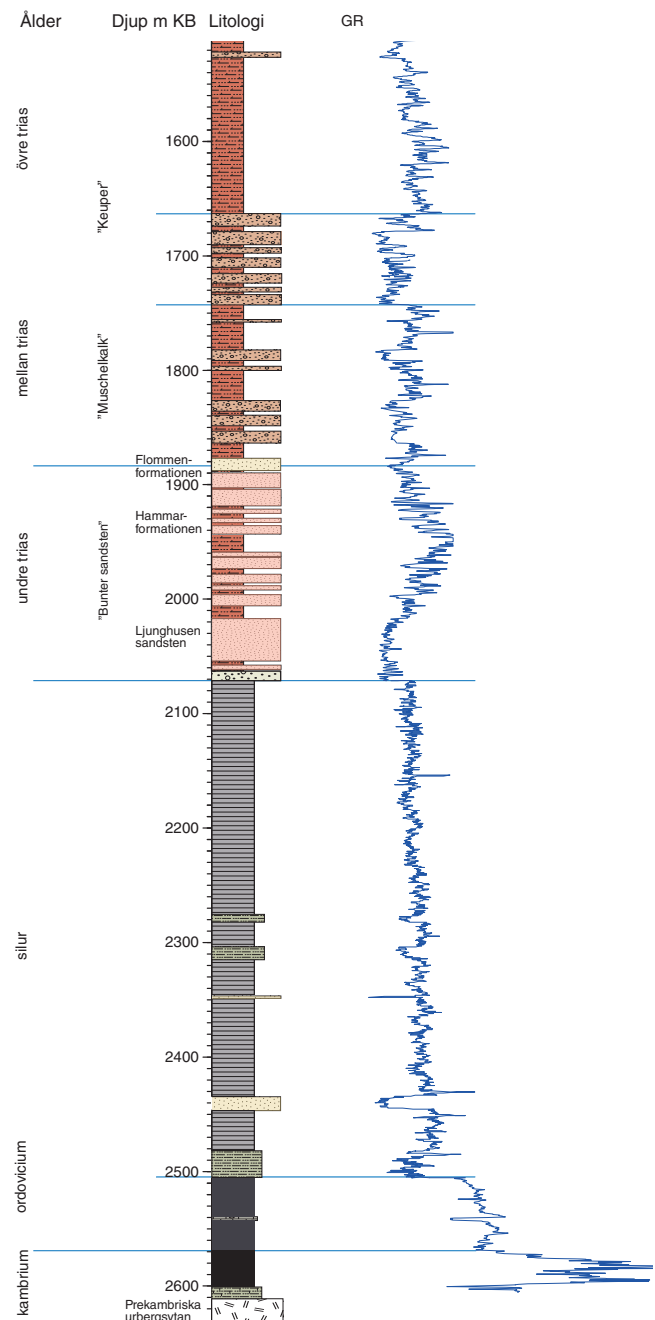
Djupet till toppen av lagringsenheten är mer än 1 500 m och lagringsenhetens genomsnittliga mäktighet är 137 m. Andel sandstenslager uppskattas till 67 %. Mängden data för porositet och permeabilitet är begränsat, och genomsnittsvärden på 12 % respektive 59 mD har beräknats utifrån OPABs och SGUs borrhålsrapporter. Dock uppskattas medelpermeabiliteten att vara något högre och har inom NORDICCS bedömts till 300 mD (Mortensen 2014, Anthonsen m.fl. 2015b). Den primära takbergarten för lagringsenheten Bunter är, liksom för övriga salina akviferer i sydvästra Skåne, den ca 1 200 m mäktiga Höllvikenformationen.

Inom svenskt territorium är Bunter begränsad till Höllvikengravsänkan, där dess utbredning definieras av Svedalaförkastningen i öst och Öresundsförkastningen i väst, se figur 13. Regionalt sett fortsätter ”Bunter”-sandstenen sin utbredning ut över den svenska ekonomiska zonen mot Danmark och Tyskland. Lagringsenheten Bunter tolkas som en delvis förkastningsbetingad, delvis öppen salin akvifer (Anthonsen m.fl. 2015b) och har i Sverige hela sin utbredning inom lämpligt djup avseende koldioxidlagring. Förekomst och utbredning av lagringsenheten omfattar inom svenskt territorium ett område på ca 1 100 km² (Erlström & Sivhed 2012, Mortensen 2014), se figur 13. En generell lagerföljd för sydvästra Skåne, baserad på borrhålet Höllviksnäs-1, visas i figur 14.



Figur 13. Utbredning av Bunter, där lagringsenheter är tolkad som sammanfallande med den totala utbredningen (modifierad från Mortensen 2014).

Ålder	Djup m KB	Litologi
-------	-----------	----------



24 (52)

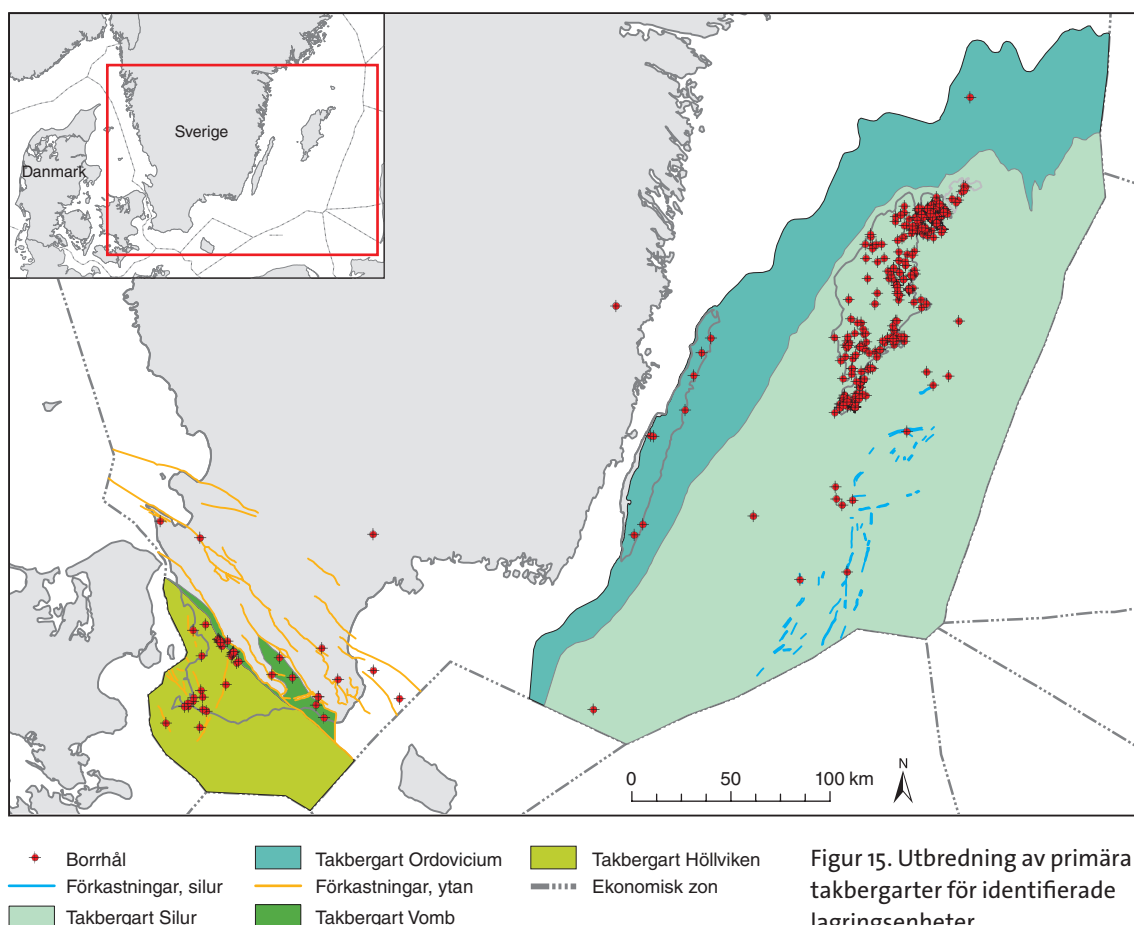
KARAKTÄRISERING AV TAKBERGARTER

I arbetet med att skapa en lagringsatlas som var så komplett som möjligt (<https://data.geus.dk/nordiccs/>) skulle även takbergarter för samtliga identifierade lagringsenheter inkluderas och karaktäriseras (Mortensen 2014, Anthonsen m.fl. 2014, Lothe 2014, Lothe m.fl. 2014, 2015). Takbergarter har till syfte att hålla koldioxiden på plats inom lagringsenheten och därmed hindra migration till ytan. Inom NORDICCS definierades en rad parametrar av avgörande betydelse för karaktärisering av takbergarter (Bergmo 2013, Lothe 2014) baserat på Chadwick m.fl. (2008), Halland m.fl. (2011), IEA-GHG (2009).

För att kunna bedöma om en geologisk sekvens är lämplig som takbergart bör den uppfylla en rad viktiga förutsättningar:

- **Mäktighet** är avgörande för säker lagring utan migration av koldioxid till ytan, och ska optimalt vara > 50 m.
- **Utbredning** ska vara kontinuerlig och täcka det totala lagringskomplex.
- **Förkastningar** ska ha låg intensitet och utsträckning för att minska potentiella migrationsvägar.
- **Litologin** utgörs optimalt av leriga bergarter för att uppnå tät försegling.
- **Multipla takbergarter** består av mer än en sekvens förseglande takbergarter ovanför lagringsplatsen, och minskar på så sätt ytterligare risken för migration av koldioxid.

Identifierade takbergarter i södra Sverige består i huvudsak av marina, mer eller mindre leriga karbonater. Utöver de primära takbergarterna (fig. 15) högst upp i den sedimentologiska lager-



följden finns det även ett antal intermediära takbergarter, som därmed kan fungera som multipla takbergarter för de lagringsenheter som finns längst ner i lagerföljden, se stratigrafiska scheman i figurerna 4 och 9. Om en lagringsenhet består av en växellagrad sekvens, som i Höganäs–Rya, kan de individuella lagren av lerstenar lokalt fungera som intermediära takbergarter (Erlström m.fl. 2011).

Sydöstra Östersjön

I sydöstra Östersjön har två primära takbergarter identifierats (Erlström m.fl. 2011, Mortensen 2014), tillhörande ett antal stratigrafiska intervall från ordovicisk och silurisk tid, se figur 4. Trots att sekvensen sträcker sig över ett antal stratigrafiska intervall gjordes inom NORDICCS en litologisk indelning med enbart två takbergarter: *ordovicisk kalksten* och *silurisk mägersten* (Anthonsen m.fl. 2015b).

Förutom de primära takbergarterna finns det mellan lagringsenheterna Viklau och När en intermediär takbergart med en genomsnittlig mäktighet på 27 m tillhörande det stratigrafiska intervallet *Närskiffer*. Dessutom finns det mellan lagringsenheterna När och Faludden ytterligare en intermediär takbergart med en genomsnittlig mäktighet på 93 m. Denna takbergart utgörs av *Grötlingboledet* och *Bårstad-Mossbergaleden* (tidigare informellt gemensamt benämnd *Tessiniskiffer*). Förutom dessa två intermediära takbergarter av nämnvärd mäktighet och kontinuerlig utbredning, finns det även i de södra delarna av Östersjön den några få meter mäktiga *Alunskiffer* som överlagrar lagringsenheten Faludden. Eftersom denna enbart påträffas i delar av området och med liten mäktighet (Erlström m.fl. 2011) har den inte kartlagts eller inkluderats inom NORDICCS.

Alla identifierade takbergarter, förutom Alunskiffern, sträcker sig i sydöstlig riktning ut över svensk ekonomisk zon, men här redogörs enbart för delarna som finns inom svenskt territorium. Inom regionen uppskattas förkastningsaktiviteten inom de primära takbergarterna som mycket låg (Lothe 2014). Endast i den siluriska lagerföljden har det identifierats ett antal mindre förkastningar (OPAB 1975a, b), se figur 15.

Ordovicisk kalksten

Den ordoviciska kalkstenssekvensen utgör den undre av de två primära takbergarterna i sydöstra Östersjön. Sekvensen har ännu ingen formell indelning, men OPAB har gjort en informell indelning av dessa, vilken används inom NORDICCS (OPAB 1976a, b). Från botten utgörs dessa av *Bentonitisk kalksten*, *Kvarnekalksten* och *Klasenkalksten*, se figur 4. Den samlade mäktigheten av denna sekvens uppgår ovanför lagringsenheterna till nästan 80 m. Mäktigheten tilltar mot sydöst och tunnar ut mot nordväst, där de undre 5–20 m av enheten går i dagen på västra delen av Öland. Sekvensen består av mer eller mindre leriga kalkstenar där sand net/gross har uppskattats till 0 % (Anthonsen m.fl. 2015b).

Bentonitisk kalksten består av lerig kalksten med lager av bentonit. Bentoniten är ett väl isolerande material med mycket låg vertikal konduktivitet. Enhetens mäktighet är ca 50 m ovanför lagringsenheterna, och tilltar likt de övriga ordoviciska kalkstenarna i mäktighet mot sydöst.

Kvarnekalkstenen utgörs av ett fåtal meter lersten mellanlagrad av mikrokristallin kalksten.

Klasenkalkstenen representerar den övre delen av den ordoviciska kalkstenssekvensen, och består av lerig kalksten med tunna inslag av skiffer. Genomsnittsmäktigheten ovanför lagringsenheterna är ca 35 m, men uppgår till 64 m i de djupare delarna av bassängen.

Silurisk mägersten

Den samlade beteckningen *silurisk mägersten* utgör den övre av de två primära takbergarterna i sydöstra Östersjön. På Gotland indelas sekvensen i 19 olika formationer som i sin tur delas in

i tre större grupper, se figur 4. Förutom den understa delen av sekvensen går alla formationer i dagen på Gotland, och den totala mäktigheten varierar från ca 300 m i nordväst till uppemot 900 m i sydöst. Ovanför lagringsenheterna har denna takbergarten en mäktighet på 600–700 m (Anthonsen m.fl. 2015a, b).

Den siluriska mörkstensekvensen domineras av mörksten mellanlagrad av kalksten och siltsten, där den uppskattade sand net/gross har bedömts till 8 %. Små förkastningar och lineament uppträder relativt frekvent i den siluriska lagerföljden, dock inte av en sådan omfattning att det bedöms resultera i någon påtaglig seismisk aktivitet (Erlström m.fl. 2009).

Sydvästra Skåne

Förutom de primära takbergarterna i sydvästra Skåne, vilka utgörs av *Höllvikenformationen* sydväst om Romeleåsens förkastningszon och *Vombformationen* i Vombsänkan (Anthonsen m.fl. 2015b), finns det mellan Bunter och Höganäs–Rya en hundratals meter mäktig sekvens av triassiska bergarter bestående av lerstenar och arkoser som inom vissa delar av sekvensen har lämpliga egenskaper för att agera intermediär takbergart, se figur 14. Lerstenarna har bra egenskaper som takbergart medan de mer sandiga arkosavsnitten kan fungera som intermediär lagringsplats för eventuell migrerande koldioxid. Dessutom kan de mellanlagrande lerstens- och skifferavsnitten i lagringsenheten Höganäs–Rya lokalt även fungera som intermediära takbergarter. I sydvästra Skåne finns även ett fåtal meter mörk skiffer av apt ålder. Denna är ännu inte stratigrafiskt definierad och dess utbredning är därmed osäker, men sannolikt kontinuerlig (Sivhed m.fl. 1999). Den mörka skiffern från apt påträffas mellan det underkretaceiska sandstensavsnittet och Arnagergrönsanden och bedöms trots dess ringa mäktighet även den fungera som intermediär takbergart.

Inom NORDICCS är det enbart Höllviken- och Vombformationerna som har kartlagts och karaktäriserats som takbergarter för sydvästra Skåne, inklusive Vombsänkan. Höllvikenformationen sträcker sig i sydvästlig riktning mot Tyskland och Danmark ut över svensk ekonomisk zon, men här redogörs enbart för de delar som är lokaliserade inom svenskt territorium. Generellt bedöms den seismiska aktiviteten i förekommande förkastningar som låg.

Höllvikenformationen

För sydvästra Skåne, i området söder om Romeleåsens förkastningszon, är det Höllvikenformationen som utgör den primära takbergarten, se figur 15. Formationen har en kontinuerlig utbredning med fortsättning mot söder och västerut över svensk ekonomisk zon och har en mäktighet på 900–1 700 m. Höllvikenformationen domineras av mer eller mindre lerig kalksten och krita som mellanlagras av lera samt silt- och sandsten. Andelen kalksten och krita ökar generellt mot sydväst och sand net/gross-förhållandet varierar över området, men har ett uppskattat medelvärde på 9 % (Anthonsen m.fl. 2015b).

Vombformationen

Vombformationen är primär takbergart för Undre krita (lagringsenhet B) i Vombsänkan, se figur 15. Vombformationen är delvis ekvivalent till Höllvikenformationen och består av en heterogen lagerföljd med graderande sandig kalksten, silt- och sandsten, mörksten, lersten, konglomerat och tunna lager med kol. Vombformationen täcker hela Undre krita (lagringsenhet B) med en mäktighet runt 600 m. På grund av det höga sand net/gross-förhållandet, som uppskattas till 60 %, råder det en del osäkerhet rörande kvalitén och lämpligheten av denna formation som takbergart.

BERÄKNING AV LAGRINGSKAPACITET

Efter att en lagringsenhet definierats med utbredning och djup, kan man med hjälp av sand net/gross-förhållandet, porositet och CO₂-densitet (Chadwick m.fl. 2008) beräkna hur stor mängd koldioxid lagringsenheten kan rymma. Denna uppskattning motsvarar egentligen det totala porutrymmet inom lagringsenheten. För att uppnå ett så realistiskt resultat som möjligt är det därför nödvändigt att också inkludera en effektivitetsfaktor i beräkningarna. Skillnaden är ofta ganska stor mellan de två resultaten, som benämns teoretisk kapacitet och effektiv kapacitet. Bägge bygger på så kallade *statiska* beräkningar för kapacitet, eftersom de inte testas vid simulering eller modellering. Om man däremot testat de statiska kapacitetsberäkningarna vid olika datorsimuleringar och -modelleringar, så kallas beräkningarna *dynamiska*. Nedan redogörs för de olika beräkningsmetoder som har använts inom NORDICCS, och även för uppnådda resultat.

Statisk

Beräkningar för statisk kapacitet grundar sig på volymen av lagringsenheten tillsammans med sand net/gross-förhållandet, porositet och koldioxidens densitet vid aktuellt djup. Det finns inget standardiserat sätt att räkna ut kapacitet, men inom NORDICCS användes metodiken från EU GeoCapacity (Vangkilde-Pedersen 2009) som är användbar för sedimentära lagringsenheter och fällor, se nedan.

Teoretisk lagringskapacitet är det totala tillgängliga porutrymmet i reservoarbergarten, och definieras med ekvationen

$$TH_MCO2 = V \times N/G \times \phi \times \rho_{CO2r}$$

TH_MCO2	teoretisk lagringskapacitet
V	volym av lagringsenhet eller fälla
N/G	genomsnittlig sand net/gross rate
ϕ	genomsnittlig reservoarporositet
ρ_{CO2r}	CO ₂ -densitet vid reservoarbetaingelser

Effektiv lagringskapacitet är den del av det tillgängliga porutrymmet i reservoarbergarten som teoretiskt sett kan uppta koldioxid, och tar hänsyn till en så kallad *storage efficiency factor*, S_{eff} . Effektiv lagringskapacitet definieras med ekvationen

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

För de svenska kapacitetsberäkningarna inom NORDICCS har en första uppskattning gjorts för teoretisk kapacitet. De använda fysikaliska parametrarna är listade i tabell 1 i avsnittet ”Karaktärisering av lagringsenheter”. I beräkningar för effektiv kapacitet användes en *storage efficiency factor*, som i detta sammanhang antogs vara 2 % baserat på U.S. DOE:s metodik för formationer (Goodman m.fl. 2011). Resultaten för statiska beräkningar av lagringskapacitet i miljoner ton (Mt) för de åtta identifierade lagringsenheterna visas i tabell 2.

Dynamisk

I förhållande till tillgänglighet av data blev dynamiska modelleringar genomförda inom NORDICCS på två av de åtta identifierade lagringsenheterna i Sverige, Faludden och Arnagergrönsand (Mortensen m.fl. 2015, 2016, Lothe m.fl. 2015, 2016). Syftet med dynamiska modelleringar är att förbättra den generella förståelsen av reservoarbetaenden, och därmed uppgradera statiska uppskattningar. Dynamiska modelleringar kan göras med olika metoder och program-

Tabell 2. Statisk lagringskapacitet för samtliga identifierade lagringsenheter. För effektiv kapacitetsberäkning användes det en S_{eff} på 2 % (modifierad från Mortensen 2014).

Namn	Teoretisk kapacitet (Mt)	Effektiv kapacitet (Mt)
Faludden	37 271	745
När	21 294	426
Viklau	27 631	553
Arnagergrönsand	26 050	521
Undre krita, enhet A	16 523	330
Undre krita, enhet B	5 753	115
Höganäs–Rya	27 127	543
Bunter	8 268	165

varor. Inom NORDICCS användes två olika metoder för de två svenska akvifererna, *bassängmodellering* som uppskattar lagringskapaciteten för strukturella och stratigrafiska fällor med användning av den så kallade SEMI-programvaran (Sylta 2004), samt *dynamisk reservoarsimulering* som uppskattar lagringskapaciteten för flera infångningsmekanismer inom lagringsenheten genom att modellera koldioxid–vattensystemets dynamiska beteende med hjälp av programvaran ECLIPSE 100 (ECLIPSE 2007).

Modellerna bygger på samma fysikaliska parametrar som vid de statiska beräkningarna, se tabell 1, samt kartor över förkastningar och akviferernas ytor och djup framställda genom tolkning av seismiska linjer, SGUs berggrundskartor och borrhålsdata (OPAB 1975, 1976a, b, SGU 1998a, b), karta över Faluddens mäktighet (Erlström m.fl. 2011) samt batymetriska kartor (Baltic Sea Hydrographic Commission 2013). Nedan följer en metodbeskrivning samt resultat från de två modellerade lagringsenheterna. Bägge modellerna inkluderar det totala utbredningsområdet för akviferen, och indikerar därmed även hur stor del av koldioxiden som eventuellt beräknas migrera utanför lagringsenheten mot mindre djup. De svenska modelleringarna inom NORDICCS avser akviferernas utbredningsområde inom svensk ekonomisk zon. Samtliga modelleringsresultat är tillgängliga i rapporten D26 (Lothe m.fl. 2015), och svenska resultat även i Mortensen m.fl. (2016).

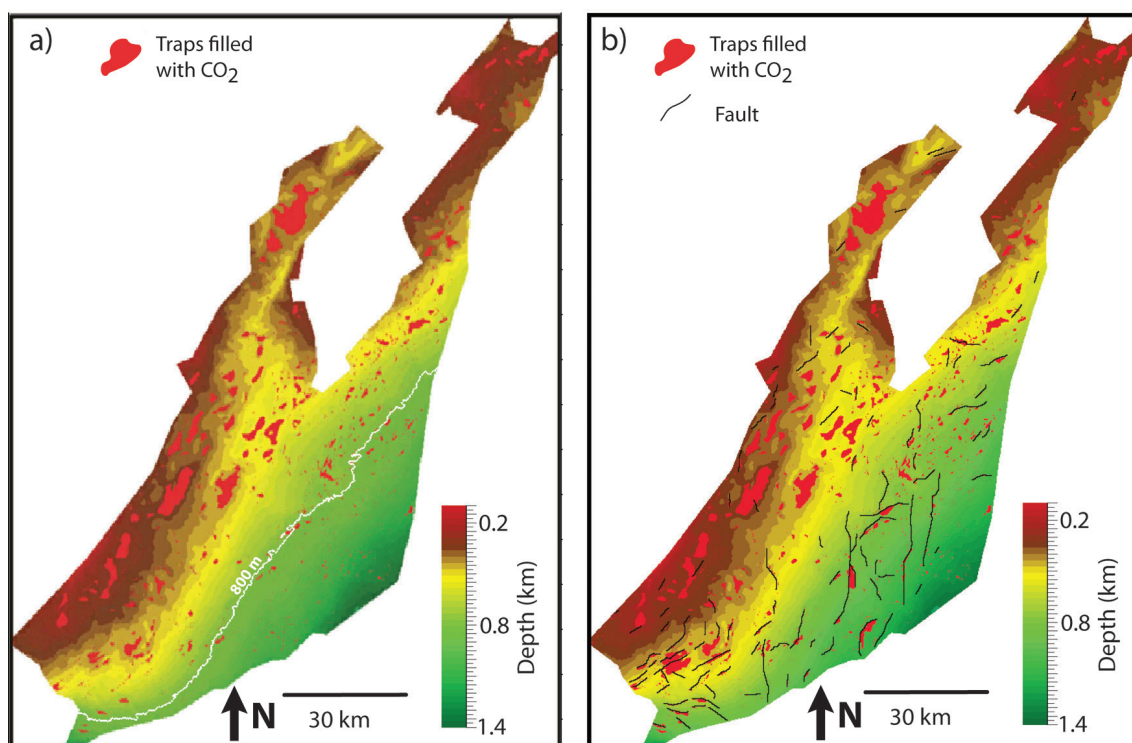
SEMI är en uppdaterad programvara för bassängmodellering, som är utvecklad för simulering av migration och infångning av kolväten i bassängskala. SEMI-metoden följer koldioxiden i akviferen under takbergarten på dess väg mot infångande i strukturella fällor. Det transporterande lagrets lutning är därmed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

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

Resultat för Faludden

I *bassängmodelleringen* för Faludden var det en betydande del av koldioxiden som migrerade till områden grundare än 800 m vilket anses vara minsta djup för säker lagring. Befinner sig koldioxiden över 800 m djup övergår den från superkritisk fas till gasform, där risken för migration till ytan ökar. Orsaken till migrationen är Faluddens relativt jämna övre yta som begränsar möjligheten för infångande i fällor. För att undvika att koldioxiden migrerar utanför modellområdet testas man för en så kallad säker injektionstakt. I modelleringen uppnåddes en årlig säker injektionstakt på 0,23 Mt på en period över 100 år inom de djupaste delarna av lagringsenheten, nära den svenska ekonomiska zonen. Eftersom en stor del av koldioxiden inom modellen migrerade till områden grundare än 800 m djup, var det enbart en mindre del som infångades på 800 m djup eller mer, och resultatet för lagringskapaciteten blev därmed ganska lågt. I scenariot utan förkastningar uppnådde Faludden en lagringskapacitet på 10 Mt koldioxid, och i scenariot där förkastningar inkluderades uppnådde enheten en lagringskapacitet på 70 Mt koldioxid, se figur 16.

I den *dynamiska reservoarsimuleringen* för Faludden blev en rad tester utförda för att nå fram till det optimala antalet injektionsbrunnar samt deras position och injektionstakt. Detta resulterade i totalt sex injektionsbrunnar placerade inom de djupaste delarna av lagringsenheten, längst mot svensk ekonomisk zon i sydöst. Den optimala årliga injektionstakten bestämdes till 0,5 Mt koldioxid i brunnarna längst mot norr och söder, samt 1 Mt koldioxid i de fyra mellanliggande brunnarna. Ytterligare fem vattenproducerande brunnar placerades intill injektionsbrunnarna i syfte att kunna höja injektionstakten och samtidigt hålla injektionstrycket under 75 % av det litostatiska trycket. För Faludden blev två injektionsscenarier med ovanstående injektionstakt



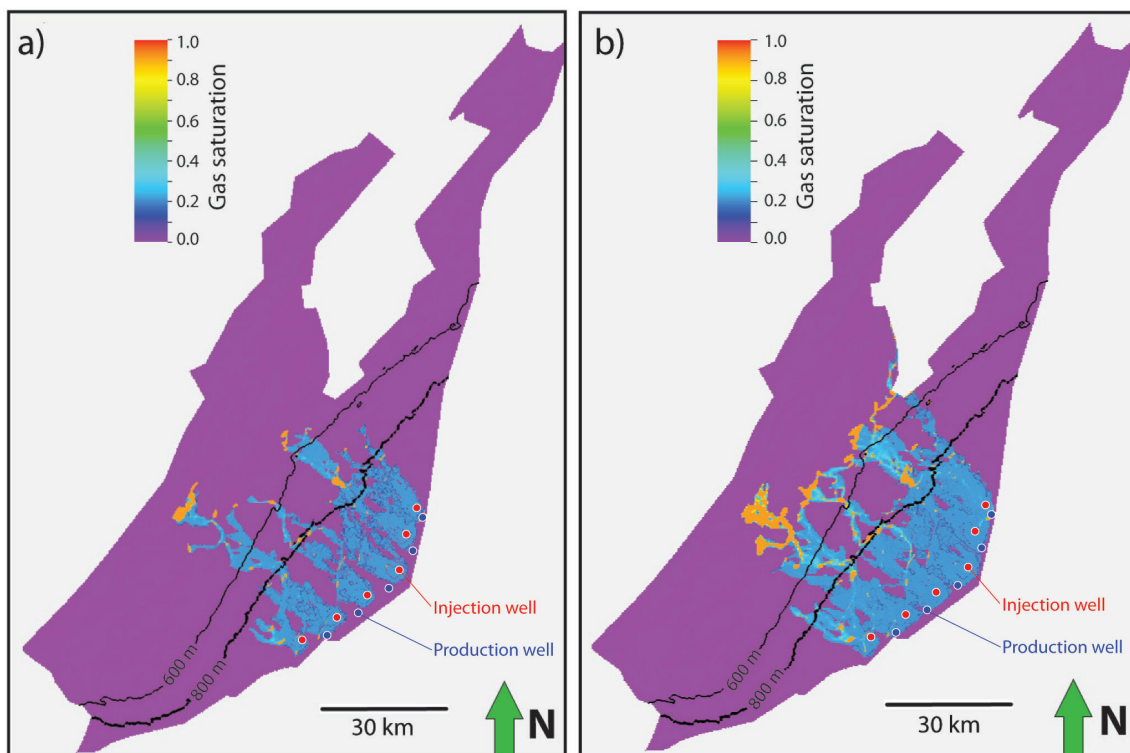
Figur 16. Resultat för bassängmodellering för Faludden. Den inom fällor infångade koldioxiden syns som röda områden: **a)** scenario utan förkastningar, **b)** scenario med förkastningar. Djup under 800 m finns sydöst om isolinjen i figur a (från Mortensen m.fl. 2016).

testade. I ett scenario, se figur 17 (a), injicerades totalt 250 Mt koldioxid över en period på 50 år, i ett annat scenario, se figur 17 (b), injicerades 500 Mt under 100 år. En efterföljande simuleringstid på 6 000 år för bägge scenarier indikerade sedan migrationsvägar för koldioxiden inom akviferen.

I scenario (a) där 250 Mt koldioxid injicerades, migrerade 9,1 % av koldioxiden till områden mellan 600 och 800 m djup, och bara 4,1 % till djup grundare än 600 m. Detta resulterade i att hela 86,8 % av koldioxiden blev kapillärt infångat eller löste sig i formationsvattnet i lagringsenheten under den 6 000 år långa simuleringstiden. Av den infångade andelen koldioxid var 42,5 % löst i formationsvattnet.

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

Trots att en del av koldioxiden migrerade till grundare djup antogs det inom denna simulering att den migrerade delen, trots gasfas, skulle infångas inom mindre strukturella fällor i akviferen och därmed inte migrera ytterligare.

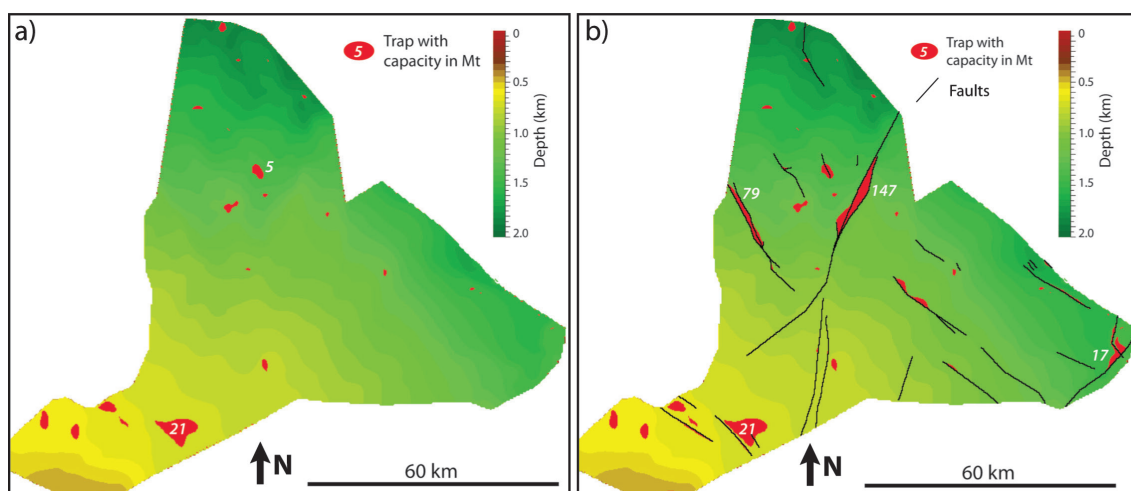


Figur 17. Resultat från dynamisk reservoarsimulering för Faludden, där mängden av kapillärt (inom porutrymmen) infångad koldioxid efter 6000 år visas som blå områden; **a)** 250 Mt koldioxid injicerad under 50 år, **b)** 500 Mt koldioxid injicerad under 100 år (från Mortensen m.fl. 2016).

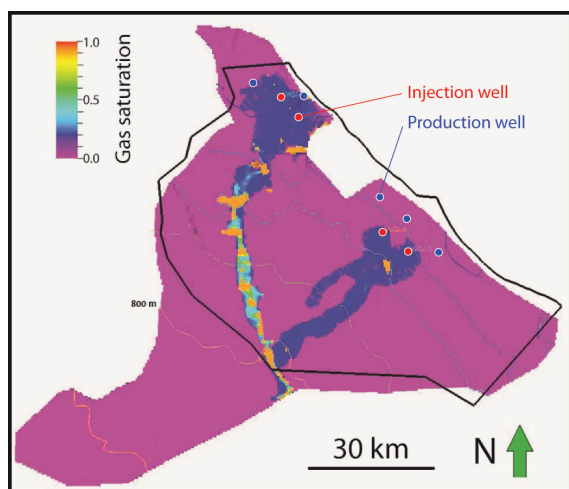
Resultat för Arnagergrönsand

I *bassängmodelleringen* för Arnagergrönsanden var det också en stor andel av koldioxiden som migrerade till områden grundare än 800 m som följd av bristen på strukturella fällor. Även här ställdes det upp två scenarier, utan och med förkastningar. I scenariot utan förkastningar uppnådde lagringsenheten Arnagergrönsand en lagringskapacitet på 10 Mt koldioxid inom området djupare än 800 m, och i scenariot där förkastningar inkluderades uppnådde enheten en lagringskapacitet på 115 Mt koldioxid på djup större än 800 m, se figur 18. En säker injektionstakt kunde inte fastställas förrän den hade reducerats till 0,08 Mt per år över en period på 100 år lokaliserad inom de djupaste delarna av lagringsenheten, nära Romeleåsens förkastningszon mot nordöst.

I den *dynamiska reservoarsimuleringen* för Arnagergrönsanden blev det optimala scenariot fyra injektionsbrunnar med årliga injektionstakter på 0,25 Mt för de två södra brunnarna och 1 Mt för de två norra brunnarna. Ytterligare fem vattenproducerande brunnar placerades intill injektionsbrunnarna i syfte att kunna kontrollera trycket. Samtliga brunnar placerades intill Romeleåsens förkastningszon i de djupaste delarna av lagringsenheten, se figur 19.



Figur 18. Resultat för bassängmodellering för Arnagergrönsanden. Den infångade koldioxiden syns som röda områden; **a)** scenario utan förkastningar, **b)** scenario med förkastningar (från Mortensen m.fl. 2016).



Figur 19. Resultat från den dynamiska reservoarsimuleringen för Arnagergrönsanden. Blå områden representerar mängden av kapillärt (inom porutrymmen) infångat koldioxid efter 6 000 år (från Mortensen m.fl. 2016).

Ett antal simuleringar testades och bästa utfallet visade på totalt 250 Mt koldioxid injicerat under en 100-årsperiod. I denna simulering var det enbart 3,3 % av koldioxiden som migrerade till områden grundare än 800 m under en 6 000 års simuleringsperiod. Vid den mest optimala simuleringen var det således hela 96,7 % av den totalt injicerade koldioxiden som blev kapillärt infångad eller löste sig i formationsvattnet i lagringsenheten under den 6 000 år långa simuleringsperioden. Av den infångade andelen koldioxid var 26,2 % löst i formationsvattnet. En mindre del av koldioxiden migrerade till områden utanför den svenska ekonomiska zonen, se figur 19.

I tester där injektionstakten ökades till 1 Mt även för de två södra injektionsbrunnarna och totalt 400 Mt koldioxid injicerades, resulterade det i att 14 % av den injicerade koldioxiden migrerade till områden grundare än 800 m under simuleringsperioden.

KLASSNING OCH URVAL AV POTENTIELLA LAGRINGSPLATSER

För tilläggsarbetet *Additional activities* togs det fram en metod för klassning av samtliga identifierade lagringsplatser i Norden (Bergmo 2013). Metoden bygger på norska Oljedirektoratets *CO₂ Storage Atlas – Norwegian North Sea* (Halland m.fl. 2011) och gäller för sedimentärt berg och därmed enbart för Sverige, Danmark och Norge. Eftersom att Island inte har några nämnda mängder av sedimentärt berg tog de istället fram egna kriterier (Aagaard m.fl. 2014), vilka dock inte presenteras inom denna rapport. Syftet med klassningen var att kunna jämföra och värdera de olika lagringsplatserna och utifrån detta göra ett urval för detaljerade studier och modelleringar. De utvalda lagringsplatserna beskrevs i detalj i rapporten D25 (Lothe m.fl. 2014) och som faktasidor i lagringsatlasen (<https://data.geus.dk/nordiccs/>). Totalt sett klassades i Sverige nio olika lagringsområden, i Danmark 21 och i Norge 27 olika områden.

I klassningsprocessen blev det bestämt att enbart använda geovetenskapligt baserade kriterier tillsammans med så kallad mogenhet och tillgänglighet av data, samt säkerhet och risk i samband med borrhål, se tabell 3. En lagringsplats mogenhet är ett uttryck för hur mycket det har forskats på enheten och hur mycket resultat som föreligger. Mängden av data och tillgängligheten till detta har en direkt koppling till lagringsenhetens mogenhet. Säkerhet och risk syftar på graden av seismicitet i regionen, samt risk för kontaminering av grundvatten. Sammanfattningsvis kom klassning av lagringsenheter därmed att delas in i följande kriterier:

- Kapacitet.
- Reservoaregenskaper.
- Takbergarters egenskaper.
- Säkerhet och risk.
- mogenhet och tillgänglighet av data.

Det finns ett antal parametrar under de olika kriterierna, och klassningen beskrivs med en färgkod där

- grön är lika med tre poäng och indikerar optimala förhållanden
- gul är lika med två poäng och indikerar att parametern inte uppfyller kraven för säker lagring, men i vissa fall kan accepteras
- röd är lika med ett poäng och indikerar att försiktighet rekommenderas.

Det maximala antalet poäng en lagringsenhet kan få enligt NORDICCS klassning är 45. Tabell 3 visar en schematisk framställning av den klassningsmetod som användes för utvärdering av CO₂-lagringsplatser inom NORDICCS.

Tabell 3. Karaktärisering och klassningskriterier för identifierade nordiska lagringsplatser (modifierad från Bergmo 2013).

Reservoar-egenskaper	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	
Tjocklek/Net sand	> 50 m	15–50 m	< 15 m	
Takbergartsegen-skaper	Optimal	Osäker	Försiktighet tillrådes	
Tjocklek	> 50 m	20–50 m	< 20 m	
Förkastnings-intensitet	Låg	Moderat	Hög	Metod från MUSTANG
Lateral utbredning	Kontinuerlig	Kontinuerlighet osäker	Ej kontinuerlig	
Multipla takbergarter	Mer än en	Enbart en	Osäker förekomst av takbergart	
Litologi	Homogen ler- eller slamsten, evaporiter	Kritkalksten (beroende av fysikaliska egenskaper)	Högt innehåll av silt eller sand	
Säkerhet/risk	Optimal	Osäker	Försiktighet tillrådes	
Seismicitet	Låg	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	

De svenska lagringsplatser som klassades enligt scheman utgjordes av åtta lagringsenheter där kapaciteten uppskattades utifrån en så kallad *storage efficiency factor* på 2 %, se avsnittet ”Beräkning av lagringskapacitet” i denna rapport. Även Dalders-strukturen inkluderades i klassningsprocessen där den listades som fälla med en *storage efficiency factor* på 10 % enligt metodiken för fällor definierad i projektet GeoCapacity (Vangkilde-Pedersen 2009). Metod för uppskattning av seismisk aktivitet baserades främst på antagande och utgör därför ett mycket osäkert underlag. Tabell 4 visar klassningsschema och utvärdering av de i NORDICCS definierade svenska CO₂-lagringsplatserna.

Tabell 4. Klassning av identifierade svenska lagringsenheter och fälla (modifierad från Aagaard m.fl. 2014).

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

De lagringsenheter i Sverige som enligt NORDICCS klassningsmetod hade bäst potential för koldioxidlagring var Faludden med 40 poäng, Arnagergrönsand med 39 poäng och Höganäs–Rya med 39 poäng. Även enhet A för Undre krita uppnådde 39 poäng i klassningen, men blev på grund av lägre uppskattad lagringskapacitet och sämre datatäckning klassad lägre.

KUNSKAPSLUCKOR

I syfte att identifiera kunskapsluckor för de utvalda lagringsplatserna gjordes det ytterligare en utvärdering (Aagaard & Sundal 2015) relaterad till Bilaga I i EUs CCS direktiv (Europeiska kommissionen 2009). Utvärderingen var tänkt som hjälp att avgöra vilka steg som är nödvändiga gällande implementering av koldioxidlagring i Norden och baserades på tre steg från direktivet:

1. Insamling av uppgifter.
2. Byggande av den tredimensionella statistiska geologiska modellen.
3. Beskrivning av dynamiskt beteende i samband med lagring, beskrivning av känslighet och riskbedömning.

För varje parameter gavs en poäng mellan 0 och -3 motsvarande tillgänglighet och kvalitet av data, där poängen 0 är optimal och indikerar full mogenhet och beredskap för implementering, och negativa siffror är uttryck för graden av brist/kvalitet på data, där sämst bedömning är -87 poäng. Resultatet av utvärderingen av de tre högst klassade lagringsenheter i Sverige redovisas i tabellerna 5–7.

Tabell 5. Schematisk utvärdering av den potentiella lagringsenheten Faludden baserad på Bilaga I inom CCS Direktivet (Europeiska kommissionen 2009, modifierad från Aagaard & Sundal 2015).

Insamling av data-underlag		Geologisk 3D-modell		Dynamisk modellering		Beskrivning av känslighet		Riskbedömning	
Tillräckliga data för konstruktion av geologisk 3D-modell för lagringsplats och lagringskomplex		Karaktärisering av lagringsplats och lagringskomplex		Bedömning av lagringsplatsen och -komplexets beteende vid CO ₂ -injektering		Bedömning av känslighet för antaganden av parametrar inom simuleringar		Bedömning av säkerhet och integritet av lagringsplats och lagringskomplex	
	Värde		Värde		Värde		Värde		Värde
Geologi och geofysik	-1	Strukturgeologisk kartläggning	-1	Injektionshastighet och CO ₂ -strömmens egenskaper	-2	Ändrade parametrar vid dynamiska modeller	-3	Karaktärisering av potentiella faror	-3
Hydrogeologi	-3	Lagringskomplex och omgivande berggrunds-, bergmekaniska-, geokemiska- och hydrauliska egenskaper	-3	Sammanfatt processmodellering	-3	Summa	-3	Bedömning av exponering	-3
Reservoartechnik	-2	Karaktärisering av spricksystem	-3	Reaktiva processer	-3			Konsekvensbedömning	-3
Geokemi	-2	Utbredning av lagringskomplex	-1	Reservoarsimulatorer	-1			Riskbeskrivning	-3
Bergmekanik	-3	Porvolymen	-2	Tidsberoende simuleringar	-1			Summa	-12
Seismicitet	-1	Utgångsdata för formationsvätskan	-2	Summa	-10				
Naturliga och tillverkade läckagevägar	-1	Integritet av förkastningar och takbergarter	-3						
Fältobservationer	-3	Summa	-15						
Befolkningstäthet	0								
Naturresurser	-2								
Motstående intressen	-1								
Avstånd till koldioxidkällor, volymer och transportnät	-1								
Summa	-20								
Klass 0, -1, -2, -3									

Tabell 6. Schematisk utvärdering av den potentiella lagringsenheten Arnagergrönsand baserad på Bilaga I inom CCS Direktivet (Europeiska kommissionen 2009, modifierad från Aagaard & Sundal 2015).

Insamling av data- underlag		Geologisk 3D-modell		Dynamisk modellering		Beskrivning av känslighet		Riskbedömning	
Tillräckliga data för konstruktion av geologisk 3D-modell för lagringsplats och lagringskomplex		Karaktärisering av lagringsplats och lagringskomplex		Bedömning av lagringsplatsen och -komplexets beteende vid CO ₂ -injektering		Bedömning av känslighet för antaganden av parametrar inom simuleringar		Bedömning av säkerhet och integritet av lagringsplats och lagringskomplex	
	Värde		Värde		Värde		Värde		Värde
Geologi och geofysik	-1	Strukturgeologisk kartläggning	-1	Injektionshastighet och CO ₂ -strömmens egenskaper	-2	Ändrade parametrar vid dynamiska modelleringar	-3	Karaktärisering av potentiella faror	-3
Hydrogeologi	-3	Lagringskomplex och omgivande berggrunds-, bergmekaniska-, geokemiska- och hydrauliska egenskaper	-3	Sammanfatt processmodellering	-3	Summa	-3	Bedömning av exponering	-3
Reservoartechnik	-3	Karaktärisering av spricksystem	-3	Reaktiva processer	-3			Konsekvensbedömning	-3
Geokemi	-2	Utbredning av lagringskomplex	-1	Reservoarsimulatorer	-1			Riskbeskrivning	-3
Bergmekanik	-3	Porvolymen	-2	Tidsberoende simuleringar	-1			Summa	-12
Seismicitet	-1	Utgångsdata för formationsvätskan	-2	Summa	-10				
Naturliga och tillverkade läckagevägar	-1	Integritet av förkastningar och takbergarter	-3						
Fältobservationer	-3	Summa	-15						
Befolkningstäthet	-1								
Naturresurser	-3								
Motstående intressen	-2								
Avstånd till koldioxidkällor, volymer och transportnät	-1								
Summa	-24								
Klass 0, -1, -2, -3									

Tabell 7. Schematisk utvärdering av den potentiella lagringsenheten Höganäs–Rya baserad på Bilaga I inom CCS Direktivet (Europeiska kommissionen 2009, modifierad från Aagaard & Sundal 2015).

Insamling av data- underlag		Geologisk 3D-modell		Dynamisk modellering		Beskrivning av känslighet		Riskbedömning	
Tillräckliga data för konstruktion av geologisk 3D-modell för lagringsplats och lagringskomplex		Karaktärisering av lagringsplats och lagringskomplex		Bedömning av lagringsplatsen och -komplexets beteende vid CO ₂ -injektering		Bedömning av känslighet för antaganden av parametrar inom simuleringar		Bedömning av säkerhet och integritet av lagringsplats och lagringskomplex	
	Värde		Värde		Värde		Värde		Värde
Geologi och geofysik	-2	Strukturgeologisk kartläggning	-2	Injektionshastighet och CO ₂ -strömmens egenskaper	-3	Ändrade parametrar vid dynamiska modelleringar	-3	Karaktärisering av potentiella faror	-3
Hydrogeologi	-3	Lagringskomplex och omgivande berggrunds-, bergmekaniska-, geokemiska- och hydrauliska egenskaper	-3	Sammanfatt processmodellering	-3	Summa	-3	Bedömning av exponering	-3
Reservoartechnik	-3	Karaktärisering av spricksystem	-3	Reaktiva processer	-3			Konsekvensbedömning	-3
Geokemi	-3	Utbredning av lagringskomplex	-2	Reservoarsimulatorer	-3			Riskbeskrivning	-3
Bergmekanik	-3	Porvolymen	-2	Tidsberoende simuleringar	-3			Summa	-12
Seismicitet	-2	Utgångsdata för formationsvätskan	-2	Summa	-15				
Naturliga och tillverkade läckagevägar	-2	Integritet av förkastningar och takbergarter	-3						
Fältobservationer	-3	Summa	-17						
Befolkningstäthet	-2								
Naturresurser	-3								
Motstående intressen	-2								
Avstånd till koldioxidkällor, volymer och transportnät	-1								
Summa	-29								
Klass 0, -1, -2, -3									

Av tabellerna 5–7 framgår att den samlade värderingen för kunskapsluckor för Faludden är -60, för Arnagergrönsand -64 och för Höganäs–Rya -76. Gemensamt för de tre lagringsenheterna är att det inte finns beskrivning av känslighet och riskbedömning. Dessutom är mängden av tillgänglig data generellt begränsad, vilket tillsammans är de huvudsakliga orsakerna till den relativt låga värderingen. Utvärdering enligt metoden för kunskapsluckor (Aagaard & Sundal 2015) på de 13 högst klassade sedimentära lagringsenheterna och fällorna inom Norden visas översiktligt i tabell 8. Av tabellen framgår att de bästa och mest mogna lagringsplatserna inom Norden finns i Norge, vilket hänger ihop med den omfattande prospekteringen för olja och gas som under längre tid har pågått i landet.

Tabell 8. Utvärdering av kunskapsluckor för de 13 högst klassade lagringsenheterna och fällorna. Högsta värderingen är 0 poäng, lägsta möjliga är -87 poäng (modifierad från Aagaard & Sundal 2015).

Lagringsenheter (U) och Fällor (T)	Land	Kunskapsluckor, värdering	Teoretisk kapacitet (Gt)
Friggs Fm. (U)	Norge	-17	1,2
Utsira Fm. (U)	Norge	-22	21,3
Johansen Fm. (U)	Norge	-26	0,8
Sognefjord Fm. (U)	Norge	-28	11,5
Garn Fm. (U)	Norge	-43	8,0
Havnsø (T)	Danmark	-47	0,9
Gassum Fm. (U)	Danmark/Norge	-48	3,7
Gassum Fm. (T)	Danmark	-49	0,6
Thisted (T)	Danmark	-57	11,0
Faludden (U)	Sverige	-60	0,7
Hanstholm (T)	Danmark	-62	2,8
Arnagergrönsand (U)	Sverige	-64	0,5
Höganäs-Rya (U)	Sverige	-76	0,5

DISKUSSION OCH SLUTSATSER

Huvudprodukten för arbetsgruppen WP6 inom NORDICCS var den nordiska CO₂-lagringsatlasen. Lagringsatlasen ger en översiktlig presentation av potentiella platser för geologisk lagring av koldioxid inom Norden. Atlasen presenterar utbredning och geologiska beskrivningar av både reservoar och takbergarter, förkastningssystem, lokalisering av djupa borrhål, fysikaliska parametrar, samt uppskattade och modellerade beräkningar av lagringskapaciteter. Atlasen kan bl.a. bidra till att underlätta för framtida planeringsprocesser i samband med infrastruktur och bedömning av mogenhet för implementering av CCS inom de nordiska länderna.

I NORDICCS undersökte man utöver reservoarbergarter även tillhörande takbergarter. Den önskvärda takbergarten består av lera och skiffer, och har en total mäktighet på mer än 50 m. De primära takbergarterna i Sverige består av mer eller mindre leriga karbonater med sandiga mellanlager, vilket enligt den använda klassningsmetoden inte anses vara optimal. Den primära takbergarten för sydvästra Skåne, Höllvikenformationen, inkluderar två större sekvenser dominerade av sandsten, Hansaformationen och Lundasandstenen. Dessa har lokal utbredning, men uppnår på vissa ställen betydande mäktigheter, lokalt mer än 800 m för Lundasandstenen (Sivhed m.fl. 1999). Trots dessa, enligt modellen, mindre optimala förhållanden, bedöms de svenska takbergarterna, på grund av deras stora totala mäktigheter, ändå vara kvalitativa och lämpliga.

Migration och läckage av koldioxid kan ske genom mikrofrakturer och längs med förkastningar. I Sverige är de bergarter som har identifierats som takbergarter generellt ännu inte väl undersökta, och det krävs därför kompletterande och detaljerade undersökningar av dessa för att pröva deras lämplighet för framtida lagringsplatser.

De mest utforskade, och därmed högst klassade, lagringsenheterna i Sverige utgörs av Faludden och Arnagergrönsand som är lokaliserade i sydöstra Östersjön respektive sydvästra Skåne. För båda lagringsenheterna gjordes olika modelleringar och simuleringar där de uppnådda resultaten blev långt ifrån statiska beräkningar. Skillnaden mellan de statiska beräkningarna och de dynamiska modelleringarna belyser utmaningen i att använda olika metoder, och även att mängden av tillgänglig data är en kritisk faktor. Som exempel kan nämnas att det för de dynamiska modelleringarna för Faludden inte fanns tillgängliga data för området öster om Gotland samt i de sydöstligaste delarna, inklusive området för Dalders-strukturen. Detta påverkar det arealmässiga området för modellering negativt, och därmed även resultaten för uppskattad

kapacitet. Även möjligheten till jämförelse med förhållandena i andra liknande projekt (Elforsk 2014, Sopher m.fl. 2014) som har haft tillgång till mer data, primärt seismik, påverkas. För Arnagergrönsanden var huvudparten av det modellerade området väl täckt av seismisk data, och därmed var det arealmässiga modellområdet i stort sett fullständigt.

På grund av begränsad mängd tillgänglig data har graden av osäkerhet inom utförda modelleringar varit hög. Brist på data har resulterat i många antaganden och att metoden för modellering fick förenklas, vilket har påverkat hastighet och avstånd av migration, samt graden av kapillärt infångande och lösning i formationsvattnen.

Betydelsen av att förkastningar i bassängmodelleringen inkluderas måste också uppmärksammas. Förkastningar har visat sig att ha stor betydelse, både för migrationsvägar och kapacitet (Emmel m.fl. 2015). Förkastningar kan agera lokala stratigrafiska fällor och därmed skapa bättre förutsättningar för infångande av koldioxid inom fällor, speciellt inom bassängmodelleringen. Gällande bassängmodelleringen har det för de två analyserade akvifererna varit kritiskt att förekomsten av både förkastningar och strukturella fällor varit begränsade. Eftersom bassängmodelleringen är beroende av infångande i strukturella och stratigrafiska fällor har denna metod visat på mycket låga kapacitetsberäkningar för bägge akvifererna.

För den dynamiska reservoarsimuleringen påvisades att den säkraste lagringen för Faludden var den i scenario (a), med injicering av 250 Mt koldioxid över en tidsperiod på 50 år, eftersom detta scenario resulterade i den minsta migrationen av koldioxid till områden grundare än 800 m. Även för Arnagergrönsand visade den optimala simuleringen att vara när 250 Mt koldioxid injicerades, dock över en 100-årsperiod.

Genom att använda de två olika modelleringsmetoderna har man i det här arbetet kunnat påvisa att metoden för dynamisk reservoarsimulering, med kapillär infångning och lösning i formationsvattnet, är den bäst lämpade metoden för beräkning av lagringskapacitet för de identifierade svenska lagringsenheterna.

I NORDICCS betraktas de svenska modelleringsresultaten, trots stora osäkerheter beroende på begränsad mängd tillgänglig data, som representativa för ungefärliga uppskattningar av lagringskapacitet. Dock skulle kompletterande data och studier kunna ändra utfallet.

Inom klassningsprocessen för nordiska lagringsplatser uppnådde många lagringsenheter och fällor höga värderingar. För huvudparten av de identifierade lagringsenheterna och fällorna behövs det dock ytterligare insatser vad gäller kompletterande data från seismik och djupborrningar, samt adekvat dynamisk modellering och kunskapsuppbyggnad innan platserna kan anses mogna för implementering av geologisk lagring av koldioxid. Metoden för identifiering av kunskapsluckor och brist på data utgör ett bra underlag för bedömning av vilka framtida insatser som krävs. Inte överraskande indikerar metoden att de lagringsplatser inom Norden som har högst mognad för implementering av koldioxidlagring finns i Norge, där det sedan länge har pågått en omfattande prospektering för olja och gas med avsevärda mängder data som följd.

Undersökning av kunskapsluckor i Sverige indikerar att det behövs både kompletterande data och forskning på svenska lagringsenheter innan implementering av koldioxidlagring kan genomföras. Studier av sparade borrhärdar från lagringsplatser kan bidra med ökad data på kemiska och fysikaliska egenskaper på reservoarbergarter och takbergarter. Förnyad och modern processning på existerande 2D seismiska data kan ytterligare bidra till ökad kunskap om djupförhållanden inom och i anslutning till lagringsenheterna.

Inledningsvis nämndes det att de 18 bäst lämpade lagringsenheterna i Norden tillsammans har kapacitet för mer än 86 Gt, motsvarande geologisk lagring av koldioxid i den nordiska regionen i mer än 500 år. Dessa beräkningar refererar enbart till de bäst lämpade lagringsenheterna och fällorna, och skulle öka avsevärt om samtliga identifierade lagringsplatser i Norden inklu-

Tabell 9. Resultat från olika studier (Erlström m.fl. 2011, Sopher m.fl. 2014, Elforsk 2014) för beräknad kapacitet för lagring av koldioxid under 800 m djup inom Faludden och Arnagergrönsand. Stora skillnader i resultat är, förutom olika metoder, orsakat av olika utbredningsområden och tillgänglighet till data. Bastor 2-studien sträcker sig dessutom ut över svenskt territorium och representerar samtliga kambrika reservoarenheter (Elforsk 2014).

Studie	Metod	Kommentar	Kapacitet (Mt)
Strukturella fällor Faludden			
SGU	US DOE	> 800 m	< 100
Sopher m.fl. 2014	US DOE	> 850 m, S_{eff} 11,5–31,5 %	64,2–159,1
BASTOR 2	GeoCapacity	hela kambrium, utöver svenskt territorium	743
NORDICCS	SEMI	inkl. förkastningar > 800 m	70
NORDICCS	SEMI	utan förkastningar > 800 m	10
Lagringenheten Faludden			
SGU	US DOE	> 800 m, S_{eff} 1–10 %	450–4500
Sopher m.fl. 2014	US DOE	> 850 m, S_{eff} 3,8–14,4 %	2 499–4 395
BASTOR 2	GeoCapacity	hela kambrium, utöver svenskt territorium	16 222
NORDICCS	US DOE	> 800 m, S_{eff} 2 %	745
NORDICCS	ECLIPSE	Dynamisk migration > 800 m	250
Strukturella fällor Arnagergrönsand > 800 m			
SGU		fällor ej definerad	n.d.
NORDICCS	SEMI	inkl. förkastningar	115
NORDICCS	SEMI	utan förkastningar	10
Lagringenheten Arnagergrönsand > 800 m			
SGU	US DOE	S_{eff} 10 %	5 000
NORDICCS	US DOE	S_{eff} 2 %	521
NORDICCS	ECLIPSE	Dynamisk migration	250

derades. En fullständig översikt skulle därmed även skapa möjlighet för import och lagring av emissioner från icke-nordiska utsläppskällor.

Sammanfattningsvis pekar resultaten från NORDICCS tillsammans med liknande studier (Erlström m.fl. 2011, Elforsk 2014, Sopher m.fl. 2014) på att det finns betydande potential för geologisk lagring av koldioxid i södra Sverige. Dock finns det stora variationer i använda modeller och utbredningsområden, och därmed även resultat, se tabell 9.

REFERENSER

- Aagaard, P., Anthonsen, K.L., Mortensen, G.M., Bergmo, P. & Snæbjörnsdóttir, S.Ó., 2014: Screening and ranking of aquifer formations, storage units and traps. *NORDICCS Technical report D.6.2.1301*, 44 s.
- Aagaard, P. & Sundal, A., 2015: Identifying knowledge gaps for selected Nordic storage aquifers. *NORDICCS Technical report D.6.2.1401*, 20 s.
- 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.L., Bergmo, P., Aagaard, P., Erlström, M., Sivhed, U., Gislason, S.R. & Snæbjörnsdóttir, S.Ó., 2012: Review of existing CO₂ storage databases. *NORDICCS Technical report D.6.1.1201*, 44 s.
- Anthonsen, K.L., Aagaard, P., Bergmo, P.E.S., Erlström, M., Faleide, J.I., Gislason, S.R., Mortensen, G.M. & Snæbjörnsdóttir, S.Ó., 2013: CO₂ storage potential in the Nordic region. *Energy Procedia* 2013;37, 5080–5092.
- Anthonsen, K.L., Aagaard, P., Bergmo, P.E.S., Gislason, S.R., Lothe, A., Mortensen, G.M. & Snæbjörnsdóttir, S.Ó., 2014: Joint Nordic CCS research in NORDICCS – the Nordic CCS Competence Centre. *CO2GeoNet Open Forum Venice; 2014*.
- Anthonsen, K.L., 2014: Definition of CO₂ storage concepts and terms. *NORDICCS Technical report D.6.1.1202*, 12 s.
- Anthonsen, K.L., Aagaard, P., Bergmo, P.E.S., Gislason, S.R., Lothe, A.E., Mortensen, G.M. & Snæbjörnsdóttir, S.Ó., 2014: Characterisation and selection of the most prospective CO₂ storage sites in the Nordic region. *Energy Procedia* 2014;63, 4884–4896.
- Anthonsen, A., 2015: Selection of the best CO₂ storage sites in the Nordic region. *NORDICCS Memo AD6.1401*, 10 s.
- Anthonsen, K.L., Mortensen, G.M., Sundal, A., Aagaard, P., Snæbjörnsdóttir, S.Ó., Bergmo, P. & Lothe, A., 2015a: Geological description of the best Nordic CO₂ storage sites. *NORDICCS Memo AD6.1402*, 100 s.
- Anthonsen, K.L., Snæbjörnsdóttir, S.Ó., Mortensen, G.M., Sundal, A. & Aagaard, P., 2015b: Geological stratigraphy for all basins and areas. *NORDICCS Memo D.6.1.1502*, 40 s.
- Anthonsen, K.L., Mortensen, G.M., Aagaard, P., Snæbjörnsdóttir, S.Ó., Bergmo, P. & Lothe, A., 2015c: Updated definition of concepts and terms. *NORDICCS Memo D6.1.1503*, 12 s.
- Baltic Sea Hydrographic Commission 2013: <http://data.bshc.pro>.
- 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: Method for ranking storage sites in NORDICCS WP6. *NORDICCS Memo*, 10 s.
- Bergmo, P., Anthonsen, K.L., Gislason, S.R. & Mortensen, G.M., 2015: Optimised exploration programme. *NORDICCS Technical report D.6.2.1201*, 43 s.
- Bergmo, P. & Emmel, B.U., 2015: Guidelines for CO₂ storage in the Nordic region (D24). *NORDICCS Technical report D.6.2.1501 (D24)*, 40 s.
- Brangulis, A.P., Kanev, S.V., Margulis, L.S. & Pomerantseva, R.A., 1986: Geology and hydrocarbon prospects of the Paleozoic in the Baltic region. *Petroleum Geology* 1986, 651–656.

- Chadwick, A., Arts, R., Bernstone, C., May, F., Thibeau, S. & Zweigel, P., 2008: Best practice for the storage of CO₂ in saline aquifers – observations and guidelines from the SACS and CO2STORE projects. *Nottingham, UK, British Geological Survey (British Geological Survey Occasional Publication, 14)*, 267 s.
- Christensen, N.P. & Holloway, S., 2004: The GESTCO project – Summary report, Second edition. European Potential for the Geological Storage of CO₂ from the Fossil Fuel Combustion. *European Union Fifth Framework Programme for Research & Development. Project No. ENK6-CT-1999-00010*, 32 s.
- CO2StoP 2013: <https://ec.europa.eu/energy/en/studies/assessment-co2-storage-potential-europe-co2stop>
- ECLIPSE 100, 2007: *Eclipse reference manual*, Schlumberger Information Solutions.
- Elforsk, 2014: CCS in the Baltic Sea region - Bastor 2. *Elforsk report 14:50*, 66 s.
- Emmel, B., Bergmo, P.E.S., Lothe, A. & Mortensen, G.M., 2015: CO₂ storage capacity estimates from basin modelling to reservoir simulation – faults matter. *TCCS-8 conference, Trondheim, 2015*.
- Erlström, M., 1994: Evolution of Cretaceous sedimentation in Scania. *Lund Publications in Geology, No 122*, 37 s.
- Erlström, M., Sivhed, U., Wikman, H. & Kornfält, K.-A., 2004: Beskrivning till berggrundskartorna 2D Tomelilla NV, NO, SV SO, 2E Simrishamn NV, SV, 1D Ystad NV, NO, 1E Örnahusen NV. *Sveriges geologiska undersökning, serie Af, Nr 212–215*, 141 s.
- Erlström, M., Persson, L., Sivhed, U. & Wickström, L., 2009: Beskrivning till regional berggrundskarta över Gotlands län. *Sveriges geologiska undersökning, serie K, 221*, 60 s.
- Erlström, M., Fredriksson, D., Juhojuntti, N., Sivhed, U. & Wickström, L., 2011: Lagring av koldioxid i berggrunden – krav, förutsättningar och möjligheter, 2011. *Sveriges geologiska undersökning, Rapporter och Meddelanden 131*, 96 s.
- Erlström, M. & Sivhed, U., 2012: Characterization of the Lower Cambrian sandstone aquifer in the Swedish Baltic Sea area – assessment regarding its potential suitability for storage of CO₂. *Geophysical Research Abstracts 2012; 14. EGU2012-2795, 2012. EGU General Assembly 2012*.
- Erlström, M. & Sivhed, U., 2012: Pre-Rhaetian Triassic strata in Scania and adjacent offshore areas – stratigraphy, petrology and subsurface characteristics. *Sveriges geologiska undersökning, Rapporter och meddelanden 132*, 54 s.
- 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*.
- Gammer, D., Green, A., Holloway, S. & Smith, G., 2011: The Energy Technologies Institute's UK CO₂ storage appraisal project (UKSAP). I: *SPE Offshore Europe Oil and Gas Conference, Aberdeen, Scotland, 6-8 Sept 2011, SPE Number 148426*. Society of Petroleum Engineers. 14 s.
- GESTCO 2004: http://www.geus.dk/program-areas/energy/denmark/co2/GESTCO_summary_report_2ed.pdf
- Goodman, A., Hakala, A., Bromhal, G., Deel, D., Rodosta, T., Frailey, S., Small, M., Allen, D., Romanov, V., Fazio, J., Huerta, N., McIntyre, D., Kutchko, B. & Guthrie, G., 2011: U.S. DOE methodology for the development of geologic storage potential for carbon dioxide at the national and regional scale. *International Journal of Greenhouse Gas Control 2011;5*, 952–965.
- Grigelis, A. & Norling, E., 1999: Jurassic geology and foraminiferal faunas in the NW part of the East European Platform, A Lithuanian – Swedish geotraverse study. *Sveriges geologiska undersökning, serie Ca 89*, 101 s.

- Halland, E.K., Gjeldvik, I.T., Johansen, W.T., Magnus, C., Meling, I.M., Pedersen, S., Riis, F., Solbakk, T. & Tappel, I., 2011: CO₂ Storage Atlas Norwegian North Sea. *Norwegian Petroleum Directorate*.
- Halland, E., Mujezinovic, J. & Riis, F., 2014: CO₂ Storage Atlas Norwegian Continental Shelf. *www.npd.no. ISBN 978-82-7257-134-3*.
- Holloway, S., Heederik, L.G.H., van der Meer, Czernichowski-Lauriol, I., Harrison, R., Lindeberg, E., Summerfield, I.R., Rochelle, C., Schwarzkopf, T., Kaarstad, O. & Berger, B., 1996: The underground disposal of Carbon Dioxide. *Joule II project No. CT92-0031, summary report. British Geological Survey, Keyworth, Nottingham, UK*.
- IEA Greenhouse Gas R&D Programme (IEA GHG), 2009: CCS Site Characterisation Criteria. *Technical study, Report No. 2009/10, July 2009, 130 s*.
- Lindström, S. & Erlström, M., 2011: Basin analysis of the uppermost Triassic to Lower Cretaceous, Danish Basin, Biostratigraphy and log correlation. *GEUS Rapport 2011/82, 63 s*.
- Lothe, A., 2014: Selection of aquifer storage cases. *NORDICCS Technical report D.6.3.1201 and D6.3.1301, 15 s*.
- Lothe, A., Emmel, B., Bergmo, P., Mortensen, G.M. & Frykman, P., 2014: A first estimation of storage potential for selected aquifer cases (D25). *NORDICCS Technical report D.6.3.1302 (D25), 56 s*.
- Lothe, A., Emmel, B., Bergmo, P., Mortensen, G.M. & Frykman, P., 2015: Updated estimate of storage capacity and evaluation of seal for selected aquifers (D26). *NORDICCS Technical report D.6.3.1401 (D26), 79 s*.
- Lothe, A., Bergmo, P., Emmel, B. & Mortensen, G.M., 2016: CO₂ storage capacity estimates for a Norwegian and a Swedish aquifer using different approaches - from theoretical volumes, basin modelling to reservoir models. *Edited book volume: Geologic Carbon Sequestration, chapter 16, Springer, DOI: 10.1007/978-3-319-27019-7, 20 s*.
- Mortensen, G.M., 2014: CO₂ Storage Atlas for Sweden – a contribution to the Nordic Competence Centre for CCS, NORDICCS. *31st Nordic Geological Winter Meeting, Lund; 2014*.
- Mortensen, G.M., Bergmo, P.E.S & Emmel, B.U., 2015: Dynamic simulation for two aquifers in southern Sweden. *CO2GeoNet Open Forum Venice; 2015*.
- Mortensen, G.M., Bergmo, P.E.S. & Emmel, B.U., 2015: Characterization and estimation of CO₂ storage capacity for the most prospective aquifers in Sweden. *TCCS-8 conference, Trondheim; 2015*.
- 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*.
- MUSTANG 2013: <http://www.co2mustang.eu/>
- 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*.
- Nielsen, C.M. & Vangkilde-Pedersen, T., 2008: Assessment of the capacity for the use of CO₂ in hydrocarbon fields (Denmark). In: Maurand N & Vincke O (Eds.) *Economic use of CO₂. EU GeoCapacity – Assessing European Capacity for Geological Storage of Carbon Dioxide. Project no. SES6-518318. D22 (Public)*.
- Norling, E., Ahlberg, A., Erlström, M. & Sivhed, U., 1993: Guide to Upper Triassic and Jurassic geology of Sweden. *Sveriges geologiska undersökning, serie Ca 82, 71 s*.
- Onarheim, K., Garðarsdóttir, S.Ö., Mathisen, A., Nord, L.O. & Berstad, D., 2015: Industrial implementation of Carbon Capture in Nordic industry sectors. *NORDICCS Technical report D.4.2.1501 (D18), 86 s*.

- OPAB, 1975a: Seismic Interpretations 1975, Baltic Sea, Top Cambrian Horizon. *Geology and Petroleum prospects, 1975*.
- OPAB, 1975b: Seismic Interpretations 1975, Baltic Sea, Mid Silurian Carbonate. *Oljeprospektering AB, 1975*.
- OPAB, 1976a: Baltic Sea, Exploration activities 1971–1976. *Geology and Petroleum prospects, 1976*.
- OPAB, 1976b: Gotland, Exploration activities 1972–1976. *Geology and Petroleum prospects, 1976*.
- SGU, 1998a: Berggrundskarta, 2C Malmö NV. *Sveriges geologiska undersökning, series Af 191, 1998*.
- SGU, 1998b: Berggrundskarta, 1C Trelleborg NV. *Sveriges geologiska undersökning, series Af 196, 1998*.
- Siggerud, E.I.H., 2008: Sedimentology Early to Late Cambrian within the Dalders Prospect; Central Baltic Sea. *Intern rapport till Svenska Petroleum Exploration AB, 2008*.
- Sivhed, U., Wikman, H. & Erlström, M., 1999: Beskrivning till berggrundskartorna 1C Trelleborg NV och NO samt 2C Malmö SV, SO, NV och NO. *Sveriges geologiska undersökning, serie Af, Nr 191, 192, 193, 194, 196, 198, 143 s*.
- SLR, 2014: Final report on prospective sites for the geological storage of CO₂ in the southern Baltic Sea. *Ref: 501-00302-00001, 2014*.
- Sopher, D., Juhlin, C. & Erlström, M., 2014: A probabilistic assessment of the effective CO₂ storage capacity within the Swedish sector of the Baltic Basin. *International Journal of Greenhouse Gas Control* 2014;30, 148–170.
- Sopher, D., Erlström, M., Bell, N. & Juhlin, C., 2014: The structure and stratigraphy of the sedimentary succession in the Swedish sector of the Baltic Basin: New insights from vintage 2D marine seismic data. *Tectonophysics* 676 (2016), 90–111.
- Sylta, Ø., 2004: Hydrocarbon migration modelling and exploration risk. *NTNU Trondheim, 2004*.
- Teir, S., Hetland, J., Lindeberg, E., Torvanger, A., Buhr, K., Koljonen, T., Gode, J., Onarheim, K., Tjernshaugen, A., Arasto, A., Liljeberg, M., Lehtilä, A., Kujanpää, L. & Nieminen, M., 2010: Potential for carbon capture and storage (CCS) in the Nordic region. *VTT Technical Research Centre of Finland, 2010, 223 s*.
- Vangkilde-Pedersen, T. (Ed), 2009: Capacity standards and site selection criteria. *EU GeoCapacity report D26. 2009*.
- Wik, N.-G., Bergström, U., Bruun, Å., Claeson, D., Jelinek, C., Juhojuntti, N., Kero, L., Lundqvist, L., Stephens, M.B., Sukotjo, S. & Wikman, H., 2005: Beskrivning till regional berggrundskarta över Kalmar län. *Sveriges geologiska undersökning, serie Ba 66, 50 s*.

BILAGA 1. Ordlista

Akvifer. En akvifer är en vattenförande, porös och permeabel, geologisk enhet eller lager. En sedimentär akvifer utgörs ofta av grus, sand- eller kalksten. En *salin* akvifer, är en akvifer där vattnet har en salinitet på mer än 3 % och är därmed inte tjänligt som dricksvatten.

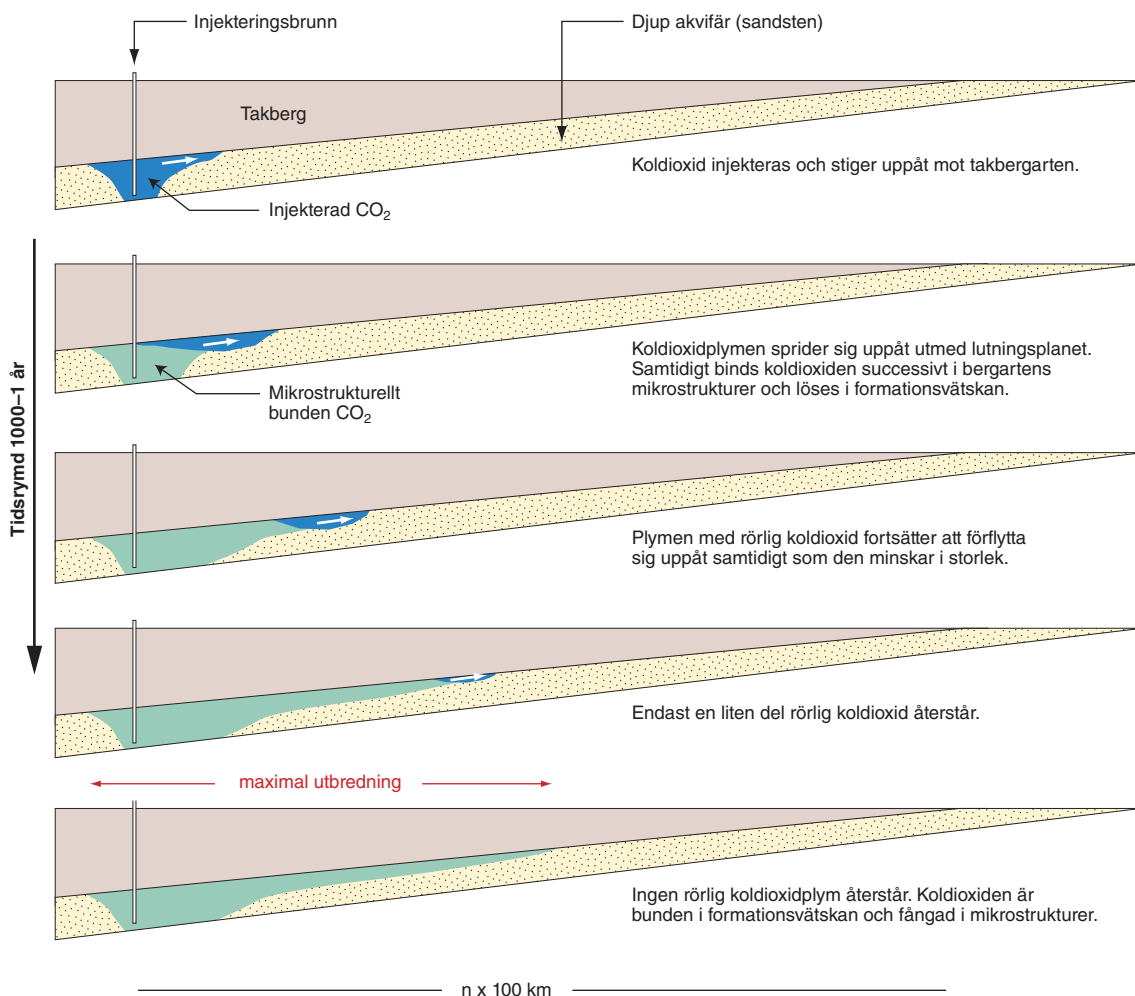
Antiklina strukturer. Antiklina strukturer är konvexa veckade geologiska lager där de äldsta lagren utgör de innersta delar av vecken.

Bentonit. Bentonit är ett mycket absorberande lermineral, som samtidigt har bra svällande egenskaper, vilket gör det till ett bra isoleringsmaterial. En bergart som har ett innehåll av bentonit kan kallas för bentonitisk eller bentonitförande.

Borrkax. Borrkax utgörs av bergflis uppkommen vid borrhning i berg. Borrkax kan användas vid enklare översiktlig analys av berggrunden.

CO₂-densitet vid reservoarbetingselser. Densiteten av koldioxid varierar med djup, tryck, temperatur och salinitet, och kan uppskattas med hjälp av olika diagram (Chadwick m.fl. 2008).

CO₂-plym. Vid injektion av koldioxid i en lutande salin akvifer bildas det en CO₂-plym som stiger uppåt mot takbergarten och sedan börjar sprida sig utmed lutningsplanet (fig. 20).



Figur 20. Schematisk illustration av injekterad koldioxids spridning inom en lutande akvifer (från Erlström m.fl. 2011).

CO₂-infångning (trapping). Det råder olika infångningsmekanismer när CO₂ injiceras i lagringsenheten:

- **Strukturell och stratigrafisk** infångning sker när stigande CO₂ hindras att nå ytan därför att den fångas nedan under ogenomträngliga bergarter eller förkastningar, se mer under *fälla*.
- **Residual/kapillär** infångning är fysisk infångning av CO₂ inom porutrymmet i reservoarbergarten.
- Infångning vid **löslighet** sker när koldioxiden upplöses i formationsvattnet.
- **Mineral** infångning sker när koldioxiden reagerar med reservoarbergarten och/eller formationsvattnet och utfaller karbonatmineraler.

Facies. En facies är summan av de kännetecken som karaktäriserar en bergart. Sedimentära facies reflekterar specifika avlagringsprocesser inom en specifik miljö.

Förkastning. En förkastning är en spricka eller sprickzon i en bergartskropp där blockrörelser och förskjutningar tar plats längs med denna.

Formation. En geologisk formation är grundenheten inom litostratigrafi. En formation utgörs av ett antal bergartslager med urskiljbar litologi eller facies, och som kan kartläggas inom en region. Formationer kan utgöra delar i en grupp och indelas i led.

Gravsänka. En gravsänka är ett strukturellt fenomen som beskriver ett nedförkastat block avgränsat av förkastningar.

Hydraulisk kontakt. Hydraulisk kontakt är ett uttryck för förbindelse mellan porutrymmen i en porös bergart, vilket tillåter flöde av fluider.

Hydraulisk enhet. En hydraulisk enhet har hydraulisk kontakt inom porutrymmen och är som enhet avgränsat av barriärer i form av t.ex. förkastningar eller litologiska gränser.

Injektivitet. Injektiviteten är ett mått för den takt varmed man kan injicera koldioxid in i en reservoar bergart och därefter hur snabbt koldioxiden sedan migrerar bort från brunnen. Det definieras som produkten av lagringsenhetens permeabilitet och tjocklek, och mäts i Darcymeter, Dm.

Lagringsenhet (storage unit). Lagringsenheten är den del av formationen, eller akviferen, som finns på mer än 800 m djup och har tillräckligt hög porositet och permeabilitet för lagring av koldioxid. En lagringsenhet är en stratigrafisk avgränsat eller förkastningsbetingat egen hydraulisk enhet och kan inkludera en eller flera fällor.

Lagringskapacitet. Lagringskapacitet är den volym koldioxid som kan rymmas i en reservoar bergart, lagringsenhet eller fälla, och mäts i gigaton (Gt), miljoner ton (Mt) eller i tusen ton (kt). Det finns inget standardiserat sätt att räkna ut kapacitet, men inom NORDICCS användes EU GeoCapacity-metodiken (Vangkilde-Pedersen 2009) som är användbar för sedimentära lagringsenheter och -fällor, se nedan.

Teoretisk lagringskapacitet är tillgängligt porutrymme i reservoar bergarten. Definieras med ekvationen $TH_MCO_2 = V \times N/G \times \phi \times \rho_{CO_2r}$

TH_MCO ₂	teoretisk lagringskapacitet
V	volym av lagringsenhet eller fälla
N/G	genomsnittlig sand net/gross rate
φ	genomsnittlig reservoarporositet
ρCO _{2r}	CO ₂ -densitet vid reservoarbetaingelser

Effektiv lagringskapacitet är den del av tillgängligt porutrymme i reservoarbergarten som kan uppta koldioxid. Definieras med ekvationen $TH_MCO2 = V \times N/G \times \phi \times \rho_{CO2r} \times S_{eff}$

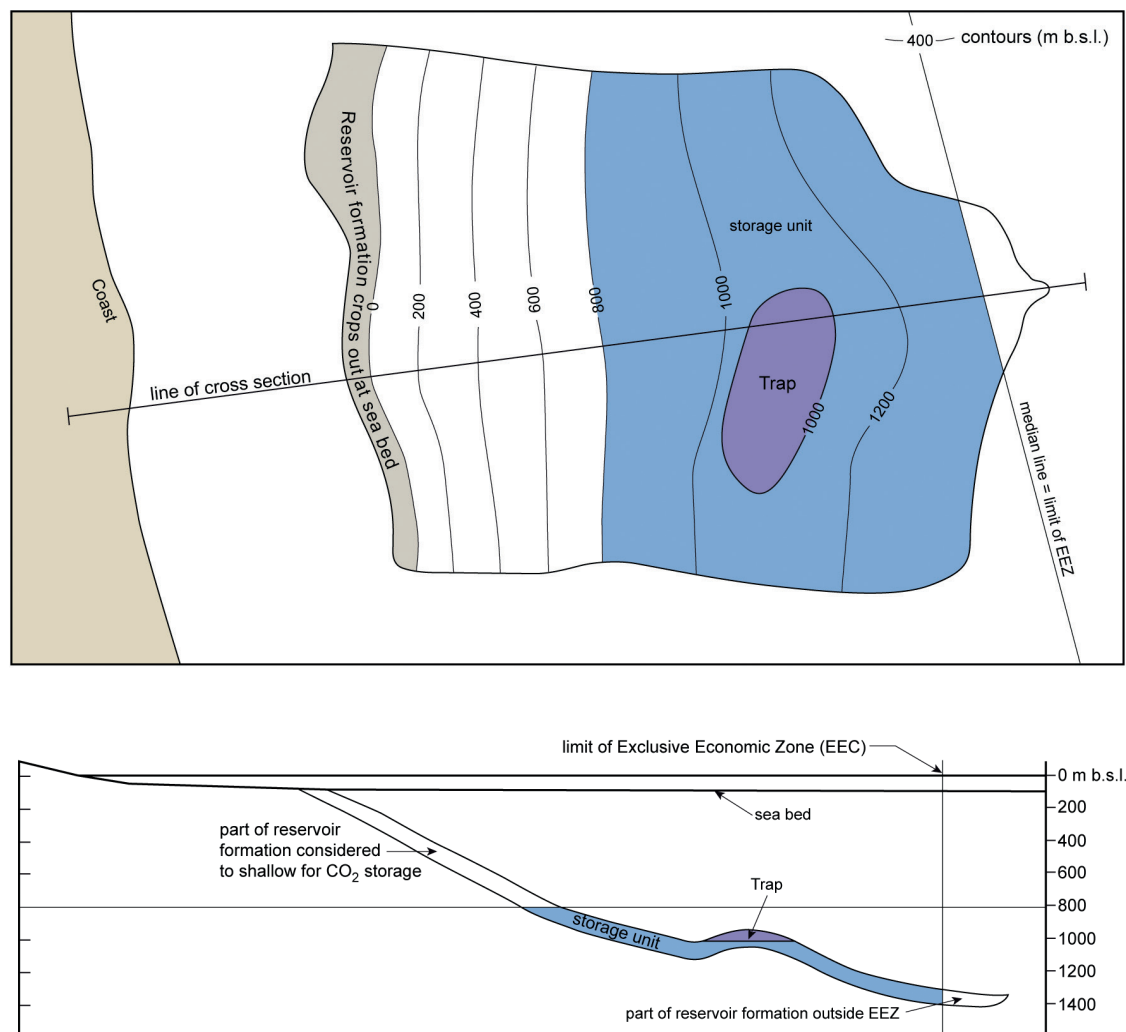
där S_{eff} är *storage efficiency factor*, se senare förklaring.

Statisk lagringskapacitet beräknas teoretiskt och utan efterprövning.

Dynamisk lagringskapacitet beräknas utifrån dynamisk modellering baserad på reservoar-simulering av CO₂-injicering. Det finns olika modeller och programvaror för detta.

Lagringskomplex. Lagringskomplexet utgör hela den geologiska formation, eller akvifer, som innehåller lagringsenheten, samt tillhörande yta och injiceringsfaciliteter.

Lagringsplats (*storage site*). Utgör den del av lagringskomplexet som är lämplig för lagring av koldioxid. Kan innehålla både lagringsenheter och fällor (fig. 21)



Figur 21. Schematisk illustration av lagringsplats med lagringsenheter och fälla (modifierad från Gammer m.fl. 2011)

Lagringsfälla (trap). En *stratigrafisk fälla* är ett resultat av laterala och vertikala variationer i porositet och permeabilitet som resultat av ett skift i facies eller bergarter.

En *strukturell fälla* är ett resultat av en konvex deformation av reservoarbergarten (fig. 22).

Litologi. Litologi är den fysikaliska karaktären av en bergart, t.ex. mineralogi, kornstorlek, struktur, textur, färg m.m.

Litostatiskt tryck. Tryck i relation till den totala belastningen ovanför. Den litostatiska tryckgradienten är 22–26 MPa (220–260 bars) per km.

Litostratigrafisk. *Se stratigrafi.*

Migration. Koldioxidens rörelse inom lagringskomplexen.

Net/gross. Den volym av reservoarbergarten (net) som är lämplig för koldioxidlagring i förhållande till den samlade volymen av formationen, eller akviferen (gross). Estimeras på bakgrund av andelen sand (m) i relation till den samlade mäktigheten (m).

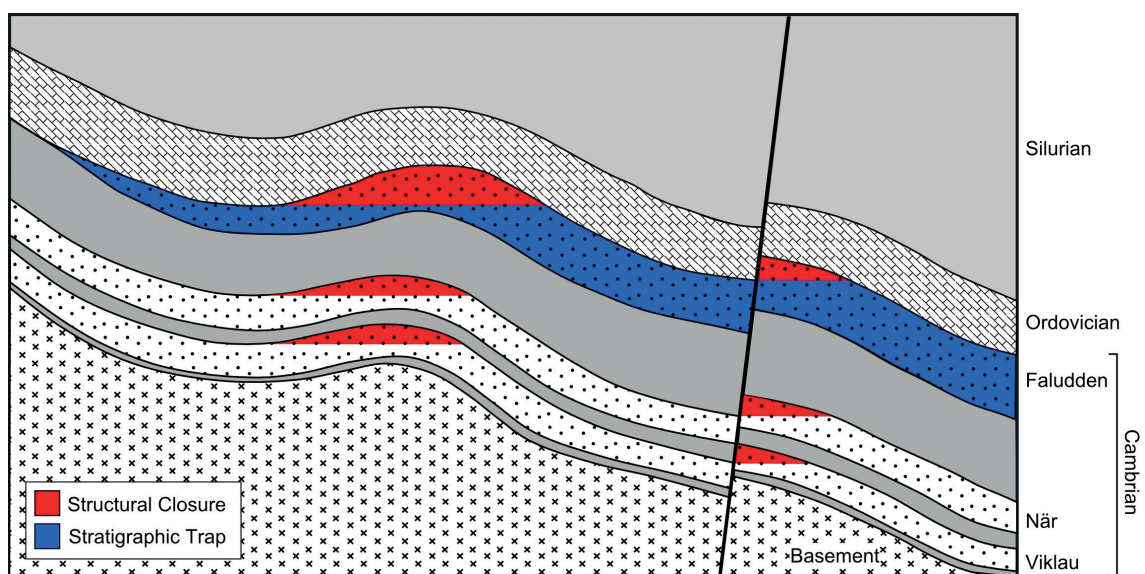
Porositet. Porositet är ett mått för hur mycket av bergarten som är öppet utrymme, vilket kan vara fyllt av luft eller formationsfluider (-vatten). Utrymmet kan finnas mellan kornen eller som sprickor eller kaviteter. Mäts i procent eller som fraktion.

Permeabilitet. Permeabilitet är ett mått för en fluids förmåga att flöda genom en porös bergart. Mäts i milli-Darcy (mD) eller Darcy (D).

Reservoar. En reservoar är ett stort lager i undergrunden som innehåller gas eller fluider. Utgörs ofta av sandsten eller kalksten.

Sediment. Sediment kan delas in i klastiska-, biogena- och kemiska sediment. *Klastiska* sediment består av partiklar från eroderat bergmaterial, som sedan har transporterats av vind, vatten eller is för att sedan avlagras som sediment (t.ex. sand) eller som sedimentär bergart (t.ex. sandsten). *Biogena* sediment består av partiklar format från biologiska processer, som nerbrytning av kalkskaliga organismer (kalksten) eller växtmaterial (kol).

Kemiska sediment bildas vid kemiska processer, som avdunstning (t.ex. gips).



Figur 22. Definition av strukturell och stratigrafisk fälla illustrerad som schematisk profil från sydöstra Östersjön (från Sopher m.fl. 2014).

Sedimentär bassäng. En sedimentär bassäng utgörs av ett strukturellt avgränsat område där takten av nersjunkning överstiger takten av ackumulering och bevaring av lagrade sediment.

Seismik. Seismik är en metod för undersökning av geometrin av geologiska lager i undergrunden med hjälp av akustiska signaler.

Storage efficiency factor (S_{eff}). *Storage efficiency factor* är den fraktion av tillgängligt porutrymme som kan uppta koldioxid. För svensk del har en *storage efficiency factor* på 2 % använts för samtliga lagringsenheter definierade inom NORDICCS, detta enligt US DOE för formationer (Goodman m.fl. 2011).

Stratigrafi. Stratigrafi är läran om geologiska lager och deras inbördes relationer med hänseende till ålder, fossilinnehåll, litologi och avlagringsmiljö. Litostratigrafi är baserad på litologi, och biostratigrafi på flora och fauna.

Superkritisk CO_2 . Koldioxid finns naturligt i gasform, men blir flytande under tryck runt 73 bar och temperatur runt 31 °C, den sägs då vara i superkritiskt tillstånd. Volymen i superkritiskt tillstånd är enbart 0,3 % av den i gasform. Betingelserna för koldioxid i superkritiskt tillstånd inträder kring 800 m djup.

Takbergart. Ett geologiskt lager med låg permeabilitet vilket hindrar fluider eller gas från att migrera till ytan. Leriga bergarter anses bäst lämpade som takbergarter.

BILAGA 2. Leveranser inom NORDICCS som SGU har medverkat till

Tabell 10. Leveranser inom NORDICCS som SGU har medverkat till.

Leverans	Titel	Leveransdatum
D6.1.1201	Review of existing CO ₂ Databases	Juni 2012
D6.1.1202	Definition of CO ₂ storage concepts and terms	Februari 2013
D6.2.1201	Optimized exploration programme	Februari 2013
D6.1.1304	Mapping of aquifer formations, storage units and traps in Sweden (GIS)	September 2013
D6.2.1301	Screening and ranking of aquifer formations, storage units and traps	Juli 2014
D6.3.1201_D6.3.1301	Selection of Nordic key storage cases	Januari 2014
D6.3.1302 (D25)	A first estimation of storage potential for selection of aquifer cases	April 2014
D6.1.1402	Mapping of exploration wells, sealing formations and faults in Sweden (GIS)	Juni 2014
D6.2.1401	Identifying knowledge gaps for selected storage aquifers	Oktober 2015
D6.3.1401 (D26)	Updated estimate of storage capacity and evaluation of seal for selected aquifers	Januari 2015
AD6.1401	Selection of the 20 best CO ₂ storage sites in the Nordic Region	Augusti 2014
AD6.1402	Geological description of the 20 best Nordic CO ₂ storage sites	Mars 2015
	Metadata for GIS-data	Oktober 2015
D6.1.1501 (D23)	Updated Nordic CO ₂ storage atlas (web-GIS)	September 2015
D6.1.1502	Geological stratigraphy for basins and areas	Oktober 2015
D6.1.1503	Updated definition of CO ₂ storage concepts and terms	April 2015
D6.2.1501 (D24)	Guidelines for CO ₂ storage in the Nordic region	November 2015

BILAGA 3. Vetenskapliga publikationer inom NORDICCS som SGU har medverkat till

Tabell 11. Vetenskapliga publikationer inom NORDICCS som SGU har medverkat till.

Författare (SGU med fet stil)	Titel	Tidskrift, konferens m.m.	Typ av publikation
Anthonsen KL, Aagaard P, Bergmo PES, Erlström E, Fareide JJ, Gislason SR, Mortensen GM , Snæbjörnsdóttir SÓ	CO ₂ storage potential in the Nordic region	Elsevier, Energy Procedia 37 (2013) 5080-5092	Internationell tidskrift och poster till GHGT-11 konferensen i Kyoto
Mortensen GM	CO ₂ Storage Atlas for Sweden – a contribution to the Nordic Competence Centre for CCS, NORDDICS	Nordiska Geologiska Vintermöte, 2014	Poster, vepa och abstract
Anthonsen KL, Aagaard P, Bergmo PES, Gislason SR, Lothe A, Mortensen GM , Snæbjörnsdóttir SÓ	Joint Nordic CCS research in NORDICCS – the Nordic CCS Competence Centre	CO2GeoNet Open Forum, Venice 2014	Poster
Anthonsen KL, Aagaard P, Bergmo PES, Gislason SR, Lothe A, Mortensen GM, Snæbjörnsdóttir SÓ	Making a CO ₂ storage atlas for the Nordic countries – The Nordic Competence Centre for CCS, NORDICCS	TCCS-7, Trondheim 2014	Abstract
Anthonsen KL, Aagaard P, Bergmo PES, Gislason SR, Lothe AE, Mortensen GM , Snæbjörnsdóttir SÓ	Characterisation and selection of the most prospective CO ₂ storage sites in the Nordic region	Elsevier, Energy Procedia 63 (2014) 4884-4896	Internationell tidskrift och poster till GHGT-12 konferensen i Austin
Mortensen GM , Bergmo PES, Emmel BU	Dynamic simulation for two aquifers in southern Sweden	CO2GeoNet Open Forum, Venice 2015	Poster
Mortensen GM , Bergmo PES, Emmel BU	Characterization and estimation of CO ₂ storage capacity for the most prospective aquifers in Sweden	TCCS-8, Trondheim 2015. Elsevier, Energy Procedia 86 (2016) 352-360	Abstract, poster, full paper i internationell tidskrift
Anthonsen KL, Aagaard P, Bergmo PES, Gislason SR, Lothe AE, Mortensen GM , Snæbjörnsdóttir SÓ	CO ₂ storage prospectivity mapping of the Nordic region – the Nordic CO ₂ storage atlas	TCCS-8, Trondheim 2015	Abstract, poster
Emmel BU, Bergmo PES, Lothe A, Mortensen GM	CO ₂ storage capacity estimates from basin modelling to reservoir simulation – faults matter	TCCS-8, Trondheim 2015	Poster
Lothe AE, Bergmo PES, Emmel BU, Mortensen GM	CO ₂ storage capacity estimates for a Norwegian and a Swedish aquifer using different approaches – from theoretical volumes, basin modelling to reservoir models	Vishal V, Singh TN (Eds.) "Geologic Carbon Sequestration: Understanding Reservoir Behavior", Springer 2016	Edited book volume, Springer: ISBN 978-3-319-27017-3, DOI:10.1007/978-3-319-27019-7
Bergmo PES, Emmel BU, Anthonsen KL, Aagaard P, Mortensen GM	Selecting the best CO ₂ storage aquifers in the Nordic countries	In press	Internationell tidskrift och poster till GHGT-13 konferensen i Lausanne

Huvudparten av levererade rapporter och publikationer inom NORDICCS finns tillgängliga på: <http://www.sintef.no/projectweb/nordiccs/results/the-nordic-co2-storage-atlas-wp6/>.
The Nordic CO₂ Storage Atlas finns tillgänglig på: <https://data.geus.dk/nordiccs/>.