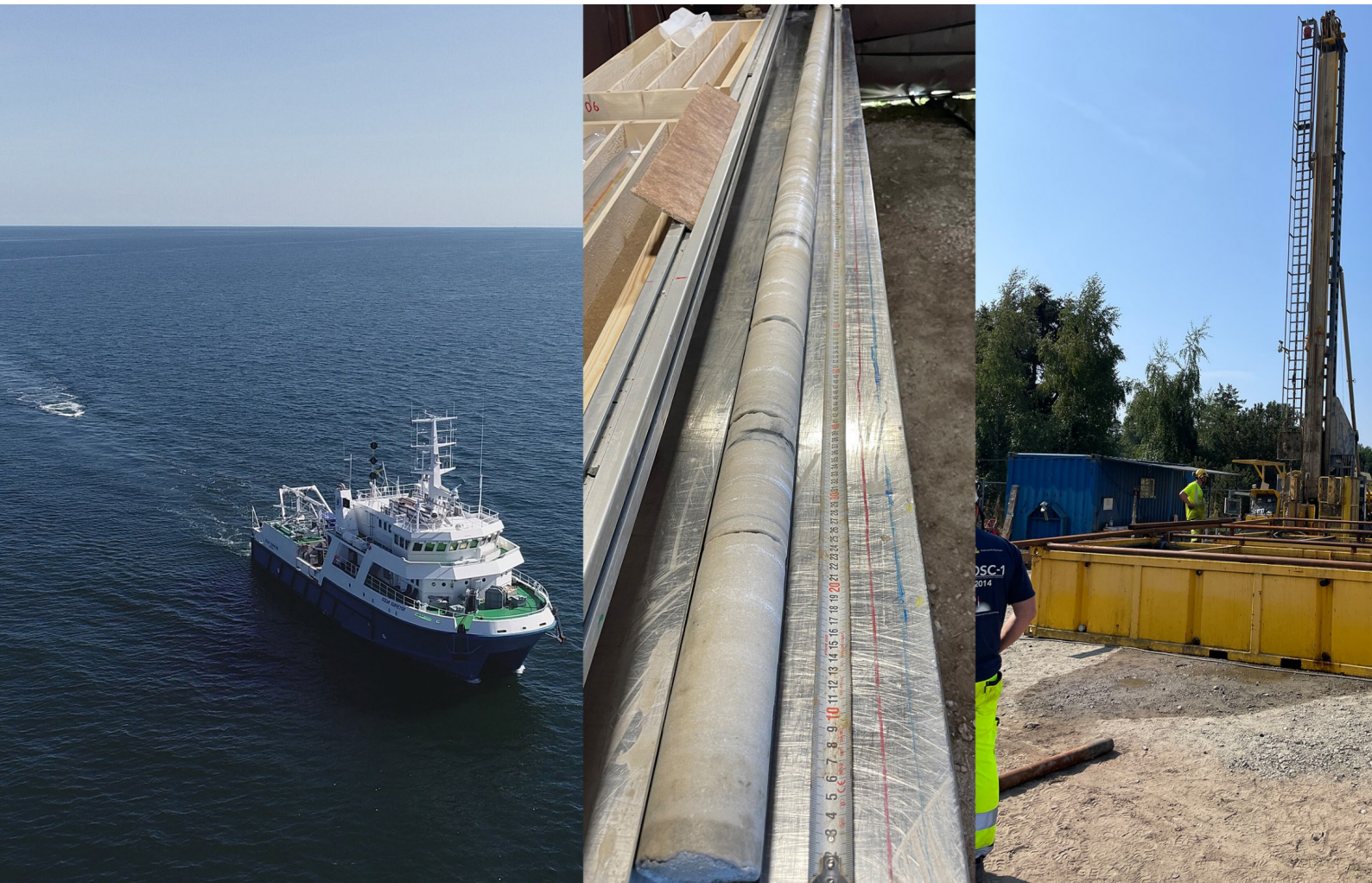


Rapportering av regeringsuppdrag

Geologisk lagring av koldioxid, delrapport 2



Ändringar genomförda 11 mars 2025

Sidan 8, 26 och 31, figur 1, 11 och 14.

Figurer utbytta mot korrekta.

Författare (i bokstavsordning): Magnus Andersson,
Thomas Andolfsson, Tobias Brattström, Peter Christiansson,
Peter Dahlqvist, Urban Ericsson, Mikael Erlström, Peter Hedin,
Carl-Erik Hjerne, Max Holmström, Maria Khalili, Paula Lindgren,
Sofie Lindström (projektledare), Björn Lund, Lena Persson,
Kaarina Ringstad, Peter Slagbrand, Daniel Sopher,
Linda Wickström, Lena Yotis (tidigare projektledare)
och Henrik von Zweigbergk

Granskad av: Elin Norström

Ansvarig enhetschef: Lena Yotis

Redaktör: Johan Sporrang

Regeringsuppdragets fullständiga namn: Koldioxidlagring i Sverige

Omslagsbild: Exempel på verksamheter inom projektet Koldioxidlagring i Sverige. Från vänster: SGU:s undersökningsfartyg Ocean Surveyor utför marinseismisk undersökning. Nyupptagen borrhärla som visar Faluddensandsten. Borrhärlan Riksriggen (LTH) under kärnborrhärlningen av Lilla Beddinge-1 i Skåne.

Fotografer: Björn Bergman och Mikael Erlström, SGU.

Februari 2025

Sveriges geologiska undersökning

Box 670, 751 28 Uppsala

tel: 018-17 90 00

e-post: sgu@sgu.se

www.sgu.se

Innehåll

Sammanfattning	5
Inledning och bakgrund	8
Undersökningar på Gotland och i sydöstra Östersjön	9
Geologiska undersökningar	9
Inledning	9
Borrningarna Nore-1 och Nore-2	10
Sammanfattande resultat från de geologiska undersökningarna	17
Djupseismik – datainsamling, bearbetning och tolkning	21
Introduktion	21
Landseismik	21
Marinseismik	22
Maringeologiska undersökningar	22
Gasevakueringsstrukturer	24
Gas och ytgeologi sydöstra Östersjön	24
Geologisk 3D-modell	26
Undersökningar i Skåne och sydvästra Östersjön	27
Geologiska undersökningar	27
Regionalgeologisk bakgrund	27
Kärnboringar	28
Lilla Beddinge-1	28
Djupseismik	31
Landseismik	31
Marinseismik	33
Maringeologiska undersökningar	36
Geologi	36
Gas på havsbotten utanför Skåne	37
Geologisk 3D-modell	38
Geologiska risker	39
Seismiska risker – jordbävningsaktiviteten i södra Sverige och södra Östersjön	40
Produktplanering och dataprodukter	42
Helsingforskonventionen	42

Samrådsunderlag och tillstånd.....	42
Borrningar	42
Inför marina undersökningar i sydöstra Östersjön 2025.....	43
Landseismiska undersökningar	45
Möjlighet att injektera från land?	45
Samverkan med myndigheter och andra organisationer	46
Trelleborgs kommun.....	46
Projektrisker 2024 – analys, hantering och utfall.....	46
Pågående och planerade arbeten 2025	47
Geologi.....	47
Seismicitet	48
Seismik.....	48
Maringeologi.....	48
Helsingforskonventionen.....	48
Projektrisker 2025.....	49
Externa kontakter och omvärldsbevakning.....	50
Konferenser och större möten.....	50
Press och kommunikation.....	51
Almedalen 2024.....	51
Studiebesök vid borrhjulen i Smygehuk.....	51
Digitala kanaler	52
SGU:s webbplats	52
Sociala medier	52
Press.....	53
Fysiskt informationsmaterial.....	53
Referenser.....	53

Sammanfattning

Sveriges geologiska undersökning (SGU) har i sitt regeringsuppdrag ”Koldioxidlagring i Sverige” uppgiften att undersöka och utreda lämpliga platser för permanent lagring av koldioxid i Sverige samt analysera förutsättningarna för driften av lagringsplatserna. SGU har fokuserat på att undersöka den sedimentära berggrundens lämplighet för koldioxidlagring i två geografiska områden: Gotland och sydöstra Östersjön samt södra Skåne inklusive havsområdet söder om Skåne (sydvästra Östersjön). Arbetet med regeringsuppdraget påbörjades 2023. Huvudansvaret för uppdraget ligger på avdelningen för Samhällsplanering men involverar medarbetare från flera olika avdelningar inom SGU. En mer djuplodande beskrivning av projektets organisation och arbetsfördelning kommer att redovisas i slutrapporten.

Projektet fortskrider i stort som planerat. SGU har under hittills utfört: tre kärnbörningar, två på Gotland och en i Skåne; gjort djupseismiska undersökningar både på land och till havs; samt även maringeologiska undersökningar av havsbotten i båda områdena. Vi har genom dessa undersökningar byggt upp en relevant och gedigen kunskapsplattform för CCS som kommer att vidareutvecklas under det fortsatta arbetet i 2025.

Sedan förra delrapporten (SGU 2023a) har följande aktiviteter genomförts och resultat uppnåtts inom uppdraget:

Område Gotland och sydöstra Östersjön

De två, nästan 800 m djupa borrhålen, Nore-1 och Nore-2, som kärnbörades på Gotland 2023 har analyserats och visar tillsammans med marinseismik på både positiva och negativa förutsättningar för lagring av koldioxid i den paleozoiska berggrunden i sydöstra Östersjön.

Tre olika sandstensenheter; Viklaledet, Närsandstenen och Faluddenledet, har undersökts och utvärderats med avseende på deras potential att fungera som lagringsbergarter (=reservoarbergarter) för koldioxid. Endast Faluddenledet uppnår och även överstiger gränsvärdena på minst 20 m tjocklek, minst 15 % porositet och en permeabilitet som är högre än 300 mD som rekommenderas för koldioxidlagring. Faluddenledet består till cirka 85 % av porösa och permeabla lager vilket kvalificerar den som mycket lämplig lagringsakvifer. Medelvärde för permeabiliteten är 1014 mD och porositeten 16,1 %. Faluddenledet är uppemot 55 m mäktigt i sydöstra Östersjön.

Viklaledet och Närsandstenen bedöms inte ha tillräckligt hög porositet och permeabilitet för att vara lämpliga för lagring av koldioxid.

För koldioxidlagring krävs inte bara en god reservoarbergart utan denna måste också vara överlagrad av täta och hållfasta bergarter som hindrar koldioxiden från att migrera upp till högre liggande lager eller till markytan. Sådana täta och hållfasta bergarter kallas takbergarter. Takbergarterna på Gotland har höga mekaniska hållfasthetsvärden och goda tätande egenskaper. Pågående mikroskopanalyser av de dessa takbergarter i Nore-1 stöttar tolkningen att de är goda takbergarter.

Data från SGU:s miljöövervakning av grundvattenkemin och grundvattennivåer i privata brunnar i närområdet av borrhålen på Gotland visar att varken grundvattenkemin eller grundvattennivåerna påverkades av borrhålen.

SGU har tagit fram en geologisk 3D-modell med syfte att ge en översiktlig bild av den sedimentära berggrundens uppbyggnad, speciellt med avseende på Faluddenledets utbredning, tjocklek och djup. Modellen kommer att uppdateras kontinuerligt och en mer detaljerad modell kommer då att tas fram över det område som är mest intressant för geologisk lagring av koldioxid.

Landseismiska undersökningar på Gotland: SGU har erhållit data som insamlades 2023 (samverkan Uppsala universitet). Tolkning är planerat under 2025.

Maringeologisk undersökning av förkastningar i sydöstra Östersjön utfördes i augusti 2024. Initiala analyser av de insamlade 462 km² ytgeologidata kring förkastningar har inte påvisat några geologiska strukturer (så kallade *pockmarks*) som tyder på gasutsläpp från berggrunden, men analys av vattenkolumnsdata är dock fortfarande pågående för att bekräfta det. Det har inte varit möjligt att fullt utvärdera hela området på grund av att miljötillstånd inte har givits för vissa områden.

Förberedelser för marinseismiska undersökningar och marin kartläggning genom ansökningar av tillstånd (Samrådsunderlag för tillstånd att utföra marinseismiska samt marina undersökningar innanför Natura 2000 (SGU Dnr SGU 3261-2482/2023) utanför Natura2000-området i sydöstra Östersjön (SGU Dnr 3261–223/2024)), där vi inväntar besked.

Skåne och sydvästra Östersjön

Hösten 2024 genomfördes en ny 1 290 m djup kärnboring, Lilla Beddinge-1, (samverkan Lunds Tekniska Högskola, Riksriggen) samt anläggning av en ny borrhåle, Skåre-1, med hammarboring och foderrörsättning. För Skåre-1 är kärnboring planerad till våren 2025 (samverkan Lunds Tekniska Högskola, Riksriggen).

I Lilla Beddinge-1 påträffades en 20 m tjock sekvens av Arnagergrönsand, en av de mest lovande enheterna för koldioxidlagring i sydvästra Östersjön då den innehåller rikligt med det grönaktiga mineralet glaukonit som är ett lättlösligt mineral med förmåga att effektivt binda injikerad CO₂ genom bildning av siderit (FeCO₃). Preliminära data och ett pumptest visar att ungefär hälften av grönsanden i Lilla Beddinge-1 består av tillräckligt permeabla sandstenslager. Arnagergrönsanden är mäktigare i andra delar av undersökningsområdet.

De cirka 600 m mäktiga kalkstenar och karbonatrika slamstenar som överlagrar Arnagergrönsanden bedöms på grund av den relativt höga lermineralhalten och homogent höga hållfastheten att vara en fullgod takbergart.

Under 2024 har SGU dessutom digitaliserat över 150 landseismiska profiler från Skåne, med en total längd på cirka 1 450 km. Landseismiska undersökningar genomfördes i Skåne under oktober 2024 i samverkan med Uppsala universitet.

De nya landseismiska undersökningarna utfördes längs fyra profiler som följde vägnätet i området kring Trelleborg med syfte att binda samman de båda borrhålen Lilla Beddinge-1 och Skåre-1 (planerad till våren 2025). Två av profilerna korsar även Svedalaförkastningen, en betydande deformationszon i området. Syftet är att möjliggöra tolkning och modellering på regional skala av de geologiska enheter och strukturer, inklusive förkastningar, som är av vikt för potentiell geologisk lagring av koldioxid i havsområdet söder om Skåne.

Uppsala universitet har under sen höst och vinter 2024 genomfört den grundläggande bearbetningen av de erhållna landseismiska data. Preliminära resultat visar på god datakvalitet och betydligt högre upplösning än de äldre landseismiska data som insamlats i närområdet vid prospektering på 1970- och 1980-talet.

SGU har bearbetat nya marinseismiska data som insamlades 2023 och skapat 101 färdigbearbetade seismiska profiler, med en total längd på cirka 2 150 km söder om Skåne.

Maringeologiska undersökningar av förkastningar utanför Skånes sydkust utfördes i april och juni 2024. Initiala analyser av de insamlade 269 km² ytgeologidata kring förkastningar utanför Skånes sydkust har inte påvisat några geologiska strukturer (så kallade *pockmarks*) som tyder på gasutsläpp. Analys av vattenkolumnsdata är dock fortfarande pågående för att bekräfta det.

Marinseismisk och maringeologisk undersökning utfördes utanför Skånes sydkust i september 2024. Ytterligare 450 km marinseismik insamlades med syftet att fylla i luckor i datatäckningen från mätningarna som gjordes under 2023.

SGU har investerat i ett eget system för marinseismik. Tidigare har SGU hyrt utrustning från GEUS (De nationale geologiske undersøgelser for Danmark og Grønland) i Danmark. Det nya systemet består av en 175 m lång så kallad 2D-streamer som bogseras av fartyget och har 56 kanaler (sensorer), samt en luftkanon (airgun) som används som energikälla för mätningarna.

En preliminär geologisk 3D-modell har tagits fram över Skåne och sydvästra Östersjön. Syftet med modellen är att ge en översiktlig bild av den sedimentära berggrundens uppbyggnad. Modellen kommer senare även att kunna användas för att beräkna volym och lagringskapacitet för de olika geologiska enheterna.

Övrig verksamhet i projektet

SGU har påbörjat en utvärdering av seismiciteten i södra Östersjön. Den visar att skalvaktiviteten i södra Östersjön är mycket låg.

Projektet kommer utöver rapporter att tillhandahålla resultat och data genom ett flertal befintliga eller planerade dataprodukter. Identifiering av de datamängder som projektet använder och samlar in i regeringsuppdraget har genomförts. De insamlade datamängderna informationsklassas och för många söks spridningstillstånd. En viss publicering av datamängder har redan påbörjats utifrån krav i EU:s förordning om nettonollindustrin (Net Zero Industry Act).

Under hösten 2024 har behovsdialoger genomförts med intressenter för att säkerställa att data som samlas in i regeringsuppdraget kan levereras i önskat format och förädlingssteg. Baserat på detta planeras det fortsatt för två övergripande produktkategorier: tillhandahållandet av insamlad data/mätdata och tillhandahållande av information för 3D-modeller som omfattar tolkade och bearbetade data med tillhörande rapporter.

SGU har under året deltagit aktivt i samordning med bland annat Energimyndigheten rörande rättsliga hinder för koldioxidlagring i Sverige.

SGU har också under 2024 varit aktivt i externa kontakter och omvärldsbevakning. Två referensgruppsmöten har hållits under året, med svenska, finska, norska och danska energimyndigheter, berörda länsstyrelser, Naturvårdsverket och intresserade företag har medverkat. SGU har också haft kontakt med organisationen KLIMPO med ett 30-tal företag anslutna. SGU har deltagit aktivt i flertalet nationella och internationella konferenser och workshoppar med fokus på CCS (*Carbon Capture and Storage*).

SGU har också varit aktivt på sociala medier, i dagspress och media.

Kommentarer och rekommendationer

Idag, 2025, är geologisk lagring av koldioxid inte tillåtet på land. Förbudet gäller hela utbredningen av lagringskomplexet, vilket förutom lagringsplatsen även inkluderar till exempel injekteringsanläggningar. En lagändring som innebär att delar av lagringskomplexet kan vara på land, till exempel injekteringsanläggningen, skulle väsentligt underlätta för att kunna genomföra geologisk lagring av koldioxid i Sverige som en del av Sveriges klimat- och miljöarbete. SGU skulle därför vilja lyfta behovet av en ändring i förordningen 2014:21 för att undersöka möjligheterna till en ändring av lagtexten för att möjliggöra att delar av lagringskomplexet kan finnas på land.

Som beskrivs i denna rapport så är gamla djupseismikdata mycket värdefulla, i synnerhet som ett komplement till moderna data. De kan ej helt ersätta den mer högupplösta information som fås från moderna data. Om inga miljötillstånd beviljas för ny datainsamling i sydöstra Östersjön finns

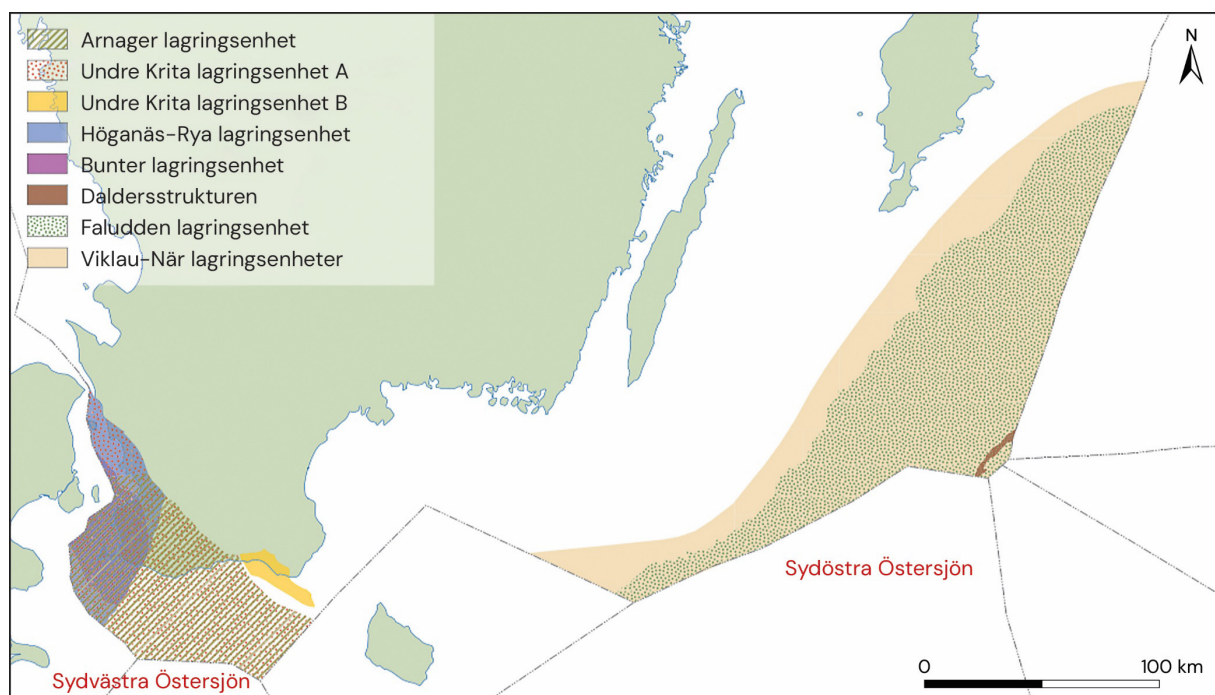
risk att SGU inte kan svara på om detta område är lämpligt för koldioxidlagring. Det blir också svårare att locka företag att försöka utveckla detta område för koldioxidlagring.

Vid en eventuellt framtida lagring av koldioxid är det också viktigt att veta på vilket sätt det kommer att vara tillåtet att övervaka injektering av koldioxid och hur koldioxiden rör sig i lagringsplatsen. Detta kommer att kräva återkommande seismiska mätningar med några års mellanrum under injekteringsfasen.

Inledning och bakgrund

I överenskommelse med regeringen ska Sveriges geologiska undersökning (SGU) ge ett utlåtande huruvida de områden som undersöks (fig. 1) är lämpliga för geologisk lagring av koldioxid, samt geografiskt lokalisera potentiella geologiska lagringsplatser för koldioxid, möjlig lagringskapacitet, riskbedömning samt konsekvenser för nationell havsplanering.

SGU kommer även att tillhandahålla grundinformation insamlad i projektet och digitala geologiska modeller som blir tillgängliga för de intressenter som behöver kunskapsunderlag inom CCS (*Carbon Capture and Storage*), till exempel branschen, konsulter, universitet och myndigheter. SGU har en väl rustad nationell plattform med marin- och landseismisk utrustning för fortsatta undersökningar och insamling av högkvalitativa data.



Figur 1. Undersökta områden inom regeringsuppdraget. Linjerna i kartan visar nationsgränser. Modifierad från Mortensen (2014).

Behovet av att kunna bedöma potentialen för koldioxidlagring i berggrunden har ökat efter den 16 mars 2023 då EU-kommissionen presenterade ett förslag på förordning om nettonollindustri (Net Zero Industry Act, NZIA), som tillsammans med förslaget om en förordning om kritiska råvaror, utgör de första delarna av Industriplanen för den gröna given (Green Deal Industrial Plan). Förordningen trädde i kraft och ska tillämpas från och med den 29 juni 2024. Förordningen ska enligt EU-kommissionen bidra till att skapa gynnsamma förhållanden för att skala upp

utvecklingen av gröna teknologier inom EU, stärka EU:s konkurrenskraft och bidra till att nå EU:s klimat- och energimål till 2030 samt skapa ett större energioberoende inom EU. Förordningen omfattar en hel del åtgärder för att stimulera investeringar i teknik med nettonoll-utsläpp. En specifik åtgärd som nämns är kapacitet för att lagra koldioxid där EU ska stödja projekt för avskiljning och lagring av koldioxid, bland annat genom att förbättra tillgången till lagringsplatser för koldioxid.

Inom uppdraget arbetar SGU kontinuerligt med kompetenshöjning för att stärka SGU:s roll som tillsynsmyndighet för CCS, samt för hantering av framtida tillståndsansökningar. Myndigheten arbetar också för att främja kunskapsöverföring inom CCS i Sverige och internationellt via samarbeten, samverkan och benchmarking. Under 2024 har vi hållit två referensgruppmöten, ett i mars och ett i maj, och ett tätt samarbete med Energimyndigheten har inletts. Ytterligare två möten planeras för 2025. SGU har även engagerat sig i öppna seminarier för industrin och andra branschaktörer främst genom nätverket KLIMPO.

I den här delrapporten ges en sammanfattning av utförda arbeten under 2024 och resultat som framkommit sedan förra delrapporten (SGU 2023a) i december 2023. Följande planlagda aktiviteter inom regeringsuppdraget har utförts sedan förra delrapporten.

- Analys och tolkning av data från landseismiska undersökningar på Gotland som genomfördes 2023 (samverkan Uppsala universitet).
- Analys och tolkning av borrhållarna från Gotland som borrades 2023.
- En ny kärnbörning i Skåne genomfördes under hösten 2024 (samverkan Lunds Tekniska Högskola, Riksriggen).
- Marinseismiska undersökningar och marin kartläggning i sydöstra Östersjön 2024
- Samrådsunderlag (SGU Dnr SGU 3261-2482/2023).
- Anmälan marinseismiska samt marina undersökningar utanför Natura 2000-området sydöstra Östersjön (SGU Dnr 3261–223/2024). Avvaktar besked.
- Landseismiska undersökningar i Skåne 2024 (samverkan Uppsala universitet)
- Maringeologiska undersökningar utanför Skånes sydkust i april 2024.

Här nedan följer kortfattade beskrivningar av de under 2024 utförda geologiska, seismiska och maringeologiska aktiviteterna, samt hittills uppnådda tolkningar och resultat. Vi ger också kortfattad information rörande: nationella och internationella juridiska frågeställningar angående CCS, samråd och tillståndsansökningar, samverkan med andra myndigheter, projektrisker, och utåtriktad verksamhet och kommunikation.

Undersökningar på Gotland och i sydöstra Östersjön

Geologiska undersökningar

Inledning

Hösten 2023 genomfördes borrningarna av två kärnborrhål på Sudret på södra Gotland. De två borrhålen Nore-1 och Nore-2 är nästan 800 m djupa och placerades strategiskt nära varandra för att det skulle vara möjligt att undersöka den laterala (horisontella) uppbyggnaden av enskilda lager och den hydrauliska kommunikationen i sandstenslagren via pumptester. Målsättningen är att

skapa väldokumenterade referensborrningar som kan vara till stöd för tolkningar av andra äldre borrningar där det saknas borrhälsinformation eller geofysiskt underlag. Det är en av förutsättningarna för nytolkning av den äldre geofysiska borrhälsinformationen från bland annat OPAB:s borrningar i södra Östersjön från 1970-talet. Med stöd av resultaten från de nya borrningarna på Gotland finns det ett bättre underlag till en kvalitativ och kvantitativ bedömning av både takberggrundens och de olika sandstensreservoarernas uppbyggnad och egenskaper på Gotland och i sydöstra Östersjön. Genomförandet och preliminära resultat från borrningarna redovisades i regeringsuppdragets delrapport 1 (SGU 2023a).

Sedan delrapport 1 har det, förutom omfattande provtagning och analys av borrhälsprover, gjorts en övergripande tolkning av resultaten från analyser, borrhälsprover och borrhälsgeofysik med syfte att undersöka berggrundens fysikaliska, mekaniska och kemiska lämplighet för geologisk lagring av koldioxid. Analyserna och testerna som redovisas i nedanstående avsnitt har fokuserat på att undersöka:

- Takberggrundens tjocklek, uppbyggnad och homogenitet, som underlag för bedömning av dess tätande egenskaper.
- De tre sandstenslagrens (Faluddenledet, Närsandstenen och Viklaledet) reservoaregenskaper och nettosand; det vill säga hur stor andel av den totala tjockleken för de olika potentiella sandstensreservoarerna som består av en tillräckligt porös och permeabel sandsten för att kunna utgöra en del av en lagringsplats.

Borrhälsprover och borrhälsprover är arkiverat i SGU:s borrhälsprover i Malå. Prover från utförda analyser läggs tillbaka i borrhälsprover så att möjlighet finns till kompletterande analyser.

Borrningarna Nore-1 och Nore-2

De geologiska undersökningar och analyser som utförts under 2024 på borrhälsprover från Nore-1 och Nore-2 finns sammanställda i tabell 1.

I borrhälsproverna har det utförts geofysiska borrhälsmätningar med instrument som mäter naturlig gammastrålning (Gamma), borrhälsväggens diameter (Caliper), ljudvågors gånghastighet (Sonic)

Tabell 1. Sammanställning av utförda undersökningar och analyser av Nore-1 och Nore-2.

Utförda undersökningar, analyser	Nore-1	Nore-2
Trycktest takberggrund	477,5 m	477,5 m
Injektionstest	551,5 m Faluddenledet 676,45 m Närsandstenen 726 m Viklaledet	553,5 m Faluddenledet
Pumptest	551,5 m Faluddenledet 676,45 m Närsandstenen	Ett test med samtliga reservoarer
Kemisk skanning XRF (kväve)	181,5–791,45 m	181,36–787,68 m
Kemisk skanning XRF (helium)	537,38–581,38 m	542,37–586,80 m
Högupplöst fotografering	181,5–791,45 m	181,36–787,68 m
Detaljerad kartläggning	400,00–791,45 m	400–787,45 m
Porositet och permeabilitet	49 prov	14 prov
Mekaniska analyser	Sex prov på takberggrund	Två prov på takberggrund
Termiska analyser	34 prov	0 prov
Lermineralanalys (XRD)	8 prov	4 prov
Petrografiska analyser	49 prov	14 prov

samt berggrundens resistivitet och temperatur som tillsammans ger en fysikalisk karakterisering av berggrunden (tabell 2).

Informationen från mätningarna med Sonic-utrustningen är ett stöd till tolkningen av de landseismiska undersökningarna som utförts i området. Den akustiska skanningen av borrhålsväggen med Akustisk Televiewer ger en bild av borrhålsväggens uppbyggnad där man bland annat kan identifiera sprickor och deras orientering i borrhålsväggen. Undersökningar och analyser har utförts av SGU, samt svenska eller utländska laboratorier specialiserade på analyser kopplade till geologisk lagring av koldioxid.

Tabell 2. Sammanställning av de geofysiska borrhålsmätningarna genomförda i Nore-1 och Nore-2.

Utförda geofysiska borrhålsmätningar	Nore-1	Nore-2
Naturlig gammastrålning	5-789 m	7-786 m
Borrhålsväggens diameter	5-789 m	7-786 m
Punktresistivitet	177-789 m	176-786 m
Lateral resistivitet	177-789 m	176-786 m
Temperatur	177-789 m	137-786 m
Akustisk Televiewer	270-789 m	270-786 m
Borrhålsväggens diameter	4-788 m	7-786 m
Ljudvågors gånghastighet	175-788 m	176-786 m

Petrografiska mikroskopsanalyser av reservoarer och takberggrund

Inom regeringsuppdraget har det gjorts mikroskopanalyser av tunnslipspreparat från de potentiella reservoarintervallen samt takbergarter från de gotländska borrhålskärnorna. Syftet med tunnslipsanalyserna är att få bättre kunskap om reservoar- och takbergarternas mineralogiska och texturella uppbyggnad. Mikroskopiska egenskaper som till exempel kornform, kornstorleksfördelning, skiktning och porfördelning påverkar bergarternas lämplighet som reservoar- respektive takbergart.

För reservoarbergarten är det avgörande att identifiera och karakterisera de ingående beståndsdelarna i sandstenen för att kunna göra en bedömning av både potentiell lagringsvolym samt hur injikerad koldioxid kan komma att reagera med reservoarbergarten. Den lagrade koldioxiden kommer att reagera med både porvätska och olika mineral i sandstenen. Koldioxiden kan finnas kvar i porvätskan eller fällas ut som olika karbonatrika mineral. Porernas geometriska form är viktig för att bedöma spridningen av injikerad koldioxid i reservoaren.

En god förståelse för takbergartens uppbyggnad och täthet är en förutsättning för att kunna bedöma om det finns en risk för läckage från en lagringsplats. I en otät takbergart skulle koldioxiden kunna läcka genom långsam spridning genom takbergarten eller via otäta sprickor eller förkastningar.

Reservoarbergarter: Prov från potentiella sandstensreservoarer i sydöstra Östersjön (Faluddenledet, Närsandstenen och Viklaudedet) har tagits från både äldre borrhålskärnor samt från Nore-1 och Nore-2. Provnivåerna valdes ut för att fånga övergångar mellan bergarter, ovanliga strukturer och anomalier i geofysiska borrhålsmätningar, samt för att noggrant undersöka representativa delar av sandstenarna. De utvalda proverna skickades till Thin Section Lab i Frankrike för tunnslipspreparation. Tunnslipen undersöktes först med polarisationsmikroskop för att få en överblick och för att kunna välja ut prov för detaljerade mikroanalyser med hjälp av ett svepelektronmikroskop på geologiska institutionen vid Lunds universitet. Totalt undersöktes 49 tunnslip från potentiella sandstensreservoarer med elektronmikroskopi (tabell 3).

Tabell 3. Utvalda tunnslip för mikroanalyser av reservoarbergart från äldre borrhälar på Gotland och sydöstra Östersjön, samt från nya borrhälar på södra Gotland (Nore-1 och Nore-2).

Borrhäla	Bergartsenhet	Antal utvalda tunnslip	Djup (m)
När-1	Närsandstenen, Viklaudedet	7	549–642
Frigsarve-1	Faluddenledet	3	501–511
Stora Sutarve	Faluddenledet	5	542–563
Kvarne-1	Faluddenledet	2	512–518
Hamra-1	Faluddenledet	3	572–586
Till havs	Faluddenledet	2	
Nore-1	Faluddenledet, Närsandstenen, Viklaudedet	21	554–778
Nore-2	Faluddenledet, Närsandstenen, Viklaudedet	6	558–780

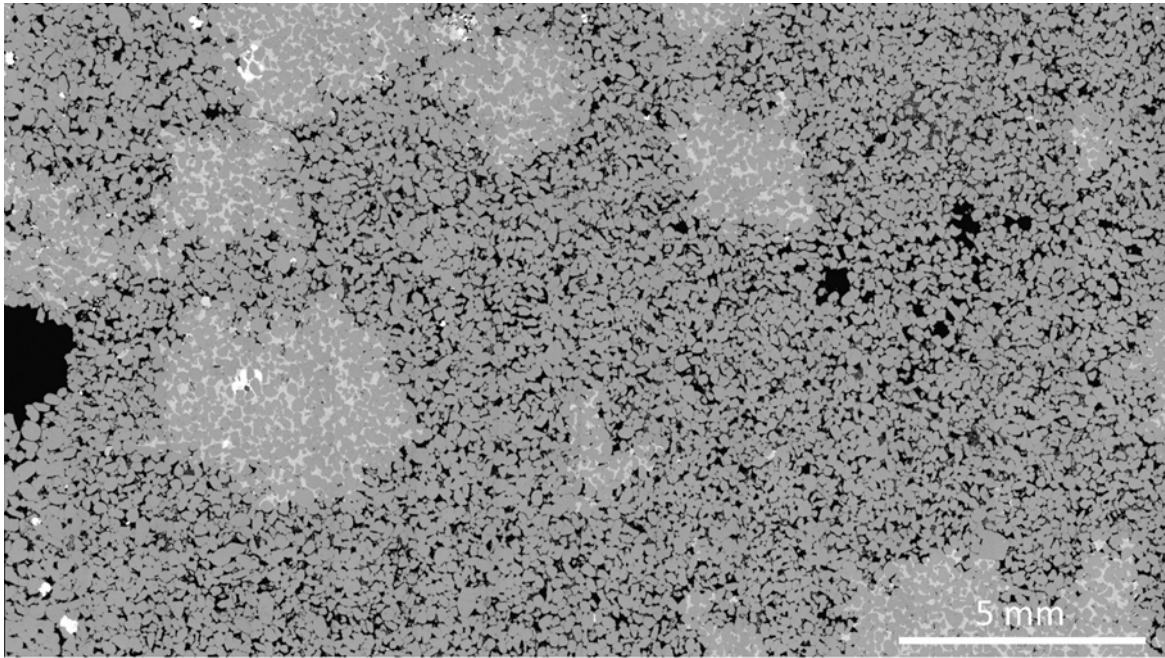
Proverna från Närsandstenen och Viklaudedet har omfattande sekundära mineraliseringar i porutrymmena vilket leder till en generellt lägre porositet och permeabilitet. Dessa två enheter bedöms därför olämpliga för geologisk lagring av koldioxid. Däremot visar undersökningen att Faluddenledet är lämplig för koldioxidlagring.

Resultat från mikroanalyser av Faluddenledet

Textur: Sandsten från Faluddenledet har en relativt jämn kornstorleksfördelning där merparten av kornen är mellan 0,1 och 0,3 mm i diameter. Kornen är ofta rundade i formen och löst packade. Det är en textur som leder till god porositet och permeabilitet där koldioxiden har förutsättningar att kunna sprida sig genom pormatrisen mellan kornen. En del korn sitter ihop i kluster men annars är det mest kontakter som snuddar vid varandra.

Detrital mineralogi: Den detritala mineralogin representerar den mineralsammansättning som sandstenen hade vid sin avsättning. I sandstenen från Faluddenledet består sandkornen nästan uteslutande av kvarts med undantag av tungmineral som finns i ett fåtal tunna skikt i sandstenens undre delar. Sandsten från Faluddenledet saknar matrix mellan sandkornen (finkornigt sediment som avsatts tillsammans med sandkornen) och inslag av lera. Det är fördelaktigt för reservoaregenskaperna eftersom det bidrar till ökad porositet och permeabilitet.

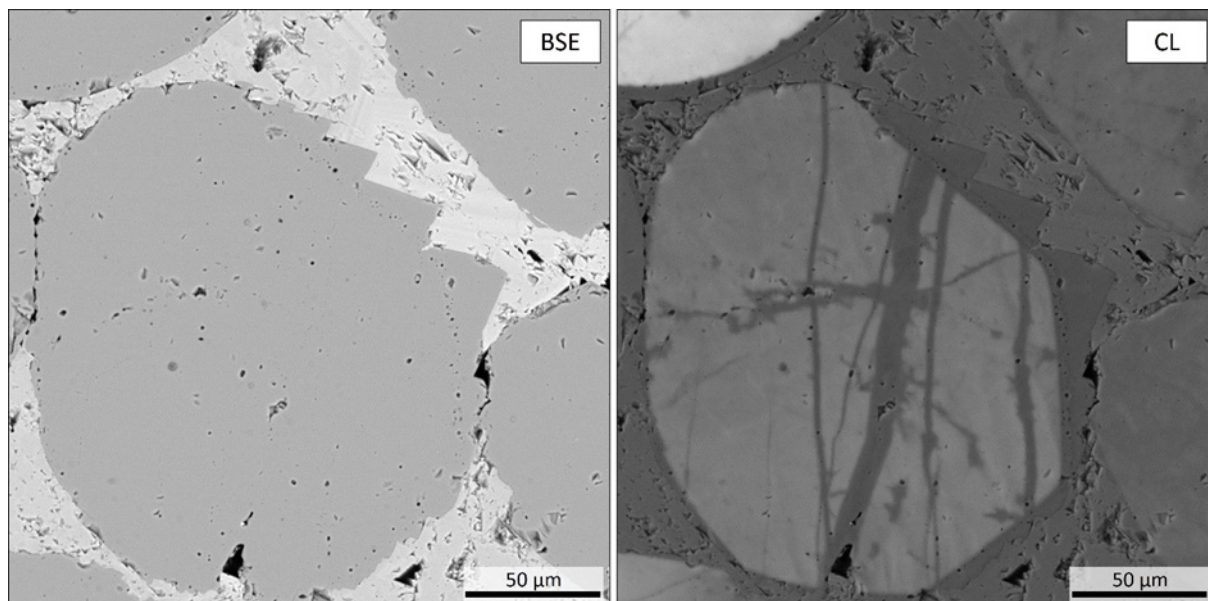
Sekundär mineralogi: Sekundära mineral bildas under diagenes, det vill säga den process där ett löst sediment omvandlas till en bergart. Sekundära mineral kan då bildas i porutrymmen mellan kornen, längs kornkanter eller i sprickor. Sekundära mineraliseringar som omsluter och håller ihop flera detritala korn kallas cement. En välcementerad sandsten har låg porositet eftersom porutrymmena fyllts ut av sekundära mineral. I Faluddenledet förekommer karbonatcement endast fläckvis (fig. 2). Eftersom cementeringen bara finns i begränsade områden hindras inte flödet av koldioxid i bergarten i lika stor utsträckning som i en välcementerad sandsten. Fläckvis cementering kan vara fördelaktig eftersom den kan motverka kompaktion av sandstenen vid geologisk lagring av koldioxid.



Figur 2. En översiktlig SEM-bild (*backscattered electron*, BSE) som visar ett helt tunnslip av sandsten från övre delen av Faluddenledet i borrhölet Nore-1 (SGU-N1-S8). Ett typiskt utseende av sandsten från Faluddenledet är rundade detritala kvartskorn (mellangrå) med ett fläckvis karbonatcement (ljusgrå). Vita fläckar är sekundära pyritmineraliseringar och svart är porutrymmen. Sekundära lermineral kan urskiljas i mörkgrått i nordöstra hörnet av bilden.

Vid injektering av koldioxid kommer porvätskans sammansättning och den kemiska miljön i reservoaren att ändras. Detta kan leda till att karbonatmineral, såsom kalcit (CaCO_3) och dolomit (CaMgCO_3), löses upp och faller ut igen på andra ställen i reservoaren. Eftersom dolomit är mindre lösligt än kalcit innebär det att dolomitcement är mer stabilt än kalcitcement. I Faluddenledet består det karbonathaltiga cementet huvudsakligen av mineralet dolomit (CaMgCO_3). Kalcitcement förekommer endast sparsamt i Faluddenledet och då främst i anslutning till mikrosprickor i de övre och mellersta delarna av bergartsenheten. Mineraliserade mikrosprickor visar att vätskor tidigare rört sig i bergarten, men troligen som en del av ett slutet och småskaligt system. Sprickorna bedöms därmed inte att utgöra någon risk för läckage av koldioxid från en lagringsplats. Andra sekundära mineraliseringar såsom pyrit, apatit, illit och kaolinit förekommer också men bedöms i dagsläget inte ha en negativ påverkan på koldioxidlagring i Faluddenledet.

Utöver cement av dolomit eller kalcit finns början till kvartscementering i sandsten från Faluddenledet (fig. 3). Utbredd kvartscementering kan reducera porositeten betydligt. Då våra analyser främst kommer från sandsten på mellan 501 och 642 m djup, vilket är grundare än det aktuella djupet för koldioxidlagring, finns det en risk för att kvartscementering är mer omfattande på större djup (Moolenaar m.fl. 2007). Vi har endast begränsade data från större djup (ett fåtal tunnslip från äldre borrhål till havs) och utan mer jämförande material är det svårt att veta om de är representativa. Det vi har observerat är att sandsten från Faluddenledet i dessa borrhål uppvisar en högre grad av kompaktion. För att få en bättre bild av hur diagenes med kvartscementering fungerar på det djup som är aktuellt för en lagringsplats skulle det behövas fler prover från dessa djup.



Figur 3. SEM-bilder, till vänster backscattered electron (BSE) och till höger cathodoluminescense (CL), som visar början till sekundär kvartscementering i sandsten från Faluddenledet, borrkärnan Kvarne-1 (518,15 m). Det rundade kvartskornet sitter i ett cement av dolomit (ljust i den vänstra bilden) och har en flikig påväxt av sekundär kvarts på sin högra sida. I bilden till vänster är både det detritala kvartskornet och den sekundära kvartspåväxten mellangrå. I bilden till höger, som är tagen med CL-detektor i elektronmikroskopet, är den sekundära kvartspåväxten mörkare grå och det går även att urskilja mörkare grå band inne i kvartskornet. CL-detektorn kan urskilja mycket små skillnader i sammansättning eller kristallorientering och är därför bra att använda för att påvisa olika generationer av mineraliseringar.

Resultat från mikroanalyser takbergarter

Resultatet av mikroanalyserna från de siluriska takbergarterna visar att de är täta och homogena. De är finkorniga, täta och homogena och har inte påvisat några problem med sprickor. De är fossilförande med skalfragment och organiskt material, och har en mineralsammansättning huvudsakligen av lermineral, dolomit, kalcit, kvarts, kalifältspat, albit, pyrit och klorit.

Slutsatser

Den sammantagna bedömningen av mikroanalyserna är att sandsten från Faluddenledet är en lämplig reservoarbergart för koldioxidlagring. Däremot faller Närsandstenen och sandsten från Viklaledet bort som reservoarkandidater eftersom de inte är tillräckligt porösa. Vidare studier krävs för att förstå hur kvartscementering i sandsten från Faluddenledet fungerar på de djup där koldioxiden ska injekteras och lagras. Om inte naturliga prov finns att tillgå kan mer kunskap om detta hämtas genom experimentella eller teoretiska studier.

Pågående analyser och tolkning av analysresultat av tunnslip från siluriska lerstenar och mörgelstenar från Nore-1 visar att dessa bergarter är goda takbergarter.

Termiska egenskaper

De termiska egenskaperna beskriver bergets förmåga att leda och förvara värme. Det är viktiga egenskaper för geologisk lagring av koldioxid eftersom koldioxiden är komprimerad vid injektering och till viss del kommer att dekomprimeras under lagringen, en process som sänker temperaturen i berggrunden. Vid en för kraftig och lokal nedkylning av berggrunden finns det risk att man inducerar seismisk aktivitet, eller påverkar takbergartens täthet (Kivi m.fl. 2022). Det innebär att både termiska och mekaniska egenskaper kan påverka flödet av koldioxid i lagringsplatsen.

Den termiska ledningsförmågan ($W/m\cdot K$) beskriver hur mycket termisk energi som berggrunden kan transportera, medan den specifika värmekapaciteten (J/K), beskriver hur mycket tillförd energi som berggrunden behöver för att öka sin temperatur. Termisk diffusion är en konstruerad enhet från de två tidigare nämnda enheterna, som beskriver hur snabbt värmen sprider sig i berget.

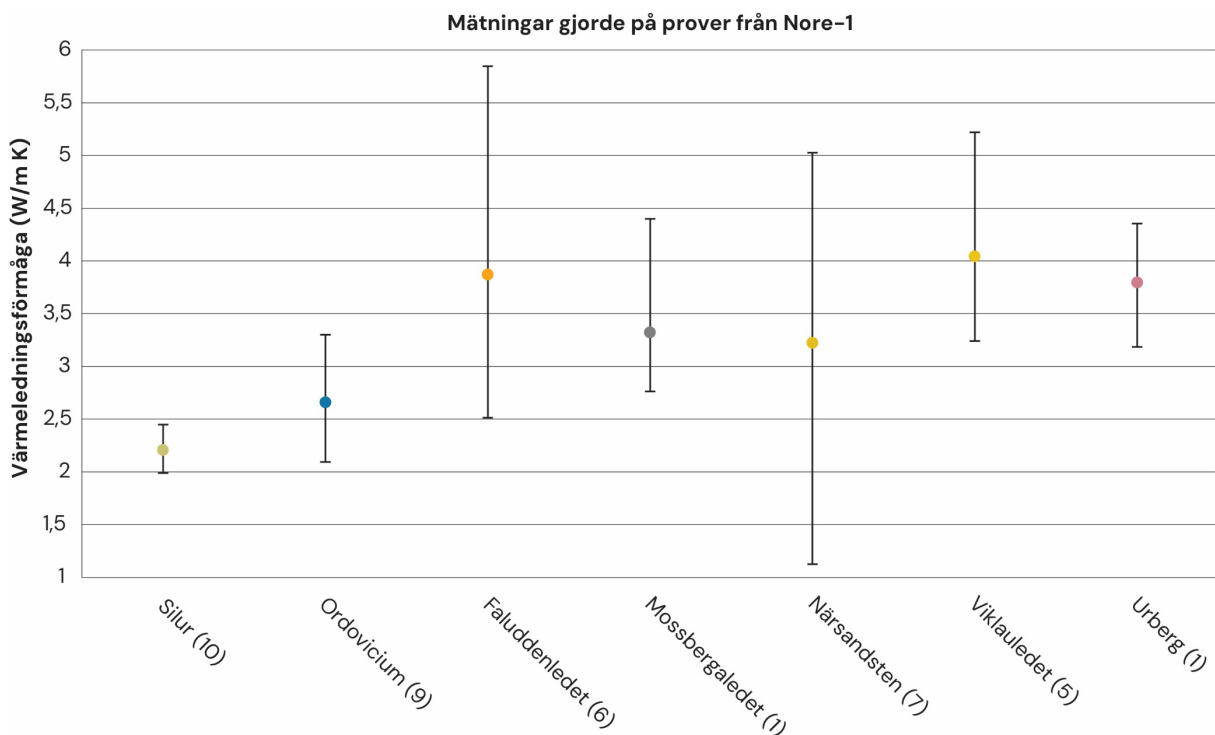
Mätmetod

Det finns olika metoder för att mäta termiska egenskaper. Den metod SGU valt att använda är TCS (*Thermal Conductivity Scanner*, termisk ledningsförmågascanner). Den mäter den termiska ledningsförmågan och den termiska diffusionen, som tillsammans beskriver den specifika värmekapaciteten.

Den största fördelen med TCS som mätmetod är att man snabbt och enkelt kan mäta stora volymer av prover – utan några större förberedelser. En nackdel är att den inte ger absoluta mätvärden direkt, utan jämför mätresultaten mot kända prover. 39 prov från Nore-1 har mätts i regeringsuppdraget. Som jämförelse med TCS-metoden kommer ett mindre antal prover, representativa för respektive bergart, att mätas med en alternativ metod senare i projektet.

Resultat

De 39 bergartsproverna från Nore-1 visar att takbergarten är homogen och därmed förutsägbar vad gäller sina egenskaper, medan själva reservoarbergarten är mer heterogen (fig. 4).



Figur 4. Resultat från mätningar av termisk ledningsförmåga från Nore-1. Numret inom parentes efter namnet anger antalet geologiska prover som resultatet baseras på. Punkten är medelvärdet för respektive "enhet", medan spridningen representerar enskilda mätpunkter på alla prov. Det kan vara värt att notera att proven från den siluriska och ordoviciska berggrunden har mindre spridning, vilket gör deras egenskaper mer förutsägbara, medan sandstenarna har en större spridning.

Hydrogeologiska tester i borrhålen på Gotland och grundvattenförhållanden

Här sammanfattas de hydrauliska tester som genomförts i kärnborrhålen Nore-1 och Nore-2. Testerna gjordes i samband med borrhningen, men har tolkats först under 2024. Inför borrhningen var tanken att genomföra tester successivt varefter borrhningen gick igenom de olika tak- och reservoarbergarterna.

Följande tester genomfördes separat i både Nore-1 och Nore-2:

- Injekteringstest i takberggrunden
- Pumptest följt av injekteringstest i respektive möjlig reservoar (Faluddenledet, Närsandstenen, Viklaledet)

Därefter genomfördes ett längre pumptest i Nore-2 samt samtidig övervakning av eventuella tryckförändringar i Nore-1.

Det övergripande syftet med testerna var att:

- Verifiera att takbergarten har en låg transmissivitet
- Uppskatta transmissivitet för respektive reservoar
- Om möjligt observera tryckrespons i Nore-1 under tester av Nore-2 för att få en bild av hur tryck fortplantar sig i de olika reservoarerna.

Vid planeringen av testerna övervägdes att genomföra hydrauliska tester med utrustning som specifikt utformats för hydrauliska tester i långa borrhål efter att borrhålen borrhats klart. Sådana tester har tidigare genomförts av SKB (Svensk kärnbränslehantering) i samband med deras geologiska undersökningar inför slutförvaret av kärnbränsle. Det bedömdes dock innebära avsevärt högre kostnader, samt en ökad risk för fastsättning av utrustning då det inför borrhning var oklart om till exempel ras skulle kunna ske i borrhålen.

I september och oktober 2023 utfördes trycktest av takbergarten i Nore-1 och i Nore-2 (tabell 4). Testen genomfördes genom att en wireline packer installerades i borrhålet och två tryck- och temperaturgivare installerades i testzonen. Pumpen på borrhningen användes under trycktestet/ injekteringstestet och injekteringsflödet registrerades av en flödesgivare placerad efter pumpen. Den här tryckökningen kvarstod tills testet avslutades. Tryckökningen och det låga injekteringsflödet indikerar att takbergarterna har väldigt låg permeabilitet och kan betraktas som täta.

Under genomförandet blev det nödvändigt att justera metoden och utvärderingen av testerna.

Baserat på de hydrauliska testerna görs bedömningen att den vattenledande förmågan, (transmissivitet T), för Faluddenledet är i storleksordningen $3E-5 \text{ m}^2/\text{s}$. Utifrån vissa antaganden beräknades permeabiliteten utifrån denna transmissivitet till 140 mD.

Tabell 4. Tabellen visar resultatet från trycktesterna i Nore-1 och Nore-2.

	Nore-1	Nore-2
Trycktest	477,4–488,45 m	523,9–533,45 m
Tid för test	8 minuter	6 minuter
Medelflöde	19 liter/minut (efter 3 minuter) 0 liter/minut	10 liter/minut (efter 3 min) 0,7 liter/minut
Tryckökning	66 bar	57 bar

Vid pumptester och borrning i Nore-2 kunde tryckresponser detekteras i Nore-1. Baserat på dessa responser skattades den hydrauliska diffusiviteten till $1,5 \text{ m}^2/\text{s}$ vilket då skulle innebära att magasinskoefficienten skulle vara i storleksordningen $2\text{E}-5$. Observera att denna skattning måste betraktas som mycket osäker. De hydrauliska testerna av Närsandstenen och Viklaudet visar att transmissiviteten i dessa enheter är mycket sämre än i Faluddenledet och att de inte ämnar sig för lagring av koldioxid.

Förklaringar till termer

Reservoarbergart: En porös och permeabel bergart, till exempel en medelkornig sandsten utan hög halt av cement eller matrix som fyller igen porerna mellan kornen.

Takbergart: En tät bergart som inte släpper igenom koldioxiden, vanligen lersten, skiffer, gips, anhydrit eller kalksten.

Permeabilitet ($k = \text{m}^2$): Ett materials möjlighet att släppa igenom vatten

Transmissivitet ($T = \text{m}^2/\text{s}$): Ett mått på en akvifers/reservoarbergarts förmåga att transportera vatten.

Hydraulisk diffusivitet: Kvoten mellan markens vattengenomsläpplighet (transmissivitet, T) och dess vattenhållande förmåga (magasinskoefficient, S).

Magasinskoefficienten (S): är ett mått på en akvifers förmåga att avge vatten vid trycksänkning

Vattenkemi

Vid fem utvalda provpumpningstillfällen togs det vattenprover för kemisk analys från Nore-1 respektive Nore-2. Den kemiska analysen visar på ett vatten med mycket höga halter av kalcium, magnesium, natrium, barium, strontium, klorid och med mycket hög hårdhet, konduktivitet och turbiditet, samt mycket lågt pH och alkalinitet. Analysresultaten är rimliga för ett vatten upptaget från detta djup på Gotland.

Grundvattenövervakning

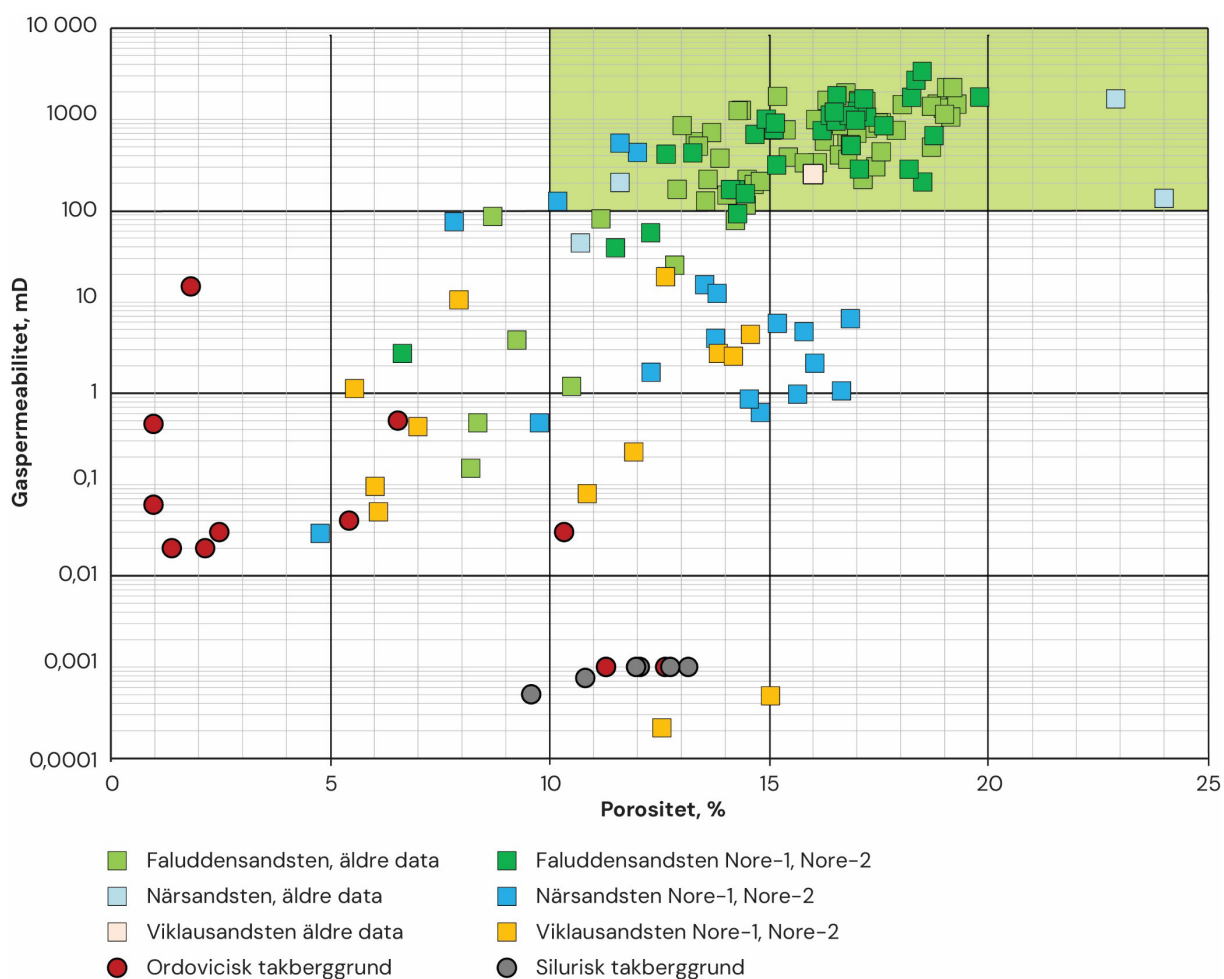
För att uppfylla de försiktighetsmått som krävs från tillsynsmyndigheten Region Gotland utfördes grundvattennivåmätningar och vattenprovtagning i samband med borrningarna. Grundvattenundersökningarna har utförts vid fem fastigheter belägna cirka 200–500 m nordnordost om borrhplatserna. Varje fastighet har en enskild dricksvattenbrunn. Vattenprover togs före och under borrningen, under hydrotesterna och efter slutförda undersökningar.

Slutsatserna från övervakningen är att vattenkemin förblev opåverkad av de borrningar som utfördes. Ingen förändring skedde samtidigt i samtliga brunnar vilket skulle kunnat indikera påverkan på grundvattenkemin från borrningarna. Grundvattennivåerna har inte heller påverkats av borrningarna. De förändringar som noterades under hösten då borrningarna utfördes kan härledas till nederbörd.

Sammanfattande resultat från de geologiska undersökningarna

Resultaten från undersökningarna i Nore-1 och Nore-2 visar både positiva och negativa förutsättningar för lagring av koldioxid i den paleozoiska berggrunden i sydöstra Östersjön.

Data från borrningarna har gett information som stödjer möjligheten till lagring av koldioxid i Faluddenledet. Däremot visar resultaten att Viklaudet och Närsandstenen inte lämpar sig för koldioxidlagring. Bedömningen baseras främst på hur stor andel av den totala tjockleken som utgörs av tillräckligt porösa och permeabla lager. Nettosanden, det vill säga tjockleken på tillräckligt porösa och permeabla lager bör vara minst 20 m för att en sandstensenheter ska vara lämplig för lagring. Gränsvärdena på minst 15 % porositet och en permeabilitet som är högre än 300 mD är satta efter gängse börkrav (Chadwick m.fl. 2008). Om reservoaren har en porositet som är $> 20 \%$ och permeabilitet $> 1\,000 \text{ mD}$ anses det vara mycket bra värden. I figur 5



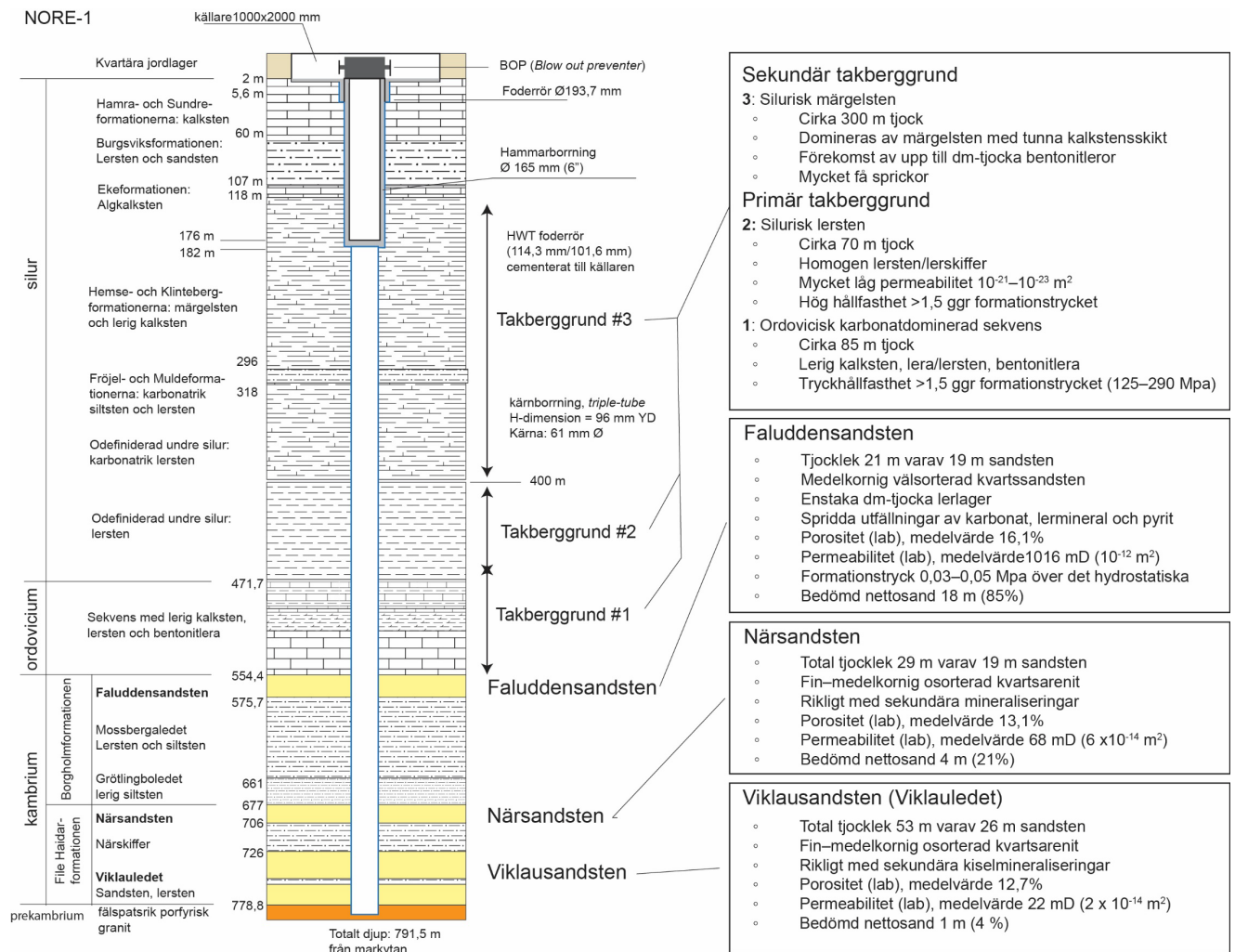
Figur 5. Diagram som redovisar resultaten från utförda analyser av porositet och permeabilitet på provmaterial från Nore-1 och Nore-2 samt data från äldre analyser på borrhov från Gotland. Svagt grönfärgat område i övre högra delen av diagrammet anger acceptabla värden för koldioxidlagring.

illustreras fördelningen och sambandet mellan porositet och permeabilitet för de olika sandstensenheter och takberggrunden. I figur 6 ges en översikt av bedömningarna av de olika lagringsenheter (reservoarer och takberggrund) i Nore-1. Notera att berggrunden i både Nore-1 och Nore-2 är i stort sett likartat uppbyggd. Det som skiljer mest är att det kring 500 m djup förekommer tjockare bentonitlager i Nore-2 jämfört med Nore-1. I övrigt skiljer sig borrhovarna endast åt genom någon meters skillnad i tjocklek för de olika berggrunds enheterna samt djupet till dessa.

Nedan följer en kort summering av de olika berggrunds enheternas bedömda egenskaper och funktion som lagringsreservoar respektive takberggrund. En summering ges även i figur 6.

- *Viklauledet* är den understa sandstens enheten och består nästan uteslutande av täta sandstenslager. Sandstenen innehåller en hög andel lera som bidrar till en mycket låg permeabilitet (medel = 26,4 mD) (fig. 5). Av en total mäktighet på 53 m utgör endast en försumbar del porös och permeabel lager vilket diskvalificerar sandstenen som lämplig för lagring.
- *Närsandstenen* är den mellersta av de tre potentiella lagrings enheterna (fig. 6) och även den uppvisar övervägande täta sandstenslager. Av den totala mäktigheten på 29 m utgörs endast fyra meter tillräckligt porös och permeabel sandsten. Även om dessa fåtal meter är tillräckligt porös och permeabel är tjockleken för liten. Det gör att även nettosanden för Närsandstenen är alldeles för liten för att den ska lämpa sig för lagring av koldioxid. Medelvärde för permeabiliteten är 68 mD och porositeten 13,1 %.

- *Faluddenledet* är den översta kambriska sandstensenheten och uppvisar goda reservoaregenskaper. Sandstenen är på södra Gotland 20–25 m tjock men i sydöstra Östersjön är den uppmot 55 m tjock. Den består till cirka 85 % av porösa och permeabla lager vilket kvalificerar den som lämplig lagringsakvifer. Medelvärde för permeabiliteten är 1 014 mD och porositeten 16,1 %. Merparten av porositets- och permeabilitetsvärdena ligger över de generella börvärdena (fig. 5). Sandstenen består av en ren kvartssandsten med liten andel mineraliseringar i porerna. I Faluddenledet förekommer några få dm-tjocka lerlager som bedöms ha en begränsad lateral utbredning. Som exempel kan inte lerlagren som förekommer i Nore-1 och Nore-2 korreleras med varandra.
- *Ordovicisk karbonatdominerad berggrund (primär takberggrund #1)*. Ovanför Faluddenledet finns ett 85 m tjockt avsnitt som består i varierande grad av lerig kalksten med inslag av karbonatrik lersten och upp till meter-tjocka bentonitleror. Kalkstenen har mycket hög mekanisk hållfasthet vilken tillsammans med lerlagren och bentonitlagren bedöms utgöra betydande vertikala barriärer som bidrar till takberggrundens tätande funktion (fig. 6).
- *Silurisk lersten (primär takberggrund #2)*. Den cirka 70 m tjocka berggrundsenheten ovanför den ordoviciska består av homogen gråsvart silurisk lersten med mycket låg vertikal permeabilitet och hög hållfasthet (fig. 6).
- *Silurisk mägersten (sekundär takberggrund #3)*. Ovanför den primära takberggrunden finns därutöver en drygt 300 m tjock sekvens med mägersten med bedömt goda tätande egenskaper (fig. 6).



Figur 6. Sammanfattande beskrivning av borrhningen Nore-1 och en bedömning av de olika lagringseenheterna.

Förhållanden i sydöstra Östersjön tolkat från resultaten av borrhningarna på södra Gotland

Utifrån resultaten från Nore-1 och Nore-2, tillsammans med jämförelser av befintlig seismik och geofysisk information från OPAB:s borrhningar till havs under 1970-talet i sydöstra Östersjön, så kan vi redan nu dra några övergripande bedömningar om berggrundens förutsättningar för lagring.

Takberggrunden ovanför Faluddenledet består i sydöstra Östersjön av ett 80–125 m tjockt ordoviciskt kalkstensdominerat intervall som kan följas och korreleras mellan samtliga äldre borrhningar i sydöstra Östersjön. Det ordoviciska intervallet kan även följas åt nordost mot Estland och västerut mot Öland. Den ordoviciska takberggrunden har tidigare beskrivits och kartlagts med hjälp av borrhålsgeofysik (Erlström & Sopher 2019) men har nu även bekräftats med analys av borrhkärnor. Med stöd av borrhkärnorna från Nore-1 och Nore-2 kan de geofysiska signalerna korreleras till olika bergartstyper och egenskaper. Bland annat har det framkommit att det finns lateralt uthålliga metertjocka bentonitlera och tjocka lerstensdominerade enheter med goda tätande egenskaper inom den ordoviciska enheten. Dessutom förekommer rikligt med oregelbundna tunna skikt med lera i kalkstenen vilket gör att det sammantaget finns vertikala hydrauliska barriärer i det ordoviciska intervallet, vilket både minskar den vertikala permeabiliteten och begränsar den kemiska upplösningen av kalkstenen vid kontakt med lagrad koldioxid.

När det gäller den siluriska lerstenen som påträffas mellan 400–470 m i Nore-1 och Nore-2 så visar pågående arbeten med att datera och korrelera denna med andra borrhål, att även den går att följa med likartad uppbyggnad i den svenska delen av sydöstra Östersjön.

Pågående jämförelser av de geofysiska borrhålmätningarna i de äldre OPAB-borrhålen till havs och resultaten av Nore-1 och Nore-2 visar att Faluddenledet har samma geofysiska signatur som i Nore-1 och Nore-2, vilket indikerar att sandstenen är likartat uppbyggd, porös och permeabel som på södra Gotland. Tjockleken ökar däremot till totalt 50–60 m i den sydostligaste delen av svensk ekonomisk zon i sydöstra Östersjön.

De underliggande sandstensenheter (Närsandstenen och Viklauledet) uppvisar likartade geofysiska signaturer i de äldre OPAB-borrningarna till havs som i Nore-borrningarna, vilket pekar på att de inte kan anses vara lämpliga för koldioxidlagring.

Sammanfattningsvis visar resultaten från Nore-borrningarna och kopplingen till de äldre borrhålen till havs att Faluddenledet och den ordoviciska och siluriska berggrunden har lateralt och vertikalt goda egenskaper för att fungera som reservoar respektive takberggrund.

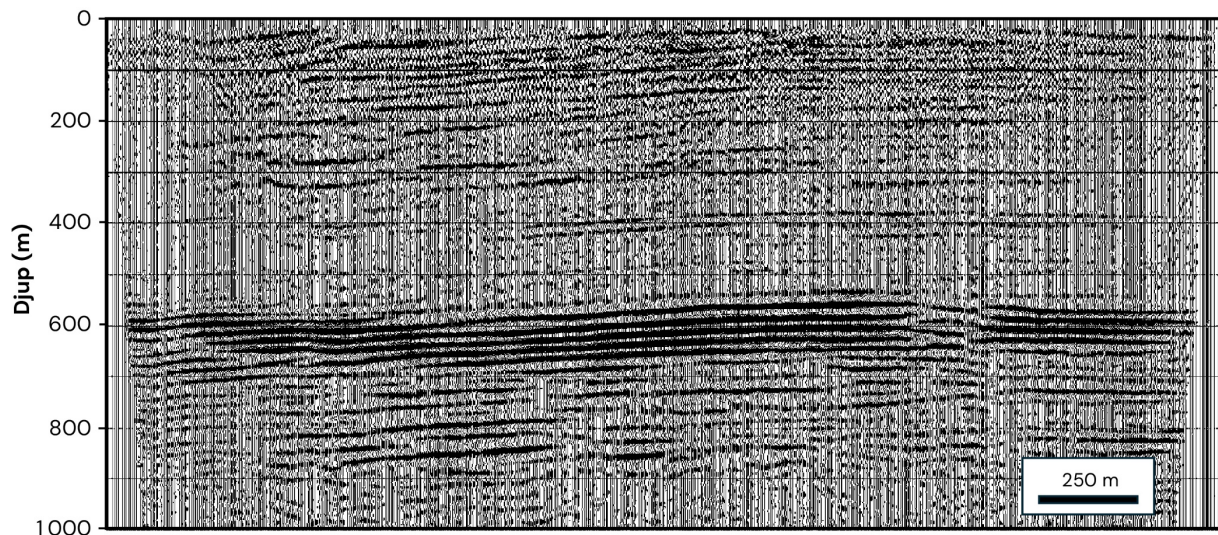
Djupseismik – datainsamling, bearbetning och tolkning

Introduktion

Reflektionsseismik är den viktigaste geofysiska metoden för att undersöka berggrunden och olika geologiska enheters tjocklek, djup, utbredning och litologi. Mätning sker längs profiler och man skapar en 2D-bild (en profil) genom berggrunden. Dessa profiler kan sedan bindas samman för att skapa en 3D-modell av berggrunden. Reflektionsseismik är även en viktig metod för att identifiera och undersöka deformationszoner i berggrunden, till exempel förkastningar. Förkastningar kan utgöra en läckageväg från ett potentiellt lager av koldioxid till havsbotten, om de utgörs av öppna sprickor. Därför är det viktigt att ha mycket god kunskap om deras läge och beskaffenhet. Seismiska undersökningar bidrar även med information om berggrundens fysiska egenskaper och är nödvändiga för att kartlägga reservoar- och takbergarter i områden mellan olika borrhål. Djupseismik kan utföras både på land och till havs, teknikerna skiljer sig till viss del men principen och syftet är detsamma.

Landseismik

I föregående regeringsrapport (SGU 2023a) beskrevs insamlingen av landseismiska data på södra Gotland som gjordes i samverkan med Uppsala universitet. Under 2024 genomförde Uppsala universitet den grundläggande bearbetningen av dessa data och ett exempel på resultatet från undersökningarna kan ses i figur 7. I figuren kan man se ett avsnitt med starka reflektioner på cirka 600 m djup. Reflektionerna är en del av den ordoviciska takbergarten som finns ovanpå Faluddenledet.



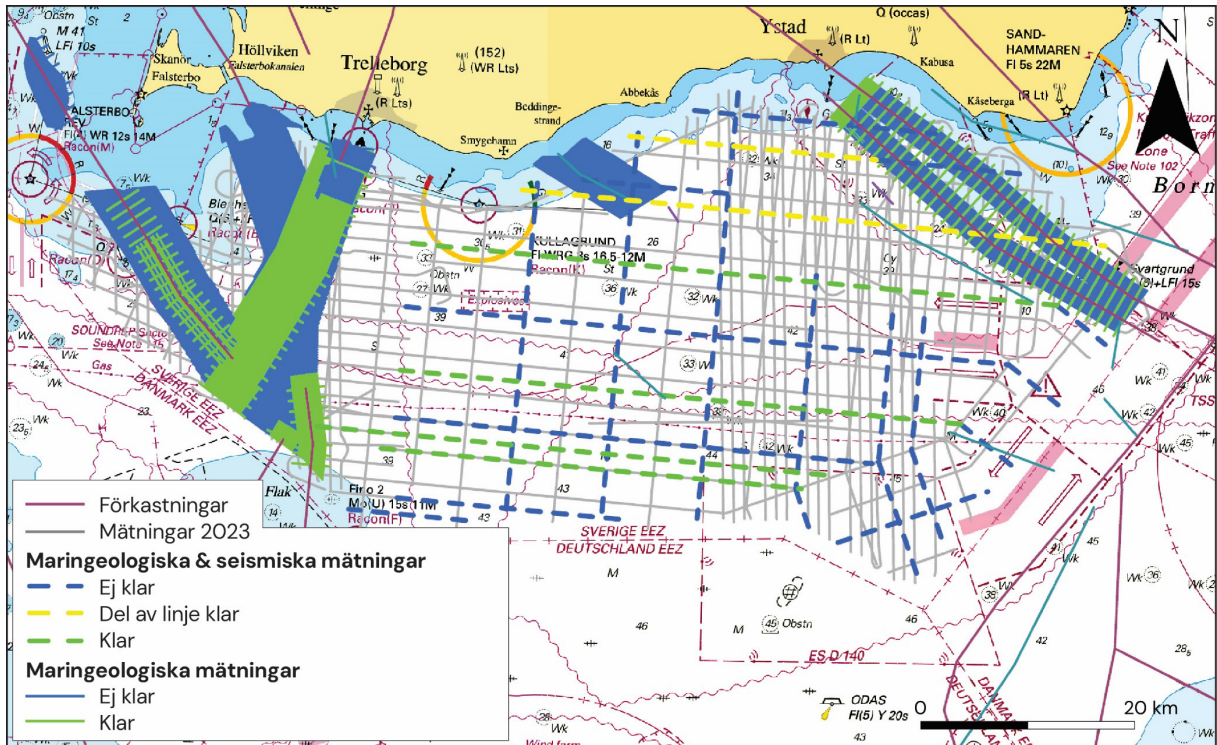
Figur 7. Djupkonverterad stackad 2D-seismisk profil från södra Gotland. Djupkonvertering med 3 500 m/s. De starka reflektionerna på 600 m djup är en del av den ordoviciska takbergarten som finns ovanpå Faluddenledet.

Marinseismik

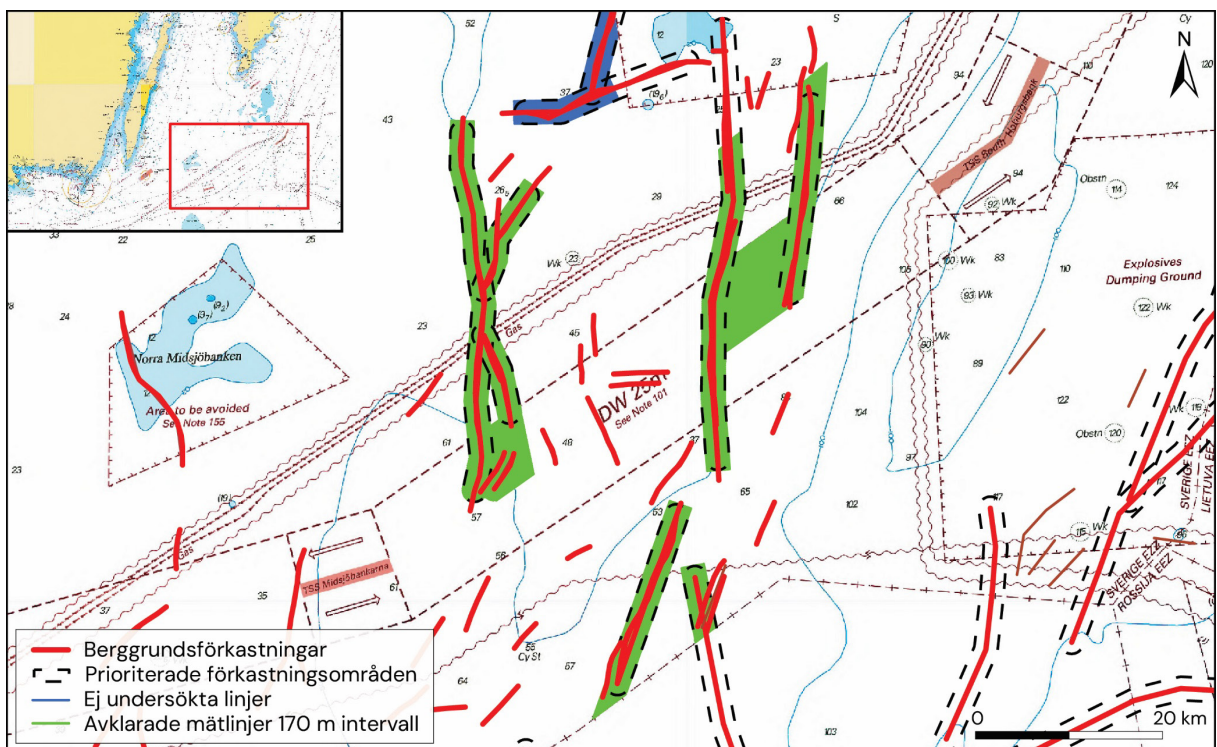
Nya moderna marinseismiska data från området är väsentliga för att SGU ska kunna undersöka möjliga lagringsplatser i sydöstra Östersjön. SGU är nu mitt i miljöutredningen för att få utföra nya seismiska undersökningar söder och sydost om Gotland. Om tillstånd beviljas kommer SGU att samla in upp till 2 000 km djupseismisk data inom Natura 2000-området och 4 000 km utanför Natura 2000-området. Hur mycket av dessa planerade undersökningar som kommer att bli möjligt att genomföra beror på flera faktorer, bland annat villkor från tillståndsansökan, vilket fartyg som kommer att kunna användas, samt väderlek under den pågående datainsamlingen.

Maringeologiska undersökningar

Inom arbetet med att ta fram potentiella lagringsplatser för koldioxid är den maringeologiska kartläggningen viktig eftersom den ger information om havsbotten och sedimenten ovanför berggrunden. Primärt fokus i undersökningarna har varit att kartlägga eventuella pågående gasutsläpp från havsbotten kring de i marinseismiska data identifierade förkastningszonerna, men då flera instrument kan köras simultant kan den samlade geologiska informationen även användas vid konstruktion av den infrastruktur som krävs för injektion av koldioxid. Den marina kartläggningen har under 2024 utförts utanför Skånes sydkust (fig. 8) samt i sydöstra Östersjön (fig. 9) med SGU:s undersökningsfartyg Ocean Surveyor. Instrumenten som användes söder om Skåne var multistråle-ekolod med backscatter och vattenkolumnsdata samt sedimentekolod. I sydöstra Östersjön användes endast multistråle-ekolod med backscatter och vattenkolumnsdata på grund av områdets närhet till ett Natura 2000-område. Under 2024 har totalt 4 848 linjekilometer data samlats in (att lägga till de 3 500 km som samlades in 2023).



Figur 8. Översiktskarta över mätningarna i sydvästra Östersjön.



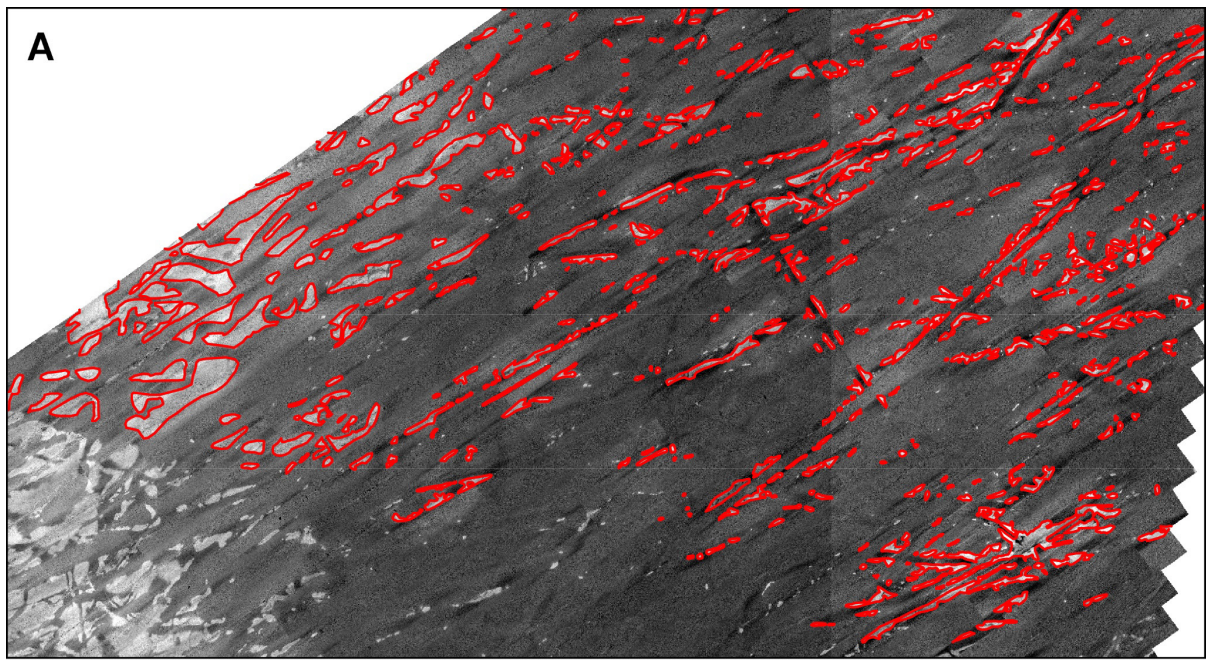
Figur 9. Översiktskarta över mätningarna i sydöstra Östersjön.

Gasevakueringstrukturer

Läckage av fluider (gas eller vätska) från en tilltänkt geologisk lagringsenhet är en påtaglig risk för framgångsrik lagring av koldioxid i berggrunden. Det är därför viktigt att undersöka det tilltänkta lagringsområdet efter tecken på befintligt läckage i ett tidigt stadium. Störst risk för läckage finns längs förkastningar som inte är tillräckligt täta och där gas kan vandra upp genom de geologiska lagren. När de läckande fluiderna når havsbottenytan bildar de så kallade "pockmarks" som är kraterliknande depressioner i havsbotten. I de fall gas upptäcks behöver källan fastställas, då den kan läcka från de djupare lagren eller bildas *in-situ* (på plats) genom biologiska processer, något som är vanligt i post-glaciala sediment med högre halt av organiskt material. Längs med en förkastning kan det bildas en sträng eller ett område av pockmarks som följer förkastningen som tyder på att gas eller andra fluider läcker eller har läckt ut från havsbotten från en fossil källa (Hovland m.fl. 2002). Pockmarks upptäcks vanligen med multistråle-ekolod som i ett svep samlar in information om djup, bottenens beskaffenhet (så kallad *backscatter*) samt svaga ekon i vattenkolumnen. Där syns de som depressioner i djupdata och förändringar i bottenens beskaffenhet. Med vattenkolumnsdata från multistråle-ekolodet kan även strömmar av bubblor från havsbotten detekteras och indikera aktivt gasläckage. Gas i de övre meterna av sedimenten kan även upptäckas genom sedimentekolod, där syns gasfyllda sediment genom akustisk utsläckning, det vill säga att inga geologiska lager under gasen syns.

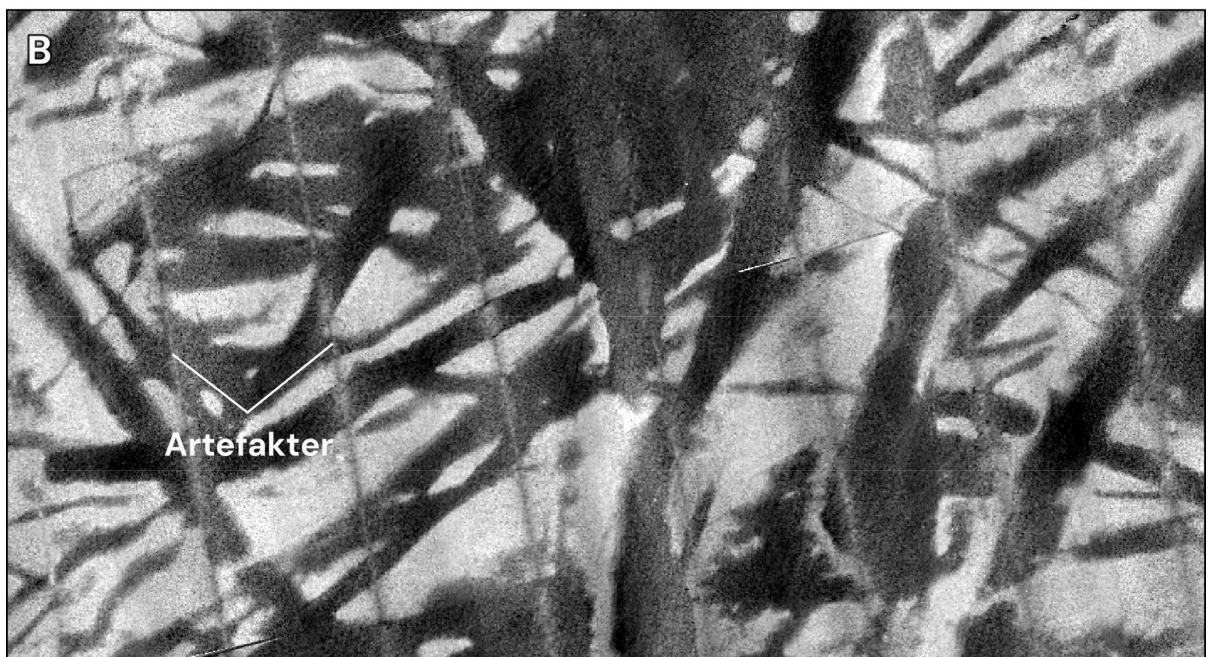
Gas och ytgeologi sydöstra Östersjön

Ett antal områden med förkastningar (fig. 9) i sydöstra Östersjön kartlades under 2024. Områdena kunde endast kartläggas med multistråle-ekolod på grund av det närliggande Natura 2000-området för tumlare. Analys av data fortsätter kontinuerligt, men initiala observationer har inte indikerat geologiska strukturer som pockmarks som tyder på läckage av gas från havsbotten. Ett flertal strukturer som skulle kunna indikera gasutsläpp har observerats i vattenkolumnen. De strukturer som hittills undersökts har inte haft den karaktäristiska formen av en stigande gasström, det vill säga en stigande plym av bubblor som stiger relativt rakt uppåt (Urban m.fl. 2016), utan tyder snarare på ekosvar från andra objekt i vattenkolumnen. Resultat från mätningarna i sydöstra Östersjön tyder på att två ytsubstrat dominerar de översta centimetrarna i det studerade området, mjuk postglacial lera som fyllt isbergsspår i hårdare glaciallera. I figur 10 syns den post-glaciala leran som mörkare toner då den är mjukare och därmed reflekterar tillbaka mindre av ljudpuls än glacialleran som i bilden visas med ljusare toner. De röda markeringar i figur 10 visar exempel på tolkade ytor, i detta fall områden där glacialleran kommer upp genom den postglaciala leran.



— Tolkning

0 2,5 km



Artefakter

0 0,45 km

Figur 10. Backscatterdata från sydöstra Östersjön utan koordinater. **A.** Översiktbild med tolkade områden (röda linjer) där glaciallera kommer upp ur den mjukare postglaciala leran, observera att hela den visade ytan inte är färdigtolkad. **B.** Inzoomad bild på isbergsspår där hårdare glaciallera visas som ljusare färger och den mjukare post-glaciala leran visas som mörkare färger. De vita linjerna visar artefakter från separata mätlinjer.

Geologisk 3D-modell

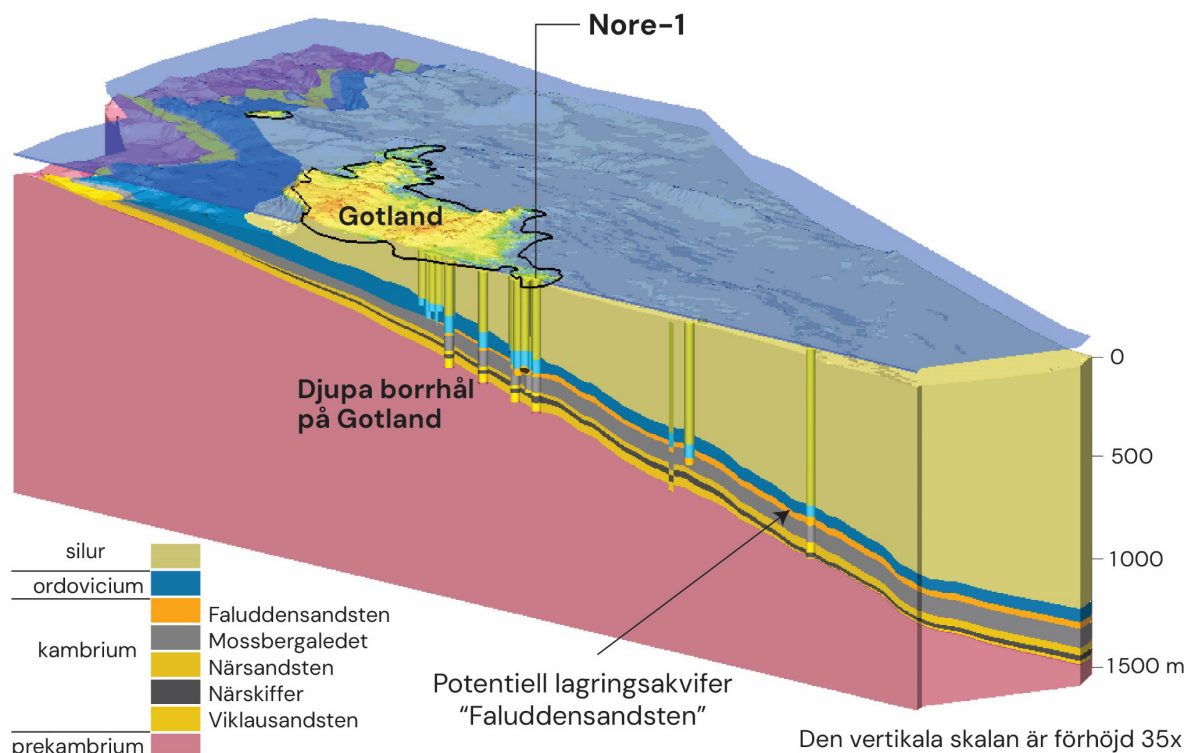
En geologisk 3D-modell har tagits fram över sydöstra Östersjön (fig. 11). Modellen bygger huvudsakligen på information från de borrhningar och seismiska undersökningar som utfördes av OPAB och Gotlandsolja AB under 1970- och 1980-talet. Resultat från de nya borrhningarna Nore-1 och Nore-2 ingår i den uppdaterade modellen.

Över Öland och Gotland har vi även använt information från flygburna elektromagnetiska mätningar som insamlats av SGU i samband med grundvattenkartläggning under åren 2013 till 2016 (Dahlqvist m.fl. 2015, 2017, 2018). I berggrundsytan har vi använt SGU:s kartdatabas Berggrund 1:1 miljon (SGU 2023b).

Syftet med modellen är att ge en översiktlig bild av den sedimentära berggrundens uppbyggnad. Modellen kommer senare även kunna användas för att översiktligt beräkna volym och lagringskapacitet för de olika geologiska enheterna.

Modellen är uppbyggd som en lagermodell och består av åtta lager; kristallint urberg, Viklaudet, Närskiffer, När sandsten, Mossbergaledet, Faluddenledet, ordovicisk kalksten och silurisk/devonsk sedimentär berggrund (jämför figur 6).

Resultat från borrhningarna Nore-1 och Nore-2 har visat att sandstenen från Faluddenledet kan vara en potentiell lagringsakvifer för koldioxid. Modellen visar att för djup större än 800 m, som är aktuellt för koldioxidlagring, varierar tjockleken på sandstenen mellan cirka 25 och 50 m med en medeltjocklek på cirka 40 m. Det finns dock få data i detta område varför modellen blir relativt osäker. Modellen kommer att uppdateras när nya marinseismiska data blir tillgängliga och en mer detaljerad modell kommer att tas fram över det område som är mest intressant för geologisk lagring av koldioxid.



Figur 11. Utsnitt ur geologisk 3D-modell över området Gotland och sydöstra Östersjön. Överytans avgränsning utgörs av höjddata över landområden och batymetri över havsområden.

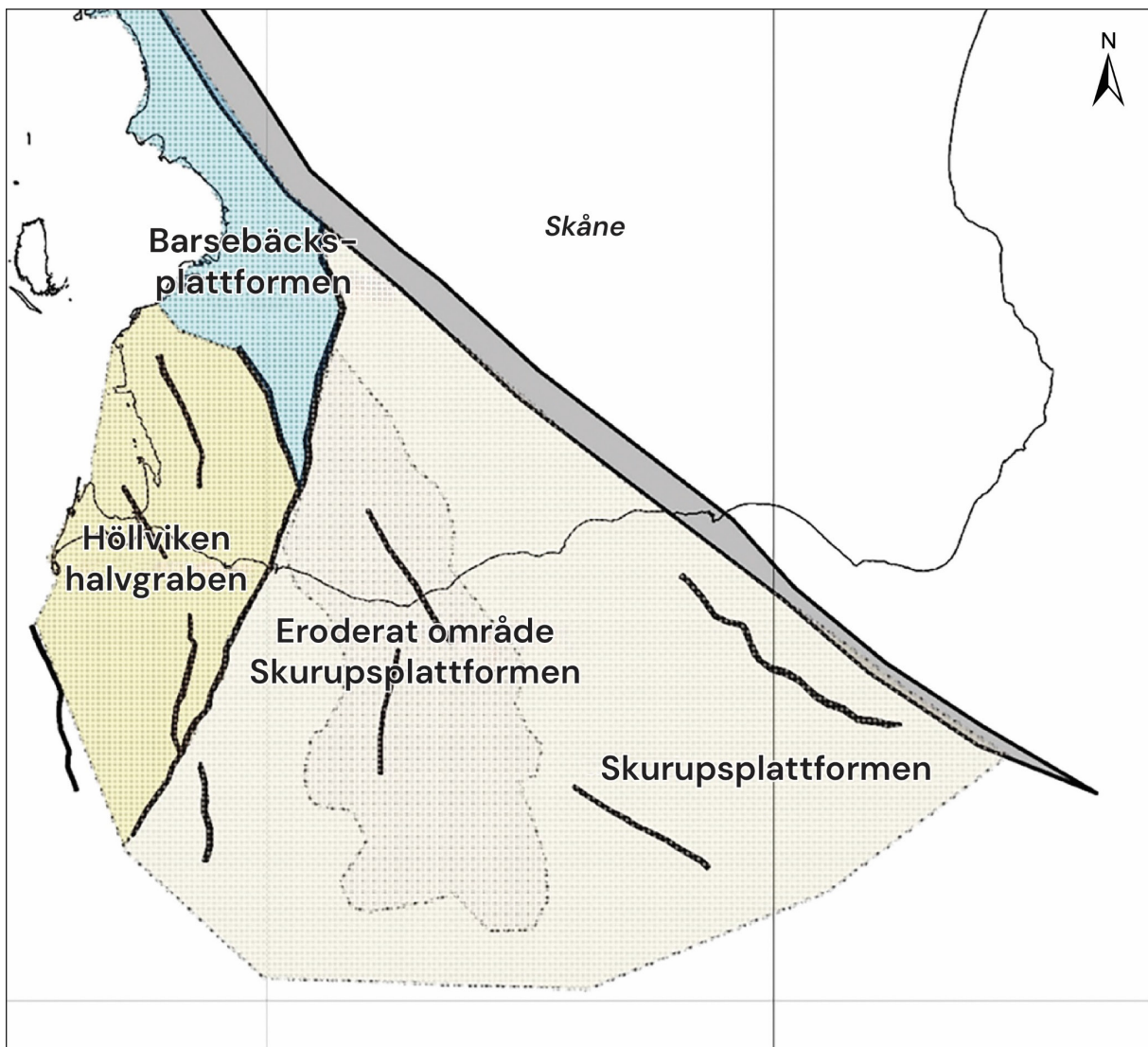
Undersökningar i Skåne och sydvästra Östersjön

Geologiska undersökningar

Regionalgeologisk bakgrund

Sydvästra Skåne kan delas in i tre större områden med något olika geologisk utveckling):
1. Skurupsplattformen, 2. Höllviken halvgraben samt 3. Barsebäcksplattformen (fig. 12).

Av dessa områden är uppfattningen att Höllviken halvgraben och Barsebäcksplattformen har störst potential för geologisk lagring av koldioxid tack vare de tjocka lager av bevarade



Figur 12. Karta över Skåne som visar de tre strukturgeologiskt viktiga områdena i sydvästra Skåne: Skurupsplattformen (beige), Höllviken halvgraben (gul), och Barsebäcksplattformen (ljusblå).

sedimentära bergarter. Gränsen mot öster utgörs av Svedalaförkastningen som avgränsar Höllviken halvgraben mot Skurupsplattformen. Den senare var utsatt för avsevärd erosion under en lång period och saknar därmed stora mäktigheter av sediment.

Svedalaförkastningen är områdets största förkastning och delar sydvästra Skåne i två delar. Den västra delen omfattar Höllviken halvgraben och Barsebäcksplattformen som har tjocka sedimentära lagerföljder. På Barsebäcksplattformen består lagerföljden av horisontella lager. I botten ligger ett förhållandevis tunt intervall med triassiska sediment direkt på urberget. De överlagras av växellagrad sandsten, siltsten och lersten som avsattes under tidig jura. Direkt ovanpå dessa ligger sandsten och lersten av tidig kretaceisk ålder medan bergarter från mellersta och sen jura saknas. Intervallet avslutas med Arnagergrönsanden som i sin tur överlagras av den överkretaceiska Höllvikenformationen med tjocka kalkstenslager och finkorniga sediment.

I Höllviken halvgraben är lagerföljden representerad av samma bergarter som på Barsebäcksplattformen, men med den mer komplett triassiska sekvensen, och sedimentlagren blir successivt tjockare mot förkastningar i väst och sydväst. På Skurupsplattformen öster om Svedalaförkastningen finns enbart ett tunt lager av bergarter från krita direkt liggande på ett tunt lager av bergarter från trias eller på eroderat prekambriskt urberg på det högsta området av strukturen. På flanken ner mot Romeleåsen återfinns troligtvis bergarter som bildats i sub-bassänger. De har tolkats som odifferentierade sedimentära bergarter av okänd ålder direkt underliggande ett tunt lager av Arnagergrönsand.

Kärnbörningar

Planering för två kärnbörningar i sydvästra Skåne påbörjades under våren 2024. Lämplig lokalisering gjordes från behovet att få information om berggrunden på Skurupsplattformen samt i Höllviken halvgraben, två strukturgeologiska enheter med olika representation av potentiella lagringsenheter för koldioxid. För att kunna jämföra borresultaten med de marina berggrunds-förhållandena söder om Skåne var det även önskvärt att borrlatserna låg så nära kusten som möjligt. Placeringen skulle helst också vara i närhet till befintliga äldre seismiska mätningar (OPAB:s mätningar på 1970-talet). Efter rekognoscering och i samråd med Trelleborgs kommun kunde arrendeavtal för två borrlatser med en privat markägare och Trelleborgs kommun tecknas under våren.

Lilla Beddinge-1

Under våren gjordes en förborring och foderrörssättning ner till 100 m vid den första borrlatserna på kommunens mark vid reningsverket i Smygehamn på fastigheten Lilla Beddinge. Borrningen utfördes med hammarborringsteknik med foderrörborring (193,7 mm) till 56 m följt av hammarborring (165 mm) och sättning av 114,3 mm HWT foderrör till 100 m. Båda foderrören cementerades mot bergväggen från 56 m respektive 100 m djup upp till botten av en 2 m djup cementkammare. Kammaren som är 1,5 m i diameter avslutas i markplan och utgör referensnivån för angivna borrhjup. Foderrören sattes som skydd för grundvattenförekomsterna i området. Kammaren och det inre foderröret behövdes för genomförande av den efterföljande kärnbörningen. Kärnbörningen utfördes med den så kallade Riksriggen som drivs av Lunds Tekniska Högskola. Borrningen påbörjades i slutet av augusti och avslutades i mitten av oktober.

Under hösten utfördes även förborring och anläggning av den andra borrlatserna vid Skåre, väster om Trelleborg. Här avses ytterligare en kärnbörning utföras under våren 2025.

Resultat

Borrningen Lilla Beddinge-1 ligger i ett område där det saknas äldre borrhål och information om djup och förekomst av olika berggrundsenheter. Främst förlitades borrhålsprognosen på resultat från äldre borrhningar väster om Trelleborg och vid Svedala samt tolkning av äldre reflektionsseismik. Enligt dessa tolkningar skulle en 30–40 m tjock Arnagergrönsand påträffas på cirka 1 200 m djup och under den ytterligare uppemot 200 m med berggrund från yngre krita, jura och eventuellt äldre trias påträffas innan borrhningen skulle nå det underliggande urberget på cirka 1 400–1 500 m djup.

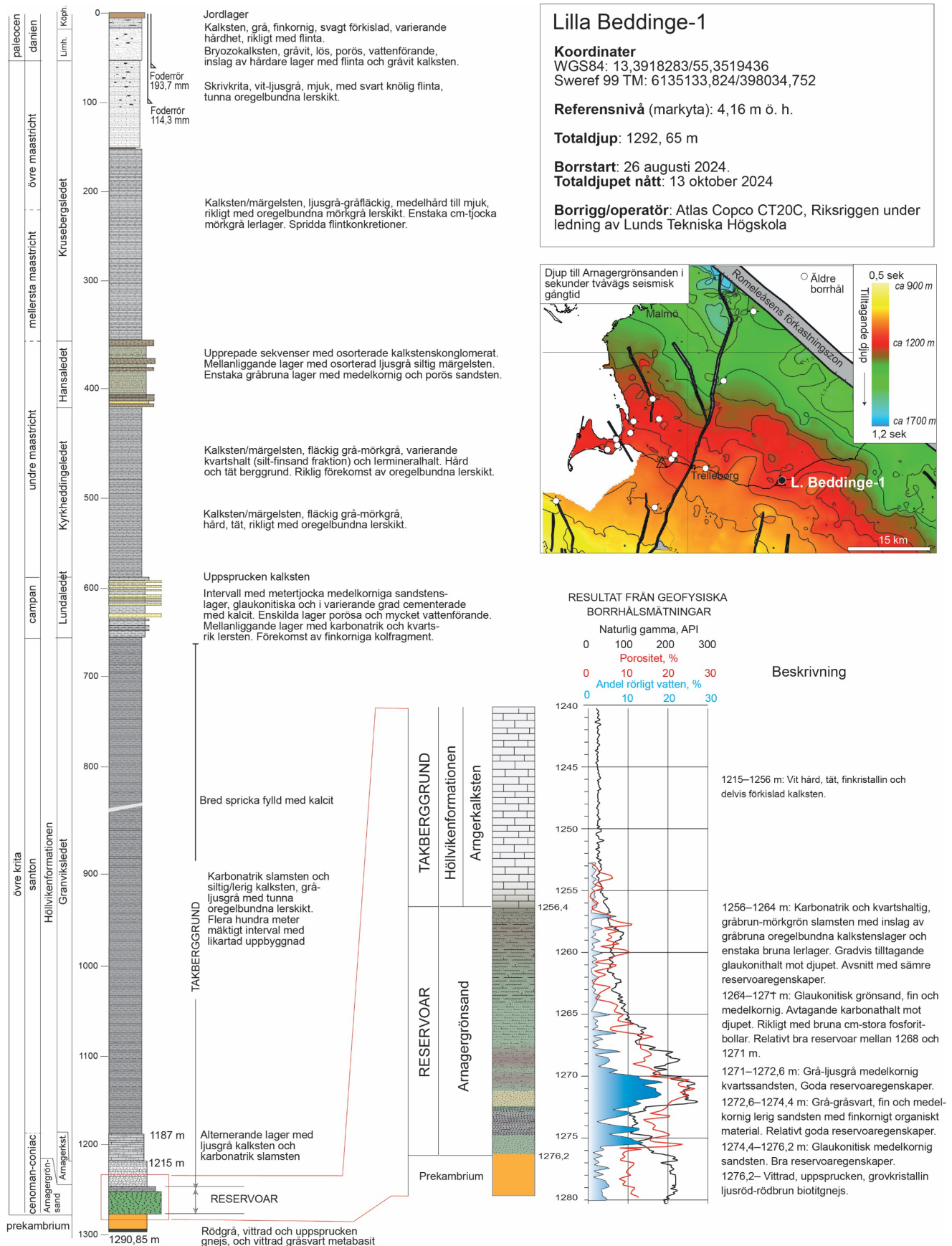
Utfallet blev att en cirka 20 m mäktig Arnagergrönsand direkt överlagrade urberget på 1 276,2 m djup. Även om det var ett oväntat och nedslående resultat gav det viktig ny information för den fortsatta CCS-utredningen om lagringspotentialen i Arnagergrönsanden på Skurupsplattformen och intilliggande marina områden. Särskilt viktig är informationen för den fortsatta tolkningen av den nya reflektionsseismiken som samlats in till havs och på land.

Preliminära utvärderingar av borrhkärnor, tolkning av geofysiska borrhålsmätningar och observationer från ett pumpptest visar att Arnagergrönsanden (1 256–1 276 m) består av både porösa och permeabla avsnitt men även avsnitt med relativt dåliga reservoaregenskaper. Av den totalt cirka 20 m tjocka sandstenen bedöms ungefär hälften bestå av tillräckligt permeabla sandstenslager. Det potentiellt bästa reservoaravsnittet är i den under delen av Arnagergrönsanden i Lilla Beddinge-1 (fig. 13).

I Arnagergrönsanden påträffas rikligt med det grönaktiga mineralet glaukonit som är ett hydroxylhaltigt kaliumjärnsilikat med en mycket varierande jonsammansättning. Framför allt är det lösligt och har en stor jonbytande förmåga, vilket gör att det kan bidra till effektiv mineralogisk bindning av injikerad CO₂ genom bildning av siderit (FeCO₃) (till exempel Zang & Tutolo 2022).

Ovanför Arnagergrönsanden förekommer mellan 1 256 och 1 215 m djup en vit, tät och hård finkristallin kalksten som i vissa avsnitt är förkislad, så kallad Arnagerkalksten (fig. 13). Ovanför denna består berggrunden upp till 670 m djup av en enhetlig lagerserie med bergarter som består av en blandning av lermineral, kvarts och karbonat. Stratigrafiskt förs de till Granviksledet (fig. 13). Avhängigt haltförhållandet mellan dessa komponenter kan bergarten antingen benämnas som kvartshaltig lerig kalksten, lerig kalksten eller karbonatrik lersten. På grund av den relativt höga lermineralhalten och homogena höga hållfastheten bedöms den totalt flera hundra meter mäktiga enheten som en fullgod takbergart.

Generellt dominerar berggrunden ner till 670 m av likartade leriga kalkstenslager, som under 670 m, med undantag av två intervall; mellan 365 och 423 m samt 587 och 670 m djup. Dessa motsvarar stratigrafiskt Hansa- och Lundaleden. I dessa påträffas en mer varierande berggrund med bland annat några meter-mäktiga lager med vattenförande sandsten.



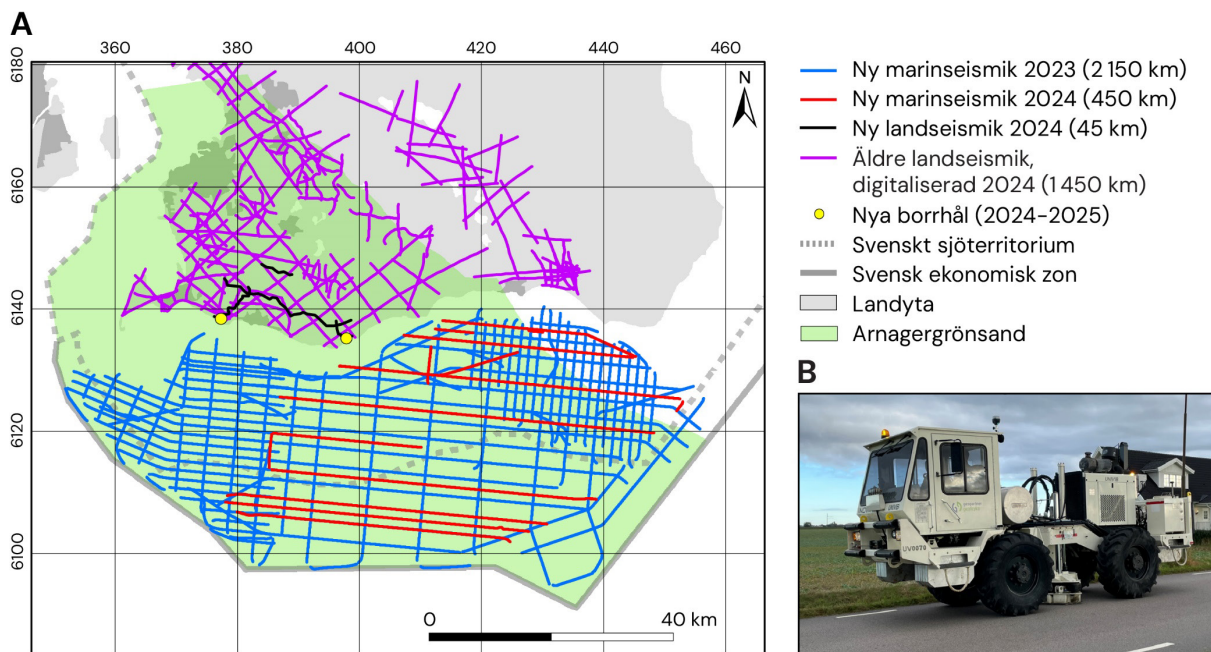
Figur 13. Översiktlig illustration och geologisk beskrivning av borrhålet Lilla Beddinge-1 med detaljinformation om Arnagergrönsanden och dess olika delar avseende bland annat porositet och bedömd andel rörligt vatten, indirekt indikation på var de mest genomsläppliga avsnitten finns.

Djupseismik

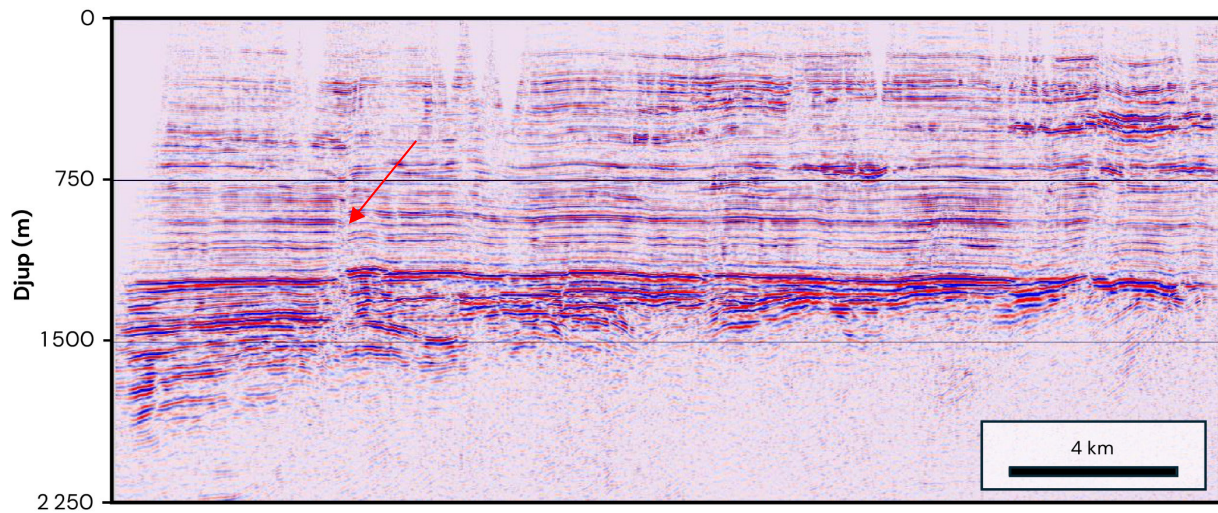
Landseismik

I oktober 2024 utfördes i samverkan med Uppsala universitet en reflektionsseismisk datainsamling längs fyra profiler som följde vägnätet i området kring Trelleborg (fig. 14). Tre av profilerna samlades in för att binda samman de båda borrhålen Lilla Beddinge-1 (borrat under hösten 2024) och Skåre-1 (planeras att borrar våren 2025). Det förväntas ge en tydligare bild av de olika geologiska enheternas utbredning och de geologiska strukturer som finns i berggrunden, se figur 15. Två av profilerna korsar även Svedalaförkastningen, en betydande deformationszon i området, med målet att få ökad kunskap om hur dess struktur och hur den förändras från norr till söder. Syftet är att möjliggöra tolkning och modellering på regional skala av de geologiska enheter och strukturer som är av vikt för potentiell geologisk lagring av koldioxid i havsområdet söder om Skåne.

Totalt insamlades cirka 45 km landseismiska data genom att 470 vibrationskänsliga sensorer placerades ut med 20 m mellanrum längs en upp till 9 km lång sträcka i taget. Detta utlägg flyttades sedan successivt fram längs profilerna under arbetets gång. Som seismisk källa användes en Inova UniVIB vibrator (fig. 14B) som tillhandahölls och kördes av Geopartner Geofizyka. Den aktiverades med 20 m mellanrum längs samma sträcka som sensorerna var utplacerade. Ett antal platser hoppades över på grund av närheten till infrastruktur eller där trafiksituationen inte tillät stopp. Ramudden anlätades som trafikkonsult för att hjälpa till med skyltning och trafik-säkerhet och tillhandahöll TMA-bil (*Truck Mounted Attenuator*, mobilt påkörningskydd) då delar av profilerna gick längs högt trafikerade vägar.



Figur 14. A. Nya seismiska profiler (land och marin) insamlade under 2023 och 2024. Kartan visar även gamla prospekteringsdata som har digitaliserats under 2024. Ny marinseismik 2023: 2 150 km, ny marinseismik 2024: 450 km, digitaliserad äldre landseismik: 1 450 km, ny landseismik 2024: 45 km. **B.** Energikällan Inova UniVIB vibrator från polska Geopartner Geofizyka som användes vid de landseismiska mätningarna 2024.



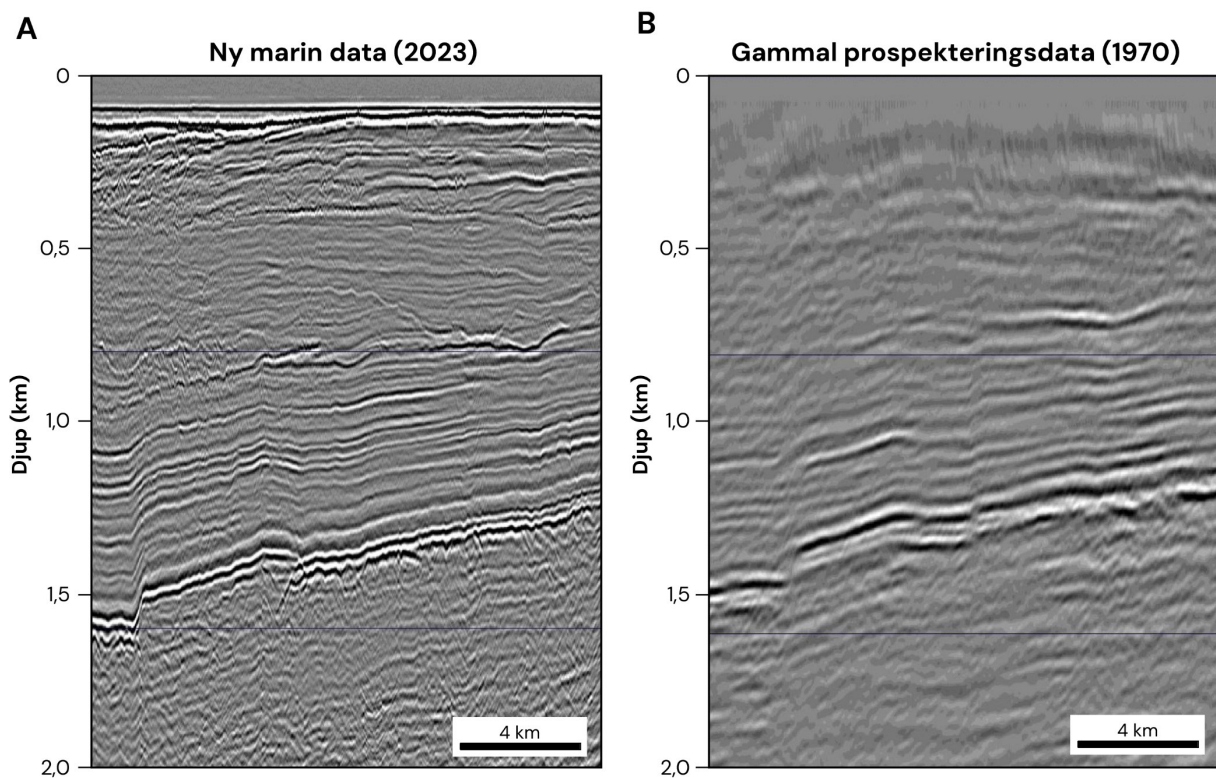
Figur 15. Seismisk profil från södra Skåne, insamlad och bearbetad 2024. Djupkonvertering med 3 000 m/s. De tydliga reflektionerna på cirka 1100 m djup hör samman med de kalkstenslager som ligger ovanpå Arnagergrönsanden. Sektionen passerar Svedalaförkastningen (röd pil) vilket syns tydligt i bilden. Förkastningen, som är bra avbildad i data, undersöks i projektet och kan vara en potentiell risk för läckage av koldioxid.

Uppsala universitet har under sen höst/vinter 2024 genomfört den grundläggande bearbetningen av de erhållna landseismiska data. Preliminära resultat visar på god datakvalitet och betydligt högre upplösning än de äldre landseismiska data som insamlats i närområdet vid prospektering på 1970- och 1980-talet. Figur 15 visar den seismiska sektionen längs en av de nyinsamlade profilerna.

Marinseismik

Nyinsamling

I delrapport 1 (SGU 2023a) beskrevs hur insamlingen av marinseismisk information genomfördes under hösten 2023 söder om Skåne med SGU:s fartyg Ocean Surveyor. Under första halvåret 2024 slutförde SGU bearbetningen av dessa nya marinseismiska data och skapade 101 färdigbearbetade seismiska profiler, med en total längd på cirka 2 150 km. Figur 16 visar en jämförelse med äldre prospekteringsdata och man kan se hur de nya bearbetade seismiska profilerna avbildar geologiska strukturer och stratigrafi med betydligt högre detaljrikedom än äldre data från 1970-talet. De nya data som insamlas i detta projekt kommer därför väsentligt att underlätta tolkningen av berggrunden och ge bättre tillförlitlighet och noggrannhet än vad som tidigare varit möjligt.



Figur 16. Jämförelse mellan ny och äldre seismik, insamlade söder om Skåne. Observera att djupskalan är ungefärlig. **A.** Färdigbearbetade nya marinseismiska data insamlade 2023. **B.** Ombearbetade prospekteringsdata insamlade 1970.

Under hösten 2024 samlade SGU in ytterligare marinseismik söder om Skåne. Dessa data färdigbearbetades under senhösten 2024 och har en totallängd på cirka 450 km. Syftet med insamlingen var att fylla i luckor i datatäckningen från mätningarna som gjordes under 2023. Bättre täckning behövs på vissa ställen för högre upplösning och för att kartlägga nyckelstrukturer och reservoarer som är intressanta för koldioxidlagring.

Datainsamlingen 2023 gjordes med ett seismiksystem som SGU hyrde av GEUS (De nationale geologiske undersøgelser for Danmark og Grønland). För att förbättra SGU:s förmåga att på egen hand samla in och bearbeta seismisk data har SGU investerat i ett eget system för marinseismik. Det nya systemet, som användes för första gången under datainsamlingen 2024, liknar det danska och är kompatibelt med det, men har än så länge en kortare räckvidd. Systemet består av en 175 m lång så kallad 2D-streamer som bogseras av fartyget och har 56 kanaler (sensorer), samt en luftkanon (airgun) som används som energikälla för mätningarna. Figur 14 visar alla nya profiler som har samlats in under 2023 och 2024.

Modern seismisk data har högre kvalitet än äldre seismiska prospekteringsdata av flera skäl, bland annat för att moderna sensorer är känsligare och sitter tätare på streamern. Fartygspositioneringen är noggrannare och det är också tätare mellan ”skott”-punkterna på mätlinjerna. Sammantaget ger detta mer högupplösta data. Moderna data är bättre trots att man av bland annat naturhänsyn använder en betydligt svagare energikälla. Metoderna för bearbetning har också utvecklats sedan 1970-talet. Det sistnämnda kan till viss del utnyttjas för ombearbetning av äldre seismikdata, men för viss modern bearbetning krävs det nya data som samlats in med moderna metoder, till exempel med sensorer placerade nära energikällan (*near offset*).

Trots att äldre prospekteringsdata är av lägre kvalitet har den fortfarande en viktig roll i projektet, för att stödja tolkning av nya data och för att tolka geologi i områden där nya data saknas.

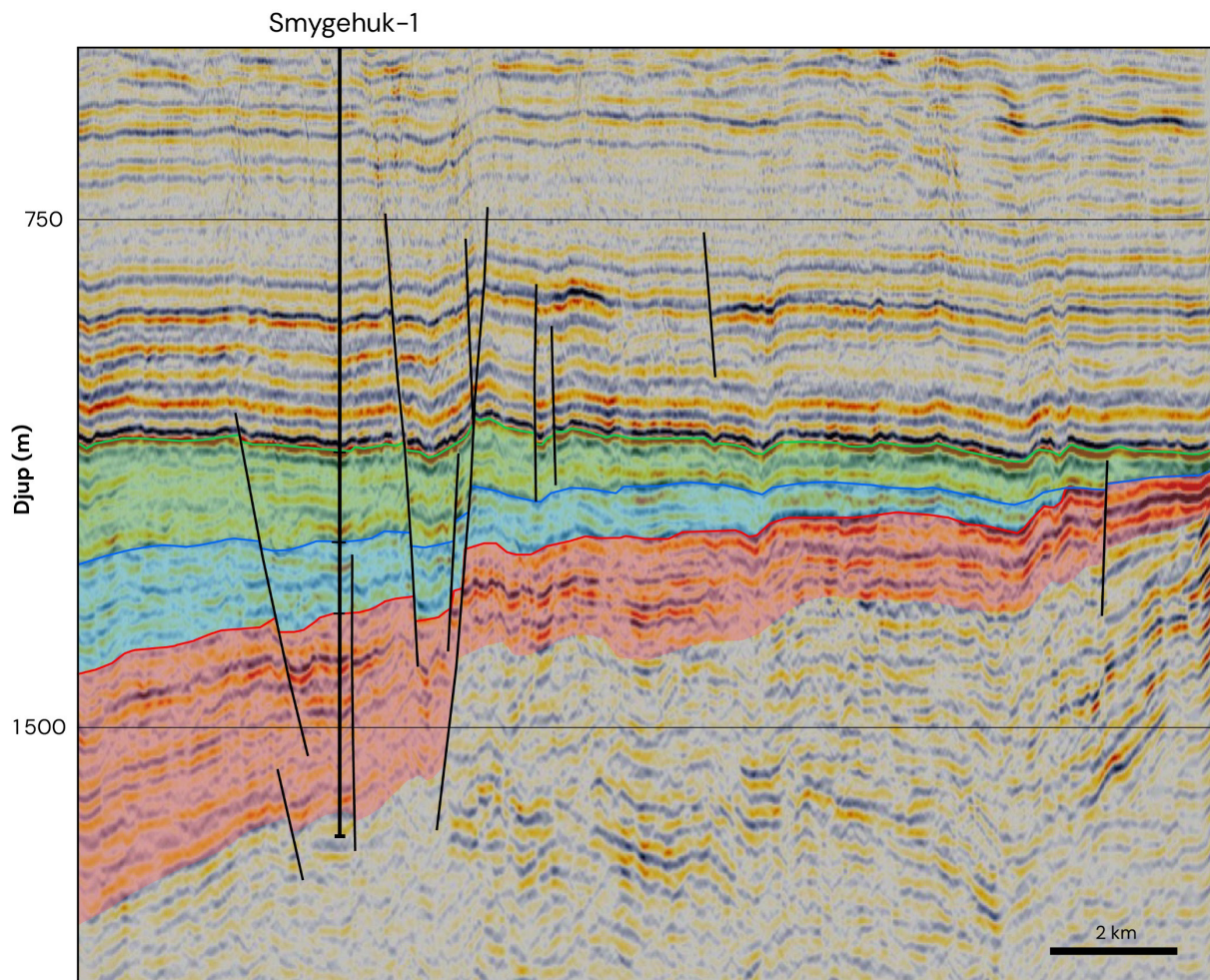
I början av projektet var mycket av dessa data i analogt format och därför inte kompatibla med modern tolkningsmjukvara. Därför har SGU under 2024 satsat på digitalisering och bearbetning av dessa äldre data så att de kan tolkas och användas under projektet. Under 2024 har SGU digitaliserat över 150 landseismiska profiler från Skåne, med en total längd på cirka 1 450 km, se figur 14. All data som har digitaliserats och bearbetats ingår nu i underlaget för tolkning av geologin, vilket beskrivs i nästa avsnitt.

Resultat från tolkning av land- och marinseismik

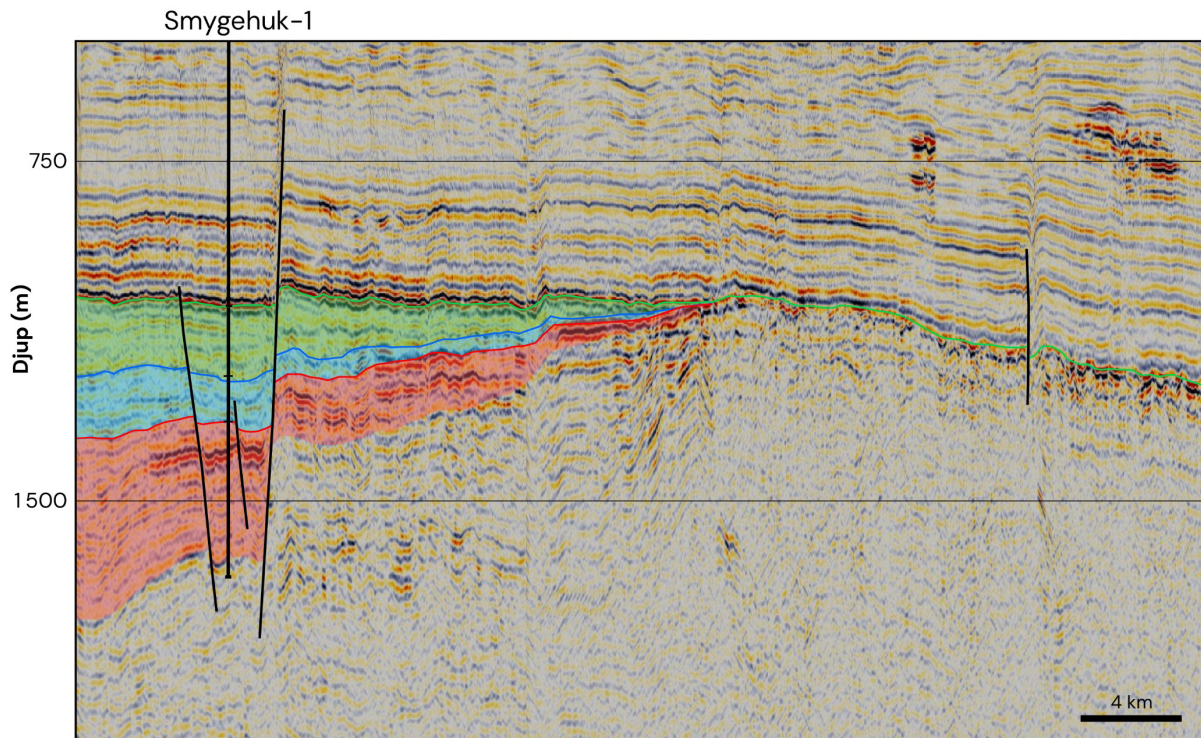
Resultaten från SGU:s seismiska undersökningar under 2023 har integrerats med äldre befintliga reflektionsseismiska data på land och utgör tillsammans med borrade brunnar på land och till havs underlag för kartläggning av den sedimentära berggrunden i sydvästra Skåne.

Omtolkning av äldre seismiska data på land har utförts över ett område i sydvästra Skåne begränsat i öst av Romeleåsens förkastningszon och i väster av den svenska kustlinjen. Tolkning av de nya marinseismiska data täcker den insamlade marinseismiska undersökningen CS2023; ett område utanför Skånes kust ner mot Tyskland och Danmark (fig. 14). Baserat på alla tillgängliga data så har ett antal nyckelhorisonter identifierats. De tolkade seismiska horisonterna utgör, tillsammans med geofysisk och geologisk information från borrhningar, det geologiska ramverk som ligger till grund för 3D-modellen över sydvästra Skåne som tas fram inom regeringsuppdraget. Den tolkade lagerföljden omfattar den sedimentära berggrunden ned till pre-zechstein, en seismisk markör som kan innefatta all berggrund äldre än sen-perm, även urberget. Figur 17 och 18 visar exempel på hur profiler kan se ut.

De tolkade seismiska sektionerna ligger till grund för den 3D-modell av sydvästra Skånes sedimentära berggrund, som beskrivs nedan.



Figur 17. En seismisk sektion från nyare marinseismik insamlad 2023 utanför Skånes kust som visar de tolkade lager av intresse för storskalig koldioxidlagring. Borrningen Smygehuk-1 borrades till havs söder om Skåne. Toppen av det gröna intervallet representerar Arnagergrönsandens överyta. Toppen av det blå intervallet svarar till Höganäs- och Ryaformationernas överyta, och toppen av röda intervallet representerar Kågerödslerans överyta.



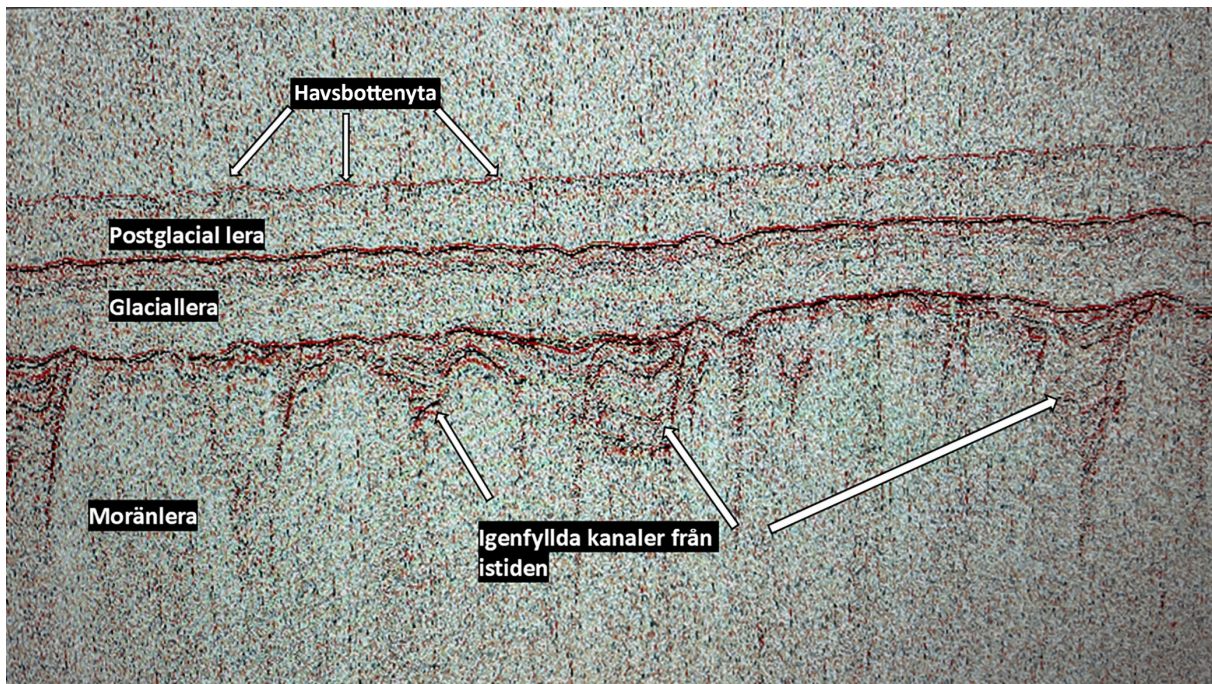
Figur 18. Seismisk väst-öst sektion över Skurupsplattformen.) Sektionen visar ett tydligt exempel på den stora variationen i sedimentmäktighet väster och öster om Svedalaförkastningen. Mäktigheten på de sedimentära bergarterna avtar stegvis över förkastningarna mot öster för att gradvis försvinna och till slut är det enbart ett tunt lager Arnagergrönliggande på urberget. Borrhålskontroll på Skurupsplattformen är begränsad till Trelleborg-1, Mossheddinge-1, Svedala-1 samt Lilla Beddinge-1 borrad 2024. Av dessa borrhål är det enbart Lilla Beddinge-1 som går igenom den sedimentära lagerföljden på den östra delen av Skurupsplattformen.

Maringeologiska undersökningar

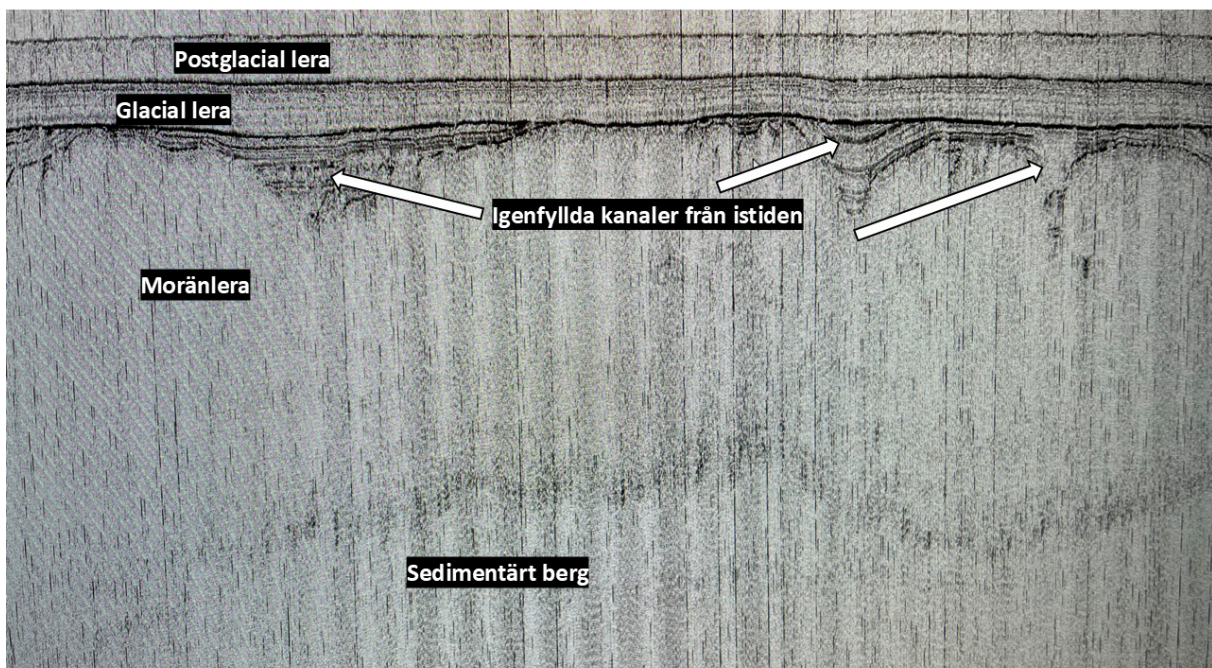
Marin kartläggning utfördes under 2024 utanför Skånes sydkust (fig. 8) med SGU:s undersökningsfartyg Ocean Surveyor. Instrumenten som användes söder om Skåne var multistråle-ekolod med backscatter och vattenkolumnsdata samt sedimentekolod.

Geologi

Den geologiska lagerföljden i området söder om Skåne utgörs – nedifrån och uppåt – av sedimentärt berg, i toppen huvudsakligen från krita, som överlagras av morän och moränleror från den senaste istiden. Det förekommer även ett fåtal spridda fickor med äldre sediment av okänd ålder. De yngsta sedimenten återfinns i bottenytan, och de grövre, sandiga sedimenten förekommer kustnära och de finare, leriga, längre ut från kusten (fig. 19 och 20).



Figur 19. Utsnitt från öst–västlig sedimentekolodsprofil från havsområdet söder om Skåne. Data visas med full amplitud.



Figur 20. Utsnitt från nord–sydlig sedimentekolodsprofil från havsområdet söder om Skåne.

Gas på havsbotten utanför Skåne

Som del av SGU:s maringeologiska kartläggning under 2024 utanför södra Skånes kust har SGU gjort undersökningar för att upptäcka tecken på gasläckor från underliggande geologiska lager. Speciellt fokus har lagts på förkastningar som finns i området där potentiella försvagningar av den tilltänkta lagringsenheten och takbergarten är troligast. Mätningarna är utförda med multistråle-ekolod samt sedimentekolod. Under pågående analys av insamlade data från förkastningarna i södra Skåne har hittills inga geologiska strukturer som tyder på läckage

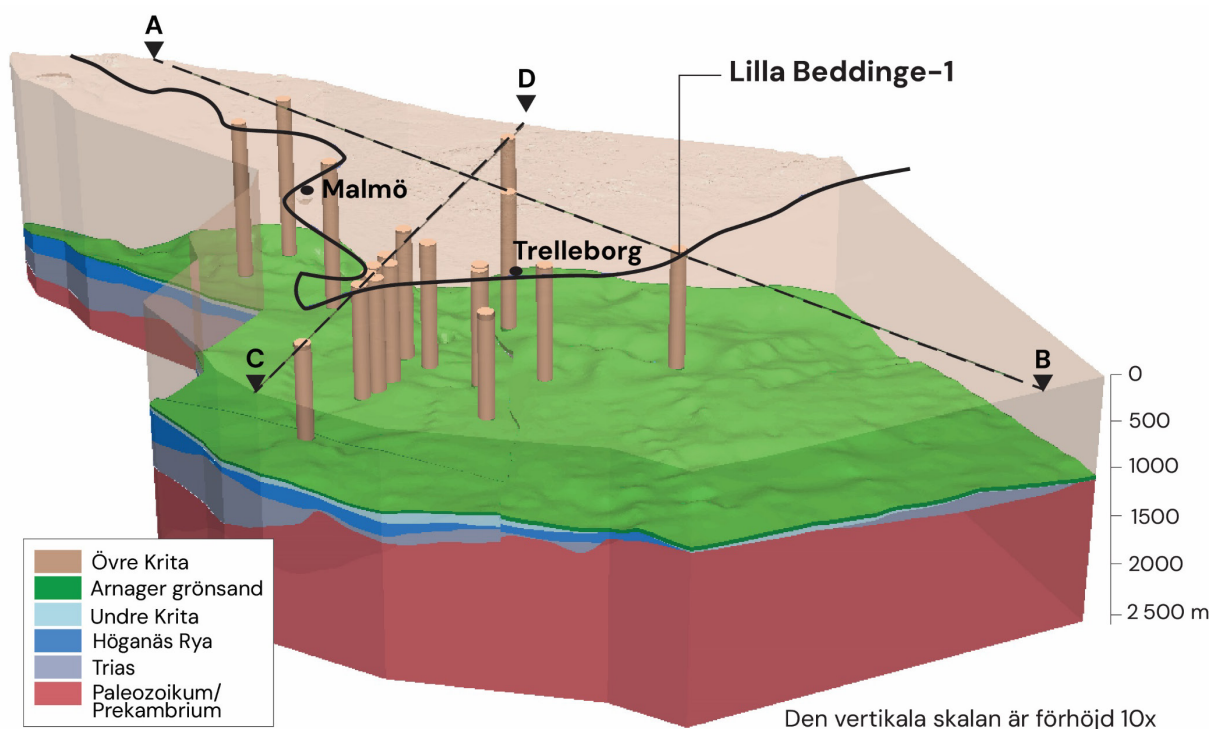
observerats. Detta är framför allt baserat på data från multistråle-ekolodet, men djupare analys och tolkning av alla insamlade data fortsätter kontinuerligt. Ifall gasstrukturer eller gasfyllda sediment upptäcks behöver en kombinerad analys av all tillgängliga geologiska data utföras för att fastställa gasens källa.

Geologisk 3D-modell

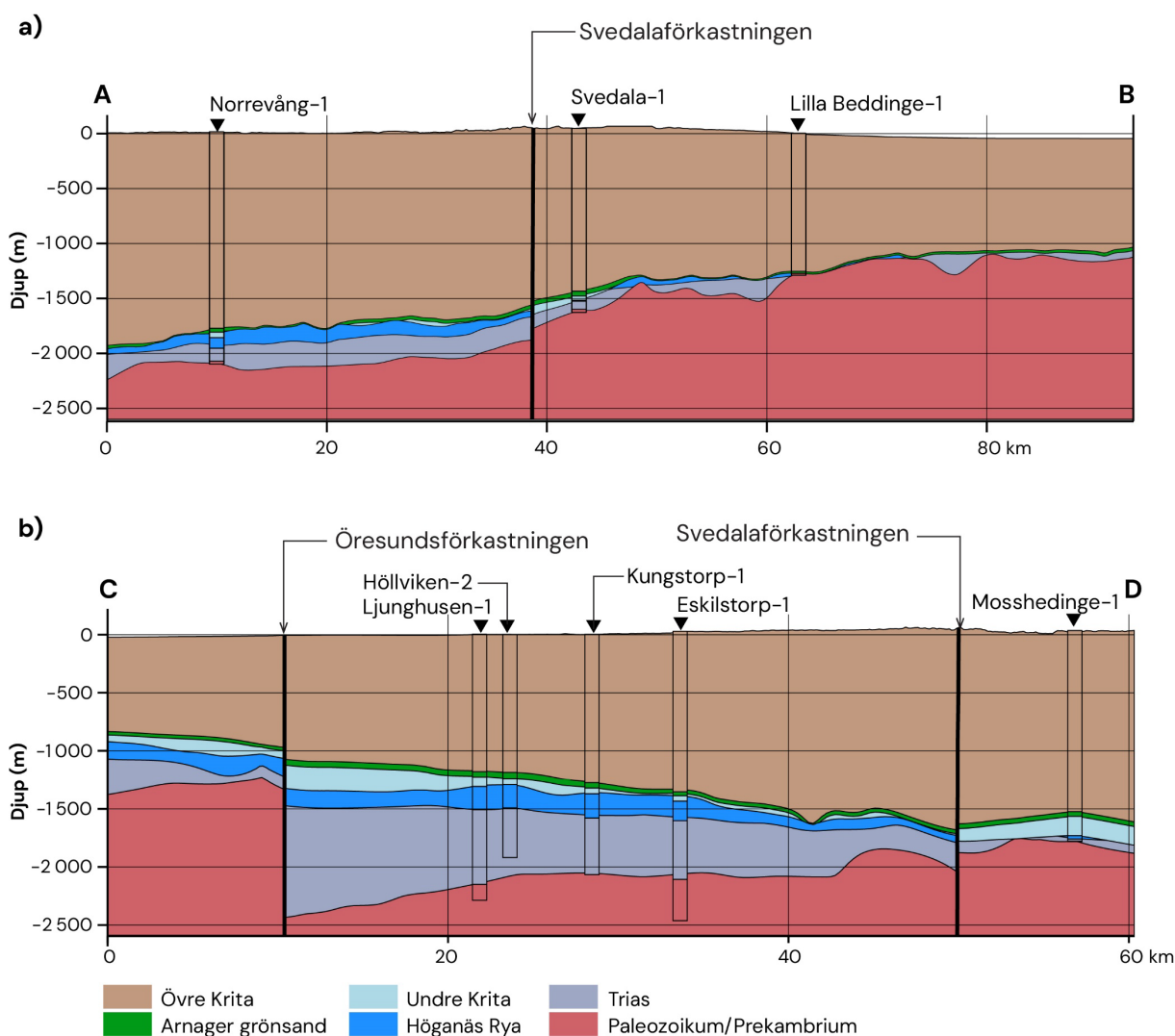
En geologisk 3D-modell har tagits fram över Skåne och sydvästra Östersjön (fig. 21). Modellen begränsas i norr av Romeleåsens förkastningszon och i söder av kontinentalsockelns yttre gräns (sammanfaller här med svensk ekonomisk zon). Modellen bygger på ny information från marinseismiska undersökningar utförda 2023 samt äldre landseismik som digitaliserats under 2024 (fig. 13). I den västligaste delen av modellområdet har vi även använt äldre digitaliserade tolkningar (Sivhed m.fl. 1999) och vetenskapliga artiklar (till exempel Erlström m.fl. 2018). Information från den nya borrhningen Lilla Beddinge-1 ingår även som underlag till modellen tillsammans med totalt 18 äldre borrhningar.

Syftet med modellen är att ge en översiktlig bild av den sedimentära berggrundens uppbyggnad. Modellen kommer senare även att kunna användas för att beräkna volym och lagringskapacitet för de olika geologiska enheterna.

Modellen är uppbyggd som en lagermodell och består av sex lager: i botten berggrund under den så kallade pre-zechsteinytan (som utgörs av kristallint urberg eller berggrund från perm eller tidigare), följt av trias (under toppen av Kågerödsleran), jura (Höganäs-Rya formationerna), undre krita, Arnagergrönsanden (undre–övre krita) och övre krita.



Figur 21. Figuren visar hela 3D-modellen i sin nuvarande utformning där det översta lagret "övre krita" är transparent för att bättre visualisera utbredningen av den underliggande Arnagergrönsanden inom området. Den svarta linjen är en förenklad kustlinje. Profilerna A-B och C-D visas i figur 22a och 22b.



Figur 22. a) Vertikal profil (A–B) genom 3D-modellen i figur 21. **b)** Vertikalprofil (C–D) genom 3D-modellen i figur 21. Den centrala delen visar Höllviken halvgraben som bedöms ha störst potential för koldioxidlagring på grund av de mäktiga lager av sedimentära bergarter som är bevarade. Risker med geologisk lagring av koldioxid.

Geologiska risker

De geologiska risker som finns i samband med geologisk lagring av koldioxid är förknippat med att koldioxid läcker ut från en lagringsplats till havsbotten eller markytan, eller att läckage sker i samband med transport eller injektering av koldioxid. I denna delrapport har vi enbart tagit hänsyn till geologiska risker i samband med lagring, inte läckagerisker som kan förekomma i samband med transport av koldioxid i till exempel rörledningar, eller borrhålens täthet i samband med injektering.

Läckage från ett geologisk lager med koldioxid kan ske genom en otät takbergart eller genom otäta sprickor i berggrunden som når upp till markytan eller havsbotten. Genom att undersöka takbergartens täthet och naturliga förekomster av gas i sediment eller berggrunden som läcker från havsbotten, kan vi innan det finns ett lager på plats skilja naturliga läckage från läckage av koldioxid från en lagringsplats.

I regeringsuppdraget har vi undersökt detta genom att analysera takbergartens täthet, hydrauliska och termiska egenskaper samt förekomsten av naturlig gas som läcker från havsbotten idag, vilket kan läsas om i den här rapporten.

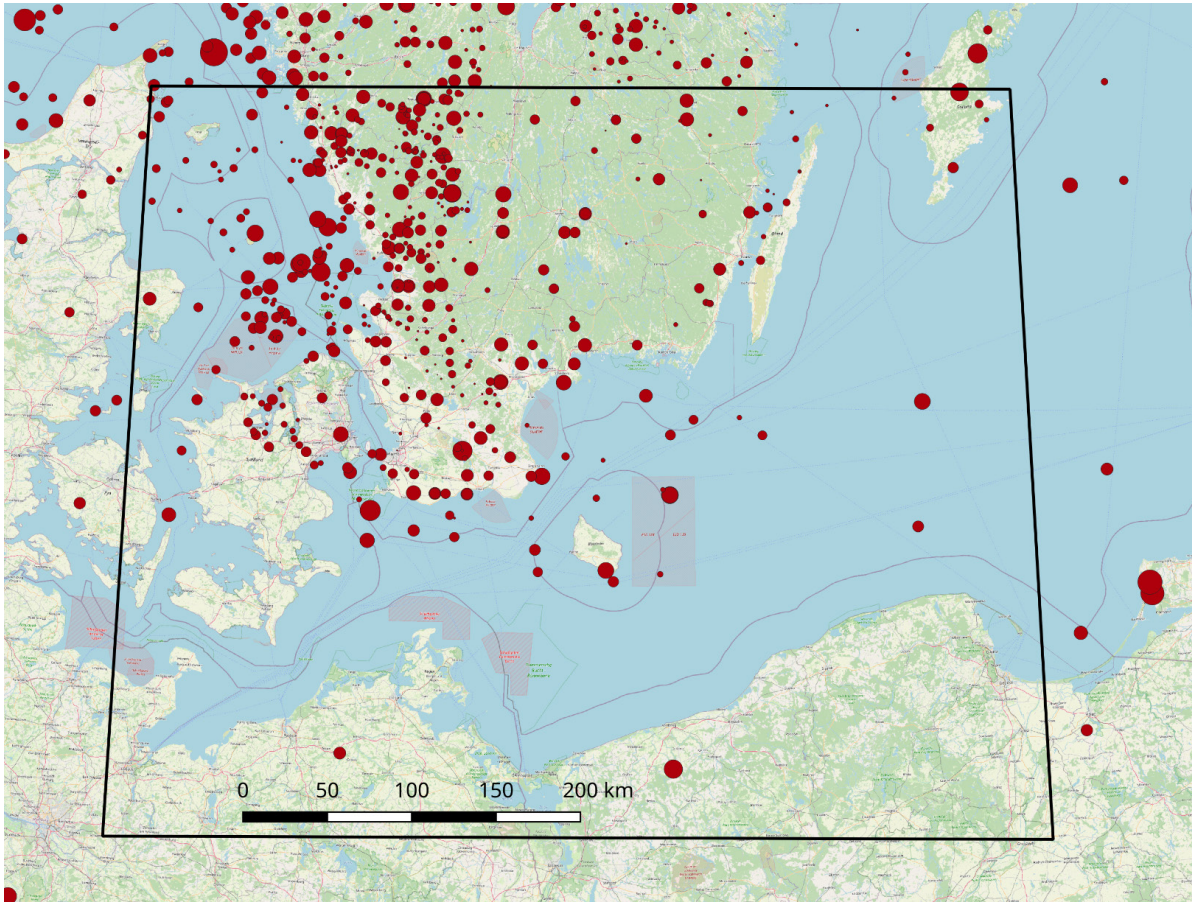
Seismiska risker – jordbävningsaktiviteten i södra Sverige och södra Östersjön

Skandinavien, norra Tyskland och Polen är ett område med låg seismisk aktivitet där endast cirka 20 jordbävningar med magnitud 5 eller större har inträffat de senaste 500 åren. Av dessa ägde endast tre rum på land och alla tre skedde i Norge. Kartan i figur 23 visar skalv registrerade i den samnordiska jordbävningsskatalogen Fencat (Ahjos & Uski 1992) samt i det Svenska nationella seismiska nätet (SNSN, Lund m.fl. 2021) mellan åren 1375 och 2022 i det aktuella området. Vi har ringat in området mellan latituderna 53.5 och 57.5, longitud 10.5 till 19, det vill säga det mest intressanta för projektet (den svarta rutan i figur 23). I området finns 514 historiska jordskalv registrerade. Magnituderna hos skalven i denna studie har homogeniserats efter Uski m.fl. (2015), och tidsserien för det inringade området kan ses i figur 24. SNSN expanderade kraftigt i sydvästra och södra Sverige under åren 2006–2007, vilket har gjort att detektionsförmågan ökat kraftigt. Före 2007 finns mycket få skalv i områdeskatalogen med magnitud under 2, utom under perioden 1980–1984, då FOA drev ett temporärt seismiskt nätverk i södra Sverige, se figur 23.

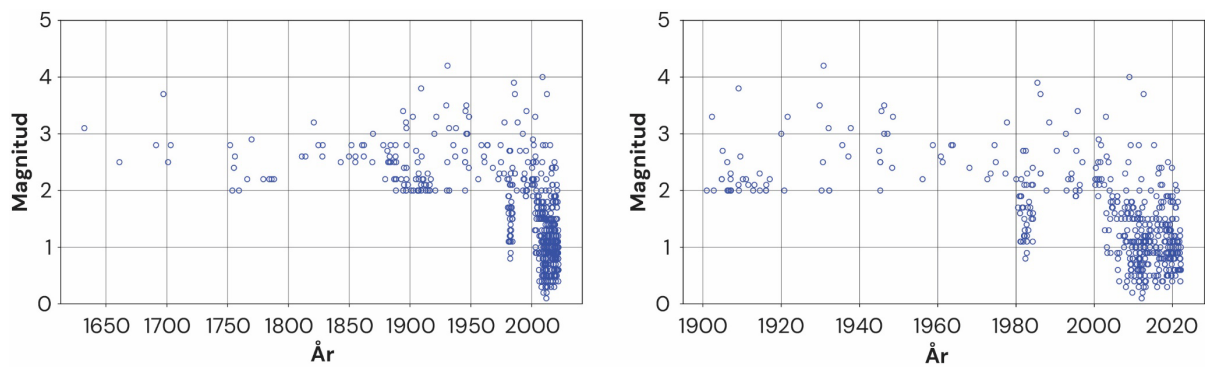
De största skalven i figur 23 har skett utanför det markerade området, dels skalvet i Kattegatt 1759 med uppskattad magnitud 5,6, dels de två skalven utanför Kaliningrad 2004, med magnituderna 5,0 och 4,8. Innanför det markerade området inträffade det största skalvet, med magnitud 4,2, år 1930 i havet söder om Falsterbo, se figurerna 23 och 24. Det näst största skalvet inträffade utanför Sjöbo i Skåne i december 2008, med magnitud 4,0. Dessa är de enda två skalven med homogeniserad magnitud 4 eller större i området. Aktiviteten i området är till stor del koncentrerad till Halland samt i Kattegatt och Skåne längs Tornquistzonen. I södra Östersjön finns tre skalv i katalogen nordost om Bornholm som är under utredning. De har en magnitud mellan 3 och 4 och har samma lokalisering och syns därför som en prick. Dessa inträffade 1946 och 1948, i ett område där ammunition dumpades efter andra världskriget och är sannolikt inte jordskalv. I övrigt är skalvaktiviteten i södra Östersjön mycket låg.

Två studier av seismisk fara i södra Sverige från naturliga jordbävningar har publicerats under de senaste åren. Dels den europeiska studien European Seismic Hazard Model 2020 (Danciu m.fl. 2021), dels en studie med fokus på Sverige (Joshi m.fl. 2024). När vätska pumpas ner i berggrunden på större djup vet vi av erfarenheter från olje- och gasindustrin (*”fracking”* och *”wastewater disposal”*; Chen m.fl. 2017), samt uppspräckning för geotermisk energi (Kim m.fl. 2017), att jordskalv kan induceras. Även för CCS är detta en risk som noga måste utvärderas, och övervakas, särskilt under nedpumpningsfasen (White & Foxall 2016).

Under 2025 kommer SGU tillsammans med Uppsala universitet att göra en mer detaljerad analys av seismiciteten i området, spänningstillståndet och om riskerna för seismisk fara från såväl naturliga som inducerade jordskalv.



Figur 23. Karta över jordbävningar rapporterade av Fencat och SNSN mellan år 1375 och 2022. Cirklarnas storlek representerar magnitud, där de största har magnitud över 5. Skälv som har registrerats i Danmark men inte är med i Fencat finns inte med på kartan.



Figur 24. Jordbävningars magnitud över tid inom det område som visas i rutan i figur 23. Vänster: Här visas år 1625 till 2022, då endast en jordbävning registrerats före det intervallet, år 1375. Höger: År 1900 till 2022.

Produktplanering och dataprodukt

Projektets resultat kommer utöver rapporter att tillhandahållas genom ett flertal befintliga eller planerade dataprodukt. Ett arbete har slutförts för att identifiera de datamängder som projektet använder. Det handlar både om historiska data och data som samlas in i regeringsuppdraget. De insamlade datamängderna informationsklassas och för många söks spridningstillstånd. En viss publicering av datamängder har redan påbörjats utifrån krav i EU:s förordning om nettonollindustrin (Net Zero Industry Act). Gemensamt för såväl projektets tillhandahållande och det tillhandahållande som sker via NZIA-direktivet är att data tillhandahålls under förutsättning att spridning av data inte hindras av lagen om skydd för geografisk information eller att sekretess föreligger.

Under hösten 2024 har behovsdialoger genomförts med intressenter för att säkerställa att data som samlas in i regeringsuppdraget kan levereras i önskat format och i de olika förädlingssteg som användarna efterfrågar. Det betyder att data- och informationsmängder kommer att tillgängliggöras i flera kommunikationskanaler och format beroende på vilka intressenterna är, och vad de vill göra med informationen. Baserat på intressentdialoger planeras fortsatt för två övergripande produktkategorier. Det är tillhandahållandet av insamlad data/mätdata och tillhandahållande av information för 3D-modeller som omfattar tolkade och bearbetade data med tillhörande rapporter.

Helsingforskonventionen

Helsingforskonventionen är en överenskommelse mellan Östersjöns kuststater samt EU om att värna miljön i Östersjön. Konventionen riktar sig till medlemsstater som ska omsätta konventionens intentioner i nationell lagstiftning. För att samordna arbetet finns ett sekretariat, HELCOM, beläget i Helsingfors.

En inledande rättslig studie har sedan tidigare gjorts av SGU gällande frågan om Helsingforskonventionen innebär ett rättsligt hinder för geologisk lagring av koldioxid i Östersjön. Arbetet har skett tillsammans med Energimyndigheten och professor David Langlet vid Uppsala universitet. SGU:s bedömning är att dumpningsförbudet i Helsingforskonventionen troligen innebär ett rättsligt hinder för geologisk lagring av koldioxid i Östersjön. Det är också i linje med den bedömning som Danmark och flera andra länder gett uttryck för inom ramen för HELCOM-samarbetet.

SGU skulle därför vilja lyfta behovet av en ändring av Helsingforskonventionen (samma ändringar som i Londonkonventionen) för att möjliggöra lagring av koldioxid i Östersjön. Helsingforskonventionen ändras när det anses nödvändigt, t.ex. för att följa utvecklingen av internationell miljö- och sjöfartslagstiftning.

Samrådsunderlag och tillstånd

Borrningar

Den 1 mars 2024 ansökte SGU till Trelleborgs kommun samt till Länsstyrelsen i Skåne att utföra två undersökningsborrningar för att få underlag till bedömning av berggrundens lämplighet för koldioxidlagring. Eftersom borrning på land är avsevärt mindre komplicerad och billigare i

jämförelse med borrhning till havs var det tillräckligt att göra undersökningsborrningarna på land nära kusten för att bilda en uppfattning av berggrundens lämplighet till havs. Möjliga borrhplatser hade rekognoscerats. Ett borrhål i den så kallade i Höllviken halvgraben (strax väster om Trelleborg) och ett på den så kallade Skurupsplattformen (öster om Trelleborg). Borrplats 1 vid Smygehuk är beläget vid det kommunala reningsverket i Smygehamn och det andra på Nils Christenssons mark vid Maglarp. För båda borrhplatserna har ett arrendeavtal upprättats mellan SGU och markägarna. Trelleborgs kommun svarade och önskade att ha ett möte för att fastställa genomförande samt villkor. Länsstyrelsen i Skåne avstod att svara på vår ansökan då de gav ärendet till kommunen i Trelleborg.

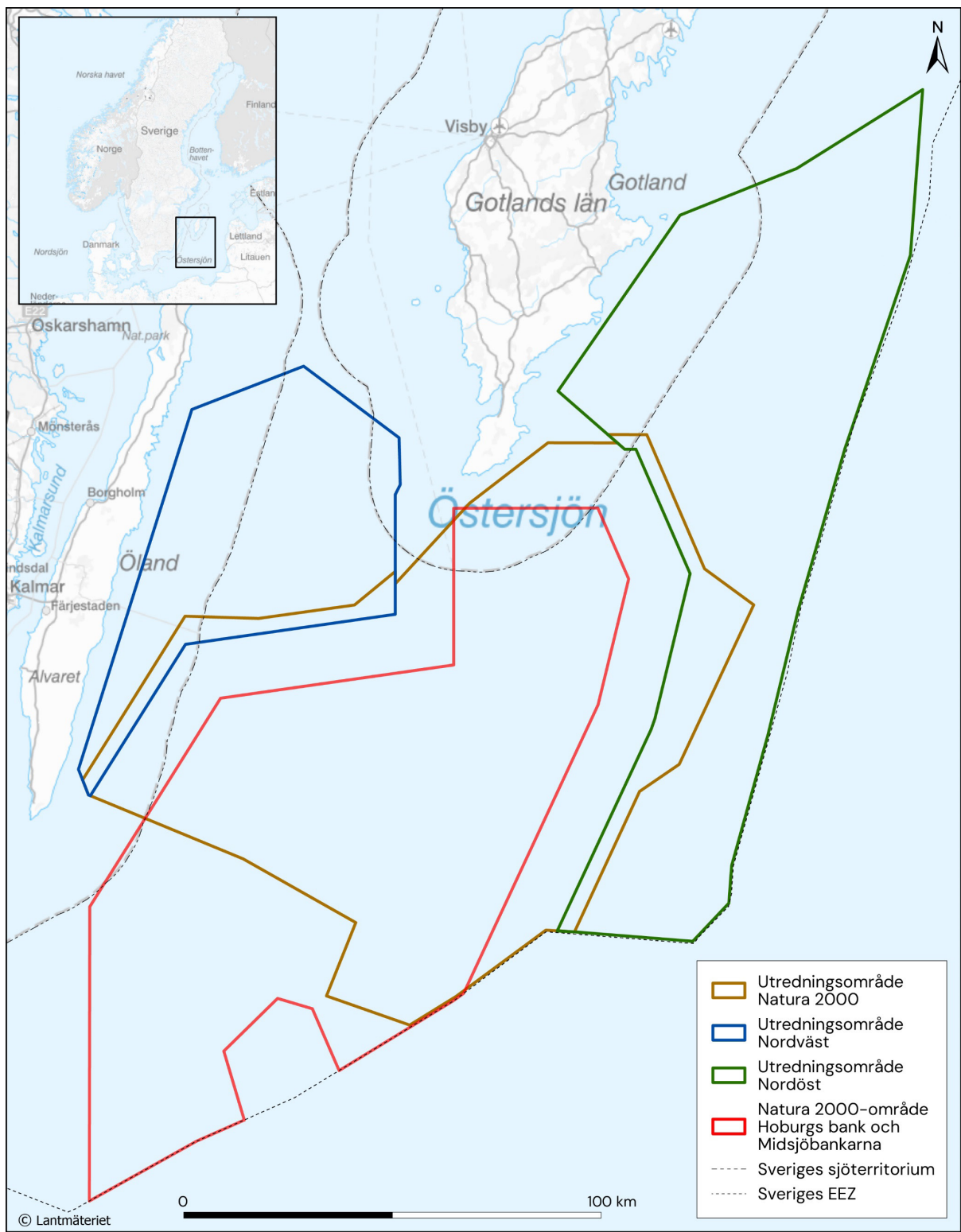
Arbetet med anläggning av borrhplats, brunnskammare och hammarborrning med foderrörsättning utfördes under maj månad 2024 vid borrhplatsen Lilla Beddinge och under oktober månad 2024 vid borrhplatsen Skåre. Kärnborrning i Lilla Beddinge startade i månadsskiftet augusti/september och pågick till november 2024. Kärnborrningen i Skåre planeras börja i månadsskiftet mars/april 2025 och avslutas i juni 2025. Det betyder ingen aktivitet under perioden december 2024 till mars 2025. Samtliga arbeten beräknas avslutade till sommaren 2025.

Innan arbetet påbörjades vid borrhplatsen skickade SGU ett informationsbrev till Försvarmakten, och Trelleborgs kommun la ut på sin webbplats att SGU skulle genomföra borrhaktiviteter i kommunen. SGU var också på plats i kommunhuset i Trelleborg och presenterade för kommunfullmäktige CCS-uppdraget och de undersökningar som krävs.

Inför marina undersökningar i sydöstra Östersjön 2025

Under 2024 har SGU arbetat med att upprätta samt lämna in en ansökan om tillstånd enligt 7 kap. 28 a § miljöbalken, en så kallad Natura 2000-ansökan, till Länsstyrelsen i Gotlands län, för att genomföra geofysiska undersökningar i Östersjön. En ansökan krävs då undersökningarna av havsbotten kommer att genomföras delvis inom Natura 2000-området Hoburgs bank och Midsjöbankarna, i mellersta, sydöstra och sydvästra Östersjön. Natura 2000-området är beläget centralt i egentliga Östersjön till största delen i Sveriges ekonomiska zon (EEZ) cirka 8 km söder om Gotland och 20 km öster om Öland, samt sträcker sig ungefär 90 km söder om Öland där det i södra delen gränsar mot Polens EEZ, se figur 25. Området utsågs den 14 december 2016 av regeringen till särskilt bevarandeområde avseende arterna alfågel, tobisgrissla och ejder enligt fågeldirektivet (rådets direktiv 2009/147/EG) och tumlare (östersjöpopulationen) enligt art- och habitatdirektivet (rådets direktiv 92/43/EG) samt naturtyperna sandbankar och rev enligt art- och habitatdirektivet. Enligt bevarandeplanen för området, fastställd av Länsstyrelserna i Kalmar och Gotlands län den 20 december 2021, är de prioriterade bevarandevärdena arterna tumlare, alfågel och tobisgrissla som nyttjar hela eller delar av området, samt naturtyperna rev och sandbankar och de arter och den biologiska mångfald som är typiska för dessa två naturtyper.

Det aktuella undersökningsområdet överlappar delvis med Natura 2000-området och sträcker sig, inom Sveriges sjöterritorium och Sveriges EEZ, ungefärligt från östra sidan av Gotland utanför Slite i nordost till Ölands sydspets i sydväst och därifrån sydost till Sveriges EEZ på ungefär samma breddgrad som Simrishamn i Skåne sen längs gränsen österut, se figur 25. Totalarea för undersökningsområdet uppgår till cirka 23 832 km². Undersökningsområdet har delats in i tre utredningsområden kallade *Natura 2000*, *Nordväst* samt *Nordöst*. Undersökningsområdet inkluderar de tre utredningsområdena och framgår av figur 25.



Figur 25. Undersökningsområdet. Inkluderat de tre utredningsområdena (Natura 2000, Nordväst och Nordöst). Av figuren framgår även Natura 2000-området.

SGU:s undersökningar till havs genomförs med olika geofysiska metoder. Under sommartid (maj–oktober) kommer undersökningarna att ske ombord på SGU:s fartyg Ocean Surveyor och vintertid (november–april) kommer undersökningarna att ske på ett inhyrt fartyg. Undersökningarna har delats upp i dessa två perioder för att minimera påverkan på östersjöpopulationen av tumlare. Under sommarhalvåret är tumlaren koncentrerad till sitt kärnområde vid Natura 2000-området och undersökningar kommer därför inte genomföras i det området under den perioden. En skyddszon om 14 km har upprättats runt Natura 2000-området för att säkerställa att ljud, eller andra störande aspekter från undersökningarna inte når in till området. Under sommartid kommer i stället andra områden att undersökas, *Nordväst* och *Nordöst* där tumlartätheten bedöms vara lägre. Området i och runt Natura 2000-området undersöks därför vintertid när tumlarna är mer utspridda i andra delar av Östersjön.

Avgränsningen av möjliga lagringsplatser i sydöstra Östersjön kommer att vara beroende av att det finns information om förekomsten och utbredningen av begränsande förkastningar i området. Idag baseras kunskapen om förekommande strukturer i berggrunden till stora delar på seismiska undersökningar med sämre upplösning, utförda av OPAB under 1970- och 1980-talet. Det är därför av största vikt att de planerade geofysiska undersökningarna kan genomföras för att fullfölja regeringsuppdraget. För de undersökningar SGU vill genomföra i södra Östersjön under 2025 (fig. 25) krävs att Natura 2000-ansökan beviljas senast under våren 2025 utan överklaganden.

Landseismiska undersökningar

Inför de landseismiska undersökningarna i Skåne skickade SGU in dokument till Trelleborgs kommun, Länsstyrelsen i Skåne län, Trafikverket och Försvarsmakten. SGU höll också löpande kontakt med Trelleborgs kommun per telefon, och de la också upp information om seismikundersökningen på sin webbplats. Trafikverket kontaktades angående trafikplaneringsplan och tillstånd att utföra vårt (och Ramudden sitt) arbete längs vägarna. Ramudden fixade trafikplaneringsplanen och var med och körde TMA-bil, satte upp skyltar och stängde av och ledde om vissa sträckor.

Möjlighet att injektera från land?

Idag, 2025, är geologisk lagring av koldioxid inte tillåtet på land. Förbud mot lagring på land (av volymer större än 100 000 ton koldioxid) i Sverige följer av 10 § förordning (2014:21) om geologisk lagring av koldioxid. Förbudet gäller hela utbredningen av lagringskomplexet, vilket förutom lagringsplatsen även inkluderar till exempel injekteringsanläggningar. En lagändring som innebär att delar av lagringskomplexet kan vara på land, exempelvis injekteringsanläggningen, skulle väsentligt underlätta för att kunna genomföra geologisk lagring av koldioxid i Sverige som en del av Sveriges klimat- och miljöarbete.

Att bygga och driftsätta en injekteringsanläggning till havs är extremt kostsamt, jämförbart med vad det kostar att bygga och ta i drift en havsbaserad plattform för olja och gasutvinning. Injektering till havs utanför till exempel Skånes sydkust skulle också kunna vara problematiskt med hänseende till de fartygsleder som finns i svenskt vatten. En injekteringsanläggning på land skulle inte störa fartygstrafiken och innebära mindre kostnader för de företag som är intresserade av geologisk lagring av koldioxid. Man skulle även minska de miljörisker som finns i samband med injekteringsanläggningen då det är enklare och billigare att genomföra miljöåtgärder på land. En injekteringsanläggning på land går att kombinera med lagring till havs genom avböjning och styrning av borrhål.

SGU skulle därför vilja lyfta behovet av en ändring i förordningen 2014:21 för att undersöka möjligheterna till en ändring av lagtexten för att möjliggöra att delar av lagringskomplexet kan finnas på land.

Samverkan med myndigheter och andra organisationer

För datainsamling av seismik har SGU under 2023–2024 samarbetat med framför allt följande aktörer: Uppsala universitet för landseismik, GEUS och Århus universitet för marinseismik, Lunds Tekniska Högskola (LTH) för samarbetsavtal för att utföra borrhningarna på Gotland samt i Skåne 2024–2025. Vid borrhningarna har den så kallade Riksriggen vid LTH använts och de har tagit in extern personal för att sköta arbetet med riggen på plats. SGU har också samarbetat med Statens Energimyndighet (STEM). I uppdraget beskrivs det att SGU ska samverka med Energimyndigheten och ett första möte genomfördes i februari 2023, utan projektledare, och ett andra möte i september med nyanställd projektledare. SGU och STEM kom överens om att samverka genom en referensgrupp. SGU bjöd in olika industrier, företag, myndigheter och länsstyrelser samt SGU:s och STEM:s grannländers motsvarigheter till en referensgrupp och första mötet skedde delvis online och vissa kom till SGU:s huvudkontor i Uppsala. Vidare samverkar SGU med STEM med det juridiska hindret Helsingforskonventionen.

Trelleborgs kommun

Trelleborgs kommun är en viktig aktör och samarbetspart gällande de borrhningar som SGU har gjort i Lilla Beddinge och Skåre (endast förborrning under 2024). SGU och Trelleborgs kommun har dels löpande utbytt information om utvecklingen i arbetet, dels arbetat tillsammans med information till närboende till exempel i form av frågor och svar (FAQ) på respektive webbplats.

Projektrisker 2024 – analys, hantering och utfall

I delrapport 1 identifierade vi ett antal projektrisker inför 2024.

- Turbulent väder, fartyget inblåst.
- Tekniska problem med Riksriggen.
- Stillestånd på grund av problem vid hammarborrning och sättning av foderrör.
- Överklagande av ansökt tillstånd för borrhning på Gotland.
- Vattenprovtagning, för att visa på kontakt med omkringliggande grundvattenreservoarer.
- Sjuk personal.
- Pandemi.
- Världslägesförändringar.
- Projektledare tillsatt sent in i projektet.

En av de risker som föll ut var dåligt väder. Under veckorna 40–44 2023, var Ocean Surveyor med personal inblåsta i Trelleborgs hamn. Vi planerade om för denna undersökning och ansökte till Länsstyrelsen i Skåne län att få inhämta resterande område 2024. Inhämtning av data genomfördes i april–maj 2024.

En annan risk som föll ut var de planerade marinseismiska undersökningarna i Östersjön under 2024 som utgick. Detta på grund av att SGU var tvungna att upphandla externa jurister under

våren 2024, för att hantera och skriva SGU:s miljökonsekvensbeskrivning samt ansökan för att genomföra marinseismiska undersökningar i Östersjöområdet. Denna process tog tid. Detta innebär sannolikt att SGU inte kommer att kunna ge ett utlåtande över det område i Östersjön som möjligen är lämpligt för geologisk lagring av koldioxid i detta regeringsuppdrag. SGU kommer inte att kunna bedöma och ge utlåtande om möjlig lagringskapacitet, riskbedömning med endast äldre data från 1970-talet som inte har samma högupplösta data (se vidare under avsnittet *Projektrisiker 2025*).

Ytterligare en risk som föll ut var att rekrytering av ordinarie projektledare som tillsattes 2023 kom in ett halvår in i projektet. I och med detta försenades behovsplan och underlag till inköps- och upphandlingsfunktionen som stöttar vid upphandling av tjänster och entreprenader. Detta resulterade i förseningar. Däremot utfördes samverkan med andra myndigheter och universitet som skulle bistå i undersökningarna, enligt tidsplan.

Pågående och planerade arbeten 2025

Geologi

Under 2025 planeras följande geologiska aktiviteter inom regeringsuppdraget:

Kärnmaterial från Lilla Beddinge-1 har provtagits och kommer att analyseras med avseende på sedimentens ålder, porositet, permeabilitet, mekaniska egenskaper och mineralogiska uppbyggnad. Resultaten kommer sedan att samtolkas med resultaten från en kemisk skanning av borrhärnan och de borrhålsgeofysiska undersökningarna.

En inventering av äldre material från OPAB:s borrhärningar i Skåne och en biostratigrafisk åldersbestämning kommer att genomföras för att kunna bedöma den laterala utbredningen och representationen av de olika delarna av Arnagergrönsanden i sydvästra Skåne. Provtagning av Arnagergrönsanden och andra potentiella reservoarer samt taklager i äldre borrhärnor vid SGU:s borrhärnearkiv i Malå kommer att genomföras i februari.

Ytterligare tunnslipsundersökningar från såväl de nya som äldre skånska borrhälarna kommer att genomföras under 2025 för att få en bild av reservoar- och takbergarternas egenskaper. Resultat från pågående tunnslipsundersökningar från de skånska borrhärnorna kommer att redovisas i slutrapporten för regeringsuppdraget.

Kärnborrningen vid Skåre utanför Trelleborg kommer att påbörjas i slutet av mars och förväntas pågå till början av juni. Borrhålet ska loggas geofysiskt och det kommer att samlas in vattenprov och utföras ett antal pumpstest. Själva borrhärnan kommer att beskrivas med särskild vikt på specifika reservoar- och takbergartsintervall.

Vidare kommer prover av såväl reservoarbergarter och takbergarter från Skåre-1 att provtas och analyseras med avseende på ålder, porositet och permeabilitet, hållfasthet, geokemi med mera, på samma sätt som tidigare har gjorts för Lilla Beddinge-1 och Nore-1 och Nore-2.

Ett arbete om Arnagergrönsandens utbredning, indelning och uppbyggnad har inletts för en värdering av dess lagringspotential, särskilt med koppling till resultaten i Lilla Beddinge-1 där den totala tjockleken var mindre än förväntat. Resultaten från Lilla Beddinge-1 visar även att en omtolkning av berggrundrörelserna i sydvästra Skåne och intilliggande marina områden behövs

för att bedöma olika förkastningars historik och därigenom deras riskklassning i samband med koldioxidlagring.

Borrhålen Nore-1 och Nore-2 på Gotland ska enligt plan permanent förseglas under sommartidig höst 2025. I ursprunglig plan ingick att utföra en så kallad NMR-loggning (*Nuclear Magnetic Resonance*) av Nore-1 och Nore-2 som visar var det finns rörligt vatten i sandstenslagren, det vill säga vilka delar av sandstenen som kan vara mottaglig för injektion av koldioxid. Men eftersom bentonitleror på cirka 500 m djup täppt till borrhålen kunde detta inte utföras under 2024. Planen är att under 2025 försöka rensa de tilltäppta sektionerna och utföra loggningen innan borrhålen försluts permanent.

De båda 3D-modellerna över Gotland och sydöstra Östersjön respektive sydvästra Skåne och sydvästra Östersjön kommer kontinuerligt att uppdateras i takt med att nya data erhålls.

Seismicitet

En mer detaljerad analys av seismiciteten i området, spänningstillståndet samt en diskussion om seismisk fara från naturliga och inducerade jordskalv kommer att utredas under 2025.

Seismik

Marinseismik sydöstra Östersjön: Vidare planerar SGU att arbeta med äldre prospekteringsdata söder om Gotland. Under 2025 kommer vi att ombearbeta äldre digital data insamlad söder om Gotland under 1970- och 1980-talet för olje- och gasprospektering. Ombearbetningen kommer att utföras av SGU-personal för data från territorialvattnet, och med hjälp av ett externt företag för data från området utanför territorialvattengränsen. SGU upphandlar ombearbetning av 4 000 km data, med option på ytterligare ombearbetning. I första hand kommer detta att göras för områdena öster, söder och sydväst om Gotland. Digitalisering av äldre analoga seismiska data kommer också att genomföras under 2025 för områden där nya data inte är tillgängliga. Under 2025 kommer SGU även att arbeta med uppdatering och förvaltning av vår seismiska databas, vilket kommer att vara en viktig produkt från det här regeringsuppdraget.

Marinseismik utanför Skåne: SGU har erhållit tillstånd för att samla nya marinseismiska data väster om Skåne i södra Öresund (Barsebäck–Malmö) för att förbättra kvaliteten på dataunderlaget. SGU planerar att samla in upp till 2 000 km nya djupseismiska data i detta område.

Landseismik Skåne: Under våren 2025 kommer dessa data integreras med övriga geofysiska och geologiska data för tolkning och modellering på regional skala.

Maringeologi

Inom maringeologi kommer under 2025 fokus ligga på bearbetning och tolkning av de redan insamlade data samt i kombination med de planerade marina seismiska undersökningarna samla ytterligare data. I det fall projektriskerna kring undersökningar i närheten av Natura 2000-områden faller ut, planeras undersökningar av den ytliga geologin i sydöstra Östersjön med både hydroakustik, områdesgenerella och högdetaljerade vid berggrundsförkastningar samt provtagningar i ackumulationsbottnar i området efter förorenade sediment.

Helsingforskonventionen

SGU kommer att arbeta med att ta fram underlag inför möte med HELCOM HoD (Heads of Delegation) i början av 2025 gällande att genomföra en extern oberoende utredning om hur koldioxidlagring i Östersjön relaterar till Helsingforskonventionens regelverk.

Projektrisker 2025

SGU har identifierat följande risker för projektet under 2025:

- Sekretesshantering av data.
- Avslag eller fördröjt tillstånd för seismiska undersökningar i sydöstra Östersjön.
- Turbulent väder, fartyget inblåst.
- Ny projektledare tillsatt.
- Tekniska problem med Riksrigger/borring Skåre
- Påvisad kontakt mellan borrhål och omkringliggande grundvattenmagasin.
- Sjuk personal.
- Pandemi.
- Världslägesförändringar.

Sekretesshantering av data. SGU har för avsikt att upphandla ombearbetning av äldre seismikdata insamlad av OPAB under 1970- och 1980-talet för att se om det går att förbättra data så att den kan ingå i tolkningsunderlaget för CCS-projektet. SGU inväntar samråd med Försvarmakten för att få information och klara direktiv om vilket underlag SGU kan dela med offentliga aktörer, och vilka delar som går att publicera med mera. Utfallet av samrådet kan äventyra ett av huvudmålen med projektet, nämligen att SGU ska tillhandahålla modern och säker grundinformation över Östersjöområdet, samt skapa och tillgängliggöra digitala geologiska modeller för aktörer i behov av kunskapsunderlag om CCS (till exempel industri, konsulter, universitet och myndigheter).

Avslag eller fördröjt tillstånd för seismiska undersökningar i sydöstra Östersjön. En överhängande risk för projektarbetet under 2025 är om SGU inte får tillstånd att utföra seismiska undersökningar i sydöstra Östersjön i och kring Natura 2000-området. SGU har skickat in ansökning om tillstånd och inväntar svar. Som poängterats, både i delrapport 1 och denna delrapport, så är undersökningarna avgörande för att kunna bedöma lagringspotentialen i sydöstra Östersjön. Nuvarande kunskap om berggrundens uppbyggnad och möjliga lagringsstrukturer är primärt baserat på äldre seismik med sämre upplösning som utfördes av OPAB under 1970- och 1980-talet. Gamla djupseismikdata är mycket värdefulla, i synnerhet som ett komplement till moderna data. De kan dock inte helt ersätta den mer högupplösta information som kan erhållas från moderna data. Om inga miljötillstånd beviljas för ny datainsamling i sydöstra Östersjön finns risk att SGU inte kan svara på om detta område är lämpligt för koldioxidlagring. Avgränsningen av möjliga lagringsplatser i sydöstra Östersjön kommer att vara beroende av att det finns information om förekomsten och utbredningen av begränsande förkastningar i området. Det blir också svårare att locka företag att försöka utveckla detta område för koldioxidlagring. Vid en eventuellt framtida lagring av koldioxid är det också viktigt att veta på vilket sätt det kommer att vara tillåtet att övervaka injekteringen. Seismisk övervakning av lagringsplatsen krävs för att kunna övervaka både hur koldioxiden sprids i reservoaren samt eventuella läckage. Detta kommer att kräva återkommande seismiska mätningar med några års mellanrum under injekteringsfasen, så kallade time-lapse-mätningar.

Turbulent väder. Fartyget inblåst. En försenad beviljning av ansökan till sommar eller höst 2025, med försenad insamling till höst/vinter 2025 skulle innebära att SGU inte hinner bearbeta och tolka data under 2025. Tidsspannet för de marina undersökningar som eventuellt kan komma att beviljas sent 2025 är satt till vinterhalvåret 2025–2026 och då föreligger stor risk för hårt väder.

Tekniska problem med Riksrigger/borring Skåre och möjliga åtgärder. Det föreligger alltid en viss risk för tekniska problem eller avbrott under borrhingsprocessen. Vi har tagit höjd för eventuella risker i form av tekniska svårigheter som kan uppstå i samband med borrhningen. Detta innefattar bland annat:

- risk för igensättning av borrhålet på grund av svällande leror. I dessa intervall är det viktigt att inte stoppa borrningen.
- Avbrott i borrning på grund av geofysisk loggning av okonsoliderade intervall. Vanligen loggas borrhål efter avslutat borrarbete, men om det förekommer okonsoliderade sandintervall kan vi behöva stoppa borrningen för att logga det intervallet och därmed säkra att ingen information går förlorad. Sådana intervall kan komma att behövas cementeras efter loggning för att förhindra ras innan man borrar vidare. Loggning under pågående borrning medför en merkostnad då borrarpersonal får vänta medan loggningen utförs.

Externa kontakter och omvärldsbevakning

Under 2024 har CCS-projektet genomfört två referensgruppsmöten där svenska, finska, norska och danska energimyndigheter, berörda länsstyrelser, Naturvårdsverket och intresserade företag har medverkat. De första två mötena var ett samarbete med Energimyndigheten där Energi- myndighetens ansvar och uppgifter inom CCS i Sverige presenterades och där SGU presenterade sitt regeringsuppdrag Koldioxidlagring i Sverige. Mötena gav mycket feedback från industrin och tips och idéer från våra grannländers projekt inom CCS.

Utöver referensgruppsmötena har SGU haft kontakt med organisationen KLIMPO som är ett forum för klimatpositiv och kolsänkor och har cirka 30 olika företag anslutna. KLIMPO besökte en av våra borrhållsplatser i Skåne under hösten 2024. SGU har under 2025 jobbat med att kartlägga CCS-företagens behov av dataunderlag. SGU fick där en bra grund för vilken typ av data som företagen efterfrågar inför en ansökan till SGU och regeringen om att få göra undersökningar till havs och provborra.

Konferenser och större möten

Kartdagarna 2024 (16–18 april, Göteborg)

Årligt återkommande evenemang med fokus på beslutsfattare, experter, utvecklare och studenter med koppling till samhällsplanering. Eva Wendelin höll föredraget ”Koldioxid för klimatets skull”, som handlade om SGU:s arbete med att identifiera lämpliga platser för koldioxidlagring.

I april 2024 deltog SGU vid den årliga EGU-konferensen i Wien (EGU, *European Geosciences Union*) med 13 000 deltagare. SGU medverkade och gjorde två presentationer om CCS-arbetet och undersökningarna på Gotland (Erlström m.fl. 2024, Juhlin m.fl. 2024).

SGU genom Thomas Andolfsson deltog i CO2Geonets årligt återkommande konferens i Venedig på försommaren 2024. Det är en bra arena för omvärldsbevakning där man deltar i diskussioner och delar erfarenheter om CCS-projekt.

SGU genom Thomas Andolfsson deltog i CCS Baltic som är en konferens fokuserad på CCS i området runt Östersjön i ett bredare sammanhang. Här presenterade vi det svenska CCS-projektet, och bidrog till en viss ökning av hoppet om att kunna lagra koldioxid under Östersjöns havsbotten. Osäkerheter kring Helsingforskonventionen innebär att osäkerheter finns kring förutsättningar för geologisk lagring av koldioxid.

SGU genom Henrik von Zweigbergk har i april och november 2024 medverkat vid möten med HELCOM Working Group Sea Based Pressures för att redogöra för den rättsliga frågeställningen och den studie som SGU gjort gällande om Helsingforskonventionen innebär ett rättsligt hinder

för koldioxidlagring i Östersjön. SGU har under året även deltagit i möte med Polen och Danmark inför möte med HELCOM HoD (Heads of Delegation) i juni 2024 för att diskutera frågan och hur den kan hanteras.

Press och kommunikation

Ledord för kommunikationen inom regeringsuppdraget har varit transparens, öppenhet och tydlighet. Flera olika kommunikationsinsatser har gjorts under 2024 och SGU:s arbete med geologisk lagring av koldioxid har också lyfts fram i mer generella nyheter om SGU:s arbete och prioriteringar – både på den egna webbplatsen och i inslag i sociala medier.

SGU har också intervjuats i dagspressen, bland annat Trelleborgs Allehanda, Ystads Allehanda och Dagens Nyheter, om CCS projektet.

Almedalen 2024

SGU anordnade fem publika arrangemang under Almedalsveckan. Samtliga hölls ombord på SGU:s undersökningsfartyg Ocean Surveyor, som låg förtöjd vid kajplats 2, det vill säga förhållandevis centralt i Visby.

Arrangemanget ”Koldioxidlagring i Sverige – förutsättningar och möjligheter” tog upp hur geologisk koldioxidlagring kan vara en del av lösningen att minska samhällets storskaliga utsläpp av koldioxid. I programmet lyftes också att industrin står i startgroparna och att en viktig fråga är hur berörda myndigheter kan möta upp.

SGU inledde med att presentera de geologiska förutsättningarna för geologisk lagring under svensk havsbotten och representanter från näringslivet gav sin syn på potentialen för CCS i Sverige – hur ska vi göra och varför. Avslutningsvis lyftes frågorna kring CCS i en paneldebatt mellan berörda aktörer.

Arrangemanget hölls tisdagen den 25 juni, kl. 15:00–15:45, och hade 53 åhörare, vilket är ungefär maximalt antal personer som rymdes i den iordningsställda mötesytan. Det var det mest välbesökta av SGU:s publika evenemang under Almedalsveckan 2024.

I programmet medverkade från SGU dåvarande generaldirektör Anneli Wirtén, Lovisa Zillén Snowball (avdelningschef) och Charlotte Nilsson Kylesten (moderator för arrangemanget och kommunikationschef). Övriga medverkande var Mikael Kullman (projektledare på Heidelberg Materials Sweden), Anders Egelrud (vd för Stockholm Exergi), Johanna Mossberg (avdelningschef på Energimyndigheten), Mats Svensson (avdelningschef på Havs- och vattenmyndigheten) och Anna-Karin Nyström (enhetschef på Naturvårdsverket).

Studiebesök vid borrhalsen i Smygehuk

Borringarna i Smygehuk har väckt stort intresse, inte minst från media (se även nedan). Under 2024 har SGU tagit emot fyra studiebesök, där vi har kunnat visa och berätta om projektet och dess syfte.

- 20 september fick borrhalsen besök av studenter från en masterskurs i geologi vid Lunds universitet (15 personer). Kursen innehåller bland annat moment om koldioxidlagring och geoenergi.
- 26 september fick borrhalsen besök av 10 personer från Vetenskapsrådet. Besök på borrhalsen.

- Samma dag på eftermiddagen kom även HP-borrningar på besök med 5–10 personer.
- Lena Yotis har också flaggat för att någon gång mellan den 14–18 oktober kommer en grupp från KLIMPO. Det är en organisation med cirka 50 företag som arbetar med bioCCS.

Digitala kanaler

Nedan följer en sammanställning över SGU:s kommunikation kring regeringsuppdraget i olika digitala kanaler.

SGU:s webbplats

Under 2024 har SGU:s information på www.sgu.se kontinuerligt uppdaterats – både på de mer projektrelaterade sidorna och frågor och svar (FAQ) om koldioxidlagring.

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

Utöver det har ett antal nyheter publicerats där det pågående arbetet har presenterats: SGU lyssnar på berggrunden i Skåne (8 oktober)

<https://www.sgu.se/om-sgu/nyheter/2024/oktober/sgu-lyssnar-pa-berggrunden-i-skane/>

SGU borrar i Skåne för att hitta lämpliga platser för framtida koldioxidlagring (29 augusti)

<https://www.sgu.se/om-sgu/nyheter/2024/augusti/sgu-borrar-i-skane-infor-framtida-koldioxidlagring/>

SGU får utökad uppdrag kring koldioxidlagring (19 juni). Detta inslag handlar om att SGU blir behörig svensk myndighet för utpekande av strategiska projekt som rör hela kedjan för CCS. Myndighetens arbete med kartläggning av lämpliga havsområden för geologisk lagring av koldioxid lyfts även här.

<https://www.sgu.se/om-sgu/nyheter/2024/juni/sgu-far-utokat-uppdrag-kring-koldioxidlagring/>

Sociala medier

Tio inslag har gjorts på LinkedIn, som är SGU:s prioriterade kanal på sociala medier:

- 18 oktober, inslag där SGU:s projektledare intervjuas om djupboringen i Smygehamn.
- 24 september, studiebesök av mastersstudenter i geologi i Smygehamn (där det arbete SGU gör lyfts).
- 4 september, ”SGU går på djupet”.
- 29 augusti, information som länkar till nyhet om CCS-arbetet på SGU:s webbplats.
- 27 augusti, egentligen om strategiska projekt, men SGU:s arbete med kartläggning av lämpliga platser lyfts fram här.
- 27 juli, Vetenskapsradion intervjuar SGU:s projektledare för CCS-projektet (Hundratals miljoner ton koldioxid kan lagras under svensk havsbotten).
- 25 juli, från SGU:s Almedalsseminarium om CCS.
- 19 juni, information som länkar till nyhet om utökad uppdrag kring koldioxidlagring.
- 19 juni, information inför Almedalsseminarium om CCS (som en del i marknadsföringen av SGU:s arrangemang på Almedalsveckan).
- 17 april, ”Koldioxidlagring för klimatets skull”, inslag om SGU:s medverkan på Kartdagarna 2024.
- Motsvarande inslag har även gjorts – med vissa variationer – på SGU:s konton på Facebook och X.

Press

- 3 egna pressmeddelanden via TT (4 inklusive mer generell information om SGU:s arrangemang i Almedalen). Pressmeddelandena har samma innehåll som nyheterna på SGU:s webbplats (se ovan).
- 35 inslag i olika media som handlar om SGU:s arbete med CCS (hämtat från SGU:s mediabevakning)

Fysiskt informationsmaterial

Information om borrningarna i Smygehuk har även förmedlats via utskrivna faktablad som bland annat har delats ut till besökare på borrhalsen och närboende samt på en poster som sattes upp på borrhalsen.

Referenser

- Ahjos, T. & Uski, M., 1992: Earthquakes in northern Europe in 1375–1989. *Tectonophysics*, 207(1–2), 1–23. 10.1016/0040-1951(92)90469-M
- Chadwick, R. A., Arts, R., Bernstone, C., May, F., Thibeau, S. & Zweigel, P., 2008: Best practice for the storage of CO₂ in saline aquifers. *Keyworth, Nottingham: British Geological Survey Occasional Publication No. 14*.
- Chen, X., Nakata, N. & Pennington, C., 2017: The Pawnee earthquake as a result of the interplay among injection, faults and foreshocks. *Scientific Reports* 7,4945.
<https://doi.org/10.1038/s41598-017-04992-z>
- Dahlqvist, P., Triumpf, C.-A., Persson, L., Bastani, M., Erlström, M., Jørgensen, F., Thulin Olander, H., Gustafsson, M., Thorsbrink, M., Schoning, K. & Curtis, P., 2015: SkyTEM-undersökningar på Gotland. *Rapporter och meddelanden 136*. Sveriges geologiska undersökning, 108 s.
- Dahlqvist, P., Triumpf, C.-A., Persson, L., Bastani, M., Erlström, M. & Schoning, K., 2017: SkyTEM-undersökningar på Gotland, del 2. *Rapporter och meddelanden 140*. Sveriges geologiska undersökning, 135 s.
- Dahlqvist, P., Bastani, M., Persson, L., Triumpf, C.-A., Erlström, M., Gustafsson, M., Jørgensen, F., Gulbrandsen, M. & Malmberg Persson, K., 2018: SkyTEM-undersökningar på Öland. *Rapporter och meddelanden 145*. Sveriges geologiska undersökning, 100 s.
- Danciu, L., Nandan, S.R. & Celso G., 2021: The 2020 update of the European Seismic Hazard Model: Model Overview. *EFEHR Technical Report. 001, v1.0.0*. doi: 10.12686/a15
- Erlström, M. & Sopher, D., 2018: Geophysical log-motifs. Lithology, stratigraphical aspects and correlation of the Ordovician succession in the Swedish part of the Baltic Basin. *International Journal of Earth Sciences. Volume 108*, 1387–1407. <https://doi.org/10.1007/s00531-019-01712-y>
- Erlström, M., Rosberg, J-E., Dahlqvist, P., Hjerne, C-E. & Lorenz, H., 2024: Scientific core drilling of the Lower Palaeozoic succession in the Swedish sector of the Baltic Sea – investigation of the CO₂ storage potential. Abstract EGU24-5974.
- Erlström, M., Boldreel, L. O., Lindström, S., Kristensen, L., Mathiesen, A., Andersen, M. S., Kamla, E. & Nielsen, L. H. 2018: Stratigraphy and geothermal assessment of Mesozoic sandstone reservoirs in the Øresund basin – Exemplified by well data and seismic profiles. *Bulletin of the Geological Society of Denmark*, 66, 123–150.

- Hovland, M., Gardner, J. V. & Judd, A. G., 2002: The significance of pockmarks to understanding fluid flow processes and geohazards. *Geofluids* 2, 127–136. <https://doi.org/10.1046/j.1468-8123.2002.00028.x>
- Joshi, N., Lund, B. & Roberts, R. 2024: Probabilistic Seismic Hazard Assessment of Sweden. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 24, 4199–4223, <https://doi.org/10.5194/nhess-24-4199-2024>
- Juhlin, C., Brodic, B., Erlström, M., Hedin, P., Sopher, D., Wang, Z. & Wilczynski, Z., 2024: 3D reflection seismic surveying and borehole DAS measurements to image the sedimentary structure in the Sudret area of Gotland, Sweden. Abstract EGU24-38-01.
- Kim, K-H., Ree, J-H., Kim, Y., Kim, S., Kang, S.Y. & Seo, W., 2018: Assessing whether the 2017 Mw 5.4 Pohang earthquake in South Korea was an induced event. *Science*, 360, 1007–1009. doi: 10.1126/science.aat608
- Kivi, I.R., Pujades, E., Rutqvist, J. & Vilarrasa, V., 2022: Cooling-induced reactivation of distant faults during long-term geothermal energy production in hot sedimentary aquifers. *Scientific Reports* 12, 2065.
- Lund, B., Schmidt, P., Shomali, Z.H. & Roth, M., 2021: The modern Swedish National Seismic Network: two decades of intraplate microseismic observation. *Seismological Research Letters*, 92(3), 1747–1758, 10.1785/0220200435
- Molenaar, N., Cyziene, J. & Sliupa, S., 2007: Quartz cementation mechanisms and porosity variation in Baltic Cambrian sandstones. *Sedimentary Geology* 195, 135–159.
- 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*.
- Sivhed, U., Wikman, H. & Erlström, M., 1999: Beskrivning till berggrundskartorna 1C Trelleborg NV och NO samt 2C Malmö SV, SO, NV och NO. *Serie Af. Nr 191, 192, 193, 194, 196, 198*. Sveriges geologiska undersökning.
- SGU, 2023a: Rapportering av regeringsuppdrag. Geologisk lagring av koldioxid, delrapport 1. RR 2023:04. Sveriges geologiska undersökning, 26 s.
- SGU, 2023b: Berggrund 1:1 miljon – databas. 2023-09-01.
- Urban, P., Köser, K. & Greinert, J., 2016: Processing of multibeam water column image data for automated bubble/seep detection and repeated mapping. *Limnology and Oceanography: Methods* 15, 1–21. doi: 10.1002/lom3.10138
- Uski, M., Lund, B. & Oinonen, K., 2015: Compilation of a homogenized earthquake catalogue. I Saari J. (red), Lund, B., Malm, M.M., Mänyniemi, P. B., Oinonen, K.J., Tiira, T., Uski, M.R. & Vuorinen, T.A.T., 2025: Evaluating seismic hazard for the Hanhikivi nuclear power plant site, seismological characteristics of the seismic source areas, attenuation of seismic signal, and probabilistic analysis of seismic hazard. *Report NE-4459*, 15–29. ÅF-Consult Ltd.
- White, J.A. & Foxall, W., 2016: Assessing induced seismicity risk at CO2 storage projects: Recent progress and remaining challenges. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 49, 413–424. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2016.03.021>
- Zhang, Q. & Tutolo, B.M., 2022: Evaluation of the potential of glauconite in the Western Canadian Sedimentary Basin for large-scale carbon dioxide mineralization. *International Journal of Greenhouse Gas Control* 117. doi.org/10.1016/j.ijggc.2022.103663