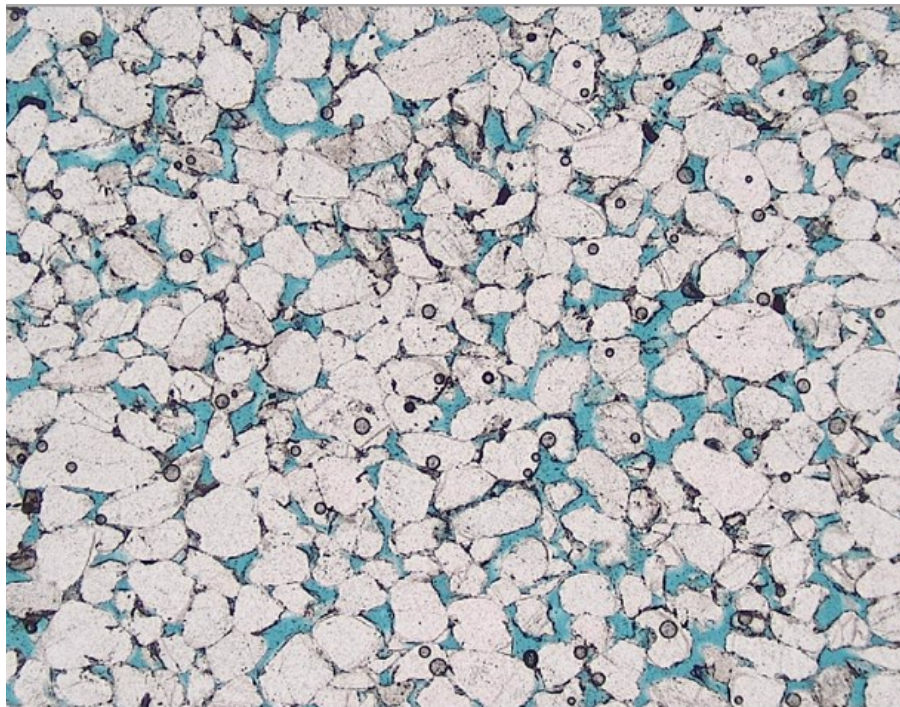


Geologisk karaktärisering av den kambriska Faluddensandstenen i Östersjön och dess lämplighet för koldioxidlagring

Kaisa Bengtsson

Examensarbeten i geologi vid Lunds universitet,
kandidatarbete, nr 664
(15 hp/ECTS credits)



Geologiska institutionen
Lunds universitet
2023

Geologisk karaktärisering av den kambriska Faluddensandstenen i Östersjön och dess lämplighet för koldioxidlagring

Kandidatarbete
Kaisa Bengtsson

Geologiska institutionen
Lunds universitet
2023

Innehåll

1 Introduktion	7
1.1 Viktiga egenskaper för djupt liggande akviferer	7
1.2 Takbergart	8
1.3 Koldioxidens bindningssätt i berggrunden	8
1.4 Tidigare undersökningar	8
1.5 Faluddensandstenen	8
1.6 St. Sutarve-2018	9
1.7 Syfte	10
2 Material	10
3 Metod.....	10
3.1 Logg	10
3.2 Modalanalys	10
4 Resultat.....	11
4.1 Logg	11
4.2 Modalanalyser	12
4.2.1 Detritala komponenter och textur	12
4.2.2 Utfällningar och cement	12
4.2.3 Accessoriska mineral	12
5 Diskussion	15
5.1 Faluddensandstenens petrografi, textur och porositet	15
5.2 Faluddensandstenen som lagringsakvifer för koldioxid	15
5.2.1 Kemiska reaktioner	15
5.3 Felkällor	16
6 Slutsats.....	16
7 Tack	16
8 Referenser.....	16
Bilaga I – Resultat från modalanalyser.....	18

Sammanfattning

KAISA BENGTSSON

Bengtsson, K., 2023: Geologisk karaktärisering av den kambriska Faluddensandstenen i Östersjön och dess lämplighet för koldioxidlagring. *Examensarbeten i geologi vid Lunds universitet*, Nr. 664, 20. sid. 15 hp.

Sammanfattning: Sveriges geologiska undersökning (SGU) har ägnat flera år åt att undersöka den svenska berggrunden för att utreda möjligheterna för geologisk lagring av koldioxid. Djupt liggande akviferer anses ha störst potential och den kambriska Faluddensandstenen, som finns i Östersjön öster om Gotland, visar stor potential som lagringsakvifer. I denna studie har borrhälsarna St. Sutarve-2018 från södra Gotland studerats för att undersöka sandstens mineralogi och textur, i syfte att noggrannare utreda dess lämplighet som lagringsakvifer för koldioxid. Tre tunnslip från olika djup (547,3 m, 552,4 m och 559,35 m) från St. Sutarve-2018 studerades under polarisationsmikroskop. Två kompletterande tunnslip från borrhälsarna B7 (826 m) och B9 (1030 m) som är borrade i Östersjön användes också i studien för att studera om det förekommer skillnader i sandstenen beroende på begravningsdjup. Genom punkträkning (modalanalys) undersöktes sandstens mineralogiska sammansättning. Dessutom gjordes en okulär beskrivning av Faluddensandstenen i St. Sutarve-2018, vilken resulterade i en logg. Resultaten visar att sandstenen främst består av vit till ljusgrå, finkornig och väl sorterad kvartssand. Tunna horisontella lager av lera, samt utfällningar av pyrit är vanligt förekommande. Även vertikala sprickor observeras. Utöver kvarts består de accessoriska mineralen främst av pyrit och vittrade fältspater. Tryckupplösning och kompaktion blir mer påtagligt vid successivt större djup, samtidigt som porositeten minskar. Kiselcement dominerar bland sekundära mineraliseringar, ofta som kvartsöverväxter, men karbonatcement förekommer också. Resultatet av modalanalyserna i denna studie är jämförbara med tidigare utförda analyser och ger i stort sett samma resultat. Porositeten i sandstenen varierar något mellan olika studier, men övergripande överensstämmer den väl med kraven för koldioxidlagring. Även permeabiliteten, formationens tjocklek och utbredning tyder på att sandstenen är lämplig för koldioxidlagring. Vidare undersökningar bör fokusera på att kartlägga heterogeniteter i berggrunden, såsom sprickor, impermeabla lager och variationer i porositet och permeabilitet då dessa kan ha stor inverkan i koldioxidens spridningsvägar.

Nyckelord: Koldioxidlagring, djupt liggande akvifer, Faludden, St. Sutarve-2018

Handledare: Mikael Calner (LU), Mikael Erlström (SGU), Peter Dahlgvist (SGU)

Ämnesinriktning: Berggrundsgeologi

Kaisa Bengtsson, Geologiska institutionen, Lunds universitet, Sölvegatan 12, 223 62 Lund, Sverige. E-post: kaisa_bengtsson@hotmail.com

Abstract

KAISA BENGTTSSON

Bengtsson, K., 2023: Geologisk karaktärisering av den kambriska Faluddensandstenen i Östersjön och dess lämplighet för koldioxidlagring. Examensarbeten i geologi vid Lunds universitet, Nr. 664, 20. sid. 15 hp.

Abstract: The Geological Survey of Sweden (SGU) has spent several years investigating the Swedish bedrock to find suitable bedrock for geological storage of carbon dioxide. Deep saline aquifers are considered to have the greatest potential, and the Cambrian Faludden Sandstone subcropping in the Baltic Sea east of Gotland, shows great potential as a storage aquifer.

In this study, the drill core St. Sutarve-2018 from southern Gotland has been studied to investigate the mineralogy and texture of the Faludden Sandstone, with the aim of more accurately investigating its suitability for carbon dioxide storage. Three thin sections from different depths (547.3 m, 552.4 m and 559.35 m) from St. Sutarve-2018 were studied under a polarizing microscope. Two additionally thin sections from drill cores B7 (862 m) and B9 (1030 m), which are drilled in the Baltic Sea, were also used in the study to determine whether there are differences in the sandstone depending on burial depth. By point counting (modal analysis), the mineralogical composition of the sandstone was investigated. Additionally, an ocular description of the Faludden Sandstone in St. Sutarve-2018 was made, resulting in a log. The results show that the sandstone mainly consists of white to light grey, fine-grained and well-sorted quartz sand. Thin horizontal layers of clay, as well as precipitates of pyrite are common. Vertical fissures are also observed. In addition to quartz, the accessory minerals consist mainly of pyrite and weathered feldspar. Pressure dissolution and compaction become more noticeable at greater depths, while porosity decreases. Siliceous cement is most common, often as quartz overgrowths, but carbonate cement is also observed. The modal analyses in this study are comparable to previously performed analyses and give largely the same results. The porosity of the sandstone varies slightly between different studies, but overall, it corresponds well with the requirements for carbon dioxide storage. The permeability, thickness and extent of the sandstone also indicate that it is suitable for carbon dioxide storage. Further investigations should focus on mapping heterogeneities in the bedrock, such as fractures, impermeable layers and variations in porosity and permeability, as these can have a major impact on carbon dioxide diffusion paths.

Keywords: CO₂-storage, deep saline aquifers, Faludden, St. Sutarve-2018

Supervisor(s): Mikael Calner (LU), Mikael Erlström (SGU), Peter Dahlqvist (SGU)

Subject: Quaternary Geology

Kaisa Bengtsson, Department of Geology, Lund University, Sölvegatan 12, SE-223 62 Lund, Sweden. E-mail: kaisa_bengtsson@hotmail.com

1 Introduktion

Mänskliga aktiviteter och utsläpp av växthusgaser har varit och är idag en betydande bidragande faktor till global uppvärmning (IPCC, 2015). Internationella panelen för klimatförändringar (IPCC) menar att den globala uppvärmningen med hög sannolikhet kommer nå 1,5°C, jämfört med förindustriell tid, innan 2050 om inga åtgärder vidtas (IPCC, 2015). En av växthusgaserna som bidrar till global uppvärmning är koldioxid, vars källa främst är utsläpp från fossila drivmedel och industrier. I IPCC:s rapporter nämns *carbon capture and storage* (CCS) som en av flera åtgärder för att minska utsläppen av koldioxid i atmosfären och stabilisera växthusgaserna och atmosfärens temperatur på sikt (IPCC, 2015). CCS är ett begrepp för avskiljning, transport och lagring av koldioxid. Genom att fånga in och avskilja koldioxid direkt från utsläppskällorna, exempelvis kraftverk eller andra industriella verksamheter, kan man injicera det i berggrunden för långvarig lagring. Detta kallas även 'geologisk lagring av koldioxid' (Erlström et al., 2022).

Tekniken kring CCS har fått en allt större marknad de senaste åren och flertalet europeiska och internationella samarbeten har vuxit fram. Däribland det nordiska samarbetet NORDICCS (aktivt 2011–2015), där den statliga myndigheten Sveriges geologiska undersökning (SGU) medverkade. Sveriges regering anser att koldioxidlagring är en viktig åtgärd för miljön och har beslutat om ett statligt bidrag på totalt 36 miljarder kronor från 2026 till 2046 för de aktörer som kan utföra CCS till bäst pris (Klimat- och näringslivsdepartementet, 2022a). Regeringen har även gett SGU ansvar att utreda och rapportera kring möjligheter för geologisk lagring av koldioxid i Sverige (Klimat- och näringslivsdepartementet, 2022b). SGU som myndighet har dessutom ansvar för tillsyn och tillstånd som gäller koldioxidlagring (Erlström et al., 2017).

Två av de vanligaste tillvägagångssätten för geologisk lagring av koldioxid är lagring i tömda gas- och oljereserver samt lagring i djupt liggande akviferer. Eftersom Sverige inte har utvunnit gas eller olja i någon större omfattning, och därav inte har tömda gas- och oljereserver, är lagring i djupt liggande akviferer mest relevanta för Sverige baserat på de förutsättningar som finns. Projektet NORDICCS bedömde i sin rapport från 2016 att det finns en betydande potential för koldioxidlagring i djupa akviferer inom Norden. Enligt deras beräkningar skulle det vara möjligt att lagra maximalt 1200 miljarder ton koldioxid i dessa akviferer (Erlström et al., 2017).

1.1 Viktiga egenskaper för djupt liggande akviferer

För att en akvifer ska vara lämplig för CCS krävs, enligt Erlström et al. (2017) att berggrundsformationen är tillräckligt utbredd men samtidigt avgränsad för att undvika läckage. Man skiljer här på sprickakviferer och porakviferer där porakviferer har störst potential på grund av dess generellt högre och väl sammankopplade porositet. Den djupa akviferen måste dessutom ligga tillräckligt djupt för att säkra att koldioxid kan lagras i superkritiskt tillstånd (Erlström et al., 2017). När koldioxiden befinner sig i superkritiskt tillstånd har den en viskositet som liknar en gas, men en densi-

tet som en vätska och det går därför att lagra en större volym. Koldioxiden är i superkritiskt tillstånd när temperaturen är högre än 31,1°C och när trycket överstiger 73,9 bar. Dessa förutsättningar råder normalt vid 800 meters djup i berggrunden (Mortensen et al., 2017).

Dessutom behöver berggrundsformationen kunna hålla stora mängder formationsvatten vilket är fossilt vatten som infångats i berggrunden vid sedimentationsprocessen och därför är mycket gammalt. Vattnet har ofta höga salthalter och kan även innehålla svavel och tungmetaller som järn och mangan. Optimalt är en salinitet i formationsvattnet på minst 30 g/l (Chadwick et al., 2008). Akvifererna kan dessutom vara öppna eller slutna vilket innebär att de antingen har hydraulisk kontakt med kringliggande akviferer och atmosfär eller inte (Erlström et al., 2017).

En annan viktig faktor att ta i beaktning när man bedömer en akvifers lämplighet för CCS är hur berggrunden är uppbyggd mineralogiskt eftersom injicering av koldioxid kan orsaka kemiska reaktioner med mineral och ämnen som finns i berggrunden. Sandstenar, som generellt är lämpliga för CCS, består främst av kvarts men kan även innehålla fältspat och mindre andel andra mineral, som glimmer och tungmineral (Erlström et al., 2017). Den optimala sandstenen för koldioxidlagring består av stora, rundade kvartskorn vilka har låg kemisk reaktivitet jämfört med mindre och kantiga korn, eller andra mineral, som har högre kemisk reaktivitet. Även sekundära mineraliseringar som binder ihop bergarten, cement, är viktigt att analysera för att veta hur bergarten kommer reagera i kontakt med koldioxid. Sandstenar har oftast ett cement som består av karbonater, kiselsyra eller järnutfällningar (Erlström et al., 2017).

Ytterligare en viktig egenskap är sandstensens porositet då den påverkar lagrings- och flödeseffektivitet när det gäller vatten, olja eller gas, och därmed även koldioxid. Porositeten refererar till mängden mikroskopiska porer eller håligheter i berggrunden och uttrycks vanligtvis i procent. En hög porositet är fördelaktig när det gäller att lagra koldioxid, enligt vissa studier bör porositeten i tänkt lagringsbergart vara över 10 % av bergartens volym för att ha tillräckligt stor lagringskapacitet (Chadwick et al., 2008). Total porositet beskriver den totala mängden porer eller håligheter i en bergart, medan effektiv porositet beskriver mängden porer som faktiskt tillåter att vätskor eller gaser strömmar genom bergarten, det vill säga den kommunicerade porvolymen. Den effektiva porositeten är oftast lägre jämfört med den totala porositeten, eftersom vissa porer och sprickor inte står i kontakt med varandra och därför inte tillåter flöde genom bergarten (Erlström et al., 2017).

Permeabilitet är ett mått på hur lätt ett material tillåter vatten och andra vätskor att strömma genom det. Permeabiliteten beror på både porositeten och bergartens textur. Hög permeabilitet innebär att vatten och gas kan strömma genom berggrunden snabbt och effektivt. För att vara en lämplig akviferbergart måste permeabiliteten vara hög för att tillåta att koldioxid injekteras, sprids och lagras effektivt (Erlström et al., 2017). Permeabiliteten i akviferbergarten bör minst vara 200 mD (Chadwick et al., 2008), vilket vanligtvis motsvarar en medelkornig sandsten med en porositet på omkring 15 %. Alla dessa viktiga egenskaper som

nämmts för lagringsakviferen redovisas i tabell 1.

Tabell 1. Sammanställning av geologiska nyckelindikatorer för djupt liggande akviferer där ”optimal” indikerar bästa förutsättningarna och ”bra” indikerar goda förutsättningar men kräver noggrannare undersökningar. Värden hämtade från Chadwick et al. (2008).

	Optimal	Bra
Djup	> 1000 m < 2500 m	< 800 m > 2500 m
Mäktighet	> 50 m	< 20 m
Porositet	> 20 %	< 10 %
Permeabilitet	> 500 millidarcy (mD)	< 200 millidarcy (mD)
Salinitet	> 100 gram/liter (gl ⁻¹)	< 30 gram/liter (gl ⁻¹)
Mäktighet takbergart	> 100 m	< 20 m

1.2 Takbergart

Förutom en lämplig akviferbergart krävs en tät takbergart (*eng. cap rock*). En takbergart är en impermeabel bergart, eller en bergart med låg permeabilitet, som ligger ovanför den tänkta lagringsakviferen. Dess primära funktion är att hindra koldioxid från att migrera vertikalt och på så vis förhindra läckage till andra formationer eller atmosfären. Takbergarten bör vara minst 100 meter mäktig och bestå av leriga bergarter med låg permeabilitet. Multipla takbergarter, alltså flera sekvenser med täta bergarter, kan ge ytterligare skydd för att förhindra koldioxidläckage (Erlström et al., 2017).

1.3 Koldioxidens bindningssätt i berggrunden

Erlström et al. (2017) diskuterar de fyra olika sätten som koldioxid binds till lagringsakviferen (*eng. trapping mechanisms*):

1. Strukturell infångning (*eng. structural and stratigraphic trapping*) sker när koldioxid fastnar i strukturella eller stratigrafiska fällor. Den superkritiska koldioxiden har betydligt lägre densitet än formationsvätskan och stiger därför upp och ansamlas i porutrymmen närmast under takberggrunden eller lager i akviferen med låg porositet. Detta är den första lagringsfasen vilket är en snabb och effektiv process.

2. Texturell infångning (*eng. residual trapping*) sker när koldioxid fastnar eller binds mikrostrukturellt i berggrunden. Detta beror på absorption i berggrundens porer och att den fastnar i icke kommunicerande porutrymmen.

3. Lösning i formationsvätskan (*eng. solubility trapping*) sker när koldioxid löser sig i formationsvattnet. Detta leder till att formationsvätskan med den lösta koldioxiden får något högre densitet än formationsvätskan i sig, vilket medför att det koldioxidmätade vattnet sjunker i formationen.

4. Mineralisering (*eng. mineral trapping*) sker när koldioxid reagerar med akviferbergartens mineral och bildar nya mineral, främst karbonatmineral. Mineraliseringsprocessen är förhållandevis långsam och sker över tusentals år.

1.4 Tidigare undersökningar

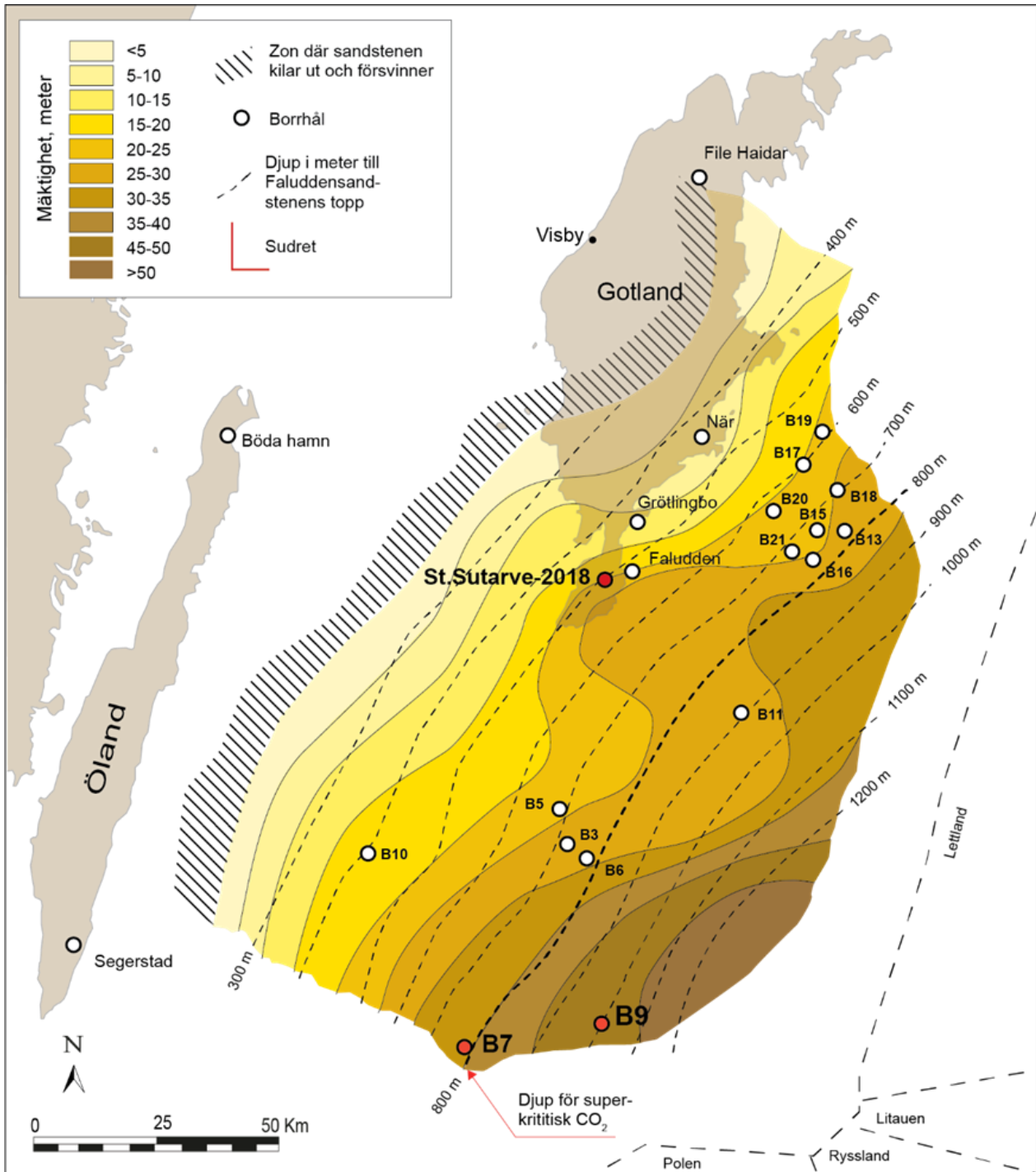
Föregående undersökningar, utförda av bland annat SGU, visar att det i Sverige finns två tänkbara områden för lagring av koldioxid; mesozoiska sandstenslager i sydvästra Skåne med närliggande havsområde, samt kambrika sandstenslager i södra Östersjön. De potentiella akvifererna för lagring i Östersjöområdet utgörs av Viklau-, När- och Faluddensandstenarna. Av dessa tre sandstenar anses Faluddensandstenen ha störst potential (Erlström et al., 2017). NORDICCS presenterar att de svenska delarna av Faluddensandstenen på > 800 meters djup har en teoretisk lagringskapacitet på 745 megaton koldioxid (Mortensen et al., 2017).

1.5 Faluddensandstenen

I södra Östersjön finns ett sammanhängande område med paleozoisk berggrund som strukturellt tillhör den Baltiska Bassängen. Denna utgör en sänka i det urberg som tillhör den Fennoskandiska skölden, även kallat Baltiska skölden. Den paleozoiska lagerföljden i Baltiska Bassängen består av formationer och bergartsled som domineras av antingen sandsten, kalksten, lersten eller mörkelsten. Faluddensandstenen tillhör den kambrika Borgholmformationen som i sin tur delas in i av Grötlingbo-, Mossberga- och Faluddenleden. Faluddensandstenen jämförs här med Faluddenledet i Gotlandsområdet (Figur 1; Erlström et al., 2017).

Faluddensandstenen tillhör den mellankambrika trilobitzonen (*Acadoparadoxides pinus*–*Ptyghagnostus praecurrens*) och domineras av ljusgrå till vit, fin- och medelkornig kvartssand. I den sandstensdominerade lagerföljden förekommer ett antal tunna lager av lerskiffer och kalksten. Faluddensandstenens utbredningsområde sträcker sig från södra Gotland mot syd och sydost (figur 1). Sandstenen har en varierande mäktighet, från någon meter i de nordvästra delarna till drygt 50 meter i den sydöstra delen i Östersjön. Dessutom ligger sandstenen på varierande djup, från 400 meter i de nordvästra delarna till 1200 meters djup i de sydöstra delarna (Erlström et al., 2022).

Berggrunden som direkt överlagrar Faluddensandstenen består i huvudsak av ordovicisk kalksten, speciellt på södra Gotland. Fläckvis påträffas tunna lager av alunskiffer. Söderut blir alunskiffern något mäktigare och bildar ett homogent lager ovanpå Faluddensandstenen. I St. Sutarve-2018 saknas alunskiffern. Ovanpå den ordoviciska 80–100 meter mäktiga kalkstenen följer 100-tal meter med silurisk karbonathaltig lerskiffer och mörkelsten (Erlström & Sopher, 2019). Sammantaget bedöms dess lager ha tillräckligt goda egenskaper som takberggrund.

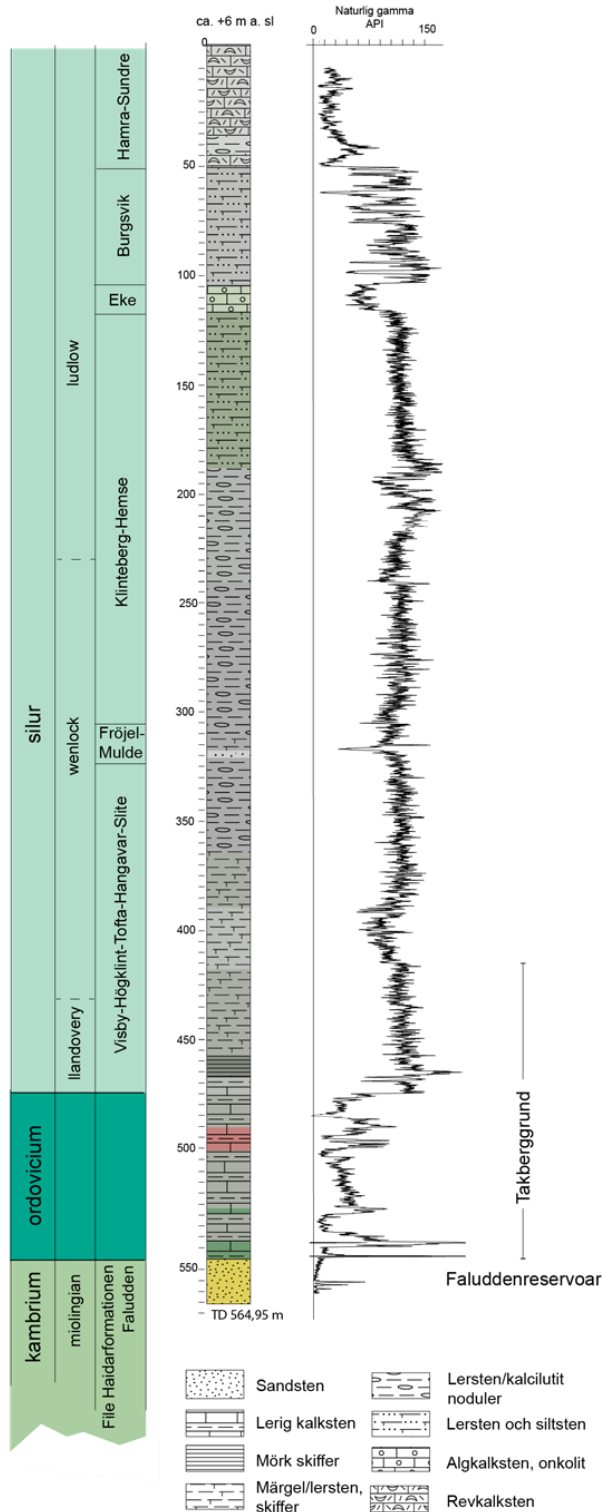


Figur 1. Illustration som visar Faluddensandstenens regionala utbredning, djup och mäktighet. Borrkärnorna St. Sutarve-2018, B7 och B9 är markerade i rött (illustration av Mikael Erlström, 2023).

1.6 St. Sutarve-2018

Som en del av SGU:s arbete för att undersöka svenska möjligheter för koldioxidlagring i berggrunden gjordes 2018 en kärnbörning på Sudret på södra Gotland, vilken fick namnet St. Sutarve-2018. Kärnbörningen utfördes av Geo-gruppen AB Göteborg till 564,95 m djup, vilket motsvarar den understa delen av Faluddensandstenen. Borrkärnan innehåller flera stratigrafiska enheter varav det understa lagret alltså är Faluddensandstenen som har sin topp på 542,8 meters djup och vars tjocklek uppskattas till 24–28 meter (Erlström et

al., 2022). Figur 2 visar lagerföljden i St. Sutarve-2018.



Figur 2. Logg som visar lagerföljden i St. Sutarve-2018. Kurvan till höger visar berggrundens naturliga gammastrålning. Skifferar och leror ger generellt högre värden medan exempelvis sandsten ger lägre värden. Gammastrålningskurvan är ett viktigt stöd för tolkning av olika litologier (illustration av Mikael Erlström, 2023). Observera att färgerna i legenden inte stämmer med loggen.

1.7 Syfte

Denna studie syftar till att göra en beskrivning av den texturella och mineralogiska uppbyggnad av Faluddensandstenen i borrhärnan St. Sutarve-2018, samt dess betydelse för sandstens potential som lagringsakvifer för koldioxid. Detta i syfte att samla mer information angående Faluddensandstens lämplighet som lagringsakvifer för koldioxid.

2 Material

Borrhärnan St. Sutarve-2018 förvaras på SGU:s kontor i Lund. SGU har även framställt ett antal tunnslip från borrhärnan, varav tre från djupen 547,3 meter, 552,4 meter och 559,35 meter studerats i denna rapport. Vid framställning av slipen impregnerades sandstenen med epoxy för att tydligare kunna se och mäta porositeten. Utöver tunnslip från St. Sutarve-2018 har ett tunnslip från 862 meters djup i borrhärnan B7 och ett tunnslip 1030 meters djup i borrhärnan B9 undersökts. Borrhärnorna B7 och B9 utfördes av OPAB i syfte för olje- och gasprospektering i slutet av 1900-talet men genom att jämföra dessa med St. Sutarve-2018 ger de en klarare inblick i Faluddensandstens uppbyggnad då lagerföljden och berggrunden korrelerar i alla borrhärnor. Tunnslip från olika djup valdes ut för att undersöka om, och i så fall hur, sandstenen skiljer sig åt beroende på begravningsdjup. Alla tunnslip finns på SGU:s kontor i Lund. De geografiska positionerna för St. Sutarve-2018, B7 och B9 visas i figur 1.

3 Metod

3.1 Logg

Inledningsvis gjordes en okulär beskrivning av Faluddensandstenen i borrhärnan St. Sutarve-2018. Detta utfördes på SGU:s kontor i Lund. Vid beskrivningen dokumenterades sandstens lagringsegenskaper och lagergränser, kornstorlek, lerskifferintervall, mineraliseringar och sprickor. En logg framställdes genom att borrhålskarteringen digitaliserades med hjälp av programmet Affinity Design (figur 3).

3.2 Modalanalys

Polarisationsmikroskop har använts för att studera bergarternas mineralogi och textur i tunnslipen. Den mineralogiska sammansättningen analyserades statistiskt genom punkträkning, vilket kallas modalanalys. Modalanalysen används för att påvisa bergartens uppbyggnad och innefattade sex olika kategorier; kvarts, fältspat, karbonatcement, kiselcement, porutrymme samt övriga mineral. I tunnslipet från borrhärnan B9 observerades även järnkarbonater, därav innefattande modalanalysen för detta tunnslip sju kategorier i stället. 300 punkter i varje tunnslip räknades. Punkträkningen upprepades fyra gånger för nivåerna 547,3 meter, 552,4 meter och 559,35 meter och tre gånger för nivåerna 862 meter och 1030 meter för att få fram ett medelvärde vilket presenteras under resultaten nedan. Utöver punkträkningen studerades även texturella egenskaper som kornkontakter, packning, rundningsgrad, sortering och cementering.

4 Resultat

4.1 Logg

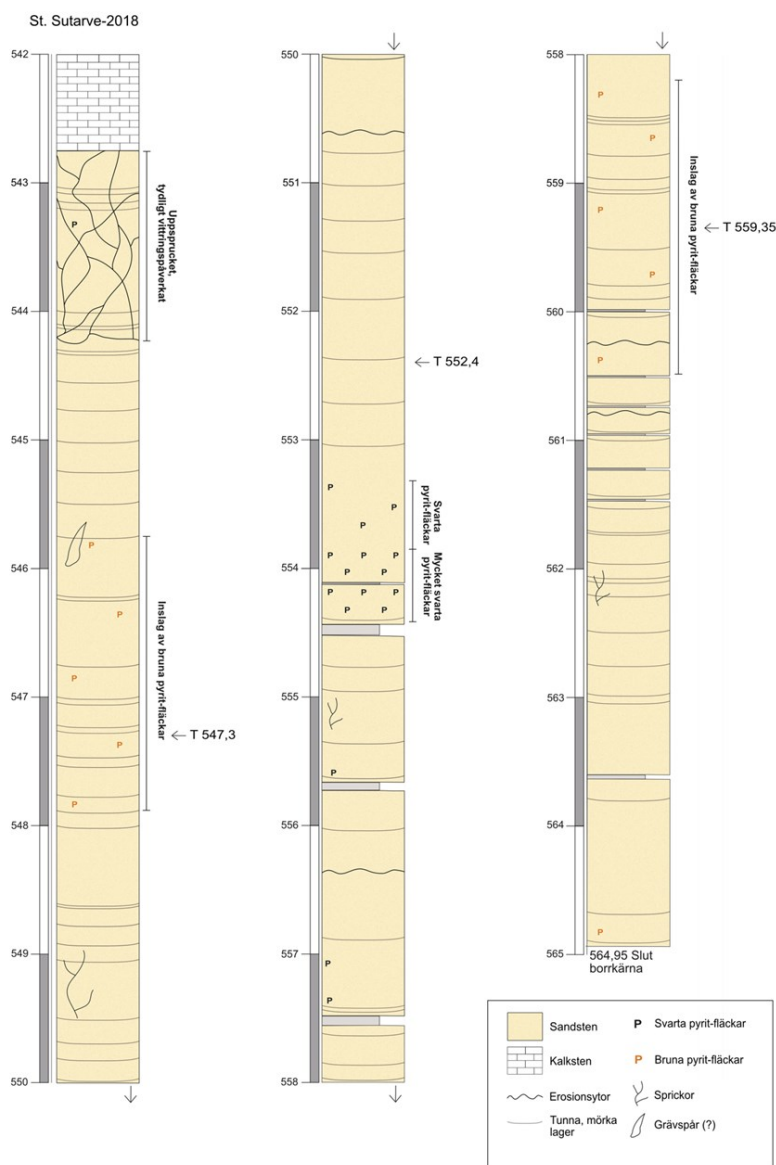
Loggen över Faluddensandstenen i St. Sutarve-2018 redovisas i figur 3. Den översta delen (1,6 m) av sandstenen är kraftigt påverkad av vittring. Denna vittring beror sannolikt på ett längre sedimentationsavbrott då stora delar av yngre kambrium saknas i området vilket presenterats i en studie av Sopher och Erlström (2019). I det vittrade intervallet är sandstenen uppsprucken och har ett heterogent färgat utseende med vertikala och horisontella sprickor samt ljusa mineraliseringar av kalciumkarbonat. Bortsett från toppen, består borkärnan främst av vit till ljusgrå, finkornig och väl sorterad sandsten.

Horisontella lager av lersten, från några millimeter upp mot en decimeter tjocka, förekommer i sandstenen. Utöver dessa framträder även flertalet mycket tunna mörka skikt. Exakt vad de består av är inte säkert, troligtvis är det lermineral som finns på små och lokala erosionsytor.

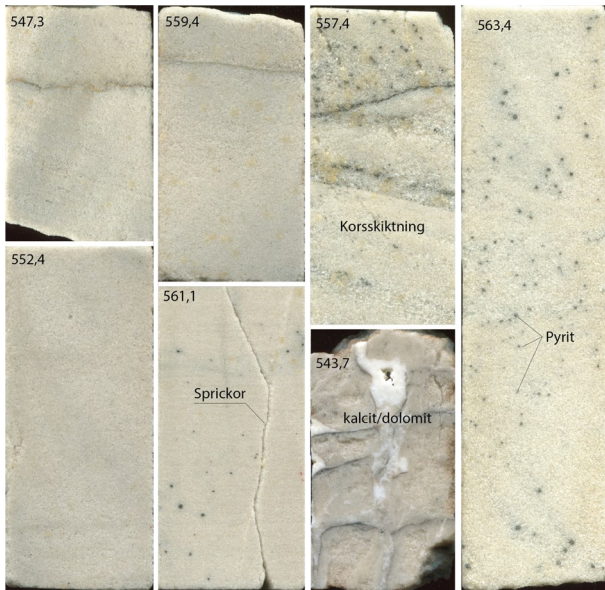
Dessa förekommer ofta parallella, med några centimeters mellanrum.

Utfällningar av pyrit är vanligt förekommande i sandstenen. Dessa syns som svarta prickar, mindre än en millimeter i storlek, och visas i figur 4. Pyriten har en varierande koncentration, för det mesta utspritt men förekommer även som aggregat. Det förekommer även bruna fläckar i vissa partier där den bruna färgen sannolikt beror på oxidering av pyrit, därav benämns dessa som bruna pyrit-fläckar i figur 3.

Förgrenade vertikala sprickor förekommer på enstaka ställen vid olika nivåer. Ofta innehåller dessa utfälld kalcit men även öppna sprickor har påträffats. Kring 545,75 meter syns en stor, avvikande, spricklikande struktur vilken är markerad i loggen (figur 3). Möjligtvis är det ett fossilt grävspår.



Figur 3. Logg över Faluddensandstenen i St. Sutarve-2018. Nivåerna för tunnslipen (T) 547,3 m, 552,4 m och 559,35 m är markerade.



Figur 4. Fotografier från olika djup av borrkärnan St. Sutarve-2018 (Bilder tagna av Mikael Erlström 2023).

4.2 Modalanalyser

4.2.1 Detritala komponenter och textur

Modalanalysen visar att en majoritet av kornen utgörs av kvarts (tabell 2), vilket innebär att sandstenen kan klassificeras som mineralogiskt mogen. Kvartsen består främst av monokristallina korn, endast enstaka polykristallina korn har observerats. Kornstorleken är mellan 0,15 mm till 0,4 mm, vilket motsvarar kornstorleksintervallen fin- och mellansand. Största delen består av korn med storlek mellan 0,15 och 0,2 mm, alltså finsand. Kornen är delvis kantavrundade (*eng. subrounded*) till kantiga (*eng. angular*) och för det mesta väl sorterad. I vissa partier kan kornstorleksfördelningen tolkas vara bimodal, eftersom det finns två dominerande kornstorlekar.

Packningsgraden varierar och kvartskristallernas kornkontakter är omväxlande punktkontakter, långa kontakter, konkav-konvexa kontakter eller suturerade kontakter. Det är stor variation i tunnslipen från olika djup. Vid 547,3 och 552,4 meters djup dominerar

punktkontakter och långa kontakter, medan konkav-konvexa och suturerade kontakter dominerar vid 862 och 1030 meters djup i B7 respektive B9. Figur 5 visar översiktsbilder över kornkontakter och porer i St. Sutarve-2018, medan figur 6 visar bilder på sandstenen vid ett större djup.

Tryckupplösnings-kluster förekommer vid olika djup där det observeras en markant skillnad på partier med öppna porutrymmen och punktkontakt mellan kornen, jämfört med partier där kvartskornen är tätt packade med suturerade kornkontakter vilket ger en tydlig indikation på tryckupplösning. Detta syns tydligt i figurerna 5B samt 7B.

De undersökta proven uppvisar relativt stor variation rörande kornstorlek, kornkontakter samt porutrymme. Detta observeras särskilt vid 552,4 meters djup där det är stora kontraster mellan helt kompakterade tryckupplösnings-kluster jämfört med partier med öppet porutrymme och punktkontakter.

4.2.2 Utfällningar och cement

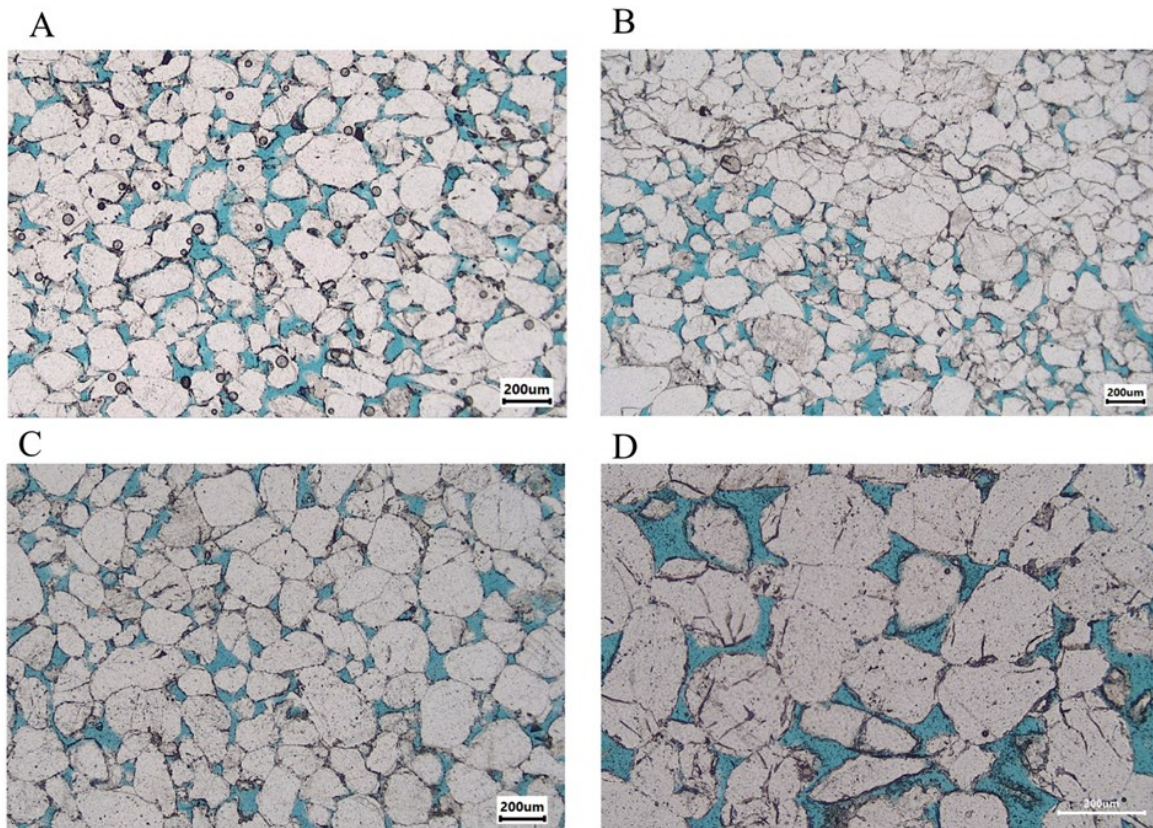
Kiselt cement förekommer frekvent, dels som euhedrala mineraliseringar på monokristallina kvartskorn (kvartsöverväxter) och dels som kiselutfällningar i matrix. I figur 7C går det tydligt att utskilja kvartsöverväxter till följd av de svarta linjerna som visar det ursprungliga kornet (*eng. dust rims*). Även karbonatcement förekommer i varierande mängd. Karbonatcementet förekommer ofta som stora kristaller som omsluter flera detritala korn av kvarts (*eng. poikilotopic*). Karbonatcementet består till största del av kalcit (figur 7D), men troligtvis finns det även dolomit-cement, vilket inte är svårt att urskilja i polarisationsmikroskop.

4.2.3 Accessoriska mineral

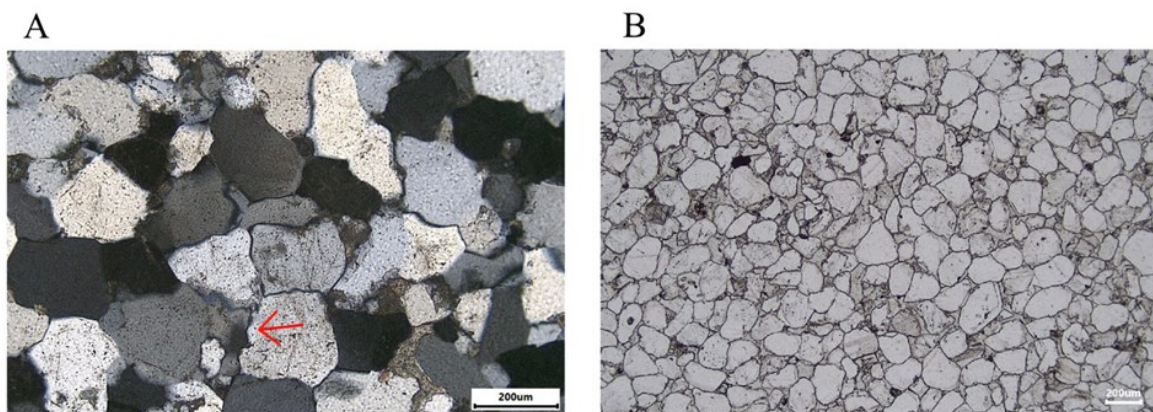
Utöver kvartskorn och cement förekommer få, mycket vittrade detritala fältspater. De övriga mineral som observerats är främst autigen pyrit, vilket förekommer intragranulärt mellan kornen (figur 7A & 8B). Även enstaka detritala zirkoner och glimmermineral anträffas. I tunnslipet från 1030 meters djup från B9 är sekundära utfällningar av järnkarbonater vanligt förekommande, dessa påträffas intragranulärt som cement mellan kvartskornen (figur 8A).

Tabell 2. Resultat från modalanalyser utförda på Faluddensandstenen i borrkärnorna St. Sutarve-2018, B7 och B9. För djupen 547,3 m, 552,4 m, och 559,35 m (St. Sutarve-2018) presenteras ett medelvärde från fyra punkträkningar. För djupen 862 m (B7) och 1030 m (B9), presenteras ett medelvärde från tre punkträkningar. För fullständig data, se bilaga I.

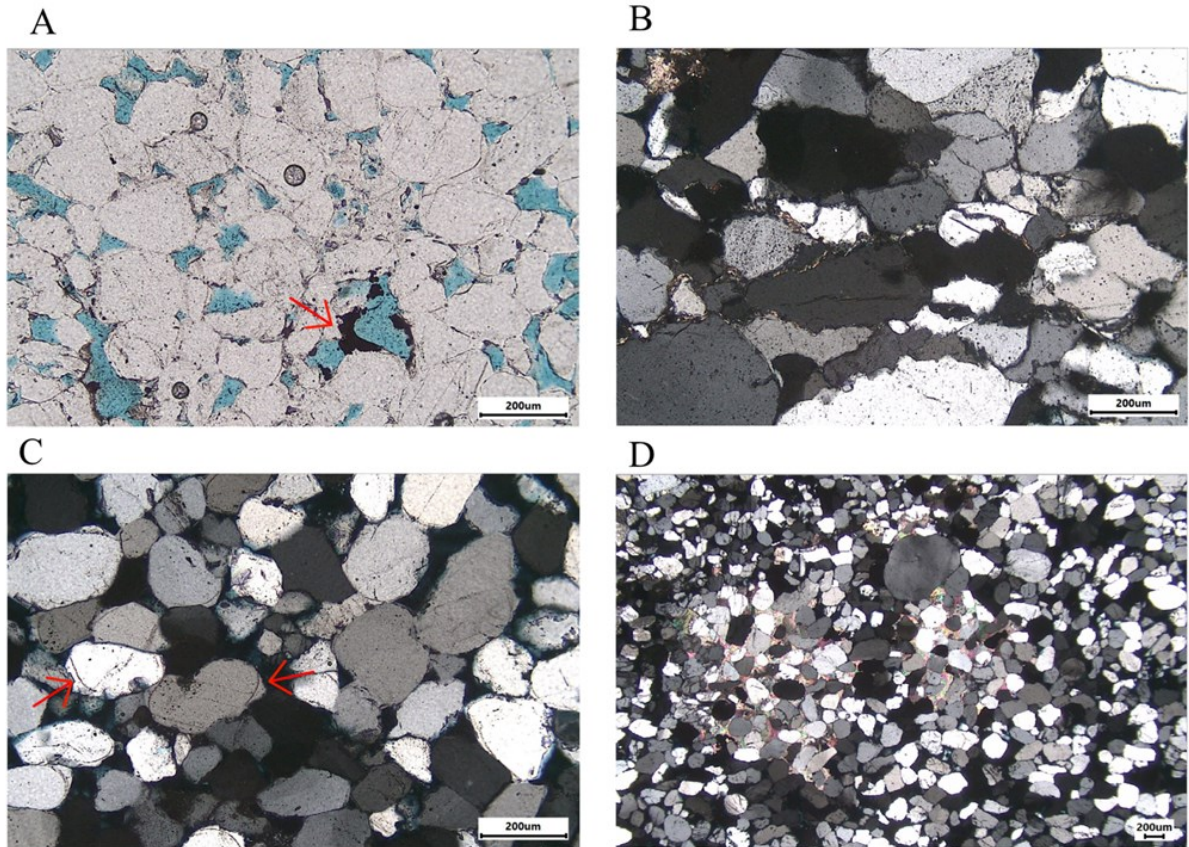
Djup:	Kvarts %	Fältspat %	Kalcit-cement %	Karbonat-cement %	Porutrymme %	Övriga mineral %	Järnkarbonater %
547,3 m	69,3	1	0,15	7,48	21,33	0,63	-
552,4 m	75,4	0,65	1,45	7,4	14,38	0,48	-
559,35 m	71,55	1,63	2,05	3,63	20,28	0,48	-
862 m	78,37	0,2	1	12,7	7,1	0,5	
1030 m	80,53	0,3	0,83	6,73	2,1	0,2	9,07
Medelvärde:	75,03	0,76	1,1	7,59	13,04	0,46	



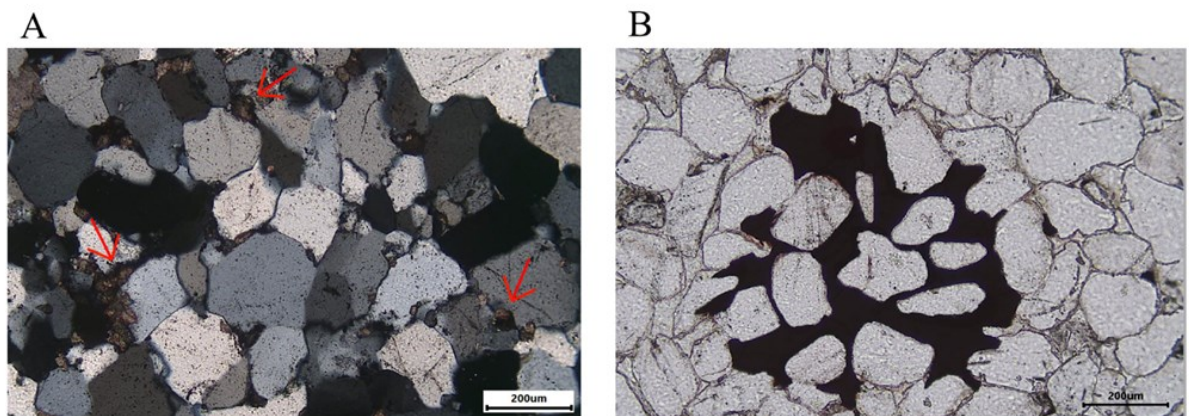
Figur 5. Fotografier av tunnslip från Faluddensandstenen. Översikt över kornkontakter och porer från St. Sutarve-2018. A) 547,3 m, B)-C) 552,4 m, D) 559,35 m.



Figur 6. Fotografier av tunnslip från Faluddensandstenen. A) Sutureerade kornkontakter, exempel markerat med röd pil, 1030 m, B) Översiktsbild, 862 m.



Figur 7. Fotografier av tunnslip från Faluddensandstenen. A) Pyrit (svart) syns vid röda pilen, 547,3 m, B) Tryckupplösning mellan kvartskorn, 552,4 m, C) Kiselscement, exempel markerat med röd pil, 547,3 m, D) Kalcitcement, 559,35 m.



Figur 8. Fotografier av tunnslip från Faluddensandstenen. A) Järnkarbonater syns som bruna fläckar, exempel markerat med röd pil, 1030 m, B) Pyrit (svart), 862 m.

5 Diskussion

För att klassificera en sandsten som kvartsarenit får den maximalt bestå av 5 % övriga mineral än kvarts (Pettijohn et al., 1987). Om man bortser från porositeten vilket man i detta fall gör, visar resultatet från modalanalysen i denna studie att sandstenen innehåller <5 % övrigt, således kan sandstenen klassificeras som kvartsarenit.

Tidigare modalanalyser, punkträkningar, gjorda av Chitindingu (2018) visar att Faluddensandstenen i genomsnitt innehåller 76,3 % detrital kvarts, 1,7 % fältspat, <0,5 % övriga mineral, 5,1 % cement samt har en porositet på 17 %.

Tabell 3. Data hämtad från Chitindingu (2018) som visar resultaten från tidigare modalanalyser på Faluddensandstenen. Tabellen visar ett medelvärde.

Kvarts %	Fältspat %	Cement %	Porositet %	Övriga mineral %
76,3	1,7	5,1	17	< 0,5

Dessa resultat är jämförbara med modalanalyserna utförda i denna rapport, vilka redovisas i tabell 2. Chitindingu's slutsats var att porositeten minskar med större begravningsdjup och att kompaktionen och tecken på tryckupplösning ökar, vilket även denna undersökning visar på. I St. Sutarve-2018, i vilken sandstenarna inte är begravningsdjupa lika djupt som i B7 och B9, innehåller sandstenen mycket öppna porer och punktkontakter mellan kvartskornen. Sandstenen på 1030 meters djup i B9 visar i stället mer omfattande kompaktion, då det finns få porer och större andel suturerade kornkontakter. Här är sandstenen nästan helt kompakterad och cementerad, vilket gör att porositeten är betydligt lägre. Något som även observeras vid 862 meters djup i borrhärnan B7.

SGU har tidigare, utifrån flertalet borrhärnor, undersökt porositeten och permeabiliteten hos Faluddensandstenen och beräknat en medelporositet på 15,6 % och en horisontell medelpermeabilitet på 655 mD (Erlström et al., 2022). Medelporositeten har alltså tidigare beräknats till 15,6 (Erlström et al., 2022) – 17 % (Chitindingu, 2018), och i denna undersökning till cirka 13 %. Porositeten skiljer sig dock åt mellan de olika djupen, där 1030 m endast har en porositet på 2,10 % medan 547,3 m har 21,33 %. Man kan alltså konstatera att det finns en stor variation på porositeten inom sandstenen men att den generellt minskar med ökat begravningsdjup. Shogenov et al. (2015) diskuterar Deimenaformationen, vilket avser samma kambriska sandstensformation som Faluddensandstenen men betecknar dess fortsatta utbredning in i de baltiska länderna. De konstaterar att formationen innehåller mycket heterogeniteter och internt stora variationer i porositet och permeabilitet. Denna studie visar på att det troligtvis även gäller för Faluddensandstenen. Variationerna i porositet gäller inte bara vid olika djup, utan även vid samma djup. I tunnslipet från 552,4 meters djup syns tydliga tryckupplösning-kluster, där porutrymmen i stort sett inte finns, men även områden med mycket öppna porer och punktkontakt mellan kvartskornen.

5.2 Faluddensandstenen som lagringsakvifer för koldioxid

Jämför man värden på porositet och permeabilitet med de som Chadwick et al. (2008) beskriver som optimala för CCS, vilka redovisas i tabell 1, så visar Faluddensandstenen på goda egenskaper för koldioxidlagring. Permeabiliteten bör vara högre än 500 mD och porositeten minst 10 %, även om 20 % porositet anses vara optimalt. Mäktigheten på Faluddensandstenen varierar mellan ungefär 5 och 50 meter, med ökande mäktighet mot syd och sydost. Eftersom mäktigheten bör ligga mellan 20 och 50 meter är detta en ytterligare faktor som gör Faluddensandstenen lämplig som lagringsplats för koldioxid. Formationen ligger så djupt som 1200 meter i de sydöstra delarna av utbredningsområdet och takbergarternas mäktighet är där också tillräckligt god.

Kiselcement i sandstenen har troligtvis bildats i samband med tryckupplösning då kisel lösts ut från kvartskornen och kristalliserats på nytt i angränsande porer. Men ursprunget kan även, eller delvis, vara leror (kaolinit eller illit) som funnits i berggrunden, alternativt migrerat ner från ovanliggande berggrund genom porerna, som sedan fällt ut kisel. Kilda & Friis (2002) studerade Deimenaformationen och egenskaper som påverkar dess kvaliteter som reservoar. Deras slutsats var att dessa kvartsövernäxter var största orsaken till en minskad porositet hos sandstenen. Att ta hänsyn till förekomsten av kvartsövernäxter kan därför vara betydande i vidare studier kring formationens lämplighet för koldioxidlagring.

Sprickor i sandstenen kan påverka koldioxidens spridningsvägar. I St. Sutarve-2018 är toppen av Faluddensandstenen kraftigt vittrad och uppsprucken och enstaka vertikala sprickor, med en varierande storlek, förekommer genom hela formationen. Troligtvis är dessa sprickor vanligt förekommande och kan orsaka att koldioxid migrerar till andra formationer eller till andra områden i formationen där man inte vill ha den. God kunskap krävs därför även om den ovanliggande berggrunden.

Nettoreservoaren (*eng. net reservoir*) är ett begrepp som ofta används inom olje- och gasbranschen och syftar på den faktiska delen av reservoaren som kan lagra vätskor och möjliggöra flöde i reservoaren. Eftersom Faluddensandstenen innehåller tunna lager med lermineral minskar nettoreservoaren. I stället kan man säga att sandstenen innehåller flera olika reservoarer, som avgränsas med lager med låg permeabilitet alternativt helt impermeabla. Det är viktigt att vidareutveckla dessa lerlager då de kan ha stor inverkan på koldioxidlagringen. Att undersöka frekvensen, tjockleken och den laterala utbredningen för dessa lerlager i Faluddensandstenen är viktigt. Även vilken permeabilitet de har är betydelsefullt för kunskapen om de helt avgränsar migration eller om de är genomsläppliga och koldioxid faktiskt kan migrera genom. Dessa lager påverkar alltså den totala lagringskapaciteten som reservoaren har, men även hur koldioxididen eventuellt kan spridas och transporteras i formationen.

5.2.1 Kemiska reaktioner

Faluddensandstenen består främst av kvarts vilket har en låg kemisk reaktivitet med koldioxid (Erlström et

al., 2017). Injicering av koldioxid kan dock leda till kemiska reaktioner med de övriga mineralen, så som pyrit och fältspat samt formationsvattnet. Några av dessa reaktioner presenteras nedan.

När koldioxid löser sig i vattnet kan kolsyra (H_2CO_3) bildas. De Silva & Ranjith (2015) presenterar att kolsyran kan vara aggressiv mot bland annat fältspater och leda till upplösning och/eller omvandling av mineralet. Fältspat kan även genom andra kemiska processer omvandlas till karbonatmineral, som kalcit eller dolomit, vid injicering av koldioxid, vilket kan påverka sandstensens porositet och permeabilitet då de porösa områdena kan fyllas med dessa karbonatmineral, så kallat fyllnadscement. Upplösning av fältspater kan även ha en positiv effekt och leda till ökad porositet och permeabilitet i berggrunden enligt De Silva och Ranjith (2015). Även oxidation av pyrit kan uppstå, vilket kan leda till en surare miljö (Hong Phuc Vu et al., 2018). Detta kan i sin tur resultera i korrosion och att andra metaller från berggrunden frigörs, och på så vis påverkar den kemiska sammansättningen och egenskaper hos sandstenen. Dock är innehållet av fältspat och pyrit väldigt litet och dessa kemiska reaktioner bör således inte ha en avgörande effekt på lagringskapaciteten.

Ytterligare en reaktion som kan ske är bildning av kalcit och dolomit när järnkarbonater reagerar med koldioxid. I denna studie hittades de endast vid större djup men reaktionen kan även ske grundare om det finns järnkarbonater närvarande. Vid pyritoxidation och karbonatisering kan även koldioxid frigöras som en biprodukt (Hutcheon, 1998), vilket kan minska lagringskapaciteten i formationen. Koldioxid kan även frigöras när kolsyra bildas vilket då beror på att karbonaterna löses upp.

Dessutom kan injicering av koldioxid leda till viss upplösning av karbonatmineral, exempelvis av kalcit och dolomit (Czernichowski-Lauriol et al., 2006), vilket i Faluddensandstenen förekommer som cement. Denna reaktion tycks vara vanlig och leder initialt till en ökad porositet. Däremot nämner Czernichowski-Lauriol et al. (2006) att karbonatmineral även kan fällas ut när det reagerar med vissa mineral i berggrunden, och på så vis bilda fyllnadscement som minskar porositeten något. Alltså finns det flera processer och reaktioner som kan leda till upplösning och/eller nybildning av cement i sandstenen.

De kemiska reaktionerna som kan uppstå beror till stor del på formationsvattnets kemi och salthalt, således är vattnets sammansättning av stor vikt vid bedömning av en potential lagringsakvifer. Czernichowski-Lauriol et al. (2006) fann dock efter ett antal experiment att den kemiska reaktiviteten vid injicering av koldioxid varierar beroende på plats och under hur lång tid koldioxiden injiceras, därav krävs plats specifika undersökningar för att avgöra hur berggrunden kommer reagera.

5.3 Felkällor

Modalanalyserna utfördes med 300 punkter i varje tunnslip. Tunnslipen innehåller dock vissa variationer i kornstorlek och textur och därför upprepades modalanalyserna ett antal gånger i varje tunnslip för att få fram ett medelvärde. Resultaten från de individuella punkträkningarna inom samma slip kunde variera med

några procent och således kan fler analyser utföras för att få ett mer precist resultat. Antalet slip som studeras är också begränsat vilket påverkar den statistiska säkerheten.

6 Slutsatser

Många av de önskvärda egenskaperna för koldioxidlagring, såsom en hög porositet och permeabilitet samt betydande mäktighet, uppfylls och därför förefaller Faluddensandstenen vara ett bra alternativ för CCS. Det krävs dock fler plats specifika undersökningar för att kartlägga heterogeniteter i formationen. Förekomst av sprickor, impermeabla lager och variationer av porositet och permeabilitet är viktigt att undersöka då dessa kan ha stor inverkan för koldioxidens spridningsvägar och eventuella kemiska reaktioner.

7 Tack

Jag vill passa på att tacka mina handledare på SGU, Mikael Erlström och Peter Dahlqvist, som hjälpt mig med konsultation under arbetets gång samt låtit mig utföra mina praktiska undersökningar på kontoret i Lund. Ert engagemang och kunskap inom ämnet har varit till stor hjälp! Jag vill även rikta ett stort tack till min interna handledare, Mikael Calner, som gett mig mycket hjälpsam feedback och stöttning under arbetets gång. Kunskapen och hjälpen från er handledare har varit ovärderlig för mig under arbetet med rapporten!

8 Referenser

- Chadwick, A., Arts, R., Bernstone, C., May, F., Thibeau, S. & Zweigel, P. (2008). *Best practice for the storage of CO₂ in saline aquifers – observations and guidelines from the SACS and CO₂STORE projects* (British Geological Survey Occasional Publication, 14). British Geological Survey. <https://www.globalccsinstitute.com/archive/hub/publications/160498/best-practice-storage-co2-saline-aquifers-observations-guidelines-sacs-co2store-projects.pdf>
- Chitindingu, T. (2018). *Petrological characterization of the Cambrian sandstone reservoirs in The Baltic Basin, Sweden*. [Masteruppsats, Lunds universitet]. Lund University Publications. <http://lup.lub.lu.se/student-papers/record/8949957>
- Czernichowski-Lauriol, I., Rochelle, C., Gaus, I., Azaroual, M., Pearce, J., & Durst, P. (2006) Geochemical interactions between CO₂, pore-waters and reservoir rocks: Lessons learned from laboratory experiments, field studies and computer simulations. *Science Series: IV: Earth and Environmental Sciences*, 65, 157-174. https://doi.org/10.1007/1-4020-4471-2_14
- De Silva, G. P. D. & Ranjith, P. G. (2015). Geochemical aspects of CO₂ sequestration in deep saline aquifers: A review. *Fuel*, 155, 128-143. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2015.03.045>
- Erlström, M. & Sopher, D. (2019). Geophysical well log-motifs, lithology, stratigraphical aspects and correlation of the Ordovician succession in the Swedish part of the Baltic Basin. *International Journal of Earth Sciences* 108, 1387-1407. <https://doi.org/10.1007/s00531-019-01712-y>
- Erlström, M., Sopher, D. & Dahlqvist, P. (2022).

- Berggrunden på Sudret, Gotland - Underlag för bedömning av grundvattentillgångar, geoenergi-potential samt koldioxidlagring* (Rapport 2022:11). Sveriges geologiska undersökning. <https://resource.sgu.se/dokument/publikation/sgurapport/sgurapport202211rapport/s2211-rapport.pdf>
- Erlström, M., Mortensen, G.M., Nordström, S. & Nyberg, J. (2017). *Geologisk lagring av koldioxid i Sverige – Lägesbeskrivning avseende förutsättningar, lagstiftning och forskning samt olje- och gasverksamhet i Östersjöregionen* (Rapporter och Meddelanden 142). Sveriges geologiska undersökning. <http://resource.sgu.se/produkter/rm/rm142-rapport.pdf>
- Hong Phuc Vu., Black, J-R., & Haese, R-R. (2018). The geochemical effects of O₂ and SO₂ as CO₂ impurities on fluid-rock reactions in a CO₂ storage reservoir. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 68, 86-98. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2017.11.001>.
- Hutcheon, I. The Potential Role of Pyrite Oxidation in Corrosion and Reservoir Souring. (1998). *Journal of Canadian Petroleum Technology* 37(01). <https://www.researchgate.net/publication/254540494>
- IPCC (2015). *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full.pdf
- Kilda, L. & Friis, H. (2002). The key factors controlling reservoir quality of the Middle Cambrian Deimena Group sandstone in West Lithuania. *Bulletin of the Geological Society of Denmark* 49, 25-39. <https://doi.org/10.37570/bgsd-2003-49-03>
- Klimat- och näringslivsdepartementet (2022a, 4 november). *Stor satsning görs på infångning av biogen koldioxid*. Regeringskansliet. <https://www.regeringen.se/pressmeddelanden/2022/11/stor-satsning-gors-pa-infangning-av-biogen-koldioxid/>
- Klimat- och näringslivsdepartementet (2022b, 16 november). *Budgetsatsning på infångning och lagring av koldioxid*. Regeringskansliet. <https://www.regeringen.se/artiklar/2022/11/budgetsatsning-pa-infangning-och-lagring-av-koldioxid/>
- Mortensen, G.M., Bergmo, P.E.S. & Emmel, B.U. (2017). Characterization and estimation of CO₂ storage capacity for the most prospective aquifers in Sweden. *Energy Procedia* 2016:86, 352–360. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.01.036>
- Pettijohn, F.J., Potter, P.E. & Siever, R. (1987). *Sand and sandstone* (2e uppl.). Springer-Verlag.
- Shogenov, K., Shogenova, A., Vizika-Kavvadias, O., & Nauroy, J-F. (2015). Reservoir quality and petrophysical properties of Cambrian sandstones and their changes during the experimental modeling of CO₂ storage in the Baltic Basin. *Estonian Journal of Earth Sciences*, 64(3), 199–217. <https://doi.org/10.3176/earth.2015.27>

Bilaga I - Resultat från modalanalyser

St. Sutarve-2018, 547,3 m

Kvarts %	Fältspat %	Karbonat-cement %	Kisel-cement %	Porutrymme %	Övriga mineral %
70,3	1	0	9	19	0,6
66,6	1	0,6	7	23	1,6
70	1	0	6,6	22,3	0
70,3	1	0	7,3	21	0,3

St. Sutarve-2018, 552,4 m

Kvarts %	Fältspat %	Karbonat-cement %	Kisel-cement %	Porutrymme %	Övriga mineral %
77	0	0,6	9	13	0
77,3	0,6	1,3	7,3	12,3	1
74	1	1,6	7	15,6	0,6
73,3	1	2,3	6,3	16,6	0,3

St. Sutarve-2018, 559,35 m

Kvarts %	Fältspat %	Karbonat-cement %	Kisel-cement %	Porutrymme %	Övriga mineral %
72	1	1,6	4,3	18,6	1,6
74	2,6	2	2,6	18,6	0
69,6	1,6	3,3	3,6	21,3	0,3
70,6	1,3	1,3	4	22,6	0

B7, 862 m

Kvarts %	Fältspat %	Karbonat-cement %	Kisel-cement %	Porutrymme %	Övriga mineral %
79,6	0,3	1	11,3	7	0,6
77,3	0,3	1	13,3	7,3	0,6
78,2	0	1	13,5	7	0,3

B9, 1030 m

Kvarts %	Fältspat %	Karbonat-cement %	Kisel-cement %	Porutrymme %	Övriga mineral %	Järn-karbonater %
80,6	0	0,6	7,6	3	0,3	7,6
81	0,3	0,6	7	1,3	0	9,6
80	0,6	1,3	5,6	2	0,3	10

**Tidigare skrifter i serien
”Examensarbeten i Geologi vid Lunds
universitet”:**

610. Lindberg Skutsjö, Love, 2021: Geologiska och hydrogeologiska tolkningar av SkyTEM-data från Vombsänkan, Sjöbo kommun, Skåne. (15 hp)
611. Hertzman, Hanna, 2021: Odensjön - A new varved lake sediment record from southern Sweden. (45 hp)
612. Molin, Emmy, 2021: Rare terrestrial vertebrate remains from the Pliensbachian (Lower Jurassic) Hasle Formation on the Island of Bornholm, Denmark. (45 hp)
613. Höjbert, Karl, 2021: Dendrokronologi - en nyckelmetod för att förstå klimat- och miljöförändringar i Jämtland under holoцен. (15 hp)
614. Lundgren Sassner, Lykke, 2021: A Method for Evaluating and Mapping Terrestrial Deposition and Preservation Potential for Palaeostorm Surge Traces. Remote Mapping of the Coast of Scania, Blekinge and Halland, in Southern Sweden, with a Field Study at Dalköpinge Ängar, Trelleborg. (45 hp)
615. Granbom, Johanna, 2021: En detaljerad undersökning av den mellanordoviciska ”furudalkalkstenen” i Dalarna. (15 hp)
616. Greiff, Johannes, 2021: Oolites from the Arabian platform: Archives for the aftermath of the end-Triassic mass extinction. (45 hp)
617. Ekström, Christian, 2021: Rödfärgade utfällningar i dammanläggningar orsakade av *G. ferruginea* och *L. ochracea* - Problemstatistik och mikrobiella levnadsförutsättningar. (15 hp)
618. Östsjö, Martina, 2021: Geologins betydelse i samhället och ett första steg mot en geopark på Gotland. (15 hp)
619. Westberg, Märta, 2021: The preservation of cells in biomineralized vertebrate tissues of Mesozoic age – examples from a Cretaceous mosasaur (Reptilia, Mosasauridae). (45 hp)
620. Gleisner, Lovisa, 2021: En detaljerad undersökning av kalkstenslager i den mellanordoviciska gullhögenformationen på Billingen i Västergötland. (15 hp)
621. Bonnevier Wallstedt, Ida, 2021: Origin and early evolution of isopods - exploring morphology, ecology and systematics. (15 hp)
622. Selezeneva, Natalia, 2021: Indications for solar storms during the Last Glacial Maximum in the NGRIP ice core. (45 hp)
623. Bakker, Aron, 2021: Geological characterisation of geophysical lineaments as part of the expanded site descriptive model around the planned repository site for high-level nuclear waste, Forsmark, Sweden. (45 hp)
624. Sundberg, Oskar, 2021: Jordlagerföljden i Højeådal utifrån nya borrhningar. (15 hp)
625. Sartell, Anna, 2021: The igneous complex of Ekmanfjorden, Svalbard: an integrated field, petrological and geochemical study. (45 hp)
626. Juliusson, Oscar, 2021: Implications of ice-bedrock dynamics at Ullstorp, Scania, southern Sweden. (45 hp)
627. Eng, Simon, 2021: Rödslam i svenska kraftdammar - Problematik och potentiella lösningar. (15 hp)
628. Kervall, Hanna, 2021: Feasibility of Enhanced Geothermal Systems in the Precambrian crystalline basement in SW Scania, Sweden. (45 hp)
629. Smith, Thomas, 2022: Assessing the relationship between hypoxia and life on Earth, and implications for the search for habitable exoplanets. (45 hp)
630. Neumann, Daniel, 2022: En mosasaurie (Reptilia, Mosasauridae) av paleocensk ålder? (15 hp)
631. Svensson, David, 2022: Geofysisk och geologisk tolkning av kritskollors utbredning i Ystadsområdet. (15 hp)
632. Allison, Edward, 2022: Avsättning av Black Carbon i sediment från Odensjön, södra Sverige. (15 hp)
633. Jirdén, Elin, 2022: OSL dating of the Mesolithic site Nilsvikdalen 7, Bjørøy, Norway. (45 hp)
634. Wong, Danny, 2022: GIS-analys av effekten vid stormflod/havsnivåhöjning, Morupstrakten, Halland. (15 hp)
635. Lycke, Björn, 2022: Mikroplast i vattenavsatta sediment. (15 hp)
636. Schönherr, Lara, 2022: Grön fältspat i Varbergskomplexet. (15 hp)
637. Funck, Pontus, 2022: Granens ankomst och etablering i Skandinavien under post-glacial tid. (15 hp)
638. Brotzen, Olga M., 2022: Geologiska besöksmål och geoparker som plattform för popularisering av geovetenskap. (15 hp)
639. Lodi, Giulia, 2022: A study of carbon, nitrogen, and biogenic silica concentrations in *Cyperus papyrus*, the sedge dominating the permanent swamp of the Okavango Delta, Botswana, Africa. (45 hp)
640. Nilsson, Sebastian, 2022: PFAS- En sammanfattning av ny forskning, med ett fokus på föroreningskällor, provtagning, analysmetoder och saneringsmetoder. (15 hp)
641. Jägfeldt, Hans, 2022: Molnens påverkan på jordens strålningsbalans och klimat-

- system. (15 hp)
642. Sundberg, Melissa, 2022: Paleontologiska egenskaper och syreisotopsutveckling i borrhärd Limhamn-2018: Kopplingar till klimatförändringar under yngre krita. (15 hp)
643. Bjeremo, Tim, 2022: A re-investigation of hummocky moraine formed from ice sheet decay using geomorphological and sedimentological evidence in the Vomb area, southern Sweden. (45 hp)
644. Halvarsson, Ellinor, 2022: Structural investigation of ductile deformations across the Frontal Wedge south of Lake Vättern, southern Sweden. (45 hp)
645. Brakebusch, Linus, 2022: Record of the end-Triassic mass extinction in shallow marine carbonates: the Lorüns section (Austria). (45 hp)
646. Wahlquist, Per, 2023: Stratigraphy and palaeoenvironment of the early Jurassic volcanoclastic strata at Djupadalsmälla, central Skåne, Sweden. (45 hp)
647. Gebremedhin, G. Gebreselassie, 2023: U-Pb geochronology of brittle deformation using LA-ICP-MS imaging on calcite veins. (45 hp)
648. Mroczek, Robert, 2023: Petrography of impactites from the Dellen impact structure, Sweden. (45 hp)
649. Gunnarsson, Niklas, 2023: Upper Ordovician stratigraphy of the Stora Sutarve core (Gotland, Sweden) and an assessment of the Hirnantian Isotope Carbon Excursion (HICE) in high-resolution. (45 hp)
650. Cordes, Beatrix, 2023: Vilken ny kunskap ger aDNA-analyser om vegetationsutvecklingen i Nordeuropa under och efter Weichsel-istiden? (15 hp)
651. Bonnevier Wallstedt, Ida, 2023: Palaeocolour, skin anatomy and taphonomy of a soft-tissue ichthyosaur (Reptilia, Ichthyopterygia) from the Toarcian (Lower Jurassic) of Luxembourg. (45 hp)
652. Kryffin, Isidora, 2023: Exceptionally preserved fish eyes from the Eocene Fur Formation of Denmark – implications for palaeobiology, palaeoecology and taphonomy. (45 hp)
653. Andersson, Jacob, 2023: Nedslagskratrars inverkan på Mars yt-datering. En undersökning av Mars främsta yt-dateringsmetod "Crater Counting". (15 hp)
654. Sundberg, Melissa, 2023: A study in ink – the morphology, taphonomy and phylogeny of squid-like cephalopods from the Jurassic Posidonia Shale of Germany and the first record of a loligosepiid gill. (45 hp)
655. Häggblom, Joanna, 2023: En patologisk sjöilja från silur på Gotland, Sverige. (15 hp)
656. Bergström, Tim, 2023: Hur gammal är jordens inre kärna? (15 hp)
657. Bollmark, Viveka, 2023: Ca isotope, oceanic anoxic events and the calcareous nannoplankton. (15 hp)
658. Madsen, Ariella, 2023: Polycykliska aromatiska kolväten i Hanöbukstens kustnära sediment - En sedimentologisk undersökning av vikar i närhet av pappersbruk. (15 hp)
659. Wangritthikraikul, Kannika, 2023: Holocene Environmental History of Warming Land, Northern Greenland: a study based on lake sediments. (45 hp)
660. Kurop, Anna, 2023: Reconstruction of the glacier dynamics and Holocene chronology of retreat of Helagsglaciären in Central Sweden. (45 hp)
661. Frisendahl, Kajsa, 2023: Holocene environmental history of Washington Land, NW Greenland: a study based on lake sediments. (45 hp)
662. Ryan, Cathal, 2023: Luminescence dating of the late Quaternary loess-palaeosol sequence at Velika Vrbica, Serbia. (45 hp)
663. Lindow, Wilma, 2023: U-Pb datering av zirkon i metasediment tillhörande Stora Le-Marstrand, SV Sverige. (15 hp)
664. Bengtsson, Kaisa, 2023: Geologisk karaktärisering av den kambriska Faludden-sandstenen i Östersjön och dess lämplighet för koldioxidlagring. (15 hp)



LUNDS UNIVERSITET

Geologiska institutionen
Lunds universitet
Sölvegatan 12, 223 62 Lund