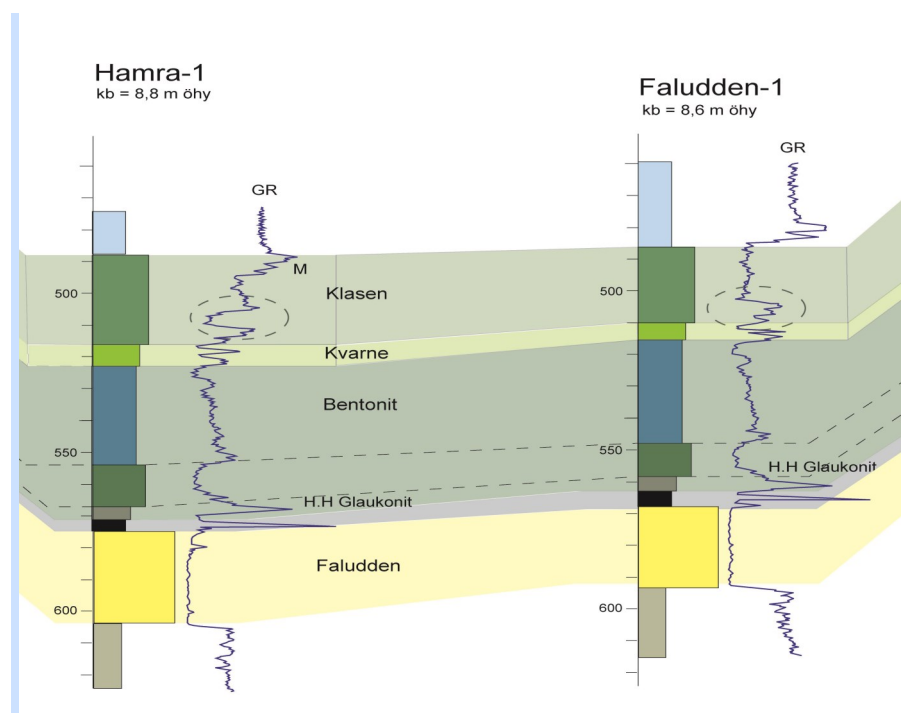


# Geofysisk karaktärisering av ordoviciska kalkstenenheter på södra Gotland

***Alexander Vasilica***

Examensarbeten i geologi vid Lunds universitet,  
kandidatarbete, nr 434  
(15 hp/ECTS credits)





# **Geofysisk karaktärisering av ordoviciska kalkstenenheter på södra Gotland**

Kandidatarbete  
Alexander Vasilica

Geologiska institutionen  
Lunds universitet  
2015

# Innehållsförteckning

<b>1</b>	<b>Introduktion .....</b>	<b>7</b>
1.1	Områdets potential för förekomst av kolväten	7
1.2	Olja & gas på Gotland samt den svenska delen av södra Östersjön	9
1.3	Områdets potential för koldioxidlagring	10
<b>2</b>	<b>Berggrundens uppbyggnad i södra Östersjön .....</b>	<b>10</b>
2.1	Regionala förhållanden	10
2.2	Lokala Förhållanden	11
2.2.1	Urberget	11
2.2.2	Den sedimentära berggrunden	12
2.2.3	Post-Silurisk berggrund	14
2.2.4	Struktur geologisk uppbyggnad av den sedimentära berggrunden	14
<b>3</b>	<b>Material, metodik.....</b>	<b>15</b>
3.1	Borrhålsdata	16
3.2	Geofysiska loggar	16
3.2.1	Borrhålsmätning-loggningsteknik	16
3.2.2	Loggningssonder och mätmetoder	16
3.3	Korrelation-tvårsnitt	19
3.4	Seismik	19
<b>4</b>	<b>Tolkning och beskrivning .....</b>	<b>20</b>
4.1	Lokala berggrundsförhållanden-södra Gotland	20
4.2	Djupkartor	21
4.3	Seismiska profiler	24
4.4	Beskrivning och korrelation av den ordoviciska sekvensen	24
<b>5</b>	<b>Resultat och diskussion.....</b>	<b>25</b>
5.1	Avsmitt A–D	25
5.2	Profilerna A–B samt C–D	27
<b>6</b>	<b>Slutsatser.....</b>	<b>28</b>
<b>7</b>	<b>Tack.....</b>	<b>29</b>
<b>8</b>	<b>Referenser.....</b>	<b>29</b>

# Geofysisk karaktärisering av ordoviciska kalkstenenheter på södra Gotland

Alexander Vasilica

Vasilica, A., 2015: Geofysisk karaktärisering av ordoviciska kalkstenenheter på södra Gotland. *Examensarbeten i geologi vid Lunds universitet*, Nr. 434, 29 sid. 15 hp.

**Sammanfattning:** I samband med olje- och gasprospektering genomförda av OPAB, Gotlandsolja AB samt SGU har omfattande geofysiska mätningar (seismik) och borrhålsundersökningar gjorts. Studien som presenteras här baseras på data och information från dessa undersökningar med syfte till en geofysisk karaktärisering och tolkning av södra Gotlands tre ordoviciska kalkstenenheter samt den underliggande mellankambriska sandstenen, den så kallade Faluddensandsten. De ordoviciska kalkstenenheterna benämns, uppifrån som: Klasen-, Kvarne- och Bentonitkalksten. I arbetet presenteras även en övergripande bedömning av lagerföljdens lämplighet som tak- respektive reservoarbergart. Framtagna djupkartor och profiler visar tydligt den allmänna lutningen på berggrunden åt SSO. Tolkningen av geofysiska borrhålsloggar, framförallt Gammaloggen, visar att den studerade lagerföljden kan följas och korreleras lateralt mellan borrhål på södra Gotland. Generellt är lagerföljden homogent uppbyggd med likartade litologiska egenskaper som återspeglas i resultaten från de geofysiska borrhålsmätningarna. Studien visar att det är med hjälp av de geofysiska borrhålsloggarna möjligt att etablera en geofysisk typsekvens för den ordoviciska kalkstenssekvensen på södra Gotland. I den övre kalkstenenheten, Klasen, återfinns lokalt s.k. ”mounds” som består av linsformade slamhögar som utgör reservoarbergart för den olja som man utvunnit på Gotland. Dessa strukturer har en storlek av ett par hundra meter upp till någon km i diameter och kan vara 50–60 m höga. Förekomsten återspeglas som lokala avvikelser i borrhålsloggar samt i seismiska profiler som redovisas. Den undre delen av den ordoviciska lagerföljden uppvisar en mycket varierande lagring med bl.a. glaukonitisk skiffer, siltsten och alunskiffer som delvis starkt påminner om motsvarande lagerföljds uppbyggnad på Öland. Avsaknaden av biostratigrafiska dateringar medför dock att detta inte går att närmare verifiera. Resultaten från karaktäriseringen visar att det finns behov av kompletterande undersökningar, framförallt dateringar, som kan möjliggöra en mer regional korrelation av lagerserien. Lagerföljdens laterala uthållighet, homogena fysikaliska uppbyggnad och inslag av bentonit talar för att den kan vara en bra takbergart för ev. lagring av CO<sub>2</sub> i den underliggande Faluddensandstenen. Den senare tilltar i mäktighet söderut vilket också syns i profilerna från södra Gotland. Sandstenen består av en porös, kvartsarenit med bedömda goda reservoaregenskaper för lagring av koldioxid.

**Nyckelord:** södra Gotland, kalksten, sandsten, borrhålslogging, gamma ray, koldioxidlagring, reservoar, takbergart, Kvarne, Klasen, Bentonit, Faludden.

**Handledare:** Mikael Erlström (Sveriges Geologiska Undersökning, Lund)

**Ämnesinriktning:** Berggrundsgeologi

*Alexander Vasilica, Geologiska institutionen, Lunds universitet, Sölvegatan 12, 223 62 Lund, Sverige.*

*E-post: [havana\\_fun@hotmail.com](mailto:havana_fun@hotmail.com)*

# Geophysical characterization of the Ordovician limestone units on southern Gotland

Alexander Vasilica

Vasilica, A., 2015: Geophysical characterization of the Ordovician limestone units on southern Gotland. *Dissertations in Geology at Lund University*, No. 434, 29 pp. 15 hp (15 ECTS credits).

**Abstract:** In connection with oil and gas exploration conducted by OPAB, Gotlandsolja AB and surveys done by SGU, extensive geophysical investigations and borehole survey have been carried out. This study is based on data and information from those surveys with the intention of creating a geophysical characterization and interpretation of the Ordovician limestone units and the underlying Middle Cambrian sandstone (Faludden sandstone) on southern Gotland. The Ordovician limestone units are called, from above; Klasen-, Kvarne- and Bentonitic limestone. This study will further present a basic, overall assessment of the cap- and reservoir potential. Presented depth maps and profiles clearly show the general dip of the bedrock in a SSE direction. Interpretation of well logs, especially Gamma Ray logs, show that the different bedrock layers can be correlated laterally between boreholes on southern Gotland. The general stratigraphy is homogenous and with similar lithological properties which is reflected in the results from the geophysical wire-line logging. This study shows that it is possible, by using the wire-line logging, to create a geophysical "type section" for the Ordovician limestone units on southern Gotland. In the upper limestone unit, also called Klasen limestone, there are local occurrences of what is known as "mounds", mud piles. This lens shaped mud piles represents the source from which oil has previously been recovered from. The size of these structures are from a few hundred meters up to a kilometer in diameter and 50–60 meters in height. The presence of these "mounds" are reflected as local anomalies in well logs and in the presented seismic profiles. The lower part of the Ordovician sequence exhibits a much more variable unit including siltstone, alun- and glauconitic shale, that strongly reminds of corresponding composition of the sequence on Öland. Absence of biostratigraphical dating makes it impossible for further confirmation. From the results of the characterization it is possible to conclude there is a need for complementary studies, especially age updates, that will allow for the development of a more regional correlation of the units. The layer sequences lateral duration, homogenous physical structure and elements of bentonite, indicate that there is a good potential as caprock for future storage of CO<sub>2</sub> in the underlying Faludden sandstone. A sandstone unit that increases in thickness to the south, as shown in the profiles from southern Gotland, and consists of porous, quartz arenite with estimated good reservoir properties for storage of carbon dioxide.

**Keywords:** southern Gotland, limestone, sandstone, wire-line logging, Gamma Ray, CO<sub>2</sub>-storage, reservoir, caprock, Kvarne, Klasen, Bentonit, Faludden.

**Supervisor(s):** Mikael Erlström (Geological Survey of Sweden, Lund)

**Subject:** Bedrock Geology

*Alexander Vasilica, Department of Geology, Lund University, Sölvegatan 12, SE-223 62 Lund, Sweden.  
E-mail: [havana\\_fun@hotmail.com](mailto:havana_fun@hotmail.com)*

# 1 Introduktion

Prospektering efter kolväten i Sverige, framför allt på Gotland och i Östersjön har pågått i olika omgångar sedan början på 1870-talet, upphörde 1966 för att sedan återupptas i mitten av 1980-talet. Geofysiska undersökningsmetoder som till exempel seismik och mätningar av magnetfält och tyngdkraftsfältet har använts, men den dominerade informationskällan kommer från prospekteringsborrningar både på land och till havs, samt information från angränsande östersjöländers geoundersökningar. Anledningen till prospekteringsintresset i södra Östersjön är förekomsten av intressanta reservoarer, moderbergarter och exploaterbara fynd av olja och gas, framför allt i de Baltiska grannländerna men även på Gotland. Mindre oljefynd påvisades på Gotland redan på 1960-talet i SGUs undersökningsborrningar, ex. När-1, Grötlingbo-1 och File Haidar-1.

Den geologiska strukturella och tektoniska utvecklingen i området har lett till att kolväten bildats och framförallt ansamlats i isolerade naturliga fällor (veck, avgränsande strukturer i anslutning till förkastningar, domer) i den kambriska sandstenen i södra Östersjön. Ett flertal av dessa strukturer påträffas i anslutning till Lebahöjdryggen och Liepaja-Saldushöjdryggen i den sydligaste delen av Östersjön. En del av den bildande oljan har dessutom omfördelats, framförallt under mesozoisk tid genom tektoniska rörelser i berggrunden, och ansamlats även i de ordoviciska reven, "mounds", under Gotland (Sivhed m.fl., 2004).

Det här arbetet presenterar data och tolkningar av ett avsnitt i berggrunden på 400–600 m djup under

södra Gotland (Fig. 1), som innefattar den mellankambriska Faluddensandstenen och tre överliggande ordoviciska kalkstensenheter benämnda, Bentonit-, Kvarne- och Klasenkalkstenen.

Det studerade avsnittet omfattar både den, ur reservoargeologiskt sett, bästa reservoarbergarten, det vill säga Faluddensandstenen och ett intervall med ordoviciska takbergarter och karbonatreservoarer (mounds). Avsnittet är uppemot 150 m mäktigt i de djupa borrhål som finns i det undersökta området på södra Gotland.

Syftet med arbetet är att sammanställa och presentera lagerföljdens uppbyggnad och att med hjälp av framförallt borrhålsgeofysik (Gamma Ray och densitetsloggar) och seismik tolka berggrundsavsnittets uppbyggnad. Vidare är syftet att med utgångspunkt från tolkningarna bedöma kalkstenssekvensens potential som takbergart med avseende för lagring av koldioxid i den underliggande Faluddensandstenen. En frågeställning som idag utgör en av de viktigaste delarna i bedömning av förutsättningarna för koldioxidlagring i södra Östersjöns paleozoiska berggrund.

Till grund för det här arbetet ligger förutom litteraturstudier och tidigare arbeten (framför allt opublicerade rapporter) också geofysiska data, framförallt borrhålsloggar från OPABs borrhål. Flertalet av OPABs borrhålsrapporter finns sökbara och tillgängliga digitalt via SGUs arkiv. Trots att det finns en del tidigare arbeten om den sedimentära lagerföljden och den ordoviciska tidsperioden (ex. Jannusson, 1977; Brunn & Kjellström, 1989; Erlström, 2009; 2014) så finns det få undersökningar och publikationer som fokuserar ingående på den ordoviciska lagerföljden i södra Östersjön.

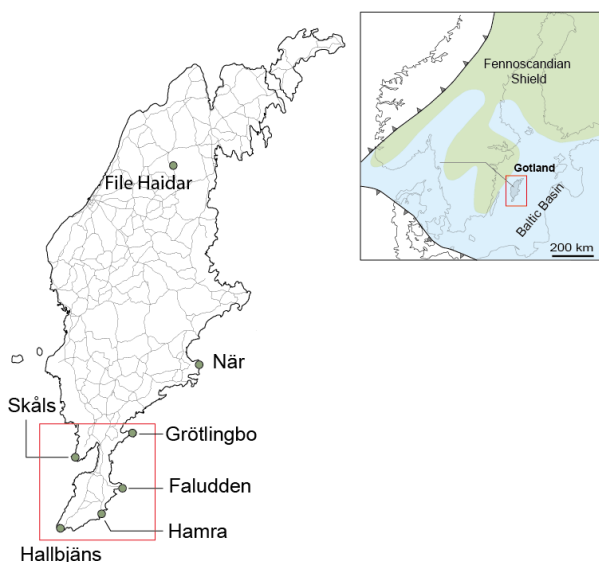


Fig. 1: Översiktsskarta över Gotland och dess läge i den Baltiska Bassängen (liten ruta uppe i högra hörnet). Det studerade området på södra Gotland är markerat med en röd ram. (Bild hämtad och modifierad från figur i Erlström m.fl. 2009).

## 1.1 Områdets potential för förekomst av kolväten

Olja och gas bildas genom omvandling av organiskt material, växter under höga tryck och temperaturer. Till skillnad från kol handlar det främst organiskt material från marina växter, plankton och alger. För bildning av olja och gas krävs avsättning av organiskt rika sediment i syrefattiga miljöer där det organiska materialet inte bryts ner fullständigt, vilket leder till att ett organogent slam bildas (Erlström m.fl., 2014). När bergartsbildningen startar kommer mer flyktiga ämnen som vatten och koldioxid att drivas ut ur slammets kerogen bildas. Kerogen i sin tur har ingen specifik sammansättning utan kan definieras mer som en olöslig vaxliknande organisk materia. Dess komplexa kedjor av kol och väte bestäms av uppbyggnaden av det ursprungliga organiska materialet (Erlström m.fl., 2014). Kvoten mellan väte och kol (H/C) styr vilka typer av kolväten som bildas. Kerogenet delas in i tre typer, I, II, III, där dessutom temperatur och begravningsdjup (tryck) är avgörande för vilken typ av kolväten som bildas (Fig. 2). Alunskifferns kerogen klassas som typ II vilket innebär att den kan vara moderbergart för både olja och gas under lämpliga tryck- och

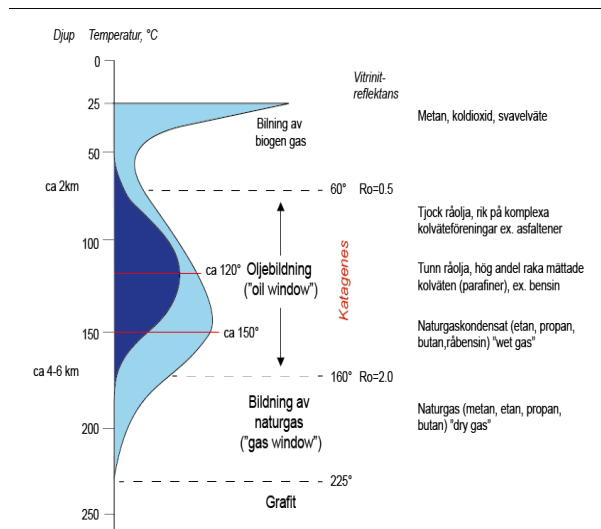


Fig. 2: Illustration över de relativa förhållanden som gäller för kolvätegenes i berggrunden med avseende temperatur, djup och mognadsgrad. (figur hämtad från Erlström m.fl., 2014).

temperaturförhållanden. Detta sker vid temperaturer mellan 60–200 °C och på 2 km och ända ner på 4–6 km djup i berggrunden. När en moderbergart som t.ex.

alunskiffern befinner sig på de djupa börjar en process som heter katagenes (moderbergarterna mognar), vilket innebär att de långa kolvätekedjorna i kerogenet bryts ner och bildar olja och gas (Erlström m.fl., 2014).

Bildad olja och gas vandrar, om förutsättningarna finns, sedan uppåt i lagerföljden och fångas in i reservoarbergarter (fällor) vilka antingen består av porös och permeabel sandsten eller ordoviciska mounds. Dessa så kallade olje- och gasfällor har ofta formen av domer, veck (antiklinaler) eller förkastningsavgränsade strukturer i berggrunden (Erlström m.fl., 2014).

Moderbergarterna i den södra delen av Östersjön inleddes katagenesen under silur–devon (Fig. 3) i samband med nedsänkning och pålagring av yngre sediment på grund av tektoniska händelser i jordskorpan kopplade till den kaledoniska orogenesis. Trots att sammansättningen av kolväten är likartad i hela den Baltiska Bassängen förekommer det dock en viss skillnad i oljans ursprung och bildningsätt. Oljans sammansättning antyder ett ursprung som kan spåras till en marin skiffer avsatt under reducerande förhållanden (Sivhed m.fl., 2004). Sådana bergarter är framför allt den kambriska alunskiffern. Andra tänkbara moderbergarter är den underordoviciska Dictyonemaskiffern och den siluriska Rastritesskiffern (Erlström m.fl.,

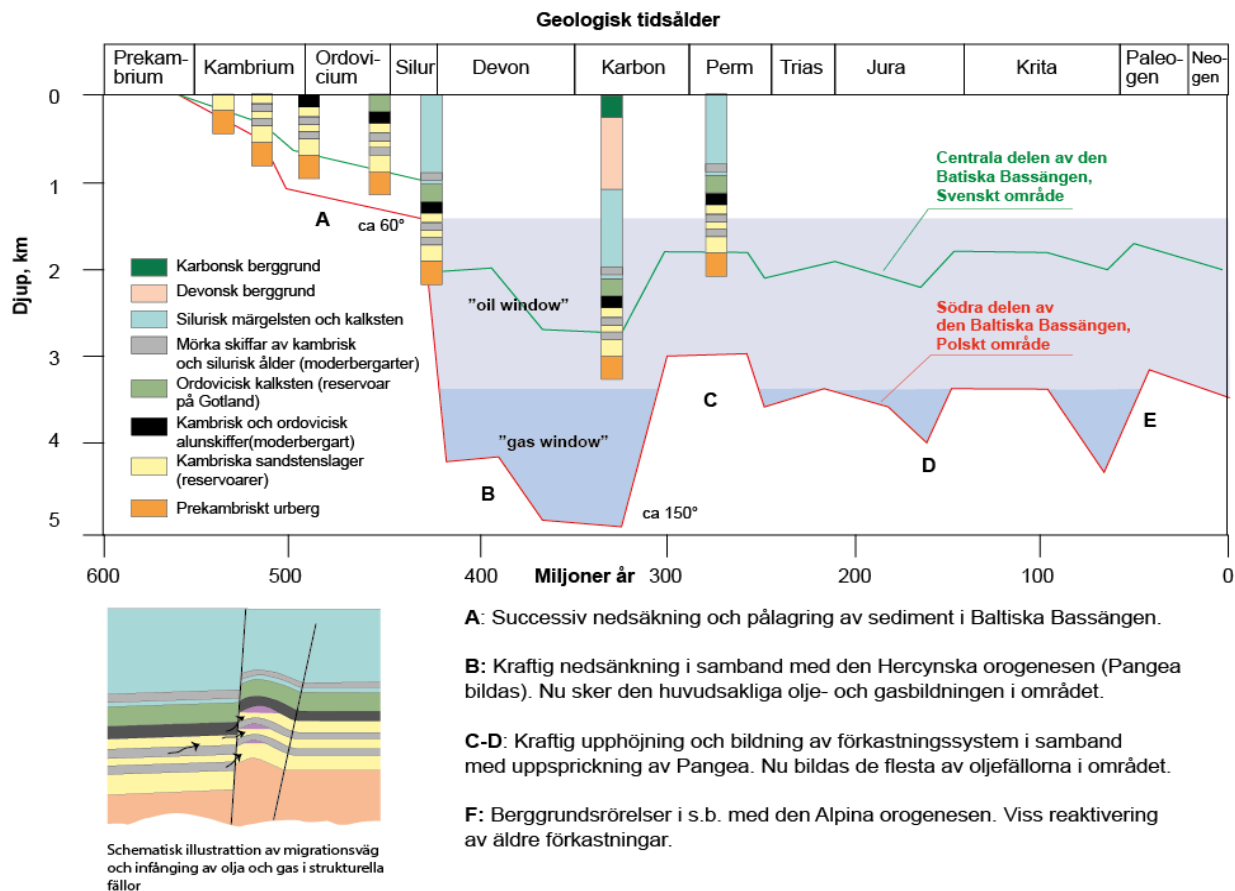


Fig. 3: Modell som beskriver den Baltiska Bassängens utvecklingshistoria på svenskt respektive polskt område. (Modifierad från Erlström m.fl., 2014).



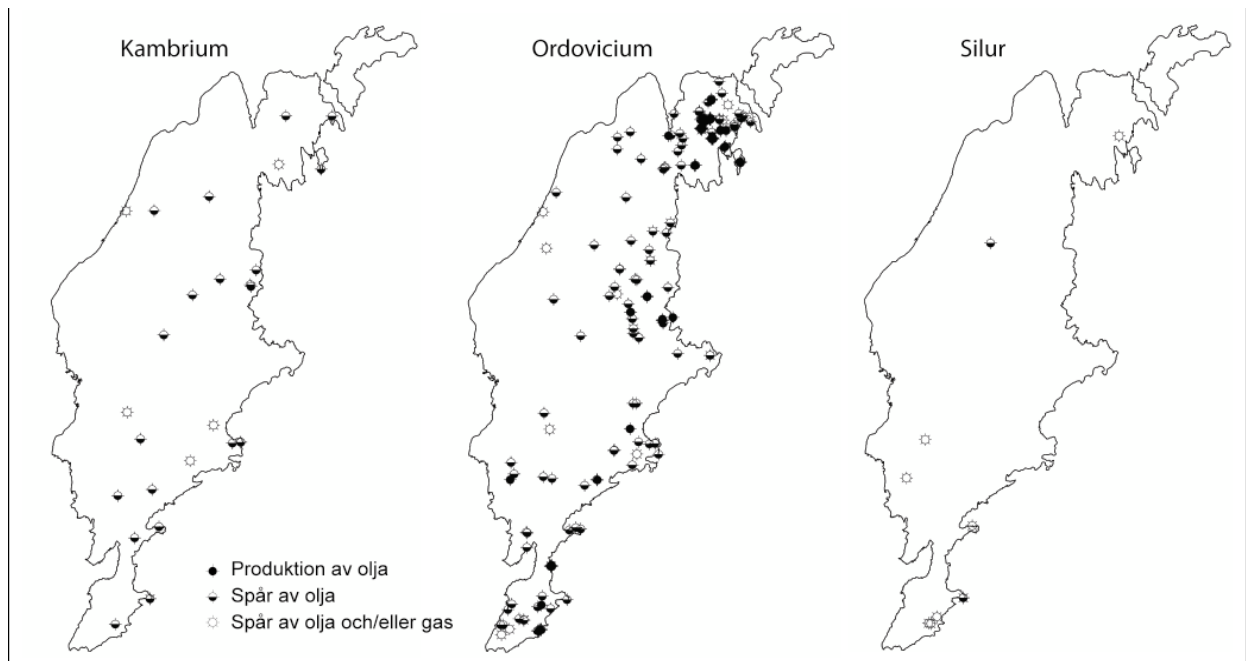


Fig 4: Sammanställning av förekomster av olja och gas i borrhål på Gotland. (Figur hämtad från Erlström m.fl., 2014).

2014).

## 1.2 Olja & gas på Gotland samt den svenska delen av södra Östersjön

Undersökningarna som OPAB genomförde på Gotland och i södra Östersjön visade endast på mindre fynd av olja och gas i den kambryska sandstenen. Däremot upptäckte man att i den övre delen av den ordoviciska kalkstenssekvensen fanns olja. Utvidgade undersökningar av dessa under 1980-talet resulterade i en produktion av drygt 10 000 m<sup>3</sup> olja ur dessa (Erlström m. fl., 2009). På Gotland borrade OPAB och Gotlandsolja drygt 350 borrhål i dessa strukturer. I angränsande Östersjöländer, främst Polen och Ryssland (Kaliningradenklaven) har det däremot gjorts relativt stora fynd av olja och gas i dom liknande fällor i den kambryska sandstenen. Dessa fynd påvisar att det finns förutsättningar även för koldioxidlagring i den kambryska sandstenen då den uppvisar goda reservoaregenskaper och att det finns en tät överliggande "caprock" (takbergart).

### Gotland

På Gotland har oljeproduktionen skett i två omgångar. Mellan 1974 och 1986 bedrev OPAB en prospekterings- och utvinningsverksamhet fördelad på 12 olika områden på norra Gotland samt 6 områden på den södra delen av Gotland (Fig. 4). Under den perioden producerades totalt 9 259 m<sup>3</sup> olja på södra Gotland respektive 69 022 m<sup>3</sup> på norra Gotland. Oljan utvanns enbart ur ordoviciska, porösa, oregelbundet förekommande revbildningar s.k. mounds (Sivhed m.fl., 2004; Erlström m.fl., 2014).

Mellan 1988 och 1992 genomfördes en ny kampanj, nu med Gotlandsolja AB, som producerade

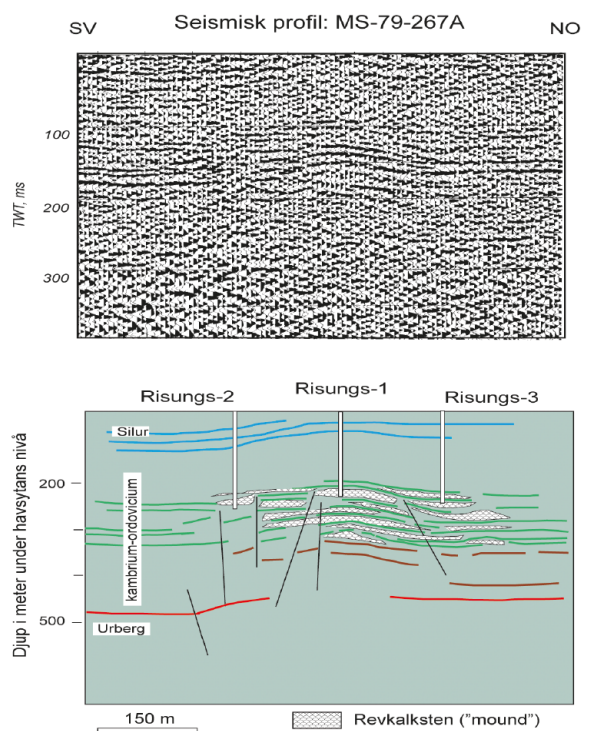


Fig. 5: Strukturella uppbyggnaden av Risungsstrukturen på norra Gotland. Det är en av de bättre oljeproducerande revstrukturerna i den ordoviciska lagerföljden. Ett bra exempel på hur man kan urskilja liknande strukturer i en seismisk profil. (Modifierad från figur i Erlström m.fl., 2014).

mellan 30 000 – 40 000 m<sup>3</sup> olja (exakt mängd olja som producerades är inte dokumenterad). Oljan var av hög kvalitet med bland annat låg svavelhalt vilket gjorde det möjligt att använda den direkt för eldning i Visby

värmeverk (Erlström m.fl., 2014).

### **Södra Östersjön**

Mellan åren 1973 och 1986 utförde OPAB 13 djupborrningar i södra Östersjön. I den kambriska lagerföljden finns ett antal porösa sandstenslager som antogs vara de viktigaste reservoarerna för olja och gas. På svenskt område heter dessa enheter Viklau-, När- och Faluddensandsten. Den sistnämnda är uppemot 50 meter mäktig i den svenska delen av Östersjön och söder och sydväst om Gotland påträffas den på 600–1000 meters djup och följer urberget svaga lutning åt syd-sydost. I de baltiska staterna kallas Faluddensandstenen för Deimenasandsten. På svenskt område har borrningarna bekräftat förekomst av gas i sandstenen, men dock har ingen olja påträffats här (Erlström m.fl., 2014).

I de flesta fall var målet med OPABs borrningar att undersöka ordoviciska revstrukturer. Den ordoviciska lagerföljden domineras av lagrad kalksten men lokalt förekommer revliknande strukturer, s.k. mounds (Fig. 5). Reven är ansamlingar av slam på havsbotten och tillhör stratigrafiskt den så kallade Klasenkalkstenen (Sivhed m.fl., 2004). I moundstrukturerna ansamlas oljan i sprickor och hålrum. Förekomsterna är väl dokumenterade på Gotlands fastland men är även indikerade till havs, främst öster om Gotland. De framträder relativt tydligt i seismogram från seismiska mätningar (Erlström m.fl., 2014).

En provborrning gjordes också till havs på ett förmodat silurisk rev men några större mängder av gas och olja påträffades dock inte. I en borrning (B-9) påträffades stora mängder kolväten i form av gas i Faluddensandstenen, vilket bedömdes eventuellt kommersiellt. Men, på grund av att prospekteringsfokus låg på olja under 1970-talet, ledde det till att gasfyndigheten inte utvärderades ytterligare (Erlström m.fl., 2014).

### **1.3 Områdets lämplighet för koldioxidlagring**

Koldioxidlagring (CCS-Carbon, Capture and Storage) har över ett decennium varit mycket omdiskuterad och debatterad. Som bakgrund ligger framför allt miljömässiga motiv men också ekonomiska och politiska agendor (t. ex. EU direktivet 2009, geologisk lagring av CO<sub>2</sub> (CCS-direktivet)) (energimyndigheten, rapport 2010:36).

Koldioxidlagring har visat sig kunna vara en realistisk och genomförbar metod till att succesivt minska de storskaliga utsläppen i atmosfären. I stora drag går det ut på att avskilja och lagra koldioxid i berggrunden. Man brukar dela in CCS in i: avskiljning, transport och lagring av koldioxid ([www.sgu.se](http://www.sgu.se), 141005).

Avskiljning, är den process där koldioxid som annars skulle ha släppts ut i atmosfären samlas in för att få en gasström av koncentrerad koldioxid.

Transport av CO<sub>2</sub> sker idag med hjälp av t.ex. båt eller rörledningar, då det kan vara stora avstånd mellan

avskiljningsanläggningen och området för förvaring/lagring av koldioxiden. Transport och lagring av koldioxid är endast genomförbar efter att gasen omvandlats till att den är praktiskt taget flytande, så kallad superkritiskt tillstånd (energimyndigheten, rapport 2010:36).

Lagring av koldioxid kan göras på olika sätt men idag anses lagring i uttömda olje- och gasfält eller i samband med s.k. EHR (enhanced hydrocarbon recovery) samt i djupt liggande akvifärer vara de mest lämpade alternativen.

Fördelen med att lagra koldioxid i uttömda gas- och/eller oljefält är att de geologiska förhållandena är kända och det finns en verifikation på att det finns en tät takbergart och lämplig reservoar, annars skulle inte olja och gas kunnat ansamlats där. Det anses numera att lagring av koldioxid i djupa akvifärer i sedimentär berggrund ha störst potential. Väl avgränsade strukturer (fällor) i berggrunden kan också ha stor potential för lagring av koldioxid. En sådan struktur kan omfatta t.ex. omböjda berggrundslager (sandsten) som skapar en kupolliknande struktur som i sin tur måste överlagras en tät takbergart (caprock). Takbergarten skall helst uppfylla vissa krav så som att mäktigheten är mer än 100 meter. Den skall dessutom vara tät, för att förhindra läckage av koldioxid till atmosfären eller markytan. Typiska takbergarter utgörs av finkorniga bergarter som lersten, skiffer och mangelsten.

För att området/reservoaren ska anses vara lämplig för lagring måste den i sin tur också uppfylla ett antal baskrav och börvärden. Grundläggande krav innefattar ett lagringsdjup på >800 m som säkerställer att koldioxiden är i superkritiskt tillstånd. Detta sker vid ett tryck på över 71 bar och temperatur på minst 31 °C. Andra krav är att lagringsakvifären bör vara >20 m mäktig, kunna ta emot och lagra >100 Mt CO<sub>2</sub> och ha en porositet på >10%. För en bedömning av lämpliga lagringsplatser krävs omfattande geologisk förstudier med tolkning och modellering av berggrundens uppbyggnad och egenskaper.

För Sveriges vidkommande har preliminära studier visat att sydvästra Skåne och södra Östersjön (på svenskt område, Daldersstrukturen (se kap. 2.2.4 sid.15) anses ha de bästa förutsättningar för koldioxidlagring. För södra Östersjön är det framför allt den kambriska sandstenen (Faluddensandstenen) med överliggande täta lager av ordoviciska leriga kalkstenar och lerstenar (takbergarter) som är av störst intresse ur lagringssynpunkt. Utifrån borrhålsdata har man kunnat visa att akvifären är homogen, porös och permeabel med regional utbredning samt att baskraven och börvärden uppfylls (Erlström m. fl., 2011).

## **2. Berggrundens uppbyggnad i södra Östersjön**

### **2.1 Regionala förhållanden**

Sedimentära bassänger är erosionsrester som omfattar

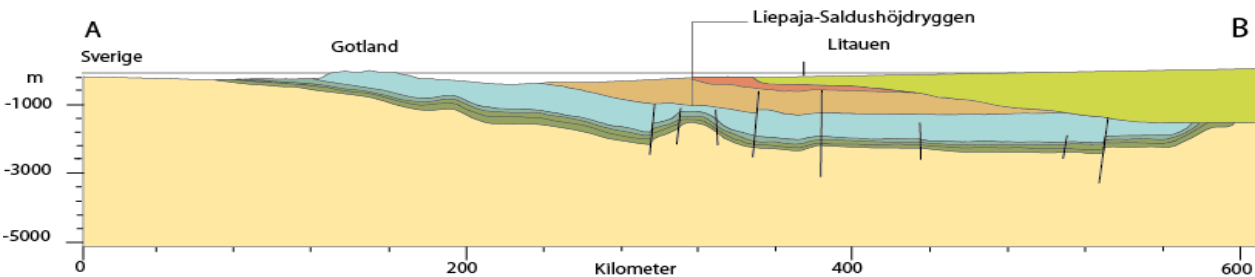
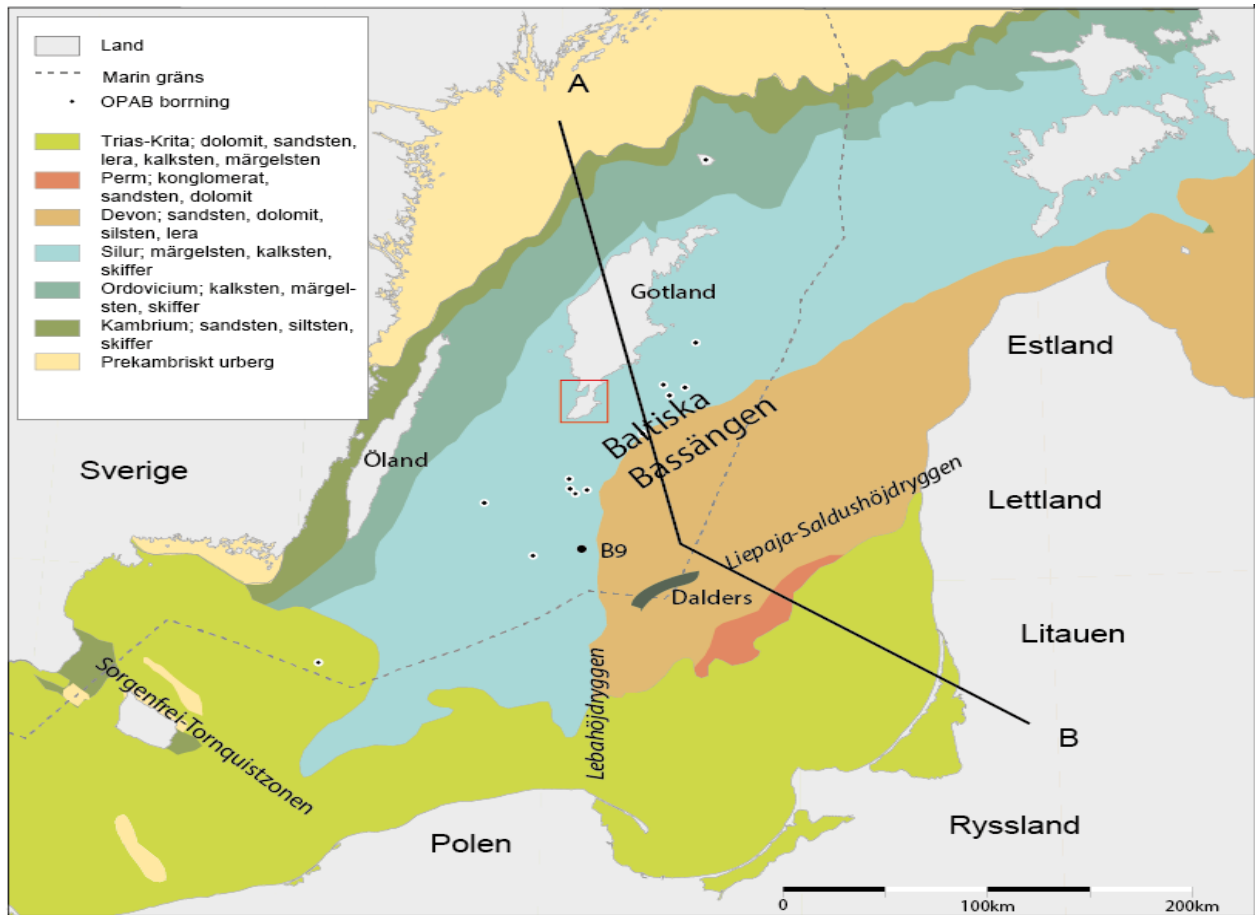


Fig. 6: Översiktlig karta med tvärsnittet A–B som visar berggrundens uppbyggnad i Östersjöområdet. (Hämtad och modifierad från figur i Erlström m.fl., 2014).

hundratals till tusentals meter mäktiga lagerföljder och som bevarats i regionalt utbredda, naturliga eller förkastningskontrollerade sänkor i den kristallina berggrunden (Calner, muntl. kom. 2013).

Södra och centrala Östersjön tillhör ett större sammanhängande område med paleozoisk sedimentär berggrund som ligger direkt på urberget och tillhör strukturmässigt den Baltiska Bassängen (Erlström, 2014).

Bassängen bildades under Ediacara-tidig kambrisk ålder och är en så kallad ”*passive continental margin basin*” som bildades på grund av att superkontinenten Rodinias delades upp. Bassängen fortsatte därefter att breda ut sig mot sydöst och nordväst framför den Kaledoniska deformationen, för att sedan bli ett subsidens- och sedimentationsområde nordost om det Danska-Nordtyska-Polska Kaledoniderna. Dagens bassäng

angränsar till den Nordtyska Bassängen, Polska Bassängen och den Danska Bassängen. Bassängens sydvästra gräns utgörs av Tornquist zonen (Björck m.fl., 2011).

## 2.2 Lokala förhållanden, södra Östersjön

### 2.2.1 Urberget

I Södra Östersjön och på Gotland (centrala Östersjön och norra delen av den Baltiska Bassängen) lutar den prekambriiska med överlagrande sedimentära berggrund successivt mot söder och sydost i den Baltiska Bassängen (se Fig. 6). Lutningen medför att urberget på svenskt område i centrala Östersjön ligger på cirka 1 200 meters djup, medan på polskt område, nära kusten, påträffas det på avsevärt större djup, dvs. 3 500–

4 000 meter (Erlström m.fl., 2014).

På Gotland avspeglas lutningen på berggrunden att djupet till urberget ligger på cirka 300 meter i norr och i söder på cirka 800 meter (Erlström m.fl., 2009). Borrhål (34stycken), på norra och södra Gotland, som går ända ner till de översta metrarna av urberget visar att urberget är av svekokarelik ålder (1,8–1,9 miljarder år gammalt) och har i huvudsak en granitisk sammansättning (Erlström m.fl., 2009).

Urbergsytan utgör ett subkambriskt peneplan, vilket är en plan yta som bildats genom vittring och erosion. På vissa ställen finns dock lokala höjder som även påverkar uppbyggnaden av den överliggande sedimentära berggrunden.

Borrkax och enstaka kärnprover visar en berggrund som domineras av bandad, rödgrå, biotitrik gnejs och röd granit. De spridda observationerna visar inte på en lika varierande uppbyggnad som indikeras i flygmagnetiska- och tyngdkraftsmätningar (jfr. Erlström m.fl., 2009). Däremot visar proverna att urberget på många ställen är kaolinvittrat och att brecciering och förekomst av mörka basiska bergarter samt mineraliseringar förekommer.

### 2.2.2 Den sedimentära berggrunden

#### Kambrium

Den kambriska lagerföljden består både av lerdominerade skiffrika bergarter och avsnitt med porösa och permeabla sandstenslager. Dessa är intressanta då de kan fungera som potentiella reservoarer för kolväten och lagring av koldioxid (Erlström m.fl., 2009). Lagerseriernas litologiska uppbyggnad varierar beroende på att den har sitt ursprung i en skiftande kustnära avsättningsmiljö med frekventa förändringar som till exempel vattendjup, vattenströmmar, vågor och stormar, men också hur långt det är till deltan och flodmynningar. Dessa frekventa förändringar i miljön har resulterat i till exempel varierande lerhalt, kornstorlek, sortering och kvartshalt. I södra Östersjön dominerar finkorniga kvartssandstenar med ganska hög andel finmaterial i form av lera och silt (Erlström, 2008).

På Gotland och i södra Östersjön delas den kambriska lagerföljden in i File Haidar- och Borgholmformationerna (se Fig.7). Den kambriska lagerföljdens mäktighet tilltar i sydostlig riktning, från cirka 140 meter i Visbyområdet till ca 200 meter på södra Gotland. Söder om Gotland är mäktigheten på den kambriska lagerserien uppemot 300 meter. Anledningen till variationen beror främst på en tilltagande mäktighet av mellersta kambrium inkluderande den så kallade Faluddensandsten (Erlström m.fl., 2009).

Undre kambrium utgörs till största delen av File-Haidarformationen (Thorslund & Westergård, 1938; Bergström & Gee, 1985; Ahlberg, 1989; Nielsen & Schovsbo, 2007). Formation är ca 100 meter mäktig och delas in i Viklausandsten, Närskiffer och När-sandsten. Bergarterna domineras av fin- och medelkornig sandsten, siltsten och lersten (Erlström m.fl., 2009).

Den överlagrande Borgholmformationen är ca 70

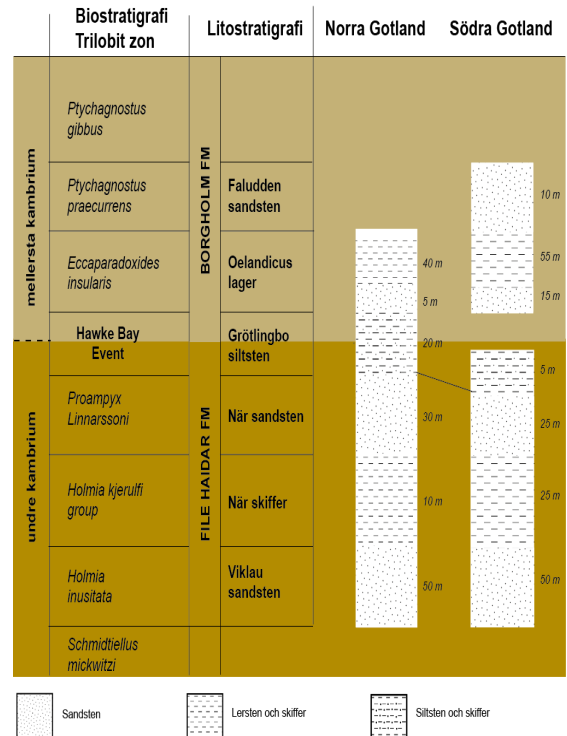


Fig. 7: Stratigrafiskt figur över den kambriska berggrunden i södra Östersjön. (Figuren är hämtad och redigerad från Erlström m.fl. (2009) och baseras på data från Nielsen & Schovsbo (2007)).

meter mäktig i norr och ca 127 meter på södra Gotland (Hagenfeldt, 1994). Den indelas i Grötlingbo-, Mossberga-, Bårstad-, Faludden- och Äleklintaleden (det sista saknas dock på Gotland). Större delen av formationen har en mellankambrisk ålder. Grötlingboledet och delar av Mossbergaleden förs, enligt Nielsen & Schovsbo (2007), till den yngsta delen av äldre kambrium. Merparten av lagerserien i Borgholmformationen består av växellagrade enheter med siltsten och lersten med underordnat inslag av sandsten. Faluddenledet däremot består nästan uteslutande av sandsten. Den här enheten är betydligt mäktigare på södra Gotland och söder om Gotland (ca 20–50 m) jämfört med norra Gotland där den endast är ca 5 meter mäktig (Erlström m.fl., 2009).

Övre kambrium, som på Gotland utgörs av endast några få metrar med mörkgrå skiffer och kalksten tillhörande Alunskifferformationen, är dåligt representerad. Det är också osäkert om den kan representera en kondenserad sekvens liknande den på Öland, dvs. även innehålla lager med underordovicisk Dictyonemaskiffer. Alunskifferformationen är endast observerad i enstaka borrhål på södra Gotland. I borrhålet När-1 förekommer en ca 2 m mäktig lagerserie tillhörande Alunskifferformationen på ca 470 meters djup (Ahlberg, 1989).

#### Ordovicium

Under ordovicium (ca 485–443 miljoner år sedan) förflyttade sig vår kontinent från att ha legat långt ner

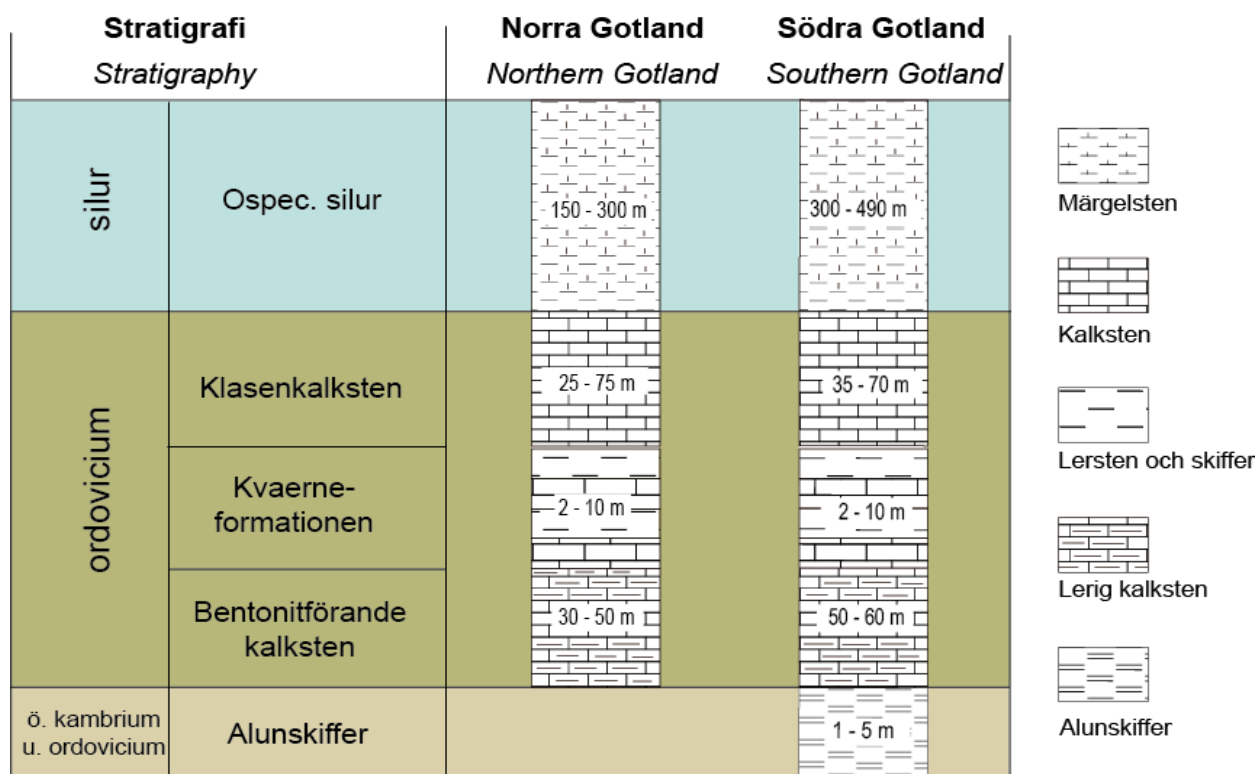


Fig. 8: Stratigrafiskt figur för den ordoviciska berggrunden i södra Östersjön. (Figuren är hämtad och redigerad från Erlström m.fl. (2009) och som är baserat på information från Sivhed m.fl., 2004).

på södra halvklotet i kambrium, längre norrut och närmare ekvatorn. Successivt blev klimatet varmare vilket ledde till att det, i Östersjöområdet, avsattes karbonathaltig sediment (Eliason, 2013).

Den ordoviciska lagerserien förekommer som djupt liggande berggrund under Gotland och södra Östersjön. Mäktigheten varierar från ca 80 meter till ca 127 meter och är informellt indelad i tre enheter, Klasen-, Kvarnekalksten, och Bentonitförande kalksten (OPABs indelning) (se Fig.8). Lagerserien är framförallt känd från OPABs och Gotlandsolja ABs borrhinar. Delar av motsvarande undre delar av lagerföljden är dock blottad på Öland. Här är den stratigrafiska indelningen mer formaliserad och skiljer sig från OPAB nomenklatur (Stouge, 2003). OPABs indelning utgår från skillnader som framträder i geofysiska borrhälsloggar, kaxprover och seismisk data. Den biostratigrafiska informationen är mycket begränsad likaså den specifika åldern på lagerföljden. Den enda studien som gjorts gällande biostratigrafisk ålderbestämning med hjälp av mikrofossiler (conodonter) är den av Bergström, Löfgren och Grahn, 2004 (Erlström m.fl., 2009).

Den understa bentonitförande lagerserien är 30–60 meter mäktig och domineras av lersten och lerig kalksten med tunna bentonitlager vars antal ökar uppåt.

Överlagrande bentonitkalkstenen kommer en 5–10 meter mäktig sekvens med karbonathaltig lersten. Denna benämns som Kvarnekalksten. Enligt OPABs definition, karaktäriseras den av en distinkt och karaktäristisk topp på de elektriska loggarna (OPAB 1976). Den översta delen av den ordoviciska lagerföljden utgörs av den 25–75 m mäktiga Klasenkalkstenen.

Enheten är uppbyggd av lerig kalksten med tunna skifferlager samt ett tydligt inslag av revliknande strukturer, så kallade "mounds" (Sivhed m.fl., 2004). Dessa strukturer kan vara uppemot 50 meter höga och 2 km i diameter och har varit målet för den oljepropektering och oljeproduktion som skett på Gotland (Erlström m.fl., 2009).

Anledningen är att dessa "slamhögar" av kalksten är porösa med stor andel större hålrum som fungerar som oljefällor som uppåt avgränsas av täta bergarter, dvs. silurisk märgelsten som hindrar oljan från att vandra vidare uppåt. Oljan har alltså inte bildats i mounds (Sivhed m.fl., 2004) utan troligen vandrat in i reservoaren från sydsydost, sannolikt från kambriska och/eller ordoviciska alunskifferna (Eliason, 2013).

### Silur

När de siluriska sedimenten avsattes befann sig vår kontinent (Baltica), strax söder om ekvatorn där det rådde tropiska förhållanden. En bukt in på kontinentens södra kust fungerade som ett havsområde där sedimenten avsattes. I det grunda kustnära havet, där mängder med djur levde, byggdes det periodvis upp rev på bottarna, men som efterhand grundades upp och till slut blev helt torrlagt. På Gotland varierar mäktigheten på den bildade lagerserien mellan 150–300 m i norr och 300–490 m på södra Gotland.

Den siluriska ytberggrunden på Gotland omfattar cirka 10 miljoner år av hela silurtiden, (428–418 Ma). Sedimenten avsattes växelvis i cykler på en grund shelf som täckte stora delar av centrala Östersjöbäckenet. Uppemot 10 cykler med avsättning har dokumenterats och mellan cyklerna förekom det perioder av

erosion då Gotland måste ha befunnit sig ovanför erosionsbas, vilket måste då betyda att området delvis torrlagts med jämna mellanrum (Eriksson & Calner, 2005).

Inom varje enhet som motsvarar en cykel är bergarterna generellt grövre och mer karbonatrika i nordost jämfört med i sydväst där inslag av mörk och mörksten är mer påtagliga, vilket indikerar allt djupare marina avsättningsförhållanden i sydvästlig riktning (Eriksson & Calner, 2005).

Den siluriska lagerföljdens uppbyggnad på djupet är dock dåligt känd då det oftast saknas djupinformation i form av borrhänsor och geofysiska loggar från OPABs borrhänsor i det siluriska intervallet. Berggrund tillhörande äldsta silur uppträder inte som ytberggrund på Gotland men förekommer sannolikt på djupet där den överlagras av den ordoviciska Klasenkalkstenen. Den siluriska djupberggrunden domineras av leriga kalkstenar, lersten och mörk till skillnad från den mer ytnära berggrunden som domineras av kalksten (Erlström m.fl., 2009).

### 2.2.3 Post-silurisk berggrund

Förutom devonsk berggrund förekommer inte post silurisk berggrund i den svenska delen av södra Östersjön (jämför Fig. 6). Den devonska berggrunden består nästan uteslutande av röda areniter (sandstenar) och lerstenar, inslag av gips och anhydrit (salt) förekommer, speciellt i de mellersta delarna av övre devon.

Sediment från karbon förekommer i ett begränsat område i sydöstra delen av bassängen och har en måktighet på mellan 70 och 130 meter. Dessa består av mörk med lerhaltiga lager i den undre delen, och fin kornig sandsten med tunna intervaller av lera i den övre enheten. På den karbonska berggrunden förekommer ojämnt fördelade avlagringar från perm, som består av evaporiter och karbonathaltiga lerstenar. Permavlagringarna förekommer i den östra delen av den Baltiska bassängen i området utanför Polens och Litauens kust med en måktighet på cirka 350 meter (Brunn & Kjellström, 1989).

Mesozoisk berggrund påträffas i den sydligaste delen av Östersjöbassängen och i Hanöbassängen. Sedimentens måktighet varierar från 1000–2000 meter söder om Skåne, och 610–670 meter i Hanöbassängen (Brunn & Kjellström, 1989). Se Fig. 3 för tektoniska förlopp samt djup.

### 2.2.4 Strukturgeologisk uppbyggnad av den sedimentära berggrunden

Under kambrium, ordovicium och nästan hela silur, sker det ”bara” en generell pålagring av sediment. På grund av tektoniska händelser samt massiv pålagring av sediment i anslutning till den kaledoniska orogensen skedde en omfattande nedsänkning av den Baltiska bassängen under silur–devon. Nedsänkningen ledde till att i den södra delen av Östersjön nådde moderbergarterna tillräckliga djup för att olja och gas ska

kunna bildas, vilket så inte var fallet i de centrala och östra delarna av bassängen där kolvätena består av mest olja. Övermogna bergarter som utsatts av allt för höga temperaturer återfinns i de allra sydligaste och sydvästligaste delen av bassängen, söder och sydväst om Bornholm och polsk-tyska Östersjökusten, där den största avlagringen av sediment sker. På grund av en mindre höjning av området under sen devon bildades Liepaja-Saldushöjdryggen och den delar tidigare bildade sedimentära berggrunden (Erlström m.fl., 2014).

Mellan tidig karbon till och med perm utsattes berggrunden för tension med tillhörande vulkanism som gav upphov till att större förkastningsavgränsande berggrundsblock bildades, som i sin tur, lokalt, höjde berggrunden mellan 1 000–2 000 meter. Lebahöjdryggen bildades och i anslutning till höjdryggar och förkastningar skapades strukturella fällor för ansamling av olja och gas (Erlström m.fl., 2014).

På grund av att superkontinenten Pangea sprack upp och delade på sig under perm–jura, fortsatte jordskorpan i Östersjöområdet att utsättas för tension och ledde till att både den nordtyska- och den norskdanska bassängen bildades men också det polska tråget. Förkastningar återaktiverades vilket troligen ledde till att omflytta en del olja och gas från gamla fällor till nya (Wrobel m.fl., 2010).

Under mesozoikum utsattes mest den sydvästligaste delen av Östersjön, som var i anslutning till Tornquistzonen (regional stortektonisk zon som avgränsar den Baltiska Bassängen i sydväst, se Fig. 6), av tektoniska rörelser. Däremot i de östra delarna av området var dessa tektoniska rörelser mindre omfattande och utgjordes först och främst av mindre rörelser längs med redan aktiva förkastningssystem. Under sen krita-neogen, i samband med den alpina orogensen, utsattes jordskorpan av omfattande kompression, framför allt i de mest sydvästliga delarna av den Baltiska Bassängen, de som var i anslutning till Tornquistzonen. Återigen reaktiverade gamla förkastningar och troligen, åter igen, omfördelades olja till nyskapade fällor i berggrunden (Erlström m.fl., 2014).

Ett antal strukturer och strukturella fällor har identifierats utifrån borrhänsor och geofysiska undersökningar (seismik) på Gotland och på svensk del av södra Östersjön. Dessa återfinns i den kambriska lagerföljden som porösa sandstenslager och som räknas till de viktigaste reservoarerna för olja och gas. De porösa sandstensenheter är uppdelade i Viklau-, När- och Faluddensandstenen. Faluddensandstenen med en måktighet på cirka 50 meter i den svenska delen av Östersjön bedöms vara den bästa reservoaren av de kambriska sandstensenheter. Söder och sydväst om Gotland finns sandstenen på 600–1000 meters djup (inom ett av baskraven för koldioxidlagring, se kapitel om koldioxidlagring). På svenskt område har gas bekräftats i sandsten, dock ingen olja. Många av de strukturella fällorna består av antingen veck, domliknande strukturer eller förkastningsavgränsade avsnitt. Dessa varierar kraftigt i storlek och de största strukturerna finns i de mest distala delarna av svenskt om-

råde och i Lettland, Litauen och Polen, vilket också innehåller den största potentialen för ekonomiskt intressanta förekomster (Erlström m.fl., 2014).

Faluddensandstenen överlagras delvis av ett tunt lager (0–2 meter mäktigt) av alunskiffer samt ett cirka 80–100 meter mäktigt avsnitt av mer eller mindre lerig ordovicisk kalksten. Denna domineras av lagrad kalksten. Lokalt förekommer det revliknande strukturer, så kallade ”mounds” (Sivhed, m.fl., 2004).

Medan den paleozoiska berggrunden inom svenskt område är relativt och förhållandevis opåverkad av förkastningar, veck och dombildningar som har skapat större fällor för olja och gas, så finner man de största strukturerna mer centralt och söderut i Östersjöområdet. Dessa är lokaliserade kring Liepaja–Saldushöjdryggen och Lebahöjdryggen som endast marginellt sträcker sig in på svenskt område och det är runt dessa höjdryggar med tillhörande och förekommande strukturella fällor som prospekteringsintresset ligger på idag (Erlström m.fl., 2014). För svensk del

ingår Daldersstrukturen som en del Liepaja–Saldushöjdryggen, och utgör en av de större strukturerna i området som fortfarande ännu inte är borrade. Den är cirka 38 km lång och sträcker sig i en svag båge från polsk kontinentalsockel i sydväst, via svensk sockel in på litauiskt och lettiskt sockel område i nordöst. Både Dalders och Liepaja–Saldushöjdryggen har en NO–SV riktning medan Lebahöjdryggen väster om Dalders har en N–S riktning, dessa är också de dominerande riktningarna på strukturer i hela Östersjöområdet. Lebahöjdryggen sträcker sig från Polen och norrut in över svenskt område (Erlström m.fl., 2014).

### 3 Material, metodik

För beskrivning och tolkning av stratigrafi och bergarter, har informationen i den här studien hämtats från OPAB och SGU, i form av borrhålsrapporter och geofysiska loggar (se tabeller och figurer nedan). OPAB

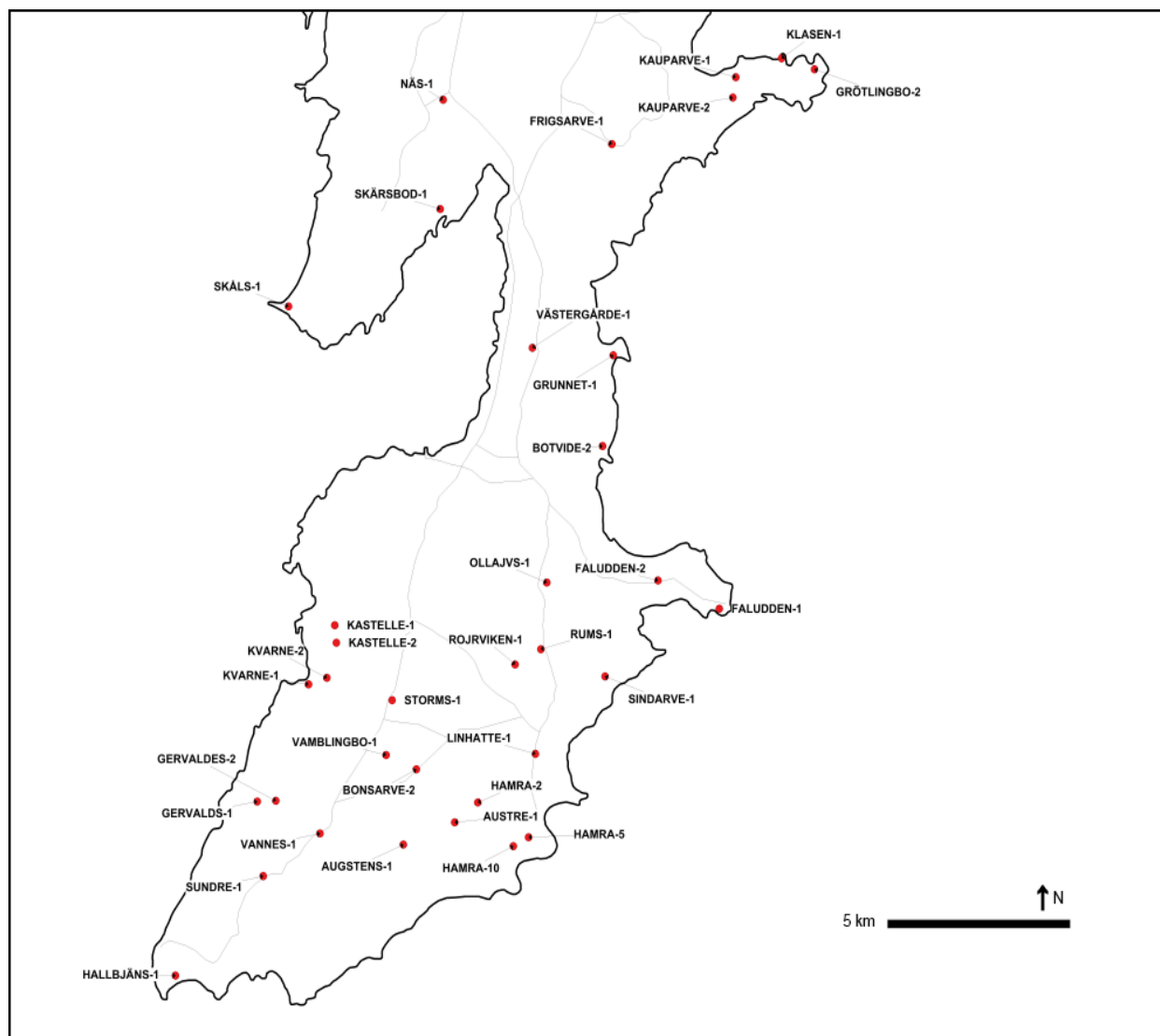


Fig. 9: Baskarta som visar läget på OPAB:s borrhål på södra Gotland.

Tabell 1: Sammanställning av borrhålsdata för de borrhål som ingått i studien. Samtliga djup i meter under havsytan.

Borring	Topp ordovicium, Klaskalksten, (m).	Topp Kvarnekalksten, (m).	Topp bentonitföran de kalksten, (m).	Måktighet ordovicium **, (m).	Topp Faludden-sandsten, (m).	Topp basement, (m).
Faludden 1	484,0	494,4	510,2	78,0	562	789,0
Faludden 2	443,4	467,2	482,8	87,4	530,8/(29,2)	
Gröttingebo 2	384,3	422,0	425,3	93,2	477,5/(8,0)	
Skåls 1	352,7	397,8	401,8	94,1	446,8*447,8/(12,8)	650,3
Hamra 1	478,2	500,2	513,8	86,5	564,7/(30,5)	791,2
Grunnet 1	398,1	439,4	465,1	116,8	514,9	
Hallbjäns 1	425,1	452,6	459,8	83,9	509,0/(24,0)	732,8
Klasen 1	397,9	435,0	442,0	92,9	490,8/(10,9)	696,3
Kvarne 1	415,0	450,0	453,0	86,0	500,0/(27,0)	721,0
Rums 1	456,1	487,9	492,4	86,0	542,1	
Sindarve 1	471,3	502,5	507,5	86,0	557,3	
Botvide 1	429,8	465,5	468,9	90,7	519,5/(26,2)	742,5
Botvide 2	418,2	465,0	468,7			
Bonsarve 2	467,8	511,3	517,7			
Sundre 1	440,1	497,1	499,3		561,5	
Vännes 1	404,8	461,8	466,8	112,8	517,6/(21,2)	
Vamblingbo 1	432,3	471,3	476,5	93,5	525,8/(30,6)	
Gervaldes 1	395,1	452,0	457,9	111,5	506,6/(36,7)	
Ollajvs 1	455,3	502,8	506,3		557,3	
Rorjviken 1	443,2	484,6	488,9	96,4	539,6	
Frigsarve 1	403,1	443,1	447,9	91,2	494,3*495,5/(14,1)	705,0
Näs 1	335,0	407,7	409,9	120,2	455,2/(12,5)	

\*Topp alunskiffer

\*\*exkl dictyonema (alunsk)

har också genomfört ett antal seismiska undersökningar som studerats. Dessa presenteras längre fram i studien (figurer och kartor).

### 3.1 Borrhålsdata

Studien omfattar ett antal borrhål där OPAB genomfört geofysiska undersökningar. Fokus har varit på de borrhål som genererat mycket geofysisk information.

### 3.2 Geofysiska loggar

Tabell 2: Sammanställning av utförda geofysiska mätningar i utvalda borrhål på södra Gotland och vilka loggar som använts för tolkning som presenteras i figurerna 19-20.

Typ av Log	Faludden-1	Gröttingebo-2	Hallbjäns-1	Hamra-1	Kvarne-1	Skåls-1
SP (självpotential), elektrisk ström.	•	•	•		•	•
Caliper (Borrhålsdiameter).	•	•		•	•	•
GR (Gamma Ray), naturlig radioaktivitet.	•	•		•	•	•
Resistivitet (motstånd, elektrisk ström).		•	•		•	
Densitet (Porositet).	•			•	•	
Microlateral (Resistivitet)					•	
Sonic					•	

#### 3.2.1 Borhålsmätning-loggningsteknik

När man prospekterar efter olja, gas och vatten, är det fördelaktigt att man på något sätt utför en djupborrning. Detta görs för att få en bättre uppfattning om måktigheten hos de intressanta lagerföljderna. Information som erhålls under pågående borring är t.ex. vridmotstånd, borrkax (sönderkrossat berggrundsmaterial), borrsjunkningshastighet (Alm, 2012). Dessutom kan man, efter avslutad borring, utföra mätningar i borrhålen som kan ge bättre information om lager- och formationsvariationer. Mätningar som resulterar i form av olika parametrar. Parametrar som kan användas för framtagning av en geologisk modell och karakterisering av bl.a. lerhalt, porositet, densitet, formationsvätskans sammansättning m.m. Med andra ord en indirekt informationskälla om berggrundens uppbyggnad och sammansättning. Dessa mätningar i borrhål kallas för geofysisk borrhålsmätning, eller "logging" (Alm, 2012).

Den vanligaste typen av loggning, och som har utförts i borrhålen på Gotland som undersökts för det här arbetet, är det som kallas för "open hole logging" vilket sker innan man klätt in borrhålsväggen med foderrör av antingen plast, stål eller liknande (casing). Denna typ av loggning sker därför vid de flesta mätningar kräver att mätsonden inte avskärmas från borrhålsväggen eller är i direkt kontakt med denna (Alm, 2012). Då kan man ju ställa sig frågan: varför behövs det loggning om man får upp material (borrkax) i samband med borringen, eller en borrkärna i de fall en kärnborring utförs? Anledningen är att loggning fyller upp informationsgapet mellan en inte så precis provtagning vid rotations- eller hammarborring och den mer kostsamma kärnborringen. Studier av borrkax ger också mindre exakt information om vilket djup borrkaxet exakt kommer från. En erfaren "Log Analyst" kan använda informationen från geofysiska loggar till att, med hjälp av kalibrering och modellering, ta fram så kallade "imaginära" kärnor, dvs. ge information om vilka bergarter som förekommer och hur de är uppbyggda (Alm, 2012).

Det finns dock faktorer, parametrar, som kan påverka mätresultatet och måste tas i beaktning. Faktorn som har störst inverkan på mätresultatet är borringens genomförande och den borrvätska som befinner sig i borrhålet vid mätning (Alm, 2012):

- Borringens genomförande.
- Borrmetod.
- Borrhålets lutning.
- Borrhålets diameter.
- Typ av borrvätska.
- Borrvätskans inträngning i formationen.

Foderrör, cementering och viskositet är andra faktorer som man måste ha i åtanke (Alm, 2012).

#### 3.2.2 Loggningssonder och mätmetoder

Nedan kommer de olika mätmetoderna och mätsonder-



na som använts för tolkningen i den här studien att presenteras och förklaras.

### **Caliper**

Caliper mäter förändringar av borrhålsdiametern. Anledningen är dels att den är enkel att använda men också av ekonomiska skäl då den är en mindre kostsam mätning. En Caliper-mätning kommer att resultera i en kurva som representerar diametern av borrhålet mot djupet. Det man eftersträvar vid all borrning är att diametern ska variera så lite som möjligt från storleken på den borrhålskrona som användes. Ibland kan det förekomma att Caliperkurvan antyder på en diameter som är mindre än borrhålskronans diameter. Detta kan bero på antingen det som kallas för "mud cake" och är i så fall en bra indikator av en porös formation, eller på grund av svällande lermineral s.k. "tight spots". Det är extremt viktigt att borrhålet är i bra kondition så att risken att förlora data vid en framtida radioaktiv mätning minimeras (se vidare beskrivning av GR loggar) (Alm, 2012).

Caliper mätningen ger en indikation om var det finns hårda respektive lösa lager som resulterat i variationer i borrhålets diameter. Allt för stort borrhål, dvs, urspolningar påverkar andra loggars mätresultat och följaktligen kvaliteten på dessa. Caliperloggen har i detta arbete använts enbart som en kontroll av borrhålskvaliteten.

### **Gamma Ray (GR)**

Den naturliga Gamma-loggen registrerar den naturliga radioaktiviteten (gammastrålning) i berggrunden. De radioaktiva elementen är koncentrerade till organiska material, lera och lerskiffer, och härrör i huvudsak från tre element, torium, uran och kalium. Kalium är det klart dominerande elementet som bidrar till gammamätningen. Gammaloggen är den viktigaste loggen för identifiering av olika bergartslager och deras innehåll av lermineral då kalium företrädesvis är associerad med dessa mineral (Alm, 2012).

En så kallad fotoscintillator används för registrering av gammastrålar genom att ett material sänder ut ljuspulser när det påverkas av strålning. När en inkommande gammastråle träffar en Natriumjodidkristall alstras en foton som får fotoelektroden att avge elektroner. Antalet elektroner ökas sedan efterhand som de träffar fler fotoelektroder. En anod samlar slutligen upp dessa och den resulterande strömmen är proportionell mot energin på den inkommande gammastrålen. Gammastrålningen mäts efter antal träffar per sekund som sedan omvandlas/ kalibreras efter standard enheten API (American Petroleum Industry) (Alm, 2012).

Då skiffer har en hög lerhalt kommer det också att ge ett högt utslag på gammaloggen (oftast mellan 100–200 API). På så sätt kan man få en uppfattning om litologi. Man kan på så sett avskilja olika sedimentära lager från varandra, vilket gör den användbar för lateral korrelation av olika strata. På grund av alla dess

fördelar har jag också valt att ha mitt fokus på gamma ray- loggar, med viss jämförelse med andra loggar till exempel SP.

GR-loggen har varit viktig i det arbete som gjorts då den använts för både skapandet av en typ-logg samt för en lateral korrelation av profilerna A–B och C–D (se Fig 10).

### **Självpotential (SP) (elektriska loggar)**

I samband med en borrning av ett borrhål där ett konduktivt borrhåls slam använts uppkommer det en så kallad självpotential. En SP-logg registrerar dessa variationer av självpotentialen. Vid mätning av SP använder man sig av en enkel mätsond som endast innehåller en elektrod. Förutom sondens elektrod behöver man också en, vid markytan placerad, elektrod. Skillnaden mellan de två elektroderna registreras vid en SP mätning som potentialskillnad. Potentialen mäts i millivolt och presenteras som förändringar i – och + millivolt, (ingen nollpunkt på kurvskalet). Skulle SP kurvan visa ett utslag, indikerar det på en permeabel zon. Då det inte finns något absolutvärde på SP-kurvan, tolkas kurvan beroende på variationen i millivolt relaterad till "base line" (Alm, 2012).

För att kunna definiera olika zoner registrerade som fluktuationer av kurvan bestäms en "base line". Denna "raka" linjen förekommer framför en tjock känd lerskifferformation där ingen variation av SP-kurvan uppträder, därav "shale line" (hög lerhalt). På samma sätt kan en linje för rena sandstensavschnitt skapas (Alm, 2012).

SP-loggen används främst till att:

- Lokalisera permeabla zoner.
- Korrelation mellan borrhål.
- Indikera lerinnehåll.
- Volymberäkning av lerinnehåll.

Både SP och GR tillhör de så kallade "Lithology Logs".

### **Resistivitet (elektriska loggar)**

Resistans är förmågan i en formation eller bergart att motstå en passerande elektrisk ström. Denna resistans hos en bergart/formation registreras med hjälp av resistivitetsloggar. Enheten för resistans anges ohm, medan resistivitet som används inom loggning anges i ohms  $m^2/m$  (Alm, 2012).

Anledningen till att resistivitetsloggarna utvecklades var för bestämmande av områden med kolväten. Då nästan alla bergarter fungerar som isolatorer är det porvätskan i dessa bergarter som då blir ledande. Undantaget är då kolväten finns närvarande vilket leder till att formationer då blir högresistiva. Om det omvända händer, att låga resistivitetsvärden uppvisas är det troligt att saltvatten finns närvarande i formationen (Alm, 2012).

För resistiviteten gäller det att denna kommer förändras beroende på hur djupt in i formationen mätsonden klarar av att mäta. Med andra ord, om resultaten är representativa för den omgivande, opåverkade zonen

eller inte (Alm, 2012).

**Microlateral**, kallas oftast för mikroresistivitet och registreras av en så kallad Dip Meter sond som oftast består av fyra mikroresistivitets elektroder. Dessa vinkelräta plattor, som pressas ut mot borrhållsväggen, används för att registrera konduktivitets- och mikroresistivitetsvärden i formationerna, för att kontinuerligt registrera lutning och riktning av formationerna runt borrhålet. Via elektroderna sker en mycket detaljerad resistivitetmätning av borrhållsväggen. Resultat presenteras i en DIP Meter logg. Bestämningen av mikroresistiviteten sker i en vertikal upplösning av endast ett fåtal mm. Följaktligen leder det till att en stor mängd data insamlas och proceseras, och slutligen kan lutning och riktning presenteras. På grund av att resistiviteten registreras krävs att mätningen sker i en vattenbaserad mud, vilket också är en naturlig begränsning för denna mätmetod. Sonden används oftast då strukturgeologin behöver undersökas (Alm, 2012).

### **Porositetsloggar**

Om intresse för utvinning av en vätska eller gas finns, är porositeten i den tänkta formationen en av de viktigaste parametererna att bestämma. Med hjälp av porositeten kan man beräkna om en produktion är ekonomiskt lönsam. Densitetslogg och akustiklogg (sonic) brukar gemensamt kallas för porositet-litologiloggar eftersom de ger båda information om litologi och porositet (Alm, 2012). Även om i princip det är två olika loggtypen som brukar användas för att bestämma en formations porositet, kommer bara densitetsloggen att förklaras mer ingående längre fram på grund av det är den enda loggtypen jag hittade för de aktuella borrhålen.

Ingen av loggarna mäter porositeten direkt. Däremot kan man utifrån dessa två loggar beräkna porositeten. Densitetsloggen använder sig av radioaktivitet vid mätningarna medan sonicloggen mäter ljudvågsutbredningen. Det gäller också att ha i åtanke den direkta kopplingen mellan porositet och densitet samt kopplingen mellan porositet och ljudvågsutbredningshastigheten i en formation (Alm, 2012).

Crain (1986) har nämnt följande viktiga användningsområden för porositets- och litologiloggarna:

- Korrelation av formationer.
- Beräkning av total porositet, effektiv porositet och vattenfylld porositet.
- Beräkning av formationstyp och/eller typ av formationsvätska.
- Beräkning av bergparametrar för geofysiska studier.
- Stratigrafisk tolkning.
- Identifikation av permeabla zoner.

**Sonic**, eller akustiska mätningar grundar sig på kunskapen om utbredningen av elastiska vibrationer genom formationer och borrhållsvätska. Den typ av vågor som studeras inom loggning är så kallade kompressionsvågor. Detta på grund av att den andra sortens vågor, så kallade skjuvningvågor, inte kan uppträda i väts-

kor eller gaser (Alm, 2012).

Sonicloggen används numera när man behöver bestämma t. ex. porositet eller litologi men också för att lokalisera sprickor i berggrunden. Loggen mäter hur lång tid (i mikrosekunder) det tar för en akustisk våg att färdas ett visst avstånd av bergmassan parallellt med borrhålet. Rådande formationens porositet och litologi styr i högsta grad den tid som fortskrider för att vägen ska färdas ett bestämt avstånd (Alm, 2012).

Genom bergarter med hög densitet, t.ex. kalksten, färdas ljudvågen snabbare. Tvärtom gäller för bergarter med låg densitet, t.ex. bergarter som har porutrymmen fyllda med gas eller vatten (Alm, 2012).

**Densitetslogg** används för registrering av densitetskillnader i bergmassan (elektrondensiteten) runt borrhålet används en sond som innehåller en aktiv radioaktiv gammakälla, oftast cesium 137 (Cs-137), som sedan presenteras i en densitetslogg (Alm, 2012).

Gammastrålarna som sänds ut i massan runt borrhålet kolliderar med elektronerna i formationen. Gammastrålningen kommer då att förlora lite av sin energi vid varje kollision och slutligen absorberas helt. Mätsonden registrerar de kvarvarande gammastrålar som inte absorberats. Detektorerna (oftast 2 olika) som finns på sonden är placerade med cirka ½ meters mellanrum ovanför den radioaktiva källan. Det är viktigt att detektorerna skyddas genom avskärmning från källan för att minska risken för direkt inkommande gammastrålar (Alm, 2012).

Den övre detektorn registrerar och räknar gammastrålarna som sedan utgör ett mått på formationsdensiteten. Antalet inkommande gammastrålar är omvänt proportionellt till formationens elektrondensitet vilket i sin tur är proportionellt mot den verkliga formationsdensiteten. Borrhållseffekter rättas till av sondens andra detektor. Det är ytterst viktigt att en kalibrering mot en känd densitet sker innan sonden används. (Alm, 2012).

Förhållandet mellan skrymdensiteten och porositeten i en formation kan beskrivas som (Alm, 2012):

Skrymdensiteten ( $\rho_s$ ) = porositet ( $\phi$ ) x vätskedensiteten ( $\rho_v$ ) + (1 -  $\phi$ ) x korndensiteten ( $\rho_k$ ). Detta gör det möjligt att beräkna formationens porositet utifrån de erhållna densitetsvärdena. Om ovanstående förhållande löses ut för porositeten erhålls (Alm, 2012):

$$\text{Porositet } \phi = \rho_k - \rho_s / \rho_k - \rho_v$$

Där:

$\rho_k$  = matrix eller korndensiteten.

$\rho_v$  = vätskedensiteten.

$\rho_s$  = skrymdensiteten vilken mäts med mätsonden, inkluderar alltså både porer och korn.

Eftersom densiteten är beroende av porositeten i formationen enligt tidigare beskrivning kan densitetsloggen också användas som porositetslogg enligt ovanstående samband. Då densitetssonden använder sig av en arm för att pressa ut sonden mot borrhållsväggen registreras en så kallad, en-arms caliper, som presenteras i den slutliga loggutskriften. En registrering samt utskrift av den naturliga radioaktiva strålningen från formationen är också vanlig vid

användning av densitetsloggen (Alm, 2012).

### 3.3 Borrhålskorrelation

Uppbyggnaden av den ordoviciska lagerföljden på södra Gotland har korrelerats lateralt mellan olika djupa borrhål med hjälp av resultaten från utförda borrhålsloggningar, främst har resultaten från gamma ray loggar använts för korrelation mellan borrhål medan andra loggar även tolkats för en mer detaljerad karaktärisering av avsnittet. Två tvärprofiler (Fig. 10) har sammanställts. En profil i NO–SV riktning (A–B) och en i NV–SO riktning (C–D) har utgjort basen för den laterala korrelationen av den ordoviciska lagerföljden som visar i två tvärprofiler (Fig. 10 och 19–20).

### 3.4 Seismik

Seismiska undersökningar har genomförts på många platser över södra Gotland. Dessa ger en mer övergripande bild av den underliggande berggrundens uppbyggnad. Processerad 2D-seismik presenteras som vertikala seismiska sektioner på två olika sätt:

- Tidssektioner (har djup skalan enheten tid, vil-

ket är tvåvägstim). (Djupet till olika reflektioner kan beräknas med hjälp av hastighetsfunktioner. En tidssektion är vanligen inte geometriskt korrekt.)

- Djupsektioner (Har djup skalan enheten meter). (Det djup som svarar mot olika tider har beräknats med hjälp av hastighetsfunktioner. En djupsektion är vanligen geometriskt korrekt).

Tolkning av seismisk data omfattar två moment :

- Strukturell analys - (beskriver markens uppbyggnad i strukturgeologiska termer: antiformaler (domer), synformer, förkastningar). Ett tredimensionellt betraktelsesätt är viktigt: reflektorer är ytor.
- Stratigrafisk analys - (sekvansanalys är en metod för regional stratigrafisk analys och baserar sig på indelning av lagerföljder i sedimentära sekvenser som avgränsas av inkonformiteter).

Dessutom är den ett bra komplement till de data som man får från borrhålsundersökningar. För att få en ännu tydligare beskrivning av den seismiska profilen är det till fördel om denna kompletteras med till exem-

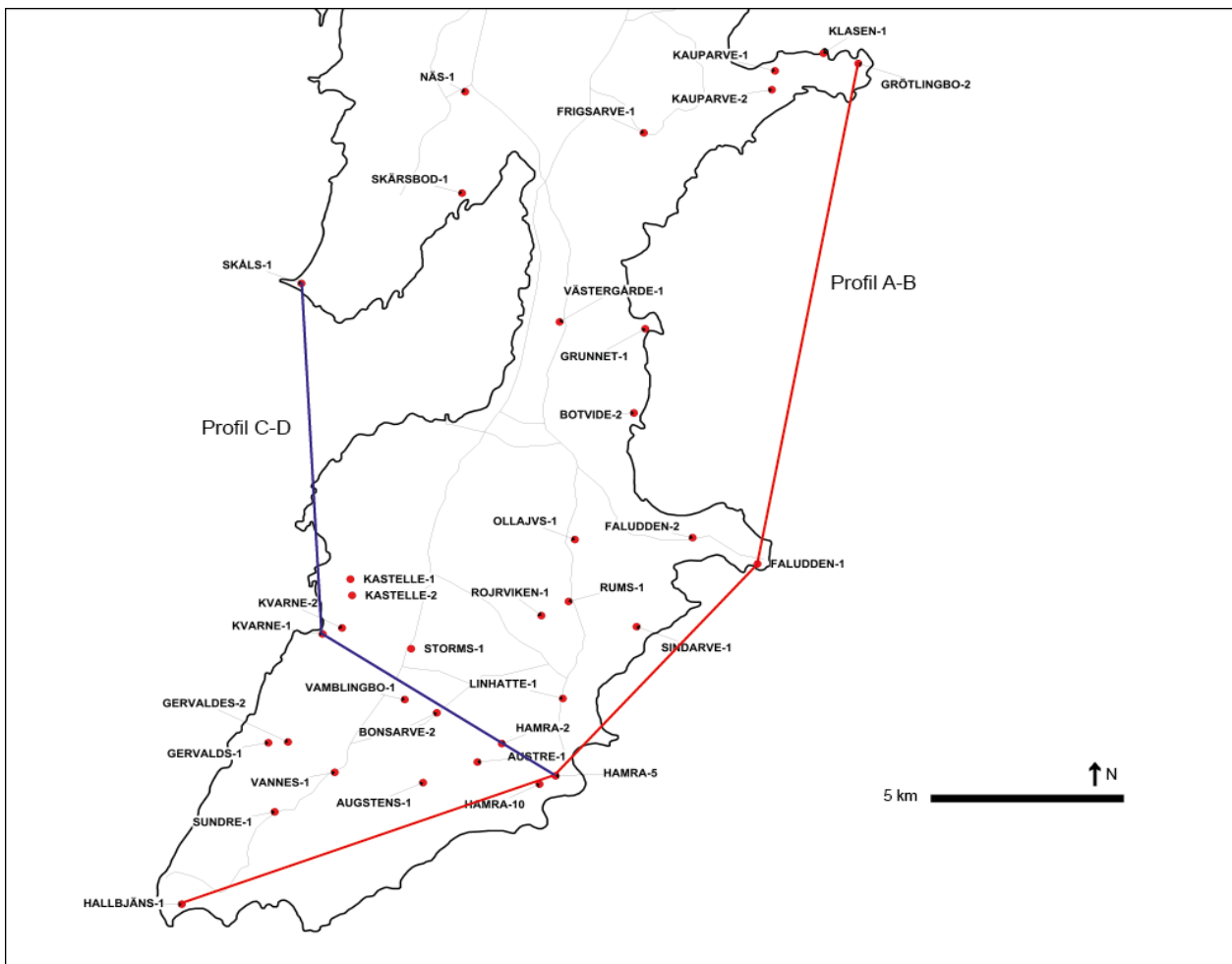


Fig 10: Karta över södra Gotland som visar läget för de tolkade profilerna A–B respektive C–D, som använts för korrelation.

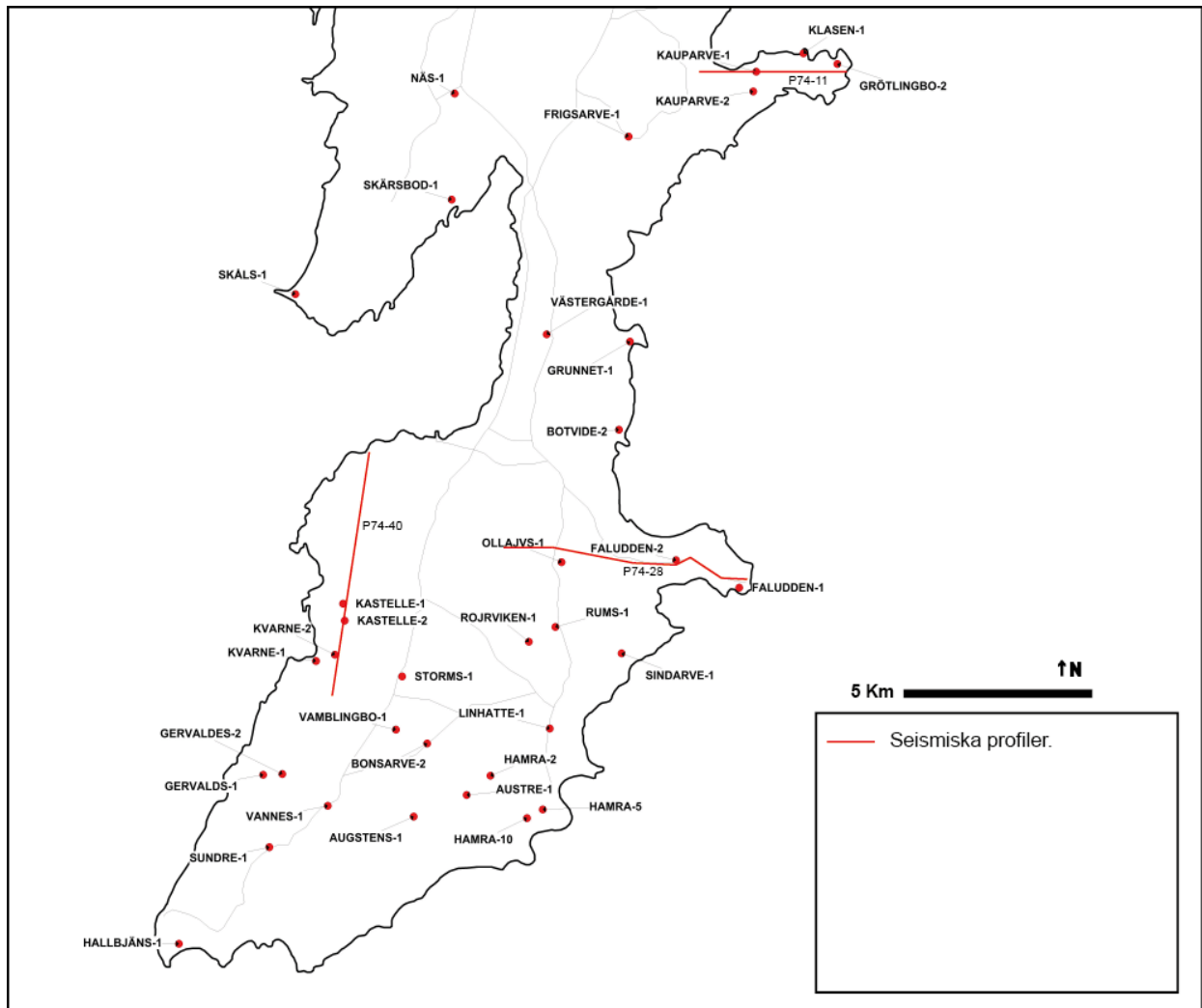


Fig. 11. Karta över södra Gotland som visar de studerade seismiska profilers läge och riktning.

pel ”Vertical Seismic Profiling” (VSP), vilket kommer att ge en bättre vertikal upplösning. Ovan visas en karta (Fig. 11) på de profiler som har valts ut för det här arbetet. Anledningen till att fokuset ligger just på dessa tre är helt enkelt att de ger mest information om geologiska strukturer, men också för att de ligger relativt långt ifrån varandra och i olika riktningar. De tre utvalda profilerna betecknas som linje P74-40, som är belägen på den västra sidan av sydligaste Gotland, i närheten av Kvarne-2, med en N-S riktning, och linje P74-11 som befinner sig i den mest nordostliga delen av södra Gotland, nära Grötlingbo-2 med en V-O riktning. En tredje profil, linje P74-28, har också valts ut, och ligger på den östra sidan av södra Gotland och sträcker sig ända ut till Faludden-1 med en riktning V-svagt SO.

## 4 Tolkning och beskrivning

### 4.1 Lokala berggrundsförhållanden-södra Gotland

För den generella beskrivningen av berggrunden på södra Gotland används en opublicerad borrhålsrapport från OPAB (1973) för borrhålet Hamra-1. Borrhöningen ligger i den sydöstligaste delen av Gotland nära kusten, cirka 4 km söder om byn Hamra. Närbelägna borrhål är Faludden-1, cirka 8 km nordöst från Hamra-1, och Kvarne-1 som ligger ungefär på lika stort avstånd åt nordväst. Detta är också OPABs djupaste borrhål på Gotland, vilket ger en god bild av den totala kambrosiluriska lagerföljden ända ner till urberget (basement) på Gotland, (Nilsson, 1973). Djupen som anges i kommande figurer är angivna i djup under havsytan och de olika litologiska gränserna är baserade på gränser identifierade i de geofysiska loggarna (Nilsson, 1973).

Lagerföljden i borrhålet är följande. Från 22 meter ner till 487 meters djup påträffas silurisk mörk- och lersten med mindre intervall med kalksten. Under

borrningen detekterades gas i siluriska lager, och mer intressant fann man också spår av tyngre kolväten (Nilsson, 1973).

Under silur kommer de ordoviciska lagren som har en mäktighet på ca 87 meter, och består av kalksten med lager av röd lersten, följt av ett mer lerigt parti med rödbrun lerskiffer och en kalkstensenheter med inslag av bentonitlager. Missfärgning av olja påträffades på 565 till 570 m djup. Eftersom den ordoviciska enheten karaktäriseras av relativt täta kalkstenslager brukar man dela in den i tre kalkstensformationer, Klasen-, Kvarne- och bentonitförande kalksten. Den ordoviciska lagerföljden är, i borrhålen Faludden-1 och Kvarne-1, 78 meter respektive 85 meter mäktiga. Det ska dock tilläggas att ibland är den siluriska-ordoviciska lagergränsen svår att bestämma på grund av att de äldre delarna av silur ofta är inlagrade med lager av kalksten vilket ger en gradvis övergång mellan dessa två lagerföljder (Nilsson, 1973).

Den kambriska lagerföljden, eller rättare sagt mellan- och undre kambrium, som ligger under de ordoviciska lagren har en mäktighet på 226 meter i Hamra-1, som är nästan samma som i Faludden-1 medan i Kvarne-1 är den 221m. Lagerföljden karaktäriseras av välsorterade kvartsareniter, där kvartsinnehållet ofta överstiger 90 %. En mindre mängd matrix bestående av lera finns i sandstenen. Denna matrix fungerar också som tunn laminering i sandstenen. Sandstenen är

i varierande omfattning cementerad med kisel och ibland med spridda förekomster av kalcit. Mängden sekundärt utfälld kisel ökar generellt med djupet. Den mest kända enheten inom kambrium är den så kallade Faluddensandstenen (mellankambrium), som i Hamra-1 har en mäktighet på 30,5 meter och bedöms ha goda reservoaregenskaper. I vissa nivåer i den kambriska sandstenen upptäcktes mindre spår av olja. Dessa bedömdes utifrån analys av de elektriska loggarna dock inte som intressanta för vidare tester (Nilsson, 1973).

Det prekambriiska urberget påträffas på 791 meter djup i Hamra-1. Urberget här har samma röd-rosa färgade granit som återfunnits i andra borrhålen på södra Gotland. Sammansättningen består huvudsakligen av kvarts och fältspat, som lokalt är nedbrutna till vit, mjuk kaolinit. Som sekundära mineral finns biotit och muskovit (mörk och ljus glimmer mineral). Den allra översta delen av urberget är utsatt för vittring och består nästan uteslutande av biotit (Nilsson, 1973).

## 4.2 Djupkartor

Tre isokartor som visar djupet till toppen av den ordoviciska, kambriska och prekambriiska berggrunden har tagits fram i den här studien. Kartorna har framställt

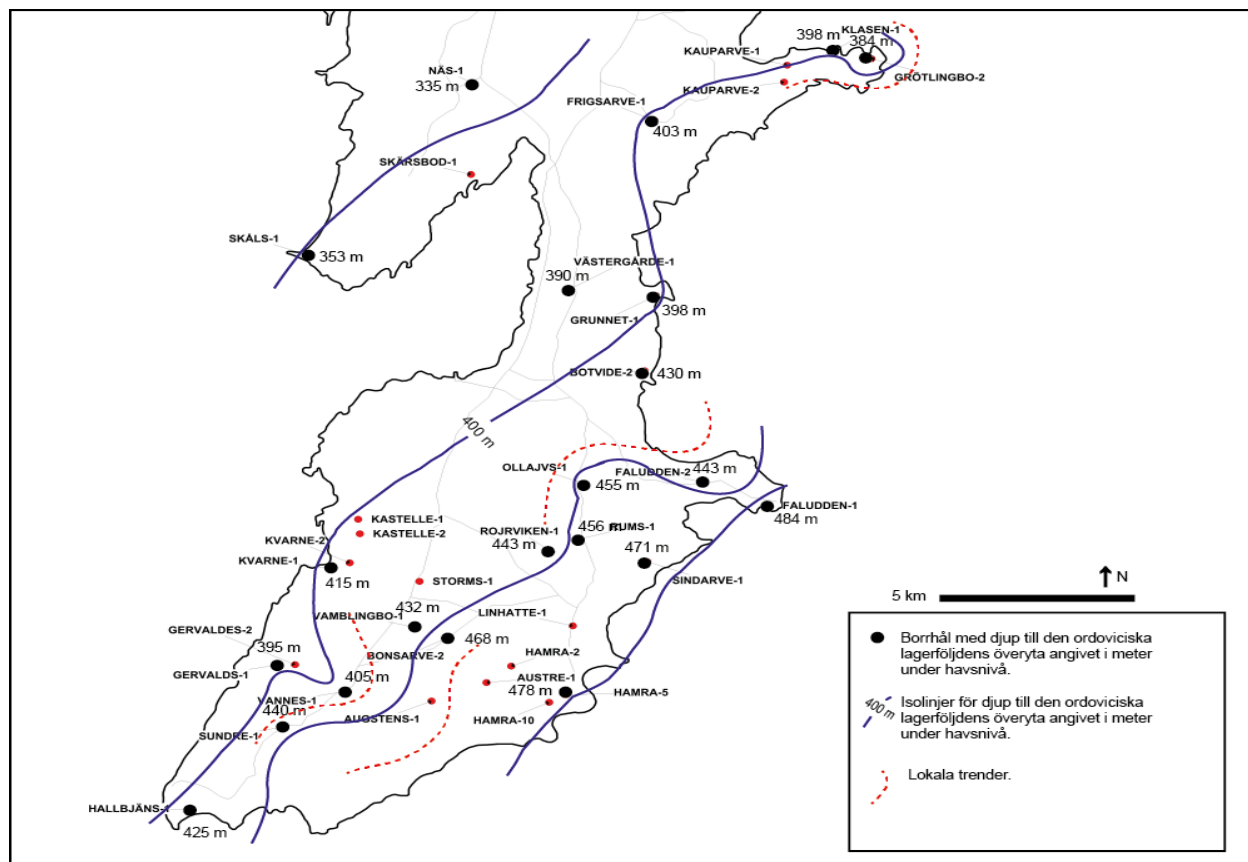


Fig. 12: ISO-karta med djup till topp ordovicium (topp Klasenkalksten) angivet i meter under havsytan. Information hämtad från OPABs och SGUs borrhål.

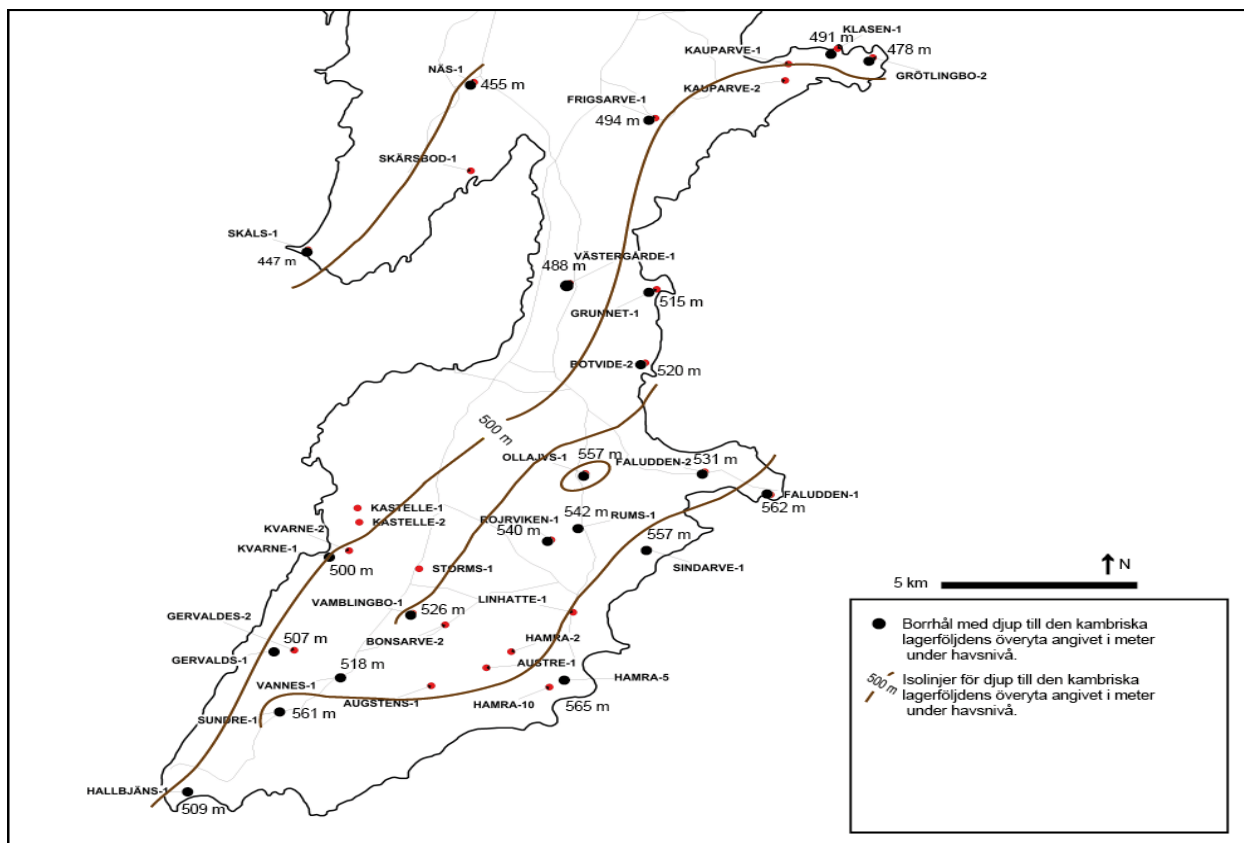


Fig. 13: ISO-karta med djup till topp kambrium angivet i meter under havsytan. Information hämtad från OPABs och SGUs borrhål.

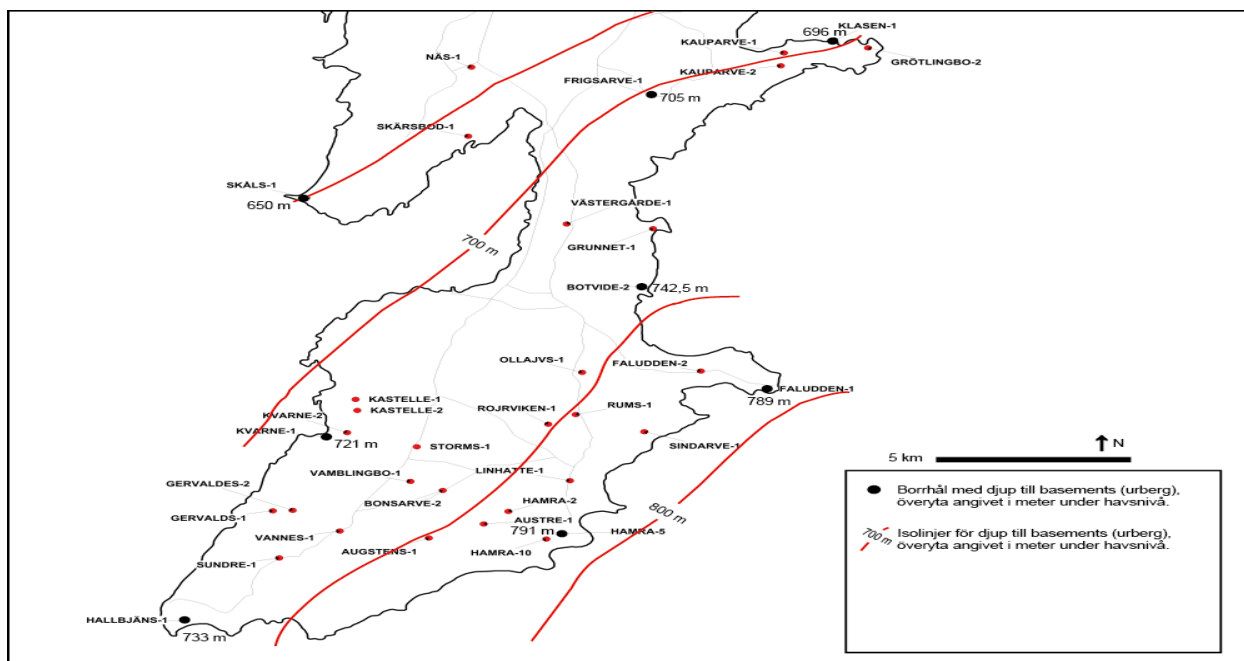


Fig. 14: ISO-karta med djup till topp urberg angivet i meter under havsytan. Information hämtad från OPABs och SGUs borrhål.

med stöd av information från OPABs borrhållningar och borrhållsloggar. Kartorna visar djupet till toppen av

respektive lager och redovisas i figurerna 12–14. Utifrån dessa djupkartor kan man konstatera att de av-

speglar den dominerade svaga lutningen av lagerserien mot S–SO. De uppgifter som legat till grund för dessa kartor är inte kompletta och djupdata för vissa lager i ett antal borrhningar saknas, då syftet med borrhningarna var att detektera gas och olja, och man har avbrutit borrhningen i vissa borrhhål då icke önskad resultat utblev. Från isokartorna kan man ändå upptäcka förekomsten av vissa lokala trender, anomalier. Dessa anomalier skulle kunna orsakas av lokala geologiska förlopp, som till exempel förkastningar. En annan möjlig förklaring kan vara förekomsten av så kallade mounds, slamhögar, (se avsnitt 4.3).

För lateral korrelation har man utgått från indelning av den ordoviciska lagerföljden som kan göras i Kvarne-1. De identifierade underenheterna, speciellt i ordovicium, har visat sig kunna följas lateralt till övriga borrhningar som ingår i profilerna A–B samt C–D. Geofysiska loggar som använts vid Kvarne-1 är gamma ray, sonic och mikrolateral (resistivitet) medan för profilerna A–B samt C–D enbart gamma ray loggar (se förklaring och figurer längre ner).

### 4.3 Seismiska profiler

Tre seismiska profiler utförda av OPAB har valts ut för att undersökas och korrelerats med data från borrhningar. Dessa borrhningar är Grötlingbo-2, Faludden-2 och Kvarne-2, från södra Gotland. Resultaten presenteras i figurerna 15–17. Vid saknad av data vid en eller flera lokaler, har i största mån uppskattningar gjorts i form av hastighetsanalyser som är baserade på djup-

uppgifter från närliggande borrhhål. Beräknade gånghastigheter och intervallhastigheter är medelhastigheter och bör betraktas mer som en riktlinje än absolut korrekta. Hastigheter har beräknats för alla tre profilerna.

En annan viktig aspekt som man bör ha i åtanke är att dessa seismiska undersökningar utfördes 1974, vilket med dåtidens teknik inte ger en lika detaljerad bild som med dagens teknik och utförande.

Trots att seismiken är gammal är det ändå möjligt att tydligt identifiera gränserna mellan de olika sedimentära lagren (från silur ända ner till urberg). I vissa fall kan man till och med urskilja de tre kalkstensenheter Klase-, Kvarne- och Bentonitkalksten, som på profilen som utförts i nord östra delen och kallas för linje P74-11 (Se figur 15). Dessa stämmer också överens med borrhålsdata gällande djup. Man kan också se ett område som man skulle kunna tyda som revstrukturer, så kallade mounds (gulstreckad linje). Dessa uppträder på de seismiska profilerna i form av domer. Från hastighetsberäkningar (medelhastighet på 2 550 m/s) kan man göra en uppskattning av strukturernas storlek, både horisontellt och vertikalt. Som exempel Linje P74-11, nära Klase-1 borrhhål, hittas en struktur med en beräknad horisontell utbredning på mellan 300–400 meter och vertikalt ca 60–65 meter mäktiga (se figur 15). Härmed bekräftas förekomsten av dessa revstrukturer i övreordovicium som så väl har beskrivits i tidigare arbeten av t.ex. Sivhed & Erlström m.fl., 2004.

Linje 11, W-E

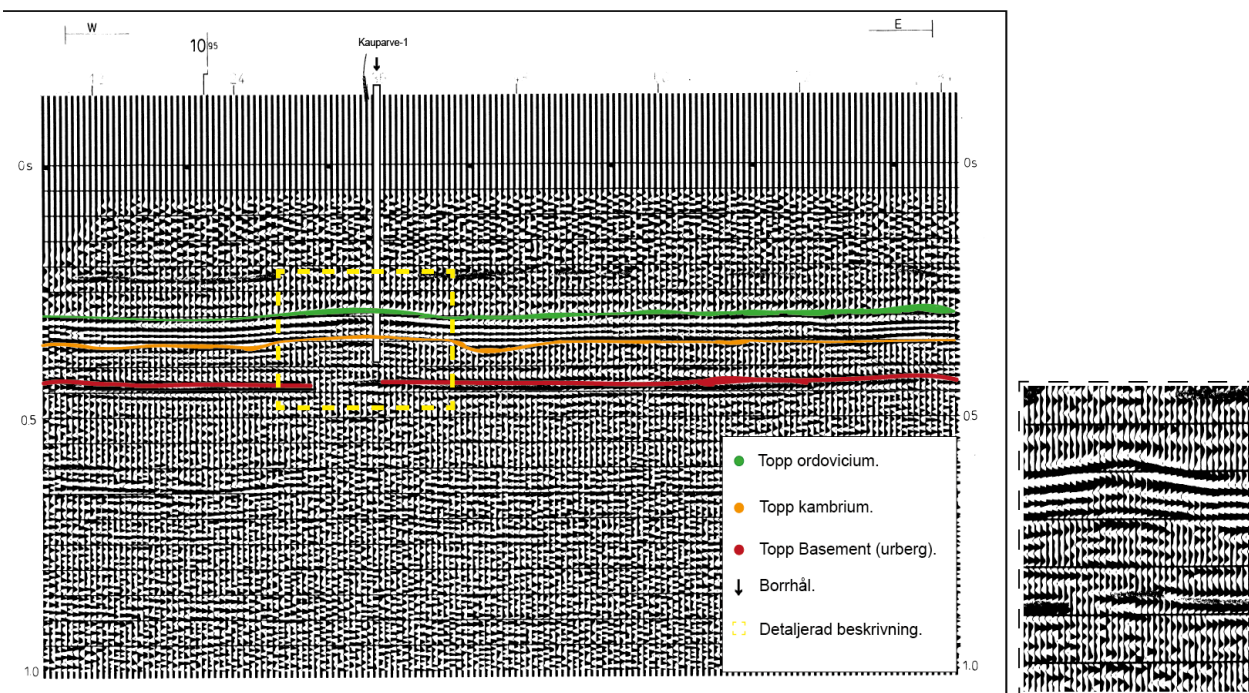


Fig. 15: Seismisk profil över linje P74-11. Toppen till de olika lagergränserna är märkta som grö-, orange- och röd linje. Gulstreckad linje vid borrhålet Kauparve-1 anmärker en typisk ordovicisk revstruktur (mound). Liten bild till höger är en förstoring av just den strukturen. Strukturellt likartad med moundstrukturer beskrivna av Sivhed m.fl. (2004).

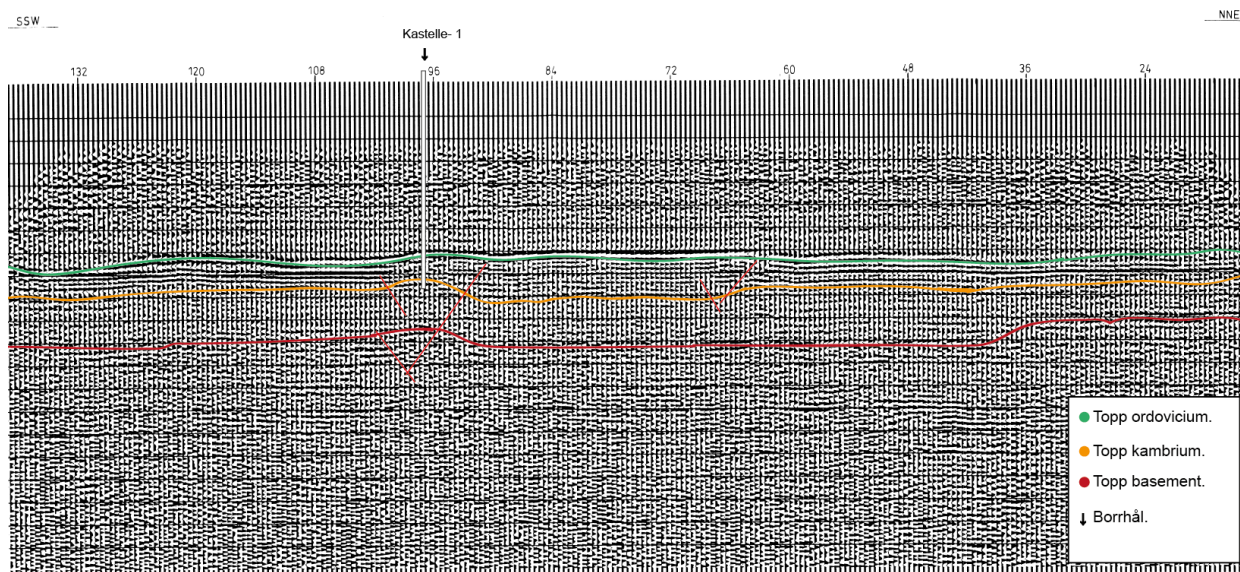


Fig. 16 : Seismisk profil för linje P74-40.

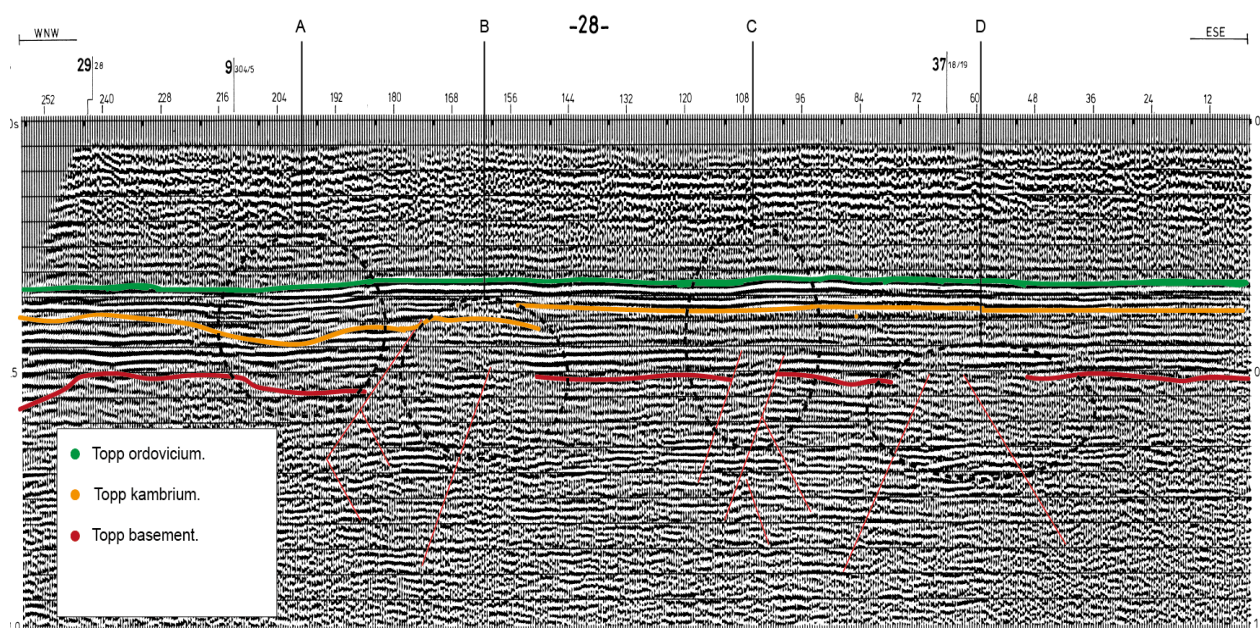


Fig. 17: Seismisk profil för linje P74-28. Inringade områden A-D anger partier där förkastningar förekommer.

De seismiska profilerna visar också allmänt avsaknaden av större tektoniskt orsakade strukturer, ex. förkastningar. Lokalt finns dock mindre sådana som t.ex. på profil P74-40 vid cdp 96 (borrhål Kastelle-1).

Sammanfattningsvis visar de seismiska profilerna att den sedimentära berggrunden på södra Gotland är relativt homogent uppbyggd, vilket har underlättat för att bekräfta olika lagergränser, strukturer och korrelation med borrhålsdata. En beräkning av borrhålsdjupet för olika reflektorer i profilen P74-40 stämmer väl överens med data från borrhålet Kastelle-1. Vid beräkning av djupet har en gånghastighet på 2 700 m/s och

en tvåvägstim på 250 m/s använts. Om man sedan sätter in dessa siffror i  $S = V * T$  så får man fram ett beräknat djup på ca 675 meter till basement (urberg) i området kring Kastelle-1.

#### 4.4 Beskrivning och korrelation av den ordoviciska sekvensen

Den laterala korrelationen som redovisas i profilerna A–B och C–D baseras på en typlogg. Borrhålet som valdes för den här typloggen är Kvarne-1 som är beläget på den västra delen av södra Gotland. Anledningen



till detta är bland annat att borrhålet når ner till urberget, och är väldokumenterade av OPAB.

En annan anledning är att det har utförts flera olika loggar med bra resultat, och att det finns bra seismiska undersökningar gjorda i anslutning till borrhningen, som kan jämföras med loggarna. Av dessa geofysiska borrhålsloggar valdes 3 stycken (gamma ray, sonic och mikrolateral) som användes för att ge tydligare och säkrare bedömning av lagerföljden. Dessa är nämligen formationerna Kvarne-, Klasen- och Bentonitkalksten samt den underliggande Faluddensandsten, med en gemensam mäktighet på ca 120 meter i borrhålet Kvarne-1. Samtliga djup är angivna i meter under borrhplattformens referensnivå, så kallad Kelly bushing (KB).

Utifrån de olika loggarna får man fram vissa intressanta och viktiga områden som bör diskuteras och förklaras mer ingående. Dessa områden betecknas i figur 18 som A–D. Men innan det börjar man med att identifiera så kallade rena sand- och lerlinjer, eller trender, som underlättar för tolkning gällande gamma ray loggen. I typloggen vissas sandlinjen som en blå markering medan lerlinjen, som också visar en trend, är rödmarkerad. Trenden som syns i loggen, och anmärks i borrhålsrapporten, sker på grund av en tilltagande lerhalt i bergarterna med ökad djup inom ett visst parti. Högre lerhalt ger högre utslag i en gamma ray kurva.

## 5 Resultat och diskussion

### 5.1 Avsnitt A - D

A: Avsnitt A överlagrar den mellankambriska Faluddensandstenen och utgör den understa delen av den så kallade Bentonitkalkstenen (avsnitt A och B i Fig.18) och tillhör den undre delen av ordovicium. Avsnitt A börjar på ett djup av ca 505 meter. Avsnittet är svårt att definiera och tolka och en korrelation och komplettering med information från borrhålet Skåls-1 krävs. Från borrhål Skåls-1 finns borrhkärnor (från djup som representerar motsvarande avsnitt A i Kvarne-1) som presenteras och beskrivs i borrhålsrapporten. I borrhål Kvarne-1 har avsnitt A en mäktighet av endast ett fåtal meter, 5–6 meter och karaktäriseras av höga till extremt höga Gamma Ray värden (>200 API). De höga GR-värdena orsakas av förekomsten av glaukonit- samt ett skifferlager, så kallad Alunskiffer, och som har hittats vid andra borrhningar på södra Gotland. Alunskiffer är sedan tidigare känd på Öland och framför allt på södra och mellersta Öland. På Öland överlagras skiffern (Dictyonemaskiffern) av Djupvik- och Köpingsklintformationen som är upp till 8 meter mäktig på södra Öland. Utifrån detta skulle mycket väl alunskiffern på södra Gotland kopplas till skiffern på Öland. Dock är alunskiffern på södra Gotland mer konglomeratisk (noduler) jämfört med motsvarande sekvens på Öland.

Som tidigare nämnts förekommer det extremt mycket glaukonit i avsnitt A. Enligt borrhålsrapporten

från borrhningen i Skåls-1 utmärker sig dessa lager som gröna, medelhårda kalkstenar som övergår till glaukonitisk sandsten vid 450–451 meters djup. Detta djup motsvarar i Kvarne-1 ett avsnitt på 505 meters djup. Utifrån loggarna och borrhålsrapporter från både Skåls-1 och Kvarne-1, samt tidigare publikationer om Öland (Stouge, 2004), tolkas partiet enligt följande: inledningsvis kalksten med ökande glaukonithalt som övergår till extremt höga halter av glaukonit. Vidare övergår detta lager till vad som tolkas som ett tunt alunskifferparti (<1 meter mäktigt). Avslutningsvis övergår alunskiffern till glaukonitisk sandsten vid ett djup av ca 510 meter i Kvarne-1. Gränsen mellan ordovicium och mellankambrium ligger på ca 512 meters djup.

Osäkerheten gällande avsnitt A är relativt stor. Ett exempel är att någon absolut datering inte finns tillgänglig, vilket hade kunnat framleda till en mer detaljerad indelning av formationen.

A - B: Ovanför avsnitt A och innan avsnitt B finns ett ca 10 meter mäktigt parti (ca 495–505 meters djup) med väldigt låga gamma ray värden (ca 20–40 API) i typ loggen. Detta parti tolkas baserat på Sonic och resistivitets data som ett avsnitt med ren, homogen och tät kalksten. Borrhålsrapporten med beskrivningar av borrhkax visar förekomst av styloliter men annars antyder den inget annorlunda gällande detta parti än vad som beskrivits ovan.

B: Avsnitt B finner man på 465–495 meters djup, alltså ca 30 meter mäktigt och tillhör den så kallade Bentonitkalkstenen. Den karaktäriseras av gradvis ökande gamma ray värden med tilltagande djup, som indikeras av den röda linjen i fig. 18. GR-kurvan har sitt minimum i början av partiet vid ca 465 meter med API-värden på ca 20. Kurvan når sitt maximum vid slutet av avsnitt B, ca 495 meters djup med ett värde på ca 140 API. Lerinnehållet har med andra ord ökat markant över detta intervall.

Enligt OPABs borrhålsrapport från Kvarne-1 dominerar det ca 30 meter mäktiga partiet av: alternerande vit till brunaktig kalksten med enstaka inbäddade lager av lera och ljusgrön – ljusbrun bentonit. Den ökande halten av lera och bentonit (vulkanisk lermineral) orsakar de successivt ökade värdena på gamma ray kurvan. Sonic kurvan uppvisar relativt låga värden (mellan ca 160–180 mikrosek./fot) med små variationer vilket indikerar ett homogent parti med relativt hög densitet.

Mikrolateralkurvan uppvisar också relativt låga värden. Dock förekommer det enstaka partier med mycket högre värden vilket gör kurvan relativt toppig på vissa ställen i avsnitt B. Gränsen mellan B (Bentonitkalksten) och avsnitt C (Kvarnekalksten) ligger vid ca 465 meter.

C: Detta avsnitt utgörs av den så kallade Kvarnekalkstenen och är endast ett fåtal meter mäktig (mellan ca 455–465 meters djup). Dess övre gräns är relativt svår att definiera enbart utifrån gamma ray kurvans utseende. API värdet sjunker från ca 200 vid 455 m djup, ner till ca 40 API vid 460 meter, för att nästan

direkt efteråt hamna på nästan 200 API vid ca 461 meter. Samma förlopp med relativt snabba och stora förändringar kan man följa i både sonic- och resistivitetloggarna. Sonicloggen visar värden på uppemot 400 mikrosek./fot för att efter bara någon meter djupare ligger värdet på strax över 100 mikrosek./fot. För samma intervall gäller det omvända för mikrolateral-kurvan. Den fluktuerar mellan långt under 10 ohms-m<sup>2</sup>/m och strax över 100 ohms-m<sup>2</sup>/m. Varierande halter av t.ex. lera, vatten eller olja och gas kan orsaka dessa snabba förändringar.

Enligt OPAB karaktäriseras Kvarnekalkstenen (avsnitt C) av dessa typiska logsignaturer, speciellt i de elektriska loggarna.

D: Avsnitt D ligger mellan 422 meter och 455 meters djup (ca 33 meter mäktig) i borrhål Kvarne-1 och tillhör Klaskalkstenen. Dess övre gräns (vid ca 422 meter) definierar också gränsen mellan den siluriska och den ordoviciska lagerföljden.

Samtliga geofysiska loggarna indikerar att nästan hela avsnittet är relativt homogent uppbyggt eftersom endast små variationer i logsignalerna förekommer. Värdena på gamma ray kurvan pendlar mellan 40 och

50 API för huvuddelen av avsnittet förutom de sista 5–6 metrarna. Enstaka toppar når dock upp till ca 80 API.

Enligt borrhålsrapporten domineras Klaskalkstenen inledningsvis av brun-mörkröd brun till gråaktig kalksten med vissa inslag av mägerl och bentonit samt vit lera. Dessa inslag av bentonit och lera syns på gamma ray kurvan som enstaka toppar på ca 80 API.

Sonic-kurvans relativt låga värden indikerar ett område med högre porositet medan mikrolateral-kurvans låga värden troligen beror på ej fyllda porutrymmena.

I slutet av avsnitt D, ca 5–7 meter innan gränsen till avsnitt C, skiljer sig värdena på alla tre loggar jämfört med tidigare förlopp. Gamma ray kurvan börjar nu uppvisa en markant stigande trend mot väldigt höga API värden inom bara ett fåtal metrar. Den första snabba ökningen sker strax innan ett djup av 450 meter, och når upp till ca 135 API. Den når sin topp på ca 200 API redan vid ca 455 meter.

För samma parti på avsnitt D ökar sonicvärdena markant från knappt 50 till ca 340 mikrosek./fot, medan resistiviteten sjunker till väldigt låga värden (strax under 10 ohms-m<sup>2</sup>/m).

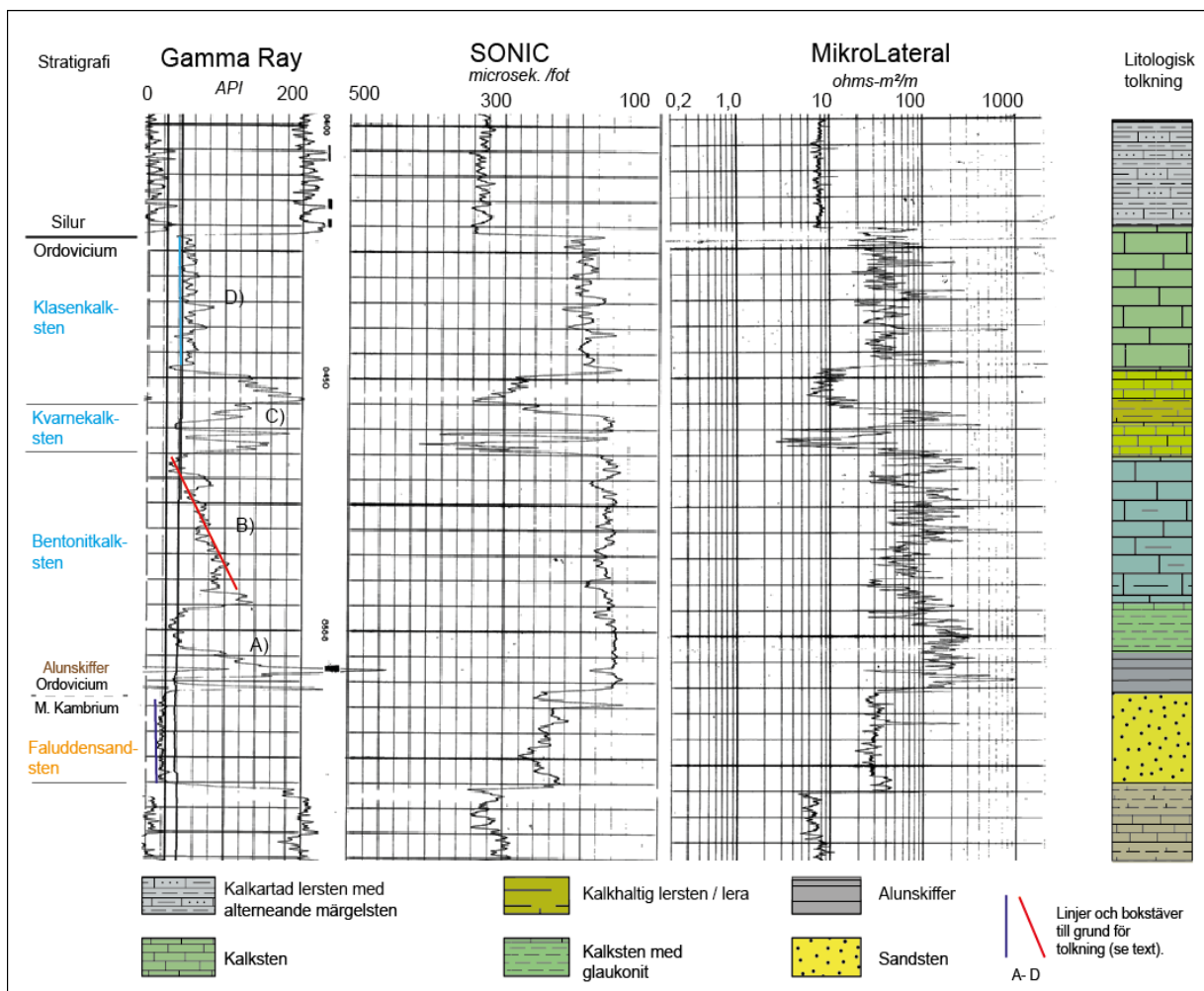


Fig. 18: Sammanställning och tolkning av loggdata från borrhålet Kvarne-1. Avsnittets uppbyggnad bedöms som representativ för den ordoviciska lagerföljdens uppbyggnad på södra Gotland.

Det är känt sedan tidigare att revstrukturer (mounds) förekommer i övre delen av ordovicium på Gotland. Dessa är väldokumenterade sedan tidigare (Sivhed m.fl., 2004). Det är troligen dessa revstrukturer som uppträder i form av anomalier i både GR-, sonic- och mikrolateralloggar i Klasenkalkstenen (avsnitt D).

Klasenkalkstenen överlagras av djupa siluriska avlagringar. Utifrån typloggen kan man urskilja jämna och höga värden på både GR- och sonicloggen medan resistivitetsloggen uppvisar låga, jämna värden. Loggen stämmer väl överens med tidigare beskrivning av den siluriska djupberggrunden av b.l.a. Erlström m.fl. (2009), som bedöms bestå, nästan uteslutande, av leriga kalkstenar, mörkel, mörkelsten och lerstenar.

## 5.2 Profilerna A - B samt C - D

För att åskådliggöra den laterala korrelationen av den undersökta lagerföljden har två profiler (Fig. 19–20) tagits fram. Dessa är baserade på den geofysiska typsekvensen från Kvarne-1 samt gamma ray loggar från samtliga borrhål som ingår i de två profilerna. Profilen A–B har en NO–SV riktning och är ca 32 km lång,

medan profil C–D har en NV–SO riktning och är ca 17 km lång.

I båda profilerna syns hur kalkstensenheter varierar i djupläge och mäktighet beroende på lutningen på berggrunden. Detta framgår ännu tydligare om man följer kalkstensens underliggande formation, nämligen den mellankambriska Faluddensandstenen. I profil C–D syns variationerna i mäktighet och djup tydligast. T.ex. i Skåls-1 (NV i C–D) påträffas Faluddensandstenen på ett djup av ca 435 m och med en mäktighet på ca.11 m. Samma formation påträffas längre söder- och österut, i borrhålet Hamra-1, på ett djup av ca 576 m och har här en mäktighet av ca 30 m.

Vidare kan man utifrån gamma ray kurvorna i samtliga borrhål tolka vad som tidigare beskrivits som övre ordoviciska rev strukturer. Dessa ”mounds” utmärker sig på GR-kurvan på liknande sätt som i den understa delen av Klasenkalkstenen (markerade med streckad cirkel i profilerna) och är därför möjliga att korrelera i båda profilerna.

Understa avsnittet av den så kallade bentonitkalkstenen har varit svårast att tyda och tolka. Detta framgår i båda profilerna. Det verkar vara tre enskilda en-

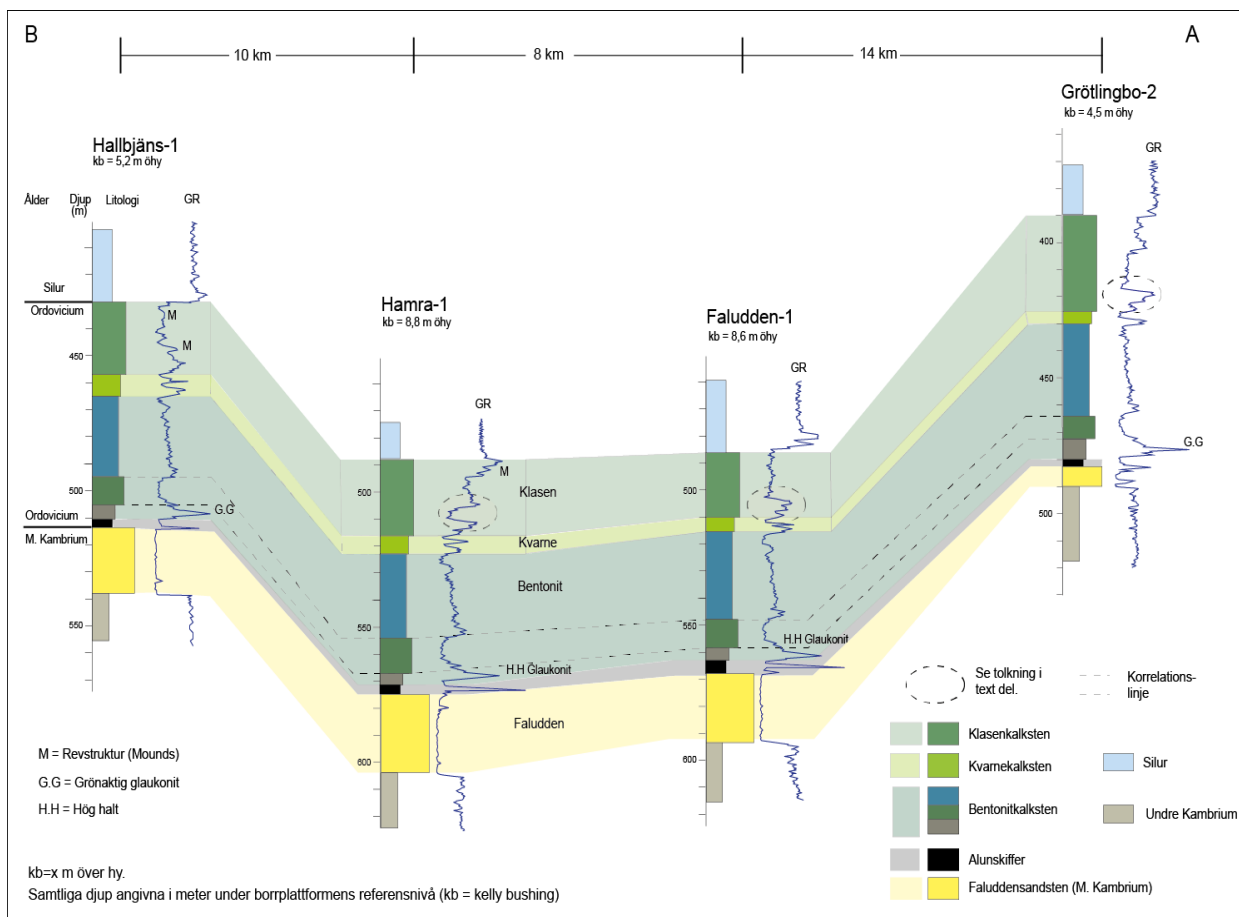


Fig. 19: Profil som visar en tolkning av den laterala utbredningen av geofysiskt och litologiskt identifierade enheter i den ordoviciska lagerföljden på södra Gotland. Profilläget är angivet i figur 10.

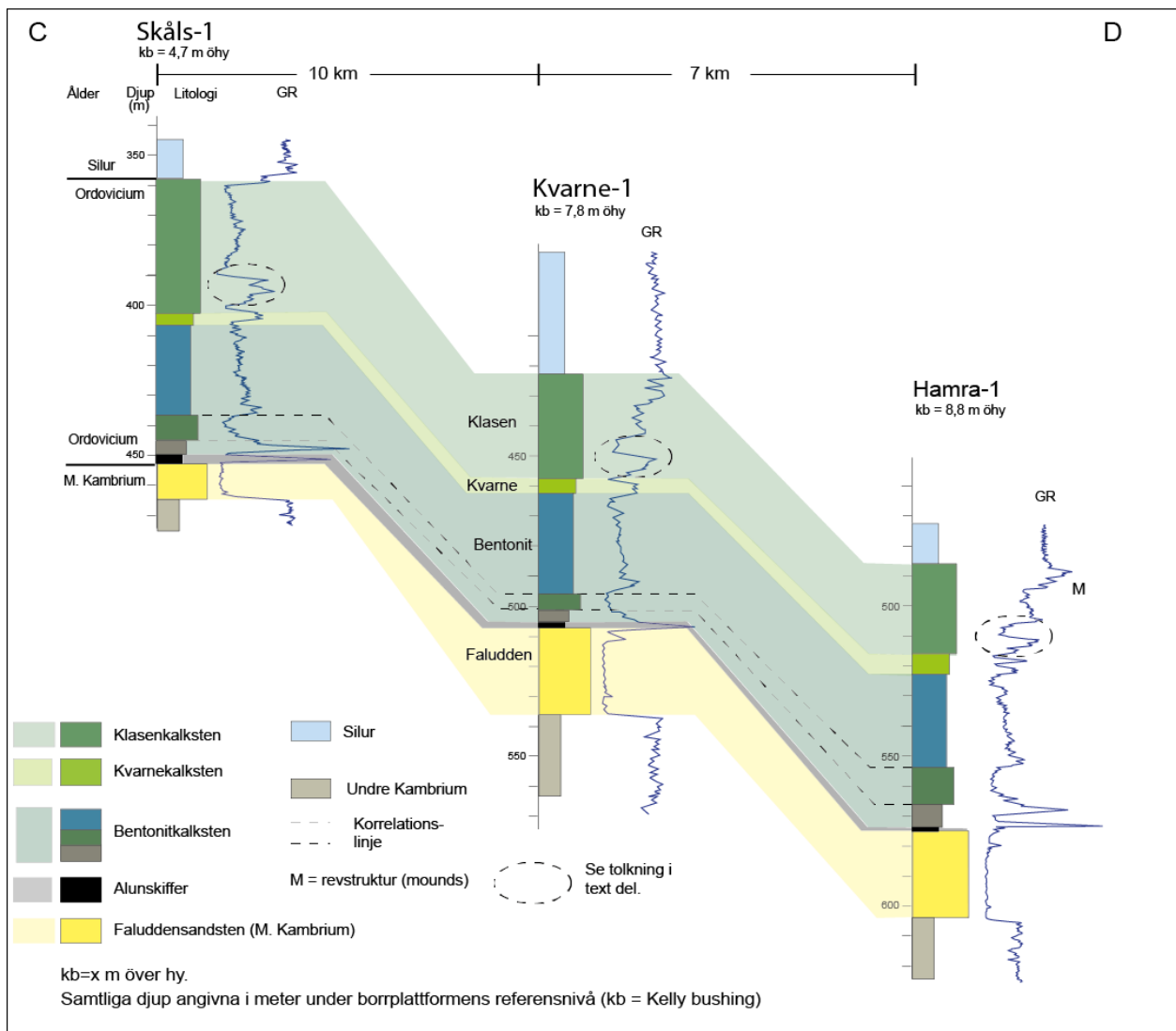


Fig.20: Profil som visar en tolkning av den laterala utbredningen av geofysiskt och litologiskt identifierade enheter i den ordoviciska lagerföljden på södra Gotland. Profilläget är angivet i figur 10.

heter på grund av att dessa är så utmärkande på gamma ray kurvan från samtliga borrhål. Indelningen skulle kunna se ut som en överliggande enhet av ren och homogen kalksten, efterföljt av ett avsnitt med varierande sammansättning med stigande halt av glaukonit och underst ett alunskifferlager. Bättre och nyare geofysiska undersökningar samt tillgång till borrhår är att rekommendera, samt en åldersbestämning.

## 6 Slutsatser

- Arbetet har med hjälp av geofysiska loggar och seismiska undersökningar, resulterat i en geofysisk karaktärisering av de tre ordoviciska kalkstensenheter samt den underliggande Faluddensandstenen, på södra Gotland.
- En typlogg har tagits fram, baserad på tolkning av geofysiska loggar som i sin tur har använts

för framtagning av två profiler som visar den laterala uppbyggnaden av den ordoviciska sekvensen. Korrelationen visar på en tydligt lateral utbredning av olika lager i den ordoviciska sekvensen.

- Seismiska undersökningar visar tydligt lagergränserna för de tre olika kalkstensenheter som utgör den ordoviciska sedimentära berggrunden för södra Gotland. Dessutom framträder de övre ordoviciska revstrukturen (mounds) från de seismiska profilerna. Från profilerna har den laterala och vertikala utbredning av dessa mounds kunnat beräknas. Vidare påvisar den seismiska undersökningen en relativt tektoniskt opåverkad berggrund.
- Utifrån den rådande informationen av den laterala korrelationen kan bedömning om möjligheterna för kolväte utvinning på land inte kunnat göras. Samma gäller för koldioxidlagring i en större skala ändå om de ordoviciska kalk-

stens formationerna samt dess överliggande siluriska mägerstenar uppfyller kraven för takbergart (caprock). Anledningen är att Faluddensandstenen, som bedöms att ha störst potential för koldioxidlagring, inte befinner sig på ett tillräckligt stort djup på södra Gotland. Dock återfinns Faluddensandstenen på svensk områden i den centrala delen av Östersjön (Dalders) på betydligt större och mer fördelaktigare djup för CO<sub>2</sub>-lagring, samt en möjlig olja och gas utvinning i större skala.

- Vidare forskning och undersökning av området behövs, till land och havs, både ur ett ekonomiskt perspektiv samt för potentialen av långsiktig och hållbar miljösynpunkt i form av koldioxidlagring i industriell skala, som på senare tid har blivit ett allt starkare debatterat ämne.
- Möjligheten finns också för vidare arbete, som t.ex. en absolut åldersdatering, gällande indelningen av den understa delen av den ordoviciska så kallade Bentonitkalkstenen. Detta för att få en bättre och tydligare indelning samt att förstå dess verkliga koppling till liknande formationer i andra delar av Sverige (Öland), både på land och till havs.

## 7 Tack

Ett stort tack vill jag tillägna Mikael Erlström på Sveriges Geologiska Undersökning i Lund, för betydelsefull ledning, råd, information och all tålamodet genom detta arbete. Ett stort tack vill också framföra till min familj och vänner, framför allt min son, som har stöttat mig och uppmuntrat mig under hela all den tid.

## 8 Referenser

- Alm, P-G., 2012: "Logging" Geofysisk borrhålmätning. GEOC04 Geofysisk undersökningsmetodik, Lund University. 20.01.2013, 85 sid..
- Björck, S., Harff, J. & Hoth P., 2011: *Geological evolution and resources of the Baltic sea area from the precambrium to the quaternary*, 3-45, The Baltic Sea Basin.
- Brunn, Å. & Kjellström, G., 1989 (unpubl.): *An introduction to the Phanerozoic geology of Sweden. Sveriges geologiska undersökning, Rapport ID 89006*, 29 sid.
- Calner, M., 2014: Muntligt samtal, oktober 2014.
- Dewan, J. T., 1983: *Essentials of modern open-hole log interpretation*. PennWell Publishing Company. Tulsa, Oklahoma, 361 sid.
- Eliason, S., 2013: *Under ytan på Gotland, Natur på Gotland Nr 4, Bilaga 6, 2 sid.*
- Energimyndigheten., 2010: *Systemstudie av möjligheter att etablera en infrastruktur för CCS i Östergötlandsområdet*. 247, 44-49, 81-94.
- Eriksson, Mats E. & Calner, Mikael (red.) (2005). *The dynamic Silurian earth: subcommission on Silurian Stratigraphy Field Meeting 2005, August 15th-22nd, Gotland, Sweden : field guide and abstracts. Sveriges geologiska undersökning rapporter och meddelanden 121*. Uppsala: Sveriges geologiska undersökning. 104 sid.
- Erlström, M., 2013: *Swedstore CO2 projektet*, 22, 1-7. *Sveriges geologiska undersökning*.
- Erlström, M., Muntligt samtal. September – Oktober 2014.
- Erlström, M., Fredriksson, D., Johojuntti, N., Sivhed, U., & Wickström, L., 2011: *Lagring av koldioxid i berggrunden – krav, förutsättningar och möjligheter. Sveriges geologiska undersökning rapporter och meddelanden 131*, 94 sid.
- Erlström, M., Persson, L., Sivhed, U., & Wickström, L., 2009: *Beskrivning till regional berggrundskarta över Gotlands län. Sveriges geologiska undersökning rapporter och meddelanden 221*. Uppsala: Sveriges geologiska undersökning, 60 sid.
- Erlström, M., Elhammer, A. & Snowball, L., 2014: *Bedömning av olja och gas i berggrunden inom svenskt marint territorium och ekonomisk zon, främst Östersjön- en översikt, Sveriges geologiska undersökning rapport 2014:26*, 46 sid.
- Jepsson, H., 2013: *Kompendium i geofysisk undersökningsmetodik GEOC04, Seismiska metoder*, 140 sid.
- Olje Prospektering AB., 1976: *Gotland exploration activities, geology and petroleum prospects, exploration department september 1976*, opublicerad rapport, 9-13.
- Sivhed, U., Erlström, M., Bojesen-Koefoed, A. J., & Löfgren, A., 2004: *Upper Ordovician carbonate mounds on Gotland, central Baltic sea: Distribution, composition and reservoir characteristics*, 115-140.
- Stouge, S., 2004: *Ordovician siliciclastic and carbonates of Öland, Sweden. In Munnecke, A., Servais, T., and Schulbert, C., (eds) Early Paleozoic Paleogeography and Paleoclimate. Erlanger Geologische Abhandlungen, Sonderband 5*, 91-97.
- Söderlund, U., 2014: Muntligt samtal, oktober 2014.

## Tidigare skrifter i serien

### ”Examensarbeten i Geologi vid Lunds universitet”:

386. Hajny, Casandra, 2014: Ett mystiskt ryggradsdjursfossil från Åsen och dess koppling till den skånska, krittida ryggradsdjursfaunan. (15 hp)
387. Ekström, Elin, 2014: – Geologins betydelse för geotekniker i Skåne. (15 hp)
388. Thuresson, Emma, 2014: Systematisk sammanställning av större geoenergianläggningar i Sverige. (15 hp)
389. Redmo, Malin, 2014: Paleontologiska och impaktrelaterade studier av ett anomalt lerlager i Schweiz. (15 hp)
390. Artursson, Christopher, 2014: Comparison of radionuclide-based solar reconstructions and sunspot observations the last 2000 years. (15 hp)
391. Svahn, Fredrika, 2014: Traces of impact in crystalline rock – A summary of processes and products of shock metamorphism in crystalline rock with focus on planar deformation features in feldspars. (15 hp)
392. Järvin, Sara, 2014: Studie av faktorer som påverkar skredutbredningen vid Norsälven, Värmland. (15 hp)
393. Åberg, Gisela, 2014: Stratigrafin i Hanöbukten under senaste glaciationen: en studie av borrhävar från IODP's expedition nr 347. (15 hp)
394. Westlund, Kristian, 2014: Geomorphological evidence for an ongoing transgression on northwestern Svalbard. (15 hp)
395. Rooth, Richard, 2014: Uppföljning av utlastningsgrad vid Dannemora gruva; april 2012 - april 2014. (15 hp)
396. Persson, Daniel, 2014: Miljögeologisk undersökning av deponin vid Getabjär, Sölvesborg. (15 hp)
397. Jennerheim, Jessica, 2014: Undersökning av långsiktiga effekter på mark och grundvatten vid infiltration av lakvatten – fältundersökning och utvärdering av förhållanden vid Kejsarkullens avfallsanläggning, Hultsfred. (15 hp)
398. Särman, Kim, 2014: Utvärdering av befintliga vattenskyddsområden i Sverige. (15 hp)
399. Tuveson, Henrik, 2014: Från hav till land – en beskrivning av geologin i Skrylle. (15 hp)
400. Nilsson Brunlid, Anette, 2014: Paleoekologisk och kemisk-fysikalisk undersökning av ett avvikande sedimentlager i Barsebäcks mosse, sydvästra Skåne, bil dat för ca 13 000 år sedan. (15 hp)
401. Falkenhaus, Jorunn, 2014: Vattnets kretslopp i området vid Lilla Klåveröd: ett kunskapsprojekt med vatten i fokus. (15 hp)
402. Heingård, Miriam, 2014: Long bone and vertebral microanatomy and osteohistology of 'Platycarpus' ptychodon (Reptilia, Mosasauridae) – implications for marine adaptations. (15 hp)
403. Kall, Christoffer, 2014: Microscopic echinoderm remains from the Darriwilian (Middle Ordovician) of Västergötland, Sweden – faunal composition and applicability as environmental proxies. (15 hp)
404. Preis Bergdahl, Daniel, 2014: Geoenergi för växthusjordbruk – Möjlig anläggning av värme och kyla i Västskåne. (15 hp)
405. Jakobsson, Mikael, 2014: Geophysical characterization and petrographic analysis of cap and reservoir rocks within the Lund Sandstone in Kyrkheddinge. (15 hp)
406. Björnfors, Oliver, 2014: A comparison of size fractions in faunal assemblages of deep-water benthic foraminifera—A case study from the coast of SW-Africa.. (15 hp)
407. Rådman, Johan, 2014: U-Pb baddeleyite geochronology and geochemistry of the White Mfolozi Dyke Swarm: unravelling the complexities of 2.70-2.66 Ga dyke swarms on the eastern Kaapvaal Craton, South Africa. (45 hp)
408. Andersson, Monica, 2014: Drumliner vid moderna glaciärer — hur vanliga är de? (15 hp)
409. Olsenius, Björn, 2014: Vinderosion, sanddrift och markanvändning på Kristianstadsslätten. (15 hp)
410. Bokhari Friberg, Yasmin, 2014: Oxygen isotopes in corals and their use as proxies for El Niño. (15 hp)
411. Fullerton, Wayne, 2014: REE mineralisation and metasomatic alteration in the Olserum metasediments. (45 hp)
412. Mekhaldi, Florian, 2014: The cosmic-ray events around AD 775 and AD 993 - Assessing their causes and possible effects on climate. (45 hp)
413. Timms Eliasson, Isabelle, 2014: Is it possible to reconstruct local presence of pine on bogs during the Holocene based on pollen data? A study based on surface and

- stratigraphical samples from three bogs in southern Sweden. (45 hp)
414. Hjulström, Joakim, 2014: Bortforsling av kaxblandat vatten från borrningar via dagvattenledningar: Riskanalys, karaktärisering av kaxvatten och reningsmetoder. (45 hp)
415. Fredrich, Birgit, 2014: Metadolerites as quantitative P-T markers for Sveconorwegian metamorphism, SW Sweden. (45 hp)
416. Alebouyeh Semami, Farnaz, 2014: U-Pb geochronology of the Tsineng dyke swarm and paleomagnetism of the Hartley Basalt, South Africa – evidence for two separate magmatic events at 1.93-1.92 and 1.88-1.84 Ga in the Kalahari craton. (45 hp)
417. Reiche, Sophie, 2014: Ascertaining the lithological boundaries of the Yoldia Sea of the Baltic Sea – a geochemical approach. (45 hp)
418. Mroczek, Robert, 2014: Microscopic shock-metamorphic features in crystalline bedrock: A comparison between shocked and unshocked granite from the Siljan impact structure. (15 hp)
419. Baliya, Fisnik, 2014: Radon ett samhällsproblem - En litteraturstudie om geologiskt sammanhang, hälsoeffekter och möjliga lösningar. (15 hp)
420. Andersson, Sandra, 2014: Undersökning av kalciumkarbonatförekomsten i infiltrationsområdet i Sydsvensk vattenverk, Vombverket. (15 hp)
421. Martin, Ellinor, 2014: Chrome spinel grains from the Komstad Limestone Formation, Killeröd, southern Sweden: A high-resolution study of an increased meteorite flux in the Middle Ordovician. (45 hp)
422. Gabrielsson, Johan, 2014: A study over Mg/Ca in benthic foraminifera sampled across a large salinity gradient. (45 hp)
423. Ingvaldson, Ola, 2015: Ansvarsutredningar av tre potentiellt förorenade fastigheter i Helsingborgs stad. (15 hp)
424. Robygd, Joakim, 2015: Geochemical and palaeomagnetic characteristics of a Swedish Holocene sediment sequence from Lake Storsjön, Jämtland. (45 hp)
425. Larsson, Måns, 2015: Geofysiska undersökningsmetoder för geoenergisystem. (15 hp)
426. Hertzman, Hanna, 2015: Pharmaceuticals in groundwater - a literature review. (15 hp)
427. Thulin Olander, Henric, 2015: A contribution to the knowledge of Fårö's hydrogeology. (45 hp)
428. Peterffy, Olof, 2015: Sedimentology and carbon isotope stratigraphy of Lower-Middle Ordovician successions of Slemestad (Oslo-Asker, Norway) and Brunflo (Jämtland, Sweden). (45 hp)
429. Sjunnesson, Alexandra, 2015: Spårämnesförsök med nitrat för bedömning av spridning och uppehållstid vid återinfiltration av grundvatten. (15 hp)
430. Henao, Victor, 2015: A palaeoenvironmental study of a peat sequence from Iles Kerguelen (49° S, Indian Ocean) for the Last Deglaciation based on pollen analysis. (45 hp)
431. Landgren, Susanne, 2015: Using calcein-filled osmotic pumps to study the calcification response of benthic foraminifera to induced hypoxia under *in situ* conditions: An experimental approach. (45 hp)
432. von Knorring, Robert, 2015: Undersökning av karstvittring inom Kristianstadsslättens NV randområde och bedömning av dess betydelse för grundvattnets sårbarhet. (30 hp)
433. Rezvani, Azadeh, 2015: Spectral Time Domain Induced Polarization - Factors Affecting Spectral Data Information Content and Applicability to Geological Characterization. (45 hp)
434. Vasilica, Alexander, 2015: Geofysisk karaktärisering av de ordoviciska kalkstensheterna på södra Gotland. (15 hp)



# LUNDS UNIVERSITET

Geologiska institutionen  
Lunds universitet  
Sölvegatan 12, 223 62 Lund