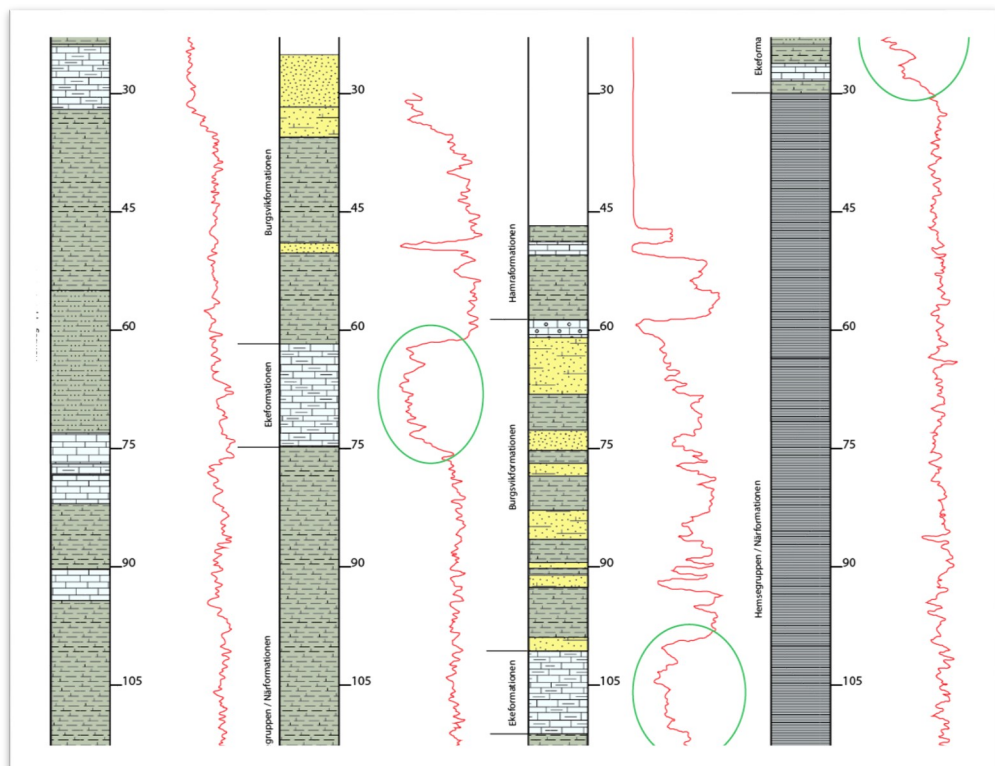


Tolkning av geofysiska mätningar i hammarborrhål på södra Gotland

Oskar Sällström

Examensarbeten i geologi vid Lunds universitet,
kandidatarbete, nr 503
(15 hp/ECTS credits)



Tolkning av geofysiska mätningar i hammarborrhål på södra Gotland

Kandidatarbete
Oskar Sällström

Geologiska institutionen
Lunds universitet
2017

Innehåll

1 Inledning	7
1.1 Gotlands grundvattenbehov	7
1.2 Grundvattenreservoar och energilagring	7
2 Berggrunden på Gotland	7
2.1 Geologin på södra Gotland, översta 150 m	7
2.1.1 Närformationen	8
2.1.2 Botvideledet	9
2.1.3 Ekeformationen	9
2.1.4 Burgsvikformationen	9
2.1.5 Hamraformationen	10
2.1.6 Sundreformationen	10
3 Material	10
3.1 Borrhålsdata	10
3.1.1 OPAB	11
3.1.2 SGU	11
3.1.3 Burgsvikborrningen (typsektion)	11
3.2 Geofysiska flygmätningar (SkyTEM)	11
4 Metodik	11
4.1 Geofysiska metoder	12
4.1.1 Gamma Ray (GR)	12
4.1.2 Resistivitet	12
4.1.3 Porositet	12
4.2 Borrkax	12
5 Tolkning och analys	12
5.1 OPAB	12
5.2 SGU	14
5.3 Tvärsnittssektioner och korrelationer mellan borrhål	14
5.4 Korrelation mellan borrhningar och SkyTEM	23
6 Diskussion	23
6.1 Potential för grundvattenuttag och energilagring	25
7 Slutsatser	25
8 Tackord	25
9 Referenser	25
 Bilaga - beskrivning av kärnborrning, Burgsvik	 27

Tolkning av geofysiska mätningar i hammarborrhål på södra Gotland

OSKAR SÄLLSTRÖM

Sällström, O., 2017: Tolkning av geofysiska mätningar i hammarborrhål på södra Gotland. *Examensarbeten i geologi vid Lunds universitet*, Nr. 503, 25 sid. 15 hp.

Sammanfattning: Studiens syfte är att utvidga kunskapen om berggrunden på södra Gotlands och koppla det till den ansträngda grundvattensituation i området. Materialet till studien kommer från Sveriges geologiska undersökning (SGU) som utfört geofysiska borrhålsmätningar och flygburna resistivitmätningar (SkyTEM) och från Oljeprospekterings AB (OPAB) som på 70- och 80-talet gjorde borrhningar på Gotland i syfte att finna kolväten. Borrhål där loggar och beskrivningar av borrhax varit tillgängligt har beskrivits närmare. Gamma ray-, resistivitets- och porositet-loggar har tolkats till stratigrafiska kolumner. Tvärsnitt av berggrundens översta 150 meter har illustrerats i figurer och korrelerats till resistivitetsprofiler från SkyTEM för att kartlägga salt grundvatten. Det är tydligt att berggrunden på Södra Gotland har en SSO-lig stupning och det bedöms att salt grundvatten kan förväntas på 30–50 meters djup. En viss porositet påträffas i en ca 10 meter mäktig sandsten tillhörandes Burgsvikformationen, varav dess NV delar befinner sig ovanför gränsen för salt grundvatten. Resultaten från borrhålskorrelation utgör ett bra underlag för kompletterande hydrogeologiska undersökningar.

Nyckelord: Gotland, kalksten, sandsten, borrhålsloggning, grundvatten.

Handledare: Mikael Erlström, Peter Dahlqvist (Sveriges geologiska undersökning, Lund)

Ämnesinriktning: Geofysik

Oskar Sällström, Geologiska institutionen, Lunds universitet, Sölvegatan 12, 223 62 Lund, Sverige. E-post: sallstrom.oskar@gmail.com

Interpretation of geophysical measurements from boreholes in southern Gotland

OSKAR SÄLLSTRÖM

Sällström, O., 2017: Interpretation of geophysical measurements from boreholes in southern Gotland. *Dissertations in Geology at Lund University*, No. 503, 25 pp. 15 hp (15 ECTS credits)

Abstract: This study aims to expand the knowledge about the bedrock in southern Gotland and link it to the strained groundwater situation that is there. The material for the study comes from the Swedish Geological Survey (SGU) which conducted geophysical borehole measurements and airborne resistivity measurements (SkyTEM) and from OPAB, which in the 70's and 80's drilled several wells on Gotland for the purpose of finding hydrocarbons. Interesting boreholes have been investigated closer to where logs and descriptions of drill cuttings were available. Gamma ray, resistivity and porosity logs have been interpreted into stratigraphic columns. Cross sections of the bedrock's top 150 meters is illustrated in figures and correlated to SkyTEM resistivity profiles for mapping of salt groundwater. It is clear that the bedrock in southern Gotland has a slope for SSE and there are strong indications that salt groundwater can be expected at 30-50 meters deep. Some porosity is found in an approximately 10-meter-rich sandstone of the Burgsvik formation, of which its NW parts are above the boundary of salt groundwater. The results from bore correlation provide a good basis for complementary hydrogeological studies.

Keywords: Gotland, limestone, sandstone, boreholes, groundwater.

Supervisor(s): Mikael Erlström, Peter Dahlgvist (Swedish Geological Survey, Lund)

Subject: Geophysics

Oskar Sällström, Department of Geology, Lund University, Sölvegatan 12, SE-223 62 Lund, Sweden. E-mail: sallstrom.oskar@gmail.com

1 Inledning

På Gotland har Sveriges geologiska undersökning under 2014 och 2016 utfört geofysiska borrhålsmätningar i ett antal borrhål samt utfört SkyTEM undersökningar (Dahlqvist 2015). Dessa undersökningar ingick som en del i en övergripande undersökning av jordlager och berggrund med syfte till att öka kunskapen om var större nya grundvattenmagasin skulle kunna finnas. SGU:s undersökningar omfattade inte hela Gotland utan fokuserades till ett antal delområden, varav ett var Sudret på Södra Gotland. Syftet med det här arbetet är att med hjälp av en tolkning av borrhålsinformation från ett antal borrhål på södra Gotland bidra med kunskap om berggrunden samt potentialen för grundvattenuttag på Södra Gotland. Till grund för arbetet finns ovan nämnda borrhålsloggar från SGU samt äldre loggar från OPAB (Oljeprospektering AB).

Målen med undersökningen är att:

- Med hjälp av borrhålsloggar utföra en tolkning av berggrundens uppbyggnad ner till ca 150 m djup.
- Identifiera avsnitt och lagerföljder med potential för grundvattenuttag eller energilagring.
- Från tolkade borrhålsdata och med stöd av SGU:s SkyTEM data illustrera ett antal tvärsnitt av berggrundens uppbyggnad.
- Koppla geofysiska tolkningar till SkyTEM-undersökningar för avgränsning av magasin med salt grundvatten.

1.1 Gotlands grundvattenbehov

Efterfrågan av Gotlands grundvattenresurser är starkt säsongsb beroende och styrs framför allt av befolkningsökningen under sommarmånaderna. Men det är fler faktorer som påverkar dagens ansträngda läge än ökad konsumtion. Minskad nederbörd, mildare vintrar med kortare perioder med snötäckt mark innebär att förutsättningarna för grundvattenbildning minskar. Även tunna jordlager och tät berggrund är bidragande faktorer som gör att grundvattenbildningen på Gotland är begränsad. Mycket av nederbörden rinner därför bort på markytan och försvinner i ytvattendrag och vidare ut i Östersjön. Berggrundens magasinerande förmåga är dessutom begränsad eftersom den till merparten består av sprickakviferer. Det ska dock påpekas att berggrunden hittills varit dåligt undersökt avseende grundvattenförhållandena eftersom det tidigare varit svårt att finna en lämplig undersökningsmetod. SkyTem metoden har dock gett förutsättningar för mer övergripande undersökningar (Dahlqvist 2015). En speciell problematik på Gotland är även förekomsten av salt grundvatten på grunda djup vilket begränsar både uttagningsmöjligheter och borrhålsdjup. Här har SkyTEM metoden kunnat bidra med viktiga data då djupet till saltvatten tydligt syns i dessa mätningar. Generellt är dock grundvattensituationen mycket besvärlig på Gotland vilket även Region Gotland påtalat (Länsstyrelsen Gotlands Län 2017).

1.2 Grundvattenreservoar och energilagring

Eftersom Gotland domineras av tunna jordlager är grundvattentillgången i berggrunden av stor betydelse

som grundvattenmagasin. Berggrunden kan generellt karaktäriseras som en sprickakvifer, dvs. vatten förekommer inte homogent i berggrunden utan företrädesvis i öppna sprickor/sprickzoner eller lokala hålrum. Motsatsen är en porakvifer där vatten förekommer i porutrymmena mellan bergartens eller jordartens korn. Ett bra magasin för grundvatten karaktäriseras av hög porositet och hög genomsläpplighet (permeabilitet) som möjliggör stora volymer vatten som med lätthet kan utvinnas. Typiska bergarter med dessa egenskaper är porösa sandstenar, karstvittrade kalkstenar, eller annan sprickrik berggrund.

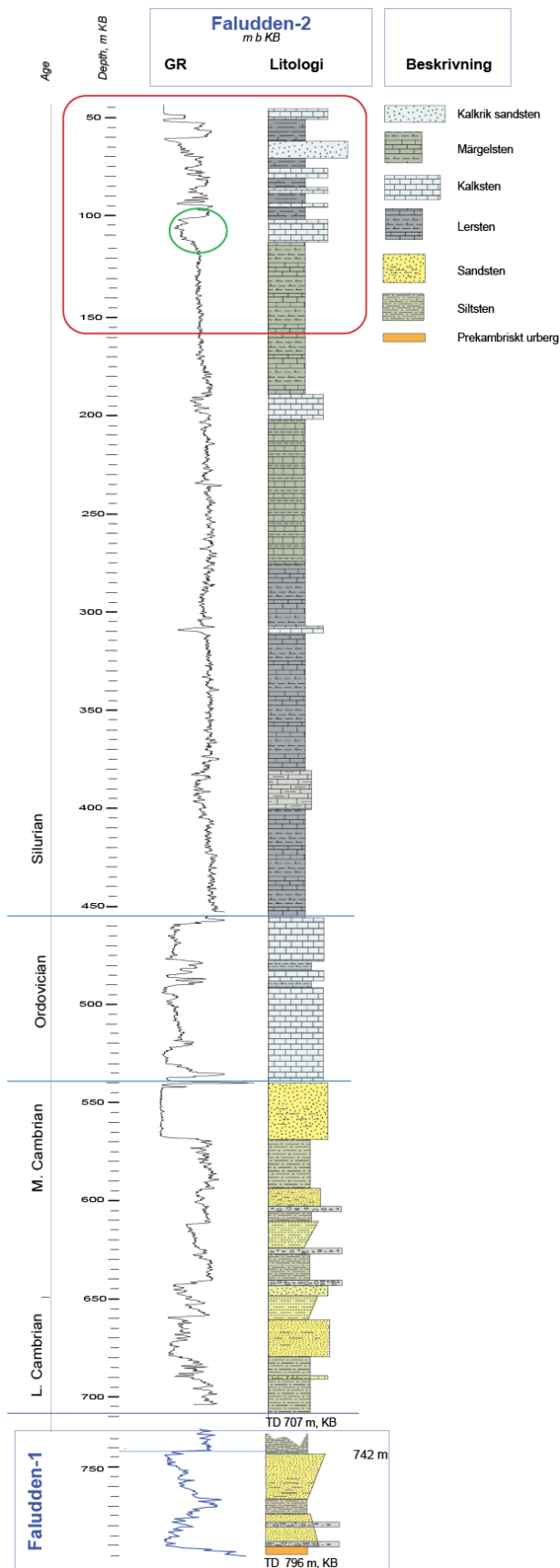
Då det ställs höga kvalitetskrav på dricksvatten, kan magasin som ej uppfyller dessa potentiellt användas för energilagring istället. Exempel på det är att utnyttja magasin med salt grundvatten till energilagring. För att fullt ut kunna gå över till grön energi så måste energin kunna lagras, och utnyttjas vid tillfällen med lägre energiproduktion. På Gotland kan detta till exempel ske med en teknik som kallas *Borehole Thermal Energy Storage* (BTES) där uppvärmning av vatten sker med överskottsenergin från vindkraftverk som sedan lagras i och värmer upp berggrunden för senare uttag vid lägre energiproduktion. För detta krävs flera borrhål, ibland flera hundra närsittande och kan t.ex. användas vid uppvärmning vintertid eller nedkylning under sommaren. Jämfört med vanlig bergvärme så används här en aktiv uppvärmning av berggrunden. En annan metod är *Compressed Air Energy Storage* (CAES) som baseras på att man med en eldriven motor komprimerar luft som trycks in i en reservoar, t.ex. en i berggrunden. Energi lagras som högttrycksluft. Vid lägre elproduktion hettas den komprimerade luften upp och expanderar för att driva en turbin som producerar el. Bägge dessa metoder kan tänkas användas på Gotland och har olika krav på berggrunden. BTES ställer krav på värmelagrings- och värmeledningsförmåga medans CAES behöver en porös och permeabel kvifer.

2 Berggrunden på Gotland

Gotland befinner sig i de centrala delarna av den Baltiska Bassängen. Berggrunden i ytan domineras av silurisk kalksten och mägersten. Den siluriska lagerföljden överlagrar en ca 150 meter mäktig ordovicisk kalksten och kambrisk sandsten och lerskiffer, däribland alunskiffern. Tillsammans utgör dessa 250–800 meter med sedimentär berggrund som stupar svagt åt SSO (0,2–0,4°) och som överlagrar det penneplaniserade prekambrika urberget. En typsektion från Faludden går att se i figur 1 där OPAB borrade 790 m ner genom den sedimentära berggrunden till toppen av det underliggande urberget. De yngsta siluriska formationerna som i detta arbete undersöks närmre, Sudretgruppen, är blottad längs med kustlinjen i söder på Sudret (Erlström 2009).

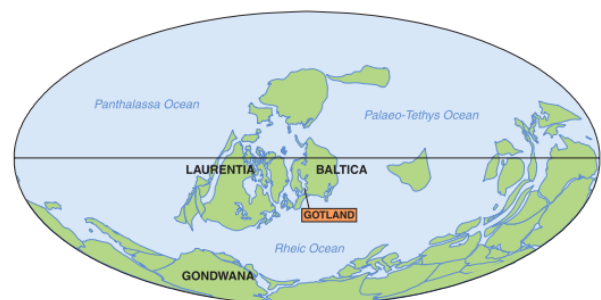
2.1 Geologin på södra Gotland, översta 150 m

De siluriska avlagringar avsattes i ett grunt marint hav när Gotland befann sig strax söder om ekvatorn (figur 2) och bildar idag kalksten, mägersten, siltsten och sandsten samt övergångsformer mellan de olika bergarterna (Eriksson & Calner 2005). Sammanlagt



Figur 1: Typsektion baserad på borrhålsdata från OPAB, området inom rött motsvarar Ludlow i ålder och har undersökts närmre. Grön ring visar en marker bed som återkommer i arbetet. Modifierad efter (Erlström 2009).

utgör de ca en 150–300 meter mäktig sekvens i norr och en 300–490 meter mäktig sekvens i söder som avsattes mellan 428–418 miljoner år sedan (ludlow och wenlock). Lagerserien har en regional strykning från NE-SV och svag stupning åt SSO (Erlström 2009). Det är vanligt med biohermer och biohermkomplex på hela Gotland som lokalt kan påverka lagerseriens stupning och strykning. Biohermerna varierar i diameter från ett par meter till flera hundra och kan ha en mäktighet på uppemot 35 meter (Regnéll & Hede 1960). Avsättning skedde i en grund kustnära marin miljö med ett havsdjup som troligtvis inte var mer än ca 50 meter. Sedimenten dominerades av karbonatpartiklar från skalbärande organismer, stromaporoidéer, koraller men det var också kortare perioder av klastiska sediment som transporterats från NW i samband med regressioner (Regnéll & Hede 1960). Det har identifierats upp till 10 cykler av olika avsättningsmiljöer under den nämnda perioden vilket återspeglas i den kraftigt varierade berggrunden (Calner et al. 2004). Då berggrunden stupar åt SSO återfinns de yngsta avlagringarna i SO, och de äldsta i NW. Sundreformationen återfinns enbart på Sudret i SO (figur 6), som följs av formationer med tilltagande ålder åt NW, Hamra-, Burgsvik-, Eke- och Närformationen (figur 6). Eftersom det här arbetet fokuserar enbart på de översta 150 meterna bedöms inte djupare lager än de som representerar Närformationen förekomma i de studerade borrhningarna. Topografin på Sudret kan beskrivas som flack med sin högsta punkt ca 25 meter över havet (Erlström 2009). Inga större tektoniska påverkningar har skett på den siluriska berggrunden, men mindre sprickzoner, lineament och förkastningar finns i riktning 270-310° och 40-60° (Erlström 2009). Paleokarst, vittrad kalksten, återfinns i de övre delarna av Ekeformationen som har skapats i perioder med regression (Cherns 1982).



Figur 2: Gotlands geografiska position under Silur (Eriksson & Calner 2005).

2.1.1 Närformationen

Närformationen är en ca 65 meter mäktig växellagrad sekvens med märgelsten och algkalksten. I öst är det grå eller grå-blå, tät, finkornig algkalksten i tunna linsar varvat med laminerad ljusblå märgelsten. I väster är det laminerad blå-grå märgelsten med grå finkornig algkalksten i noder (Regnéll & Hede 1960). En uttunning av formationen sker mot NO. Avsättningen skedde till en början i en djup marin miljö på utsidan av de siluriska reven, och visar en relativt grundare miljö i den övre delen av formationen (Eriksson & Calner 2008). Den utgör tillsammans med Botvidele-

det den översta delen av Hemsegruppen vars totala mäktighet uppgår till 200–250 meter (Erlström 2009).

ÅLDER Age		Grupp, formation Group, formation	Mäktighet, m		
SILUR	LUDLOW	Sudretgruppen	Sundreformationen	10	
			Hamraformationen	40	
			Burgsvikformationen	47	
			Ekeformationen	15	
			Närformationen	2,15	
			Botvideledet		65
			Hemsegruppen		Etelhemformationen*
		Petesformationen*			
	ludfordian				

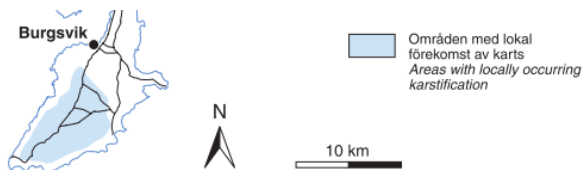
Figur 3: Stratigrafisk indelning av berggrunden på Gotland, översta silur. Modifierad efter (Erlström 2009).

2.1.2 Botvideledet

Botvideledet överlagrar Närformationen och underlagrar Ekeformationen (figur 3) och är på grund av sin mäktighet på 2,15 meter ibland svår att identifiera i borrhål. Består av limonitrik kalksten som på ställen har ett tunt övre lager med glaukonit, fosforit och pyrit (Erlström 2009). Avsättning skedde i en grund subtidal till peritidal lågenenergimiljö (Eriksson & Calner 2008).

2.1.3 Ekeformationen

Ekeformationen utgör en ca 15 meter mäktig algkalksten (tabell 1) med inslag av mörkelsten. Dess övre avgränsning är mot Burgsviksandstenen. Den präglas av kalkalger vid namn Sphaerocodium gotlandicum som påträffas som 1-5 centimeter koncentriska fossil (Munthe 1921). Bergarterna i Ekeformationen har oftast en blågrå färg i ovittrat tillstånd. De uppvisar också en ökande karbonathalt i nordostlig riktning (Regnéll & Hede 1960). I den övre delen av formationen påträffas lokalt paleokarst (figur 4) som bildats då berggrunden varit upplyft över vattenytan. Den undre avgränsningen är mot det tunna Botvideledet och utgörs av en mineraliserad diskontinuitetsyta som på östra Gotland övergår från ett tunt limonitrikt lager till ett tunt lager med fosforit, glaukonit och pyrit (Erlström 2009).



Figur 4: Område med lokal karstförekomst på södra Gotland (Erlström 2009).

2.1.4 Burgsvikformationen

Burgsvikformationen består av den undre Burgsviksandstenen och den övre Burgsvikooliten som tillsammans utgör ca 47 meter. Avgränsningen till den underliggande Ekeformationen är lokalt präglad av sandlinser avsatta i karststrukturer. Avsättning har skett i de yttre delarna av ett delta och hela formationen tunnare ut mot NO (Erlström 2009). Burgsviksandstenen är en ca 40 meter mäktig finkornig sandsten växellagrad med lersten och mörkelsten. I ovittrat till-



Figur 5: Burgsviksandstenen från ett dagbrott i Uddvide, finkornig och blågrå till färgen (Erlström 2009).

stånd blågrå till färgen (figur 5) och något glimmerförande (Munthe 1921). En petrografisk analys visar på att sandstenen innehåller 56,5% kvarts, 36,6% karbonatpartiklar och bergartsfragment och 6,9% fältspat (Erlström 2009). Med dess innehåll av mörkel och lersten har den en karbonathalt (CaCO₃) som varierar mellan 6,4 och 13,2% och låg fosforsyrehalt <0,1% (Munthe 1921). Burgsvikooliten är ca 7 meter mäktig och består av en oolitisk kalksten växellagrad med kalksten och sandsten. Ljust vitgrå till färgen och präglad av sin jämnkorniga oolitstruktur, med runda och ovala ooidkorn mellan 1–2 millimeter stora. Den har ett karbonatinnehåll (CaCO₃) på upp emot 90,1-95,6% (Munthe 1921).

Tabell 1: De vanligaste bergarterna som återfinns på Södra Gotland.

Bergartstyp	Karaktär
Mörkelsten	Finkornig bergart med ungefär lika delar karbonat och lermineral. Grå till mörkgrå i färg.
Lersten	Massiv bergart som till störst del består av lermineral, ibland inslag av silt/sand. Lerpartiklar är mindre än 0,002 mm.
Kalksten	Består av minst 50% kalciumkarbonat med andra beståndsdelar som lera, silt, kvarts. Varierande bildningssätt från organisk avsättning till kemisk utfällning.
Algkalksten	Knöligt utseende med 1–2 cm stora onkoider. Hög andel kalciumkarbonat. Indikerar grund avsättningsmiljö.
Revkalksten	Kalksten med rester av fragmenterade fossil. Tex alger, stromaporoidéer, skalrester och koraller.
Oolit	Kalksten som till störst del är uppbyggd av små koncentriska ooider. Ooider är mindre än 2 mm och består främst av kalciumkarbonat men andra mineral kan förekomma.
Siltsten	Klastisk finkornig bergart som till störst del består av kvartsmineral och fältspat. Partiklar med storlek på 0,002–0,063 mm.
Sandsten	Siliciklastisk bergart. Finkornig till grovkornig, 0,063-2mm stora partiklar. Består till störst del av kvarts, ibland karbonat och små mängder tungmineral. Har en grundmassa (cement) som kan bestå av kalciumkarbonat eller andra mineral.

2.1.5 Hamraformationen

Hamraformationen överlagrar Burgsviksandstenen och består av tre enheter benämnda a, b och c som tillsammans utgör en ca 40 meter mäktig sekvens. Enhet (a) är en onkolitisk algekalksten, något bituminös. Den överlagras av enhet (b) som är växelvis lagrad lerig kalksten och mangelsten. Översta enheten (c) utgörs av revkalksten i SV delen av Sudret och lerig kalksten och stromatoporoidékalksten med inslag av mangelsten i NO. Tillsammans med Sundreformationen utgör de ett biohermkomplex som är begränsat till Sudret (Erlström 2009). Hamraformationen är väl exponerad längs med den sydvästra kusten på Sudret. Den representerar varierande avsättningsförhållanden i en grund subtidal miljö (Eriksson & Calner 2008). Uppmätta halter av kalciumkarbonat (CaCO₃) är 82,34-92% (Munthe 1921).

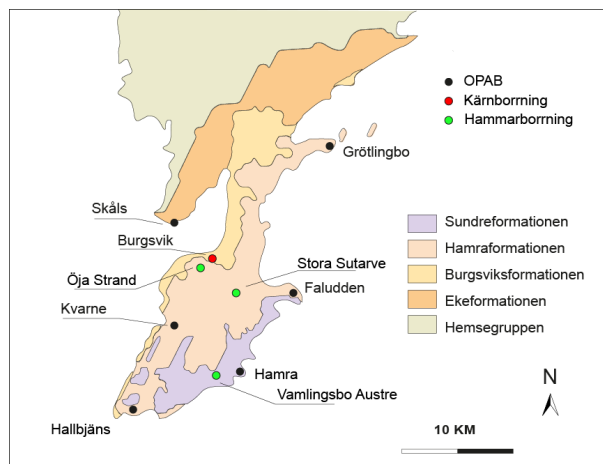
2.1.6 Sundreformationen

Sundreformationen är den yngsta berggrunden på Gotland och överlagrar Hamraformationen och finns bara på sydöstra Sudret. Ca 10 meter mäktig och består i stort av krinoidfragment. Kallas därefter en krinoidékalksten som är grovkornig och ofta röd till färgen. I sydväst återfinns biohermer med hög andel stromaporoidéer som beskrivs som en revkalksten. Krinoidékalkstenen består av 98,7% CaCO₃ och revkalkstenen av 99,1% (Munthe 1921; Erlström 2009). En del paleokarst är påvisad i den översta delen av formationen (Calner et al. 2004).

3 Material

Det material som har legat till grund för tolkning har varit geofysiska loggar, borrhålsrapporter och beskrivningar av borrhärlinor och borrhärlinor. Totalt har sex borrhål från Oljeprospekterings AB, OPAB, tre hammar-

borrhål samt två kärnborrningar från SGU undersökts (figur 6). Borrhålen från OPAB är flera hundra meter djupa med tillhörande geofysiska loggar och bergartsbeskrivningar av borrhärlinor. Hammarborrningarna har varierande djup på 30–50 m med tillhörande loggar och borrhärlinor från Stora Sutarve. Kärnborrningen vid Burgsvik utfördes 1915 och den vid Grötlingbo 1968.



Figur 6: Visar undersökta borrhål och berggrundens yttliga utbredning på Sudret, modifierad efter (Erlström 2009).

3.1 Borrhålsdata

Med varierande kvalitet på tillgängligt material har fokus lagts på det som genererat mest geologisk information. Samtliga borrhål har granskats men bara de loggar och beskrivningar med högst kvalitet (tabell 2) har använts som grundlag för tolkning och utformning av stratigrafiska kolumner.

Tabell 2: Tabell över borrhål på Sudret, Södra Gotland. Fetstilade borrhål och loggtyper har använts till tolkning av stratigrafiska kolumner.

Borrhål	Borrdjup, m	Utförare	Loggar (*använda)	Anm.
Faludden-1	800	OPAB	Borrhärlinor, Gamma Ray, Neutron, Densitet, Resistivitet, SP	
Faludden-2	707	OPAB	Borrhärlinor*, Gamma Ray* ,	Inga prov 4-52m
Hallbjäns-1	742	OPAB	Borrhärlinor*	Inga prov 2.7-32m
Hamra-1	802,5	OPAB	Borrhärlinor*, Gamma Ray*, Porositet*	Inga prov 0-31m
Skåls-1	664	OPAB	Borrhärlinor*, Gamma Ray* , Bulk Density, Resistivitet, Konduktivitet, Sonic, SP, Caliper, Porositet	
Kvarne-1	732	OPAB	Borrhärlinor*, Resistivitet, Caliper, SP	Inga prov 0-31m
Kvarne-2	640	OPAB	Gamma Ray* , Resistivitet, Sonic, Caliper	
Grötlingbo-1	690	SGU 1968	Borrhärlinor* , Gamma Ray* , Bulk Density, Caliper, Konduktivitet, Sonic, Neutron, SP	Beskrivningar av borrhärlinor, inga borrhärlinor 0–16.6m
Grötlingebo-2	665	OPAB	Borrhärlinor, Resistivitet	
Burgsvik	128,68	SGU 1915	Borrhärlinor*	Beskrivningar av borrhärlinor
Öja Strand	20,95	SGU 2015	Gamma Ray* , Temperatur, Konduktivitet, SP, Resistivitet, Akustisk Televiwer	
Stora Sutarve	49,36	SGU 2016	Gamma Ray* , Borrhärlinor* , Temperatur, Konduktivitet, SP, Resistivitet* , Akustisk Televiwer	Borrhärlinor var 6e meter mellan 9–50 m
Vamlingsbo Austre	38,94	SGU 2016	Gamma Ray* , Temperatur, Konduktivitet, SP, Resistivitet	

3.1.1 OPAB

Oljeprospektering AB, OPAB gjorde sin första borrhning på Gotland 1972 med syfte att lokalisera kolväten. De bedrev sin verksamhet på ön i 17 år och utförde totalt 241 borrhningar. Mellan åren 1974–1986 pågick oljeproduktion från den ordoviciska Klasenkalkstenen (Erlström 2009). Det återspeglar sig tydligt i borrhålsrapporter och geofysiska loggar att dem främst var intresserade av de djupare ordoviciska och kambrika avlagringarna. I vissa borrhål finns loggar först från 300–400 meters djup och beskrivningar av borrhax för de övre genomborrade avsnitten kan vara mycket summariska. När väl den ytligare berggrunden loggats är informationen av varierande kvalitet. Borrhål som bidragit med mest information om den yngre siluriska berggrunden är Faludden-2, Kvarne-2, Skåls-1 och Hamra-1.

3.1.2 SGU

Under 2014 och 2016 utförde SGU loggningar av 9 respektive 15 grunda hammarborrhål med avsikt att förbättra kartläggningen av grundvatten, berg och jord på Gotland. Tre av dessa borrhål finns på Sudret, södra Gotland. Borrhålen Öja Strand, Stora Sutarve och Vamlingsbo Austre har samtliga loggar av hög kvalitet. En kärnborrhning som SGU utförde 1968 vid Grötlingbo har också tagits del av och återfinns i SGU:s arkiv.

3.1.3 Burgsvikborrningen (typsektion)

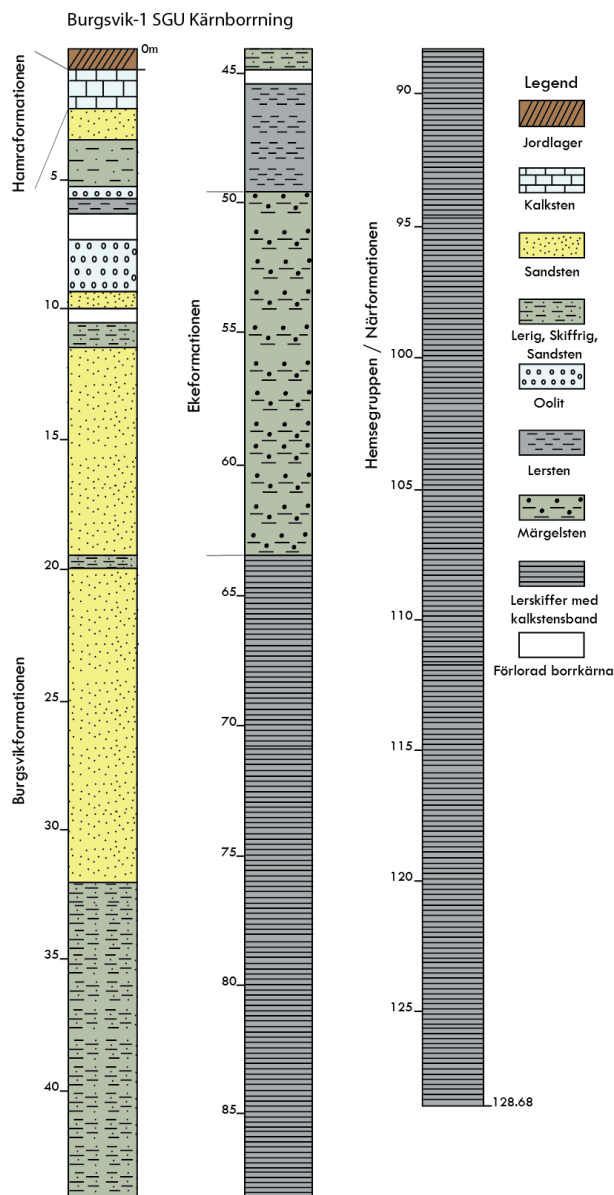
1915 utförde H. Munthe en kärnborrhning i Burgsvik som beskrivs av Hede (1919). Denna kärnborrhning gjordes i akademiskt syfte och med stort fokus på det paleontologiska värdet vilket inte har gått in på djupare i detta arbete. Munthe (1921) kom senare att identifiera de olika formationsnivåerna (figur 7) som i detta arbete använts som referens för tolkningen av de geofysiska borrhålsmätningarna. Hedes (1919) egna beskrivning av kärnborrhningen finns i bilaga 1.

3.2 Geofysiska flygmätningar (SkyTem)

Under hösten 2015 utförde SGU flygburna resistivitetmätningar (SkyTEM) på Gotland i syfte att kartlägga geologin i tre dimensioner och identifiera på vilka djup salt grundvatten förekommer. SkyTEM mäter ned till 200–300 meters djup i marken och ger mätvärden på resistivitet, vilket är inversen av den elektriska konduktiviteten och beror på parametrar som porositet, mängd lermineral, vattenhalt och huruvida det är salt eller sött porvatten. Jordarter och bergarter ovanför grundvattenytan har betydligt högre resistivitet jämfört med samma bergart under grundvattenytan (tabell 4), förutsatt att den har en vattenmättad porositet. Detta för att vatten är en bra ledare och saltvatten ännu bättre i sin tur. Dahlqvist m.fl. (2015) drog slutsatsen att resistivitetsvärden på mindre än 40–50 Ohmm sannolikt indikerar saltpåverkat grundvatten. Ett av områdena som undersöktes med SkyTem var Sudret (Dahlqvist 2017).

4 Metodik

Borrhål kan skapas med olika tekniker såsom hammarborrhning, kärnborrhning och rotationsborrhning. Gemensamt för alla är att de ofta utförs med att cirkulera en



Figur 7: Stratigrafisk kolumn baserad på kärnborrhningen vid Burgsvik 1915 (Hede 1919).

Tabell 4: Ungefärliga resistivitetsintervall för geologiska material på Gotland, modifierad efter (Dahlqvist 2017).

Geologi, markanvändning	Grundvatten-miljö	Resistivitetsintervall (Ohmm)
Torv, lera, gyttja	Sött	10–50
Sand, grus	Över gvy	>300
Sand, grus	Sött	80–200
Jordbruksmark	Sött	10–50
Morän (lerig)	Sött	30–80
Kalksten	Över gvy	>1000
Kalksten	Sött	200–1000
Kalksten	Salt	10–200
Märgel- eller märgelsten	Sött	50–200
Märgel eller märgelsten	Salt	10–80
Berggrund mättad med salt grundvatten	Salt	<40

borrvätska i borrhålet. Den fyller funktioner som att stabilisera borrhålet, cirkulera upp sönderkrossat material (borrkax) och smörja borkronan. Under borrhningen i sig ges information som vridmotstånd, borrhastighet och borkkax cirkuleras upp med möjlighet att analyseras vidare. Efter slutförd borrhning kan kompletterande information ges genom att sända ner mätinstrument på en stålvrå som registrerar formationsegenskaper längs med borrhålet (Alm 2012). Resultaten av mätningarna presenteras som "loggar" med en djupskala representativ för borrhålet, dessa har sedan tolkats.

4.1 Geofysiska mätmetoder

Geofysiska mätinstrument registrerar olika fysikaliska parametrar i berggrunden som kan användas för att skapa en geologisk modell och tolka formationsegenskaper. Det finns tre huvudtyper av mätmetoder, mekaniska, spontana och inducerade mätningar. För att utföra geofysiska borrhålmätningar behövs följande utrustning (Alm 2012);

- Registreringsenhet
- Kabelsystem
- Mätsonder

4.1.1 Gamma Ray (GR)

Mätningarna registrerar den naturliga radioaktiviteten, gammastrålningen, i berggrunden som härrör från grundämnena, uran, torium och kalium. Gammastrålning (GR) är fotoner med hög energi och med en unik signatur för varje element. GR mäts vanligen i API mellan 0–150 vilket reflekterar antalet gamma ray-pulser som registrerats inom ett givet tidsintervall. API står för American Petroleum Institute och är en standard efter vilken mätinstrumenten kalibreras. SGU:s borrhål från 2015 och 2016 har loggats med en annan standard och mätt i CPS, counts per second. Det kan användas för att urskilja olika bergarter och ge en indikation på permeabla zoner. Radioaktiva ämnen är koncentrerade till lera, skiffer och organiska material som ofta har dålig permeabilitet. Lägre värden påträffas i karbonater och sandstenar som generellt visar på bättre genomsläpplighet. Rena karbonater och sandstenar kan ge värden mellan 15–30 API medan rena skifferar typiskt ger värden mellan 75–150 API. Orenheter och övergångsformer mellan bergarter gör det inte lika självklart att tolka. En fördel med denna metod är enkelheten att korrelera gamma ray-signaturer och formationer mellan borrhål vilket har varit till stor hjälp (Dewan 1983; Alm 2012).

Lämpligt för;

- Lateral korrelation av lager serier mellan borrhål
- Identifiera olika formationer och lagergränser
- Beräkna lerhalten i sandstenar

4.1.2 Resistivitet

Elektrisk resistivitet är en inducerad mätmetod som ger information om formationens resistans mot elektrisk ström. Resistans inom borrhålslogging uttrycks i Ohmm (Ohm-meter) och mäts ofta på två avstånd vilket ger olika penetrationsdjup i berggrunden från borrhålet räknat. Mätningen med kort avstånd ger ett värde på formationen som är påverkad av borrvätskan och den med bättre djupinträning ger ett värde på den opå-

verkade formationen, och därmed formationen inklusive dess porvätska. Berggrund är ofta en bra isolator medan porvätskor är bra ledare med undantag för kolväten med hög resistivitet. Vad gäller vatten så ger en högre salthalt bättre ledningsförmåga (Dewan 1983; Alm 2012).

4.1.3 Porositet

Formationers porositet är ofta av stort intresse vare sig det gäller grundvatten, energilagring eller oljeprospektering. Det finns tre metoder att mäta porositet indirekt, neutronlog, densitetslog och akustisk log (sonic). Sonic mäter ljudvågors utbredningshastighet i ett medium. Ljudvågor eller närmare bestämt kompressionsvågor rör sig snabbare i kompakta medium vilket beror på olika litologier, densitet och formationers porositet. En formation med hög porositet visar på lägre ljudvågshastigheter vilket ger ett indirekt porositetsvärde (Alm 2012). Neutronloggen mäter formationers väteinnehåll genom att emittera neutroner från en radioaktiv källa i mätinstrumentet. När neutronerna kolliderar med atomer av lika storlek, i detta fall väteatomer så förlorar dem till slut sin energi och avger gammastrålning som sedan registreras. Detta innebär att högre väteinnehåll ger högre värden. Material med stort väteinnehåll är vatten och olja som i sin tur är koncentrat till porutrymmen (Alm 2012). Densitetsloggen använder en radioaktiv källa, ofta cesium för att sända ut gammastrålar i formationen. Dessa gammastrålar kolliderar med elektrondensiteten i formationen, förlorar sin energi och absorberas. Dem som inte absorberas registreras i en detektor och antalet inkommande gammastrålar är omvänt proportionellt mot en formations elektrondensitet, som är proportionellt mot den verkliga densiteten (Alm 2012).

4.2 Borkkax

Vid OPAB:s prospekteringsborrningar gjordes bergartsbeskrivningar av borkkax som återfinns i borrhålsrapporterna. Från SGU:s borrhning av Stora Sutarve fanns borkkax tillgängligt (figur 8). Borkkax består av krossat berg från det faktiska borrhålet vilket ger relativt bra information om förekommande bergarter. Kemiska och optiska undersökningar kan utföras för att identifiera mineral, bergart och formationsegenskaper. Man ska dock vara medveten om att p.g.a. borktekniken med hammarborrning sker en uppblandning av materialet och att ett prov kan representera en blandning av olika bergarter. Provtagningen görs också genom en uppsamling av material över ett större intervall vilket också påverkar möjligheten till noggrannare djupangivelser för olika lager.

5 Tolkning och analys

Nedan följer tolkningar i form av stratigrafiska kolumner som visas i figurer och med beskrivningar till varje borrhål. Se tabell 2 för vilken information varje kolumn har baserats på.

5.1 OPAB

Borrhningen Skåls-1 (figur 10) ligger i nordvästra delen av undersökningsområdet och har tolkats som att ha Ekeformationen i de översta 1–3 meterna. Ekeformationen framträder därför inte alls lika tydligt i Skåls-1

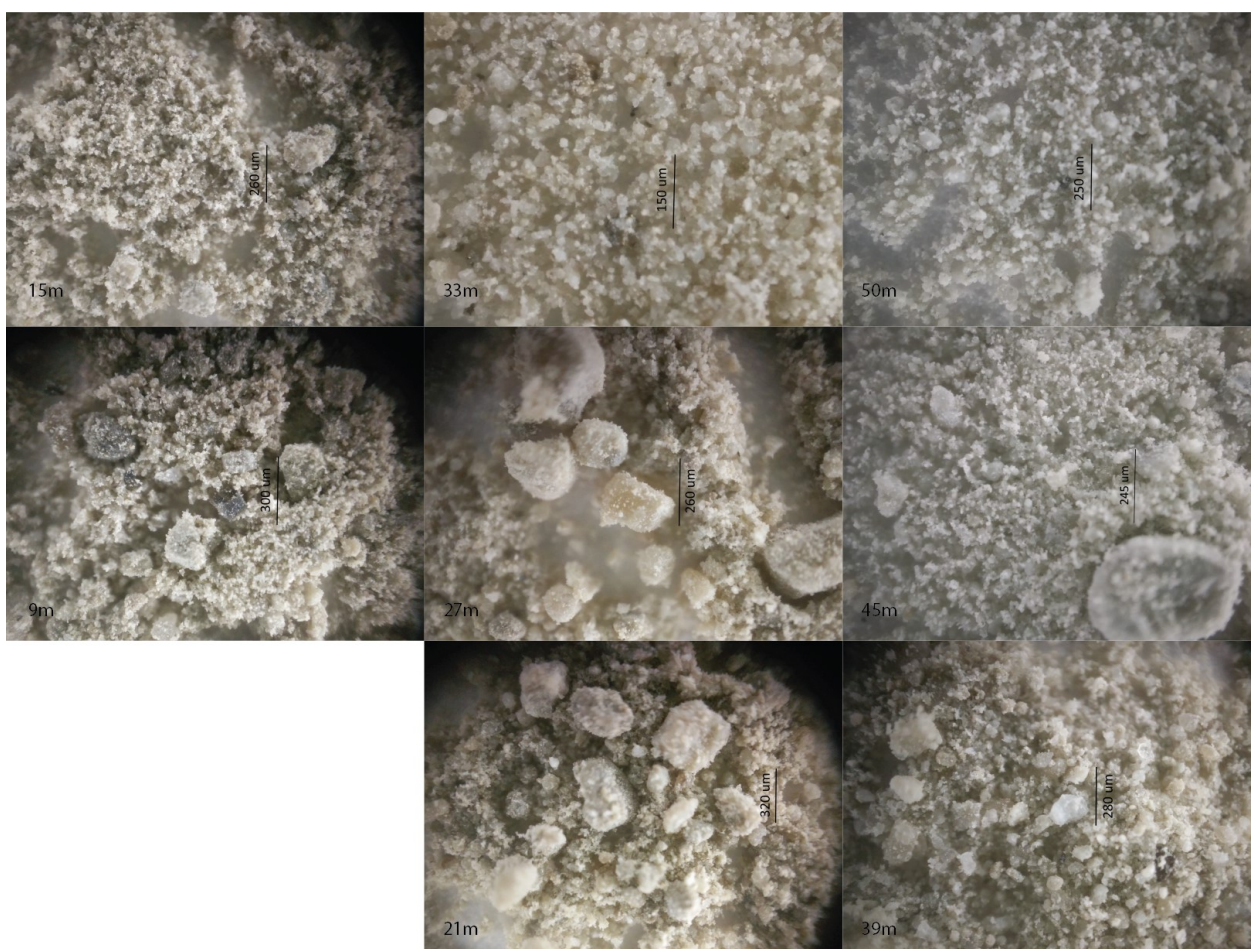
GR kurva som i övriga borrhningar. Resterande del av borrhningen inom det undersökta djupet, 150 m, består av en relativt homogen GR signal utan några signifikant avvikande anomalier och tolkas som mörkelsten varvat med kalksten som representerar berggrund tillhörande Närformationen (och Hemsegruppen). Förändringen i GR kurvan vid 33 meter, en ökning av radioaktivitet, stämmer väl överens med djupet på satt foderrör. Det förklaras av att foderrör dämpar radioaktiviteten från formationen till mätinstrumentet.

I borrhningen Kvarne-2 finns en GR-mätning först från 30 meters djup (figur 10), med i början lågt värde tolkat som sandsten. En successiv ökning av GR ned till ca 47 meter indikerar en gradvis övergång från sandsten till mörkelsten. Vid 47–48 meter sjunker GR värdet drastiskt över ett litet intervall vilket indikerar ett renare tunt lager av sandsten, följt av mörkelsten ned till ca 62 m. Vid 62–75 meter påträffas ett parti med lågt GR värde och en GR signatur typisk för Ekeformationen. I kombination med ett högt värde på en soniclogg tolkas det som hård och tät kalksten. Denna kalksten och dess typiska GR signatur är en utmärkt marker bed för en lateral korrelation mellan samtliga borrhål från OPAB (figur 10). Från 75–150 meter förekommer åter lager, som i Skåls-1, med homogen mörkelsten tillhörande Närformationen.

Faludden-2 borrhningen har sina första GR värden vid 47 meters djup, vilket kan förklaras av att foderrör

satts ned till det djupet (figur 10). Mellan 47–59 meter tolkas det som varierande kalksten varvat med mörkelsten tillhörande Hamraformationen, med ett ökande lerinnehåll ned mot 59 meter. Vid 59–61 meter sjunker GR värdet drastiskt och förklaras med stöd av OPAB:s borrhålsrapport som Burgsvikooliten, en oolitisk kalksten. Från 61–100 meter är det varierande sandsten, övergångsformer till mörkelsten och mörkelsten tillhörande Burgsviksandstenen. Det mäktigaste sandstenslagret är tolkat mellan ca 61–68 meter och har en densitet på ca 2,4g / cm² utläst från en densitetslogg. Vid ca 100–112 meter är det markant lägre GR värden vilket tolkas som algkalksten tillhörande Ekeformationen, följt av lite högre, homogena GR värden mellan 112–150 meter som tolkas som mörkelsten tillhörande Närformationen.

Borrhningen Hamra-1 har från 0–75 meter väldigt låga GR värden (figur 10) och med stöd från beskrivningar av borrhkax tolkas det som kalksten, troligt är det en mäktig revkalksten tillhörande Hamraformationen. Vid 75–95 meter övergår det till mörkelsten och sedan siltsten längre ner mot 95 meter. Från 95 till 135 meter har det tolkats som kalksten varvat med mörkelsten tillhörande Burgsvikformationen. Unikt för Hamra-1 är avsaknaden av sandsten i beskrivningarna av borrhkax. En möjlig förklaring är att Burgsvikformationen vid Hamra-1 avsattes vid den yttre delen av ett delta med större inslag av silt. Porositet är uppmätt till



Figur 8: Borrhkax från Stora Sutarve undersökt i ljusmikroskop, skala i mikrometer. 9-15m) Kalkrik mörkelsten från Hamraformationen. 21-39m) Dominans av kvartskorn vilket tolkas som Burgsviksandstenen. 45-50 m) Sannolikt från Ekeformationen med högt kalkinnehåll.

ca 25–28% i delarna med silt- och mörkelsten, jämfört med kalkstenen som har betydligt lägre porositet på ca 10%. Mellan 135 och 150 meter tolkas det som mörkelsten med inslag av siltsten med stöd i beskrivningar av borrhax och enligt GR signaturen tillhörande Ekeformationen.

Hallbjäns-1 (figur 11) är enbart baserad på beskrivningar utav borrhax från OPAB och är mindre säker vad gäller tolkade formationsgränser. Mellan 32–74 meter är det beskrivet en mörkelsten som går mot siltsten med en sektion av siltig, kalkcementerad sandsten mellan 44–54 meter som tillhör Burgsvikformationen. Från 74–144 meter beskrivs en hård lersten, med låg kalkhalt som tillhör Närformationen.

5.2 SGU

Öja Strands har låga gammavärden ned till 12,7 meter (figur 9) som tolkas som kalksten tillhörande Hamraformationen, nedanför sker en markant ökning och vilket tolkas som ett 5 meter mäktigt intervall med mörkelsten vars höga lerinnehåll ger högre gammavärden. Från 17,7 meter och neråt är det väldigt låga GR värden tolkat som en renare sandsten.

Borringen Vamlingsbo Austre har en liten variation i GR-värden genom hela loggprofilen (figur 9), det har tolkats som kalksten med inslag av mörkelsten.

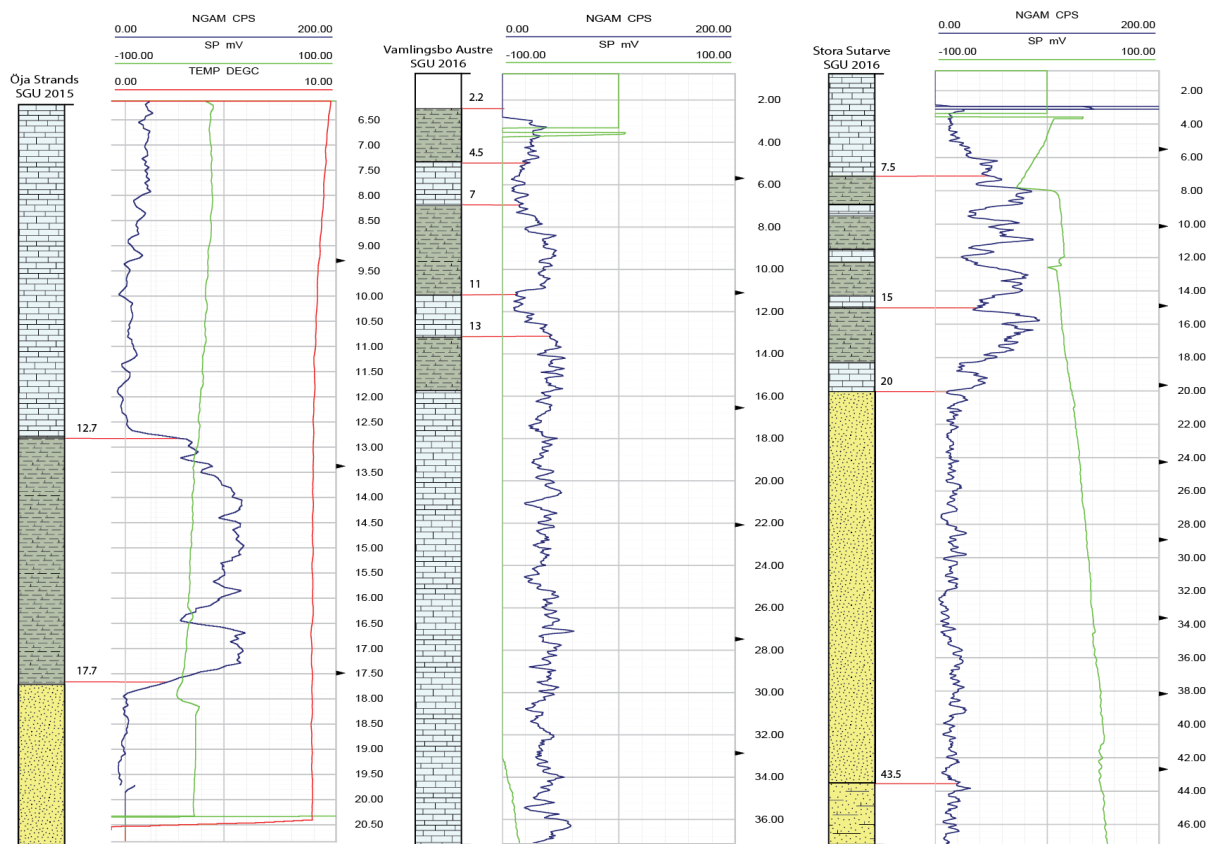
Stora Sutarve har ett inledande växelvis paket kalksten och mörkelsten som återspeglas i GR kurvan med kraftiga förändringar mellan 3–20 meter (figur 9). Från 20–46 meter är det väldigt låga gammavärden som tolkas som en renare sandsten vilket får stöd från mik-

roskoperingen av borrhaxet (figur 8). I figur 12 ses resistivitetsvärden för Stora Sutarve, där det mellan 20–47 meter visar att formationen har svagt högre resistivitet än borrhaxen. Troligt består formationsvätskan av sötvatten, hade det varit saltvatten hade det givit markant lägre värden då saltvatten leder ström bättre.

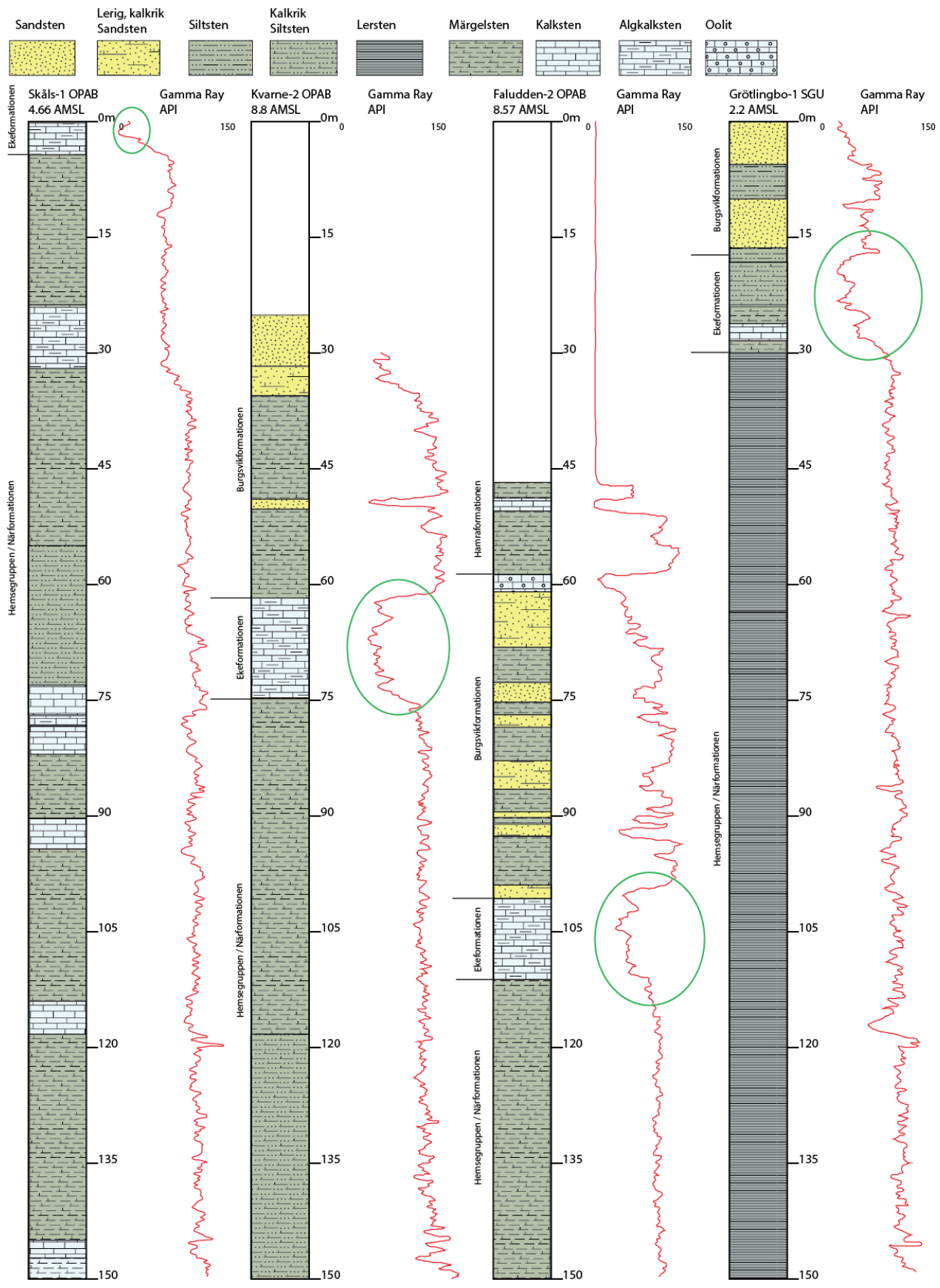
Grötlingbo-1 har en GR kurva som liknar på Burgsviksandstenen från övriga OPAB loggar mellan 0–16 meter (figur 10) som det också finns stöd av i beskrivningar av borrhaxar. Mellan 17–30 meter är det en karbonatrik siltsten, men inslag av kalksten och har ett markant lägre gammavärde som överensstämmer med Ekeformationens GR signatur. Från 30 meter och neråt är det relativt homogena och höga gammavärden som tolkas som lersten.

5.3 Tvärsnittssektioner och korrelationer mellan borrhål

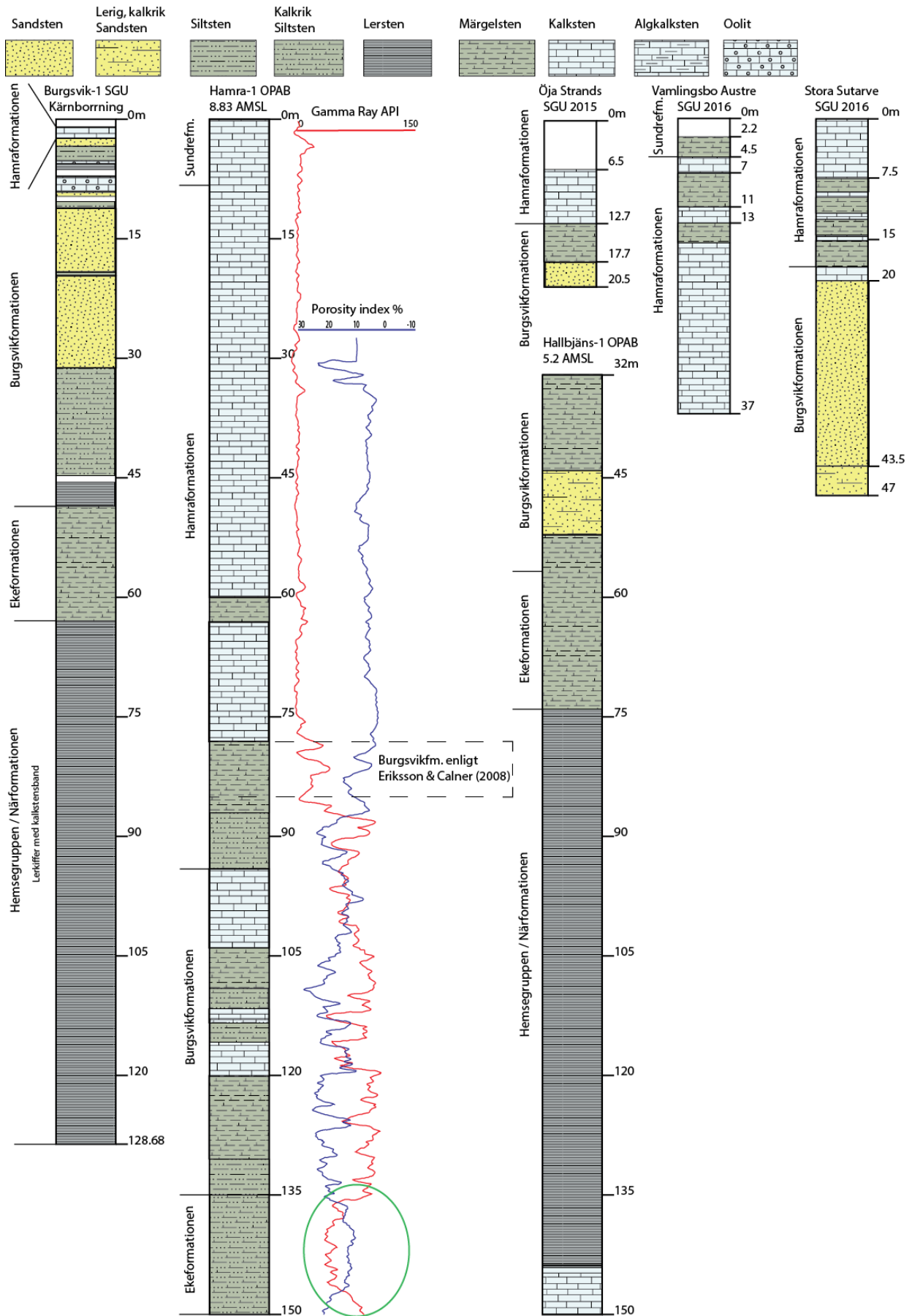
Ett antal sektioner har gjorts mellan borrhålen (figur 13) för att få en bättre bild av berggrundens uppbyggnad och åskådliggöra den laterala korrelationen. I samtliga sektioner representerar brunt Hamra- och Sundrefformationen, gult Burgsvikformationen, ljusblått Ekeformationen och ljusrött Hemsegruppen. Avstånden mellan borrhålen är flygavståndet mätt i Google Earth med hjälp av GPS-koordinater för borrhålen. I samtliga profiler A-F (figur 14-18) lämpar sig Ekeformationen väl för att visualisera lutningen mot SSO för hela berggrunden.



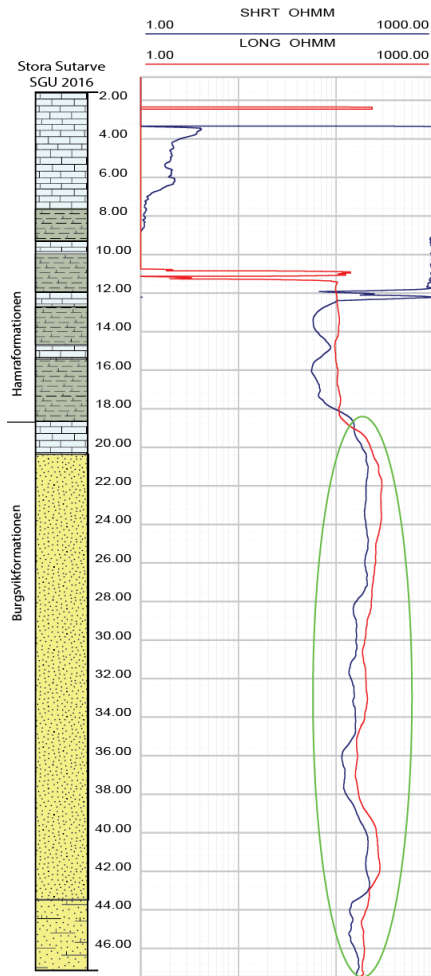
Figur 9: Borrhål från SGU med tillhörande GR-loggar presenterade med blå kurva till höger om varje tolkad stratigrafisk kolumn, närvarande är också temperaturlog och SP (Alm 2015; Alm 2016). Observera att loggarna har olika djupskalor. Borrhåls-lägena är angivna i figur 6. För formationsgränser se figur 11.



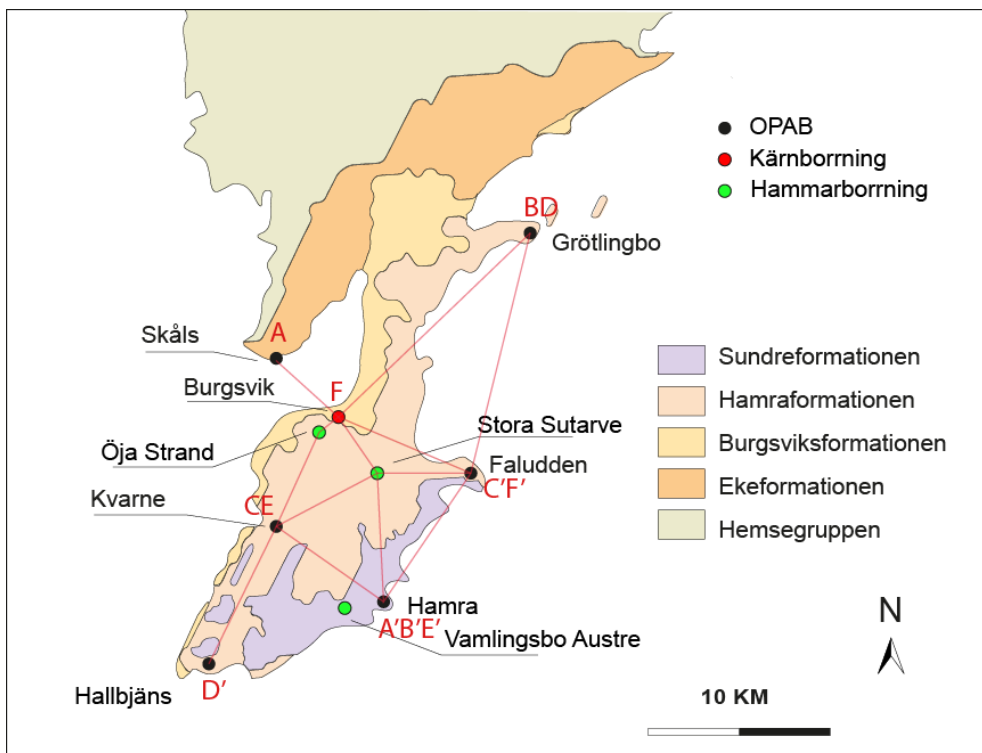
Figur 10: Tolkade stratigrafiska kolumner, varje kolumn har sin GR logg till höger. Gröna cirklar markerar Ekeformationen som är en bra marker bed vid laterala korrelationer mellan borrhålen på Sudret. I borrhålet Skåls-1 är det bara en antydning till Ekeformationen i GR-loggen. Borrhållägena illustreras i figur 6.



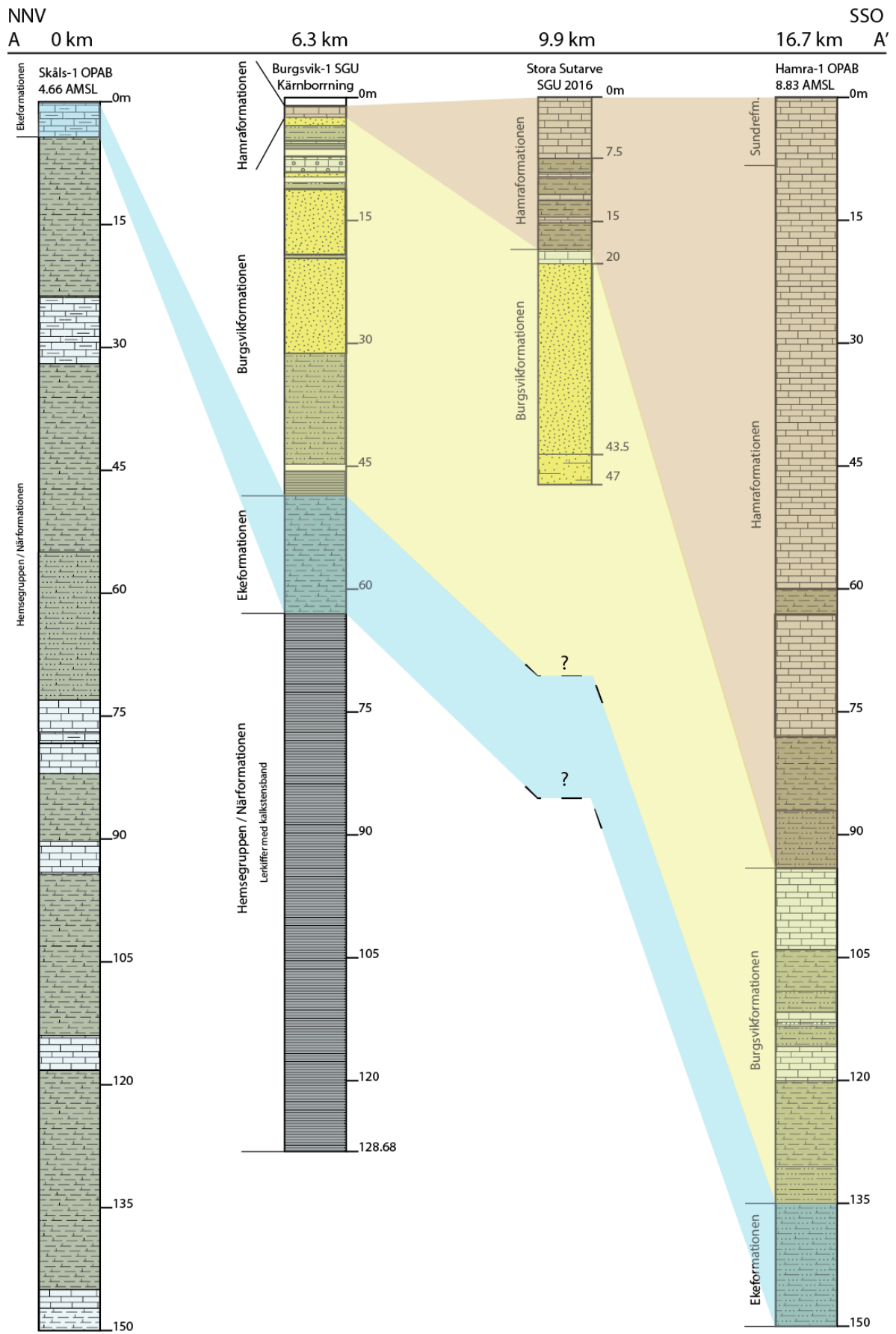
Figur 11: Tolkade stratigrafiska kolumner. Grön cirkel markerar Ekeformationen som är en bra marker bed vid laterala korrelationer mellan övriga borrhål på Sudret. Borrhålslägena är angivna i figur 6.



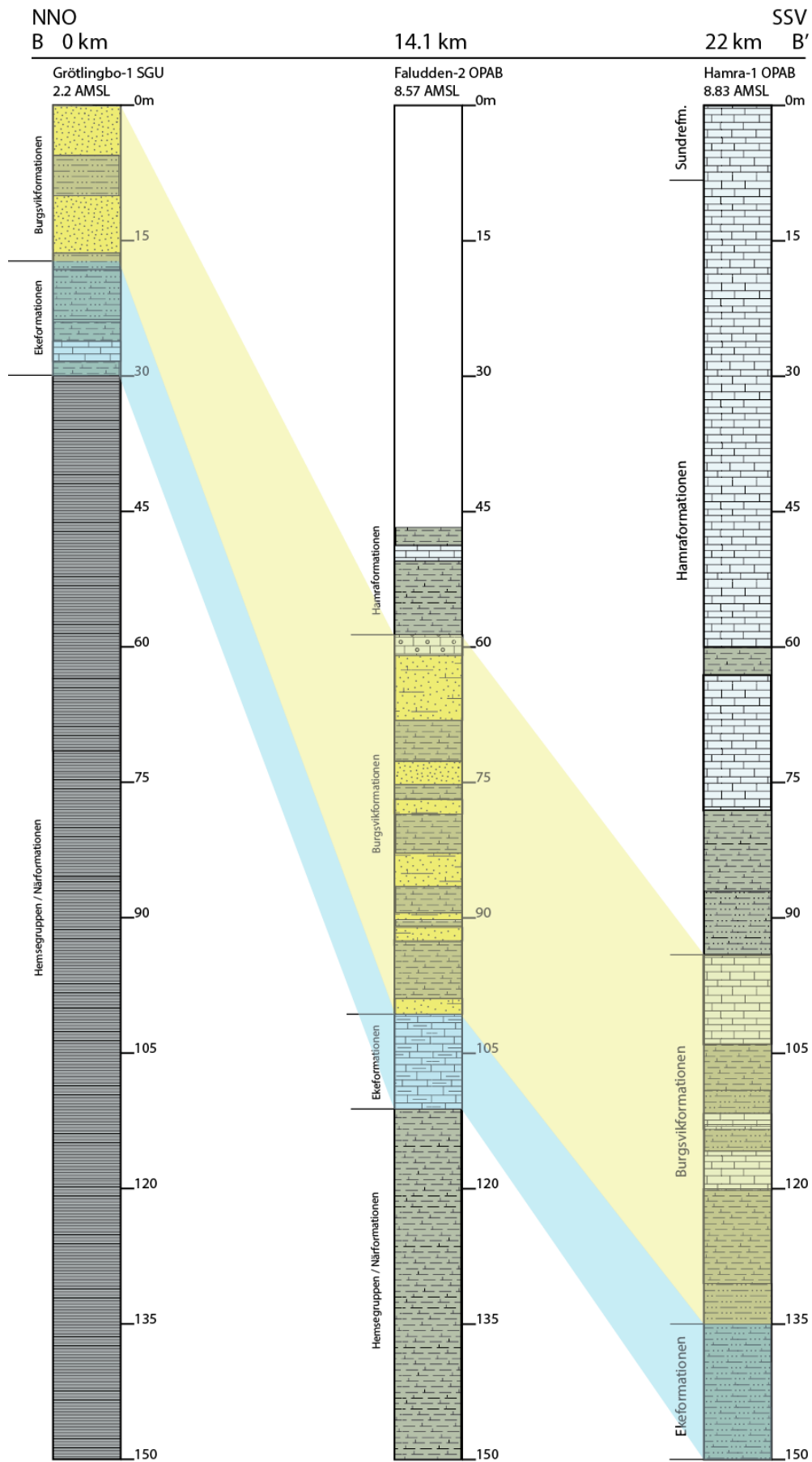
Figur 12: Resistivitetsvärden i borrhålet Stora Sutarve, området med grön ring visar på svagt högre resistivitet i formationen än i borrhätskan för Burgsviksandstenen. Det indikerar sötvatten.



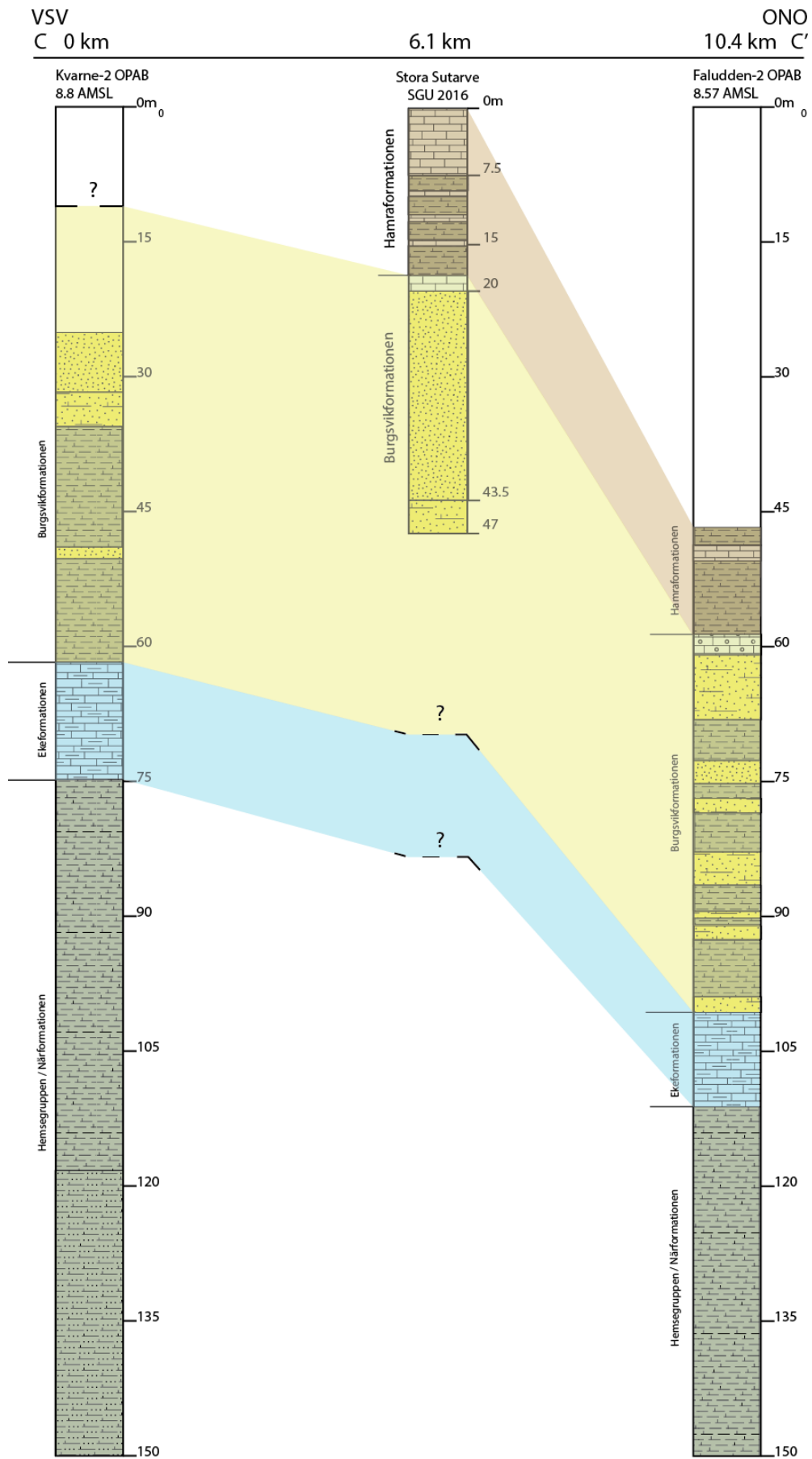
Figur 13: Karta över undersökningsområdet med tolkade sektioner (tvärsnitt).



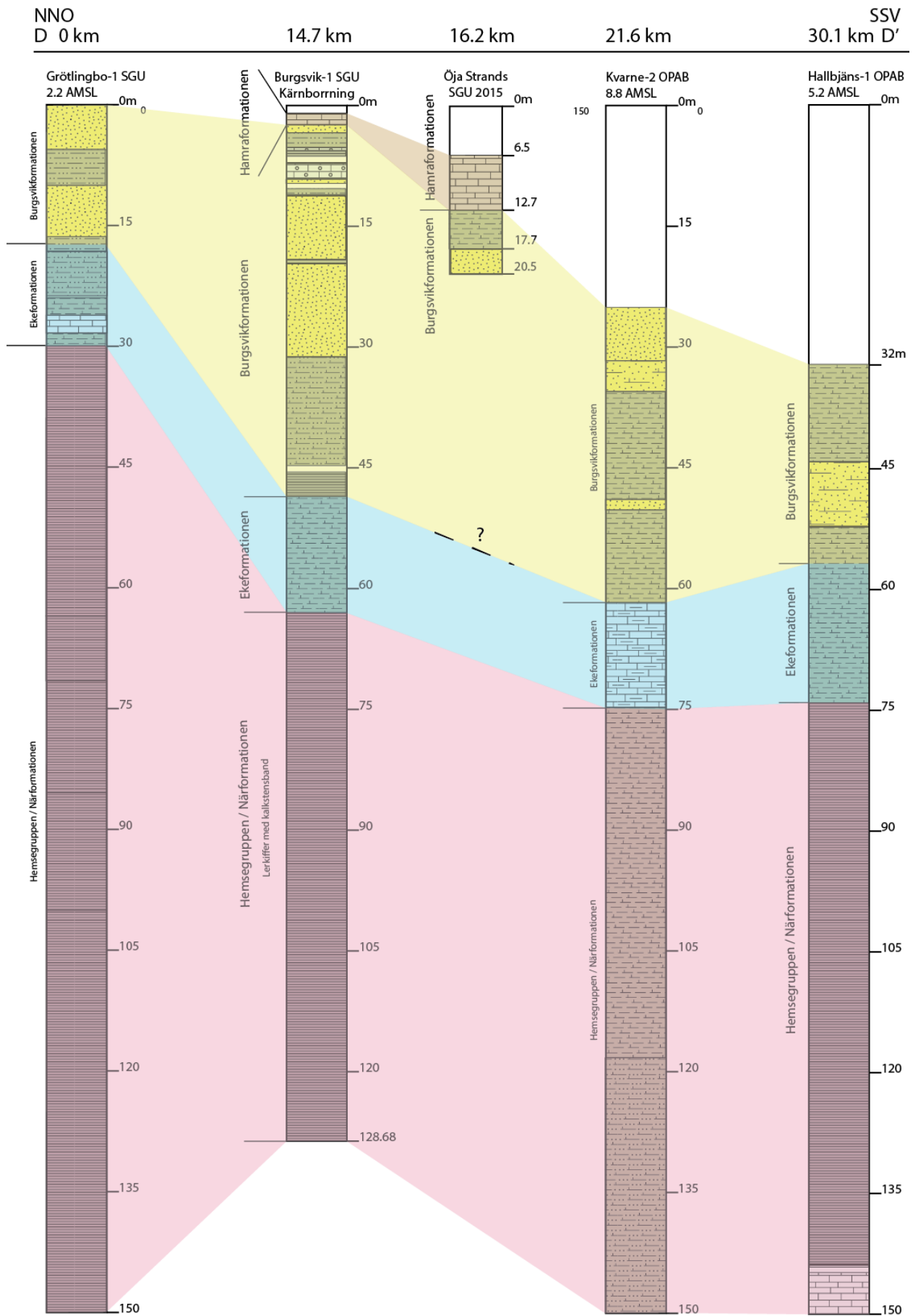
Figur 14: Tvärsnitt från Skåls-1 till Hamra-1 i NNV-SSO riktning. Profilen läge illustreras i figur 13.



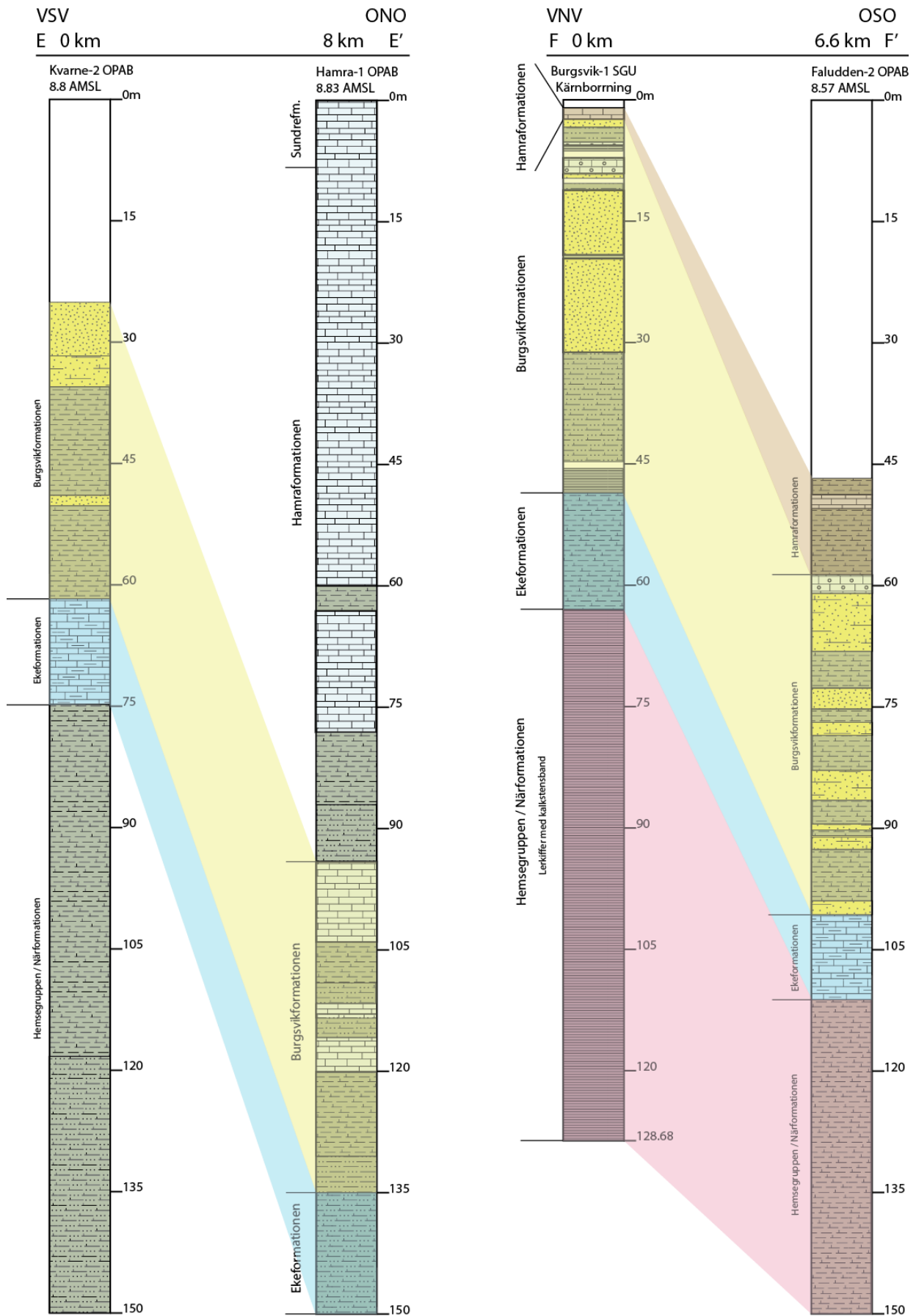
Figur 15: Tvärsnitt från Grötlingbo-1 till Hamra-1 i NNO-SSV riktning. Profilens läge illustreras i figur 13.



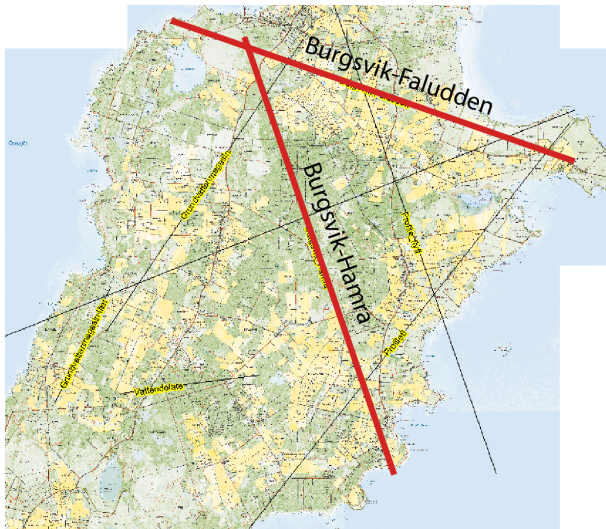
Figur 16: Tvärsnitt från Kvarne-2 till Faludden-2 i VSV-ONO riktning. Profilens läge illustreras i figur 13.



Figur 17: Tvärsnitt från Grötlingbo-1 till Hallbjäns-1 i NNO-SSV riktning. Profilens läge illustreras i figur 13.



Figur 18: Tvärsnitt från Kvarne-2 till Hamra-1 i VSV-ONO riktning, och ett tvärsnitt från Burgsvik-1 till Faludden-2 i VNV-OSO riktning. Profilernas läge illustreras i figur 13.



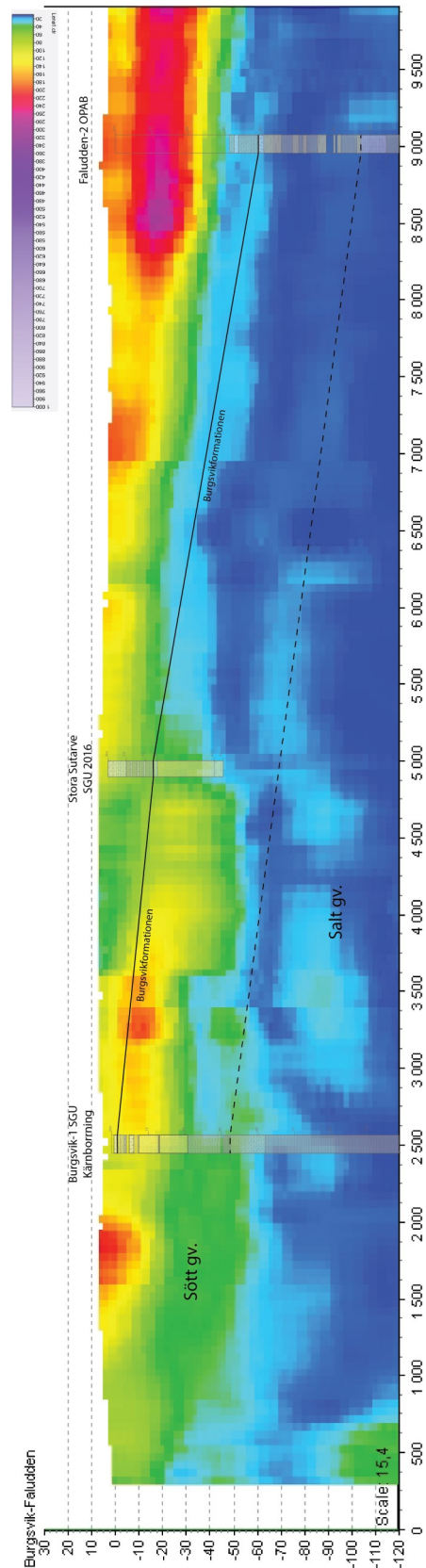
Figur 19: SkyTEM-profilerna Burgsvik-Faludden samt Burgsvik-Hamra som korrelerats till de borrhål som utförts i närheten av profilerna.

5.4 Korrelation mellan borrhningar och SkyTem

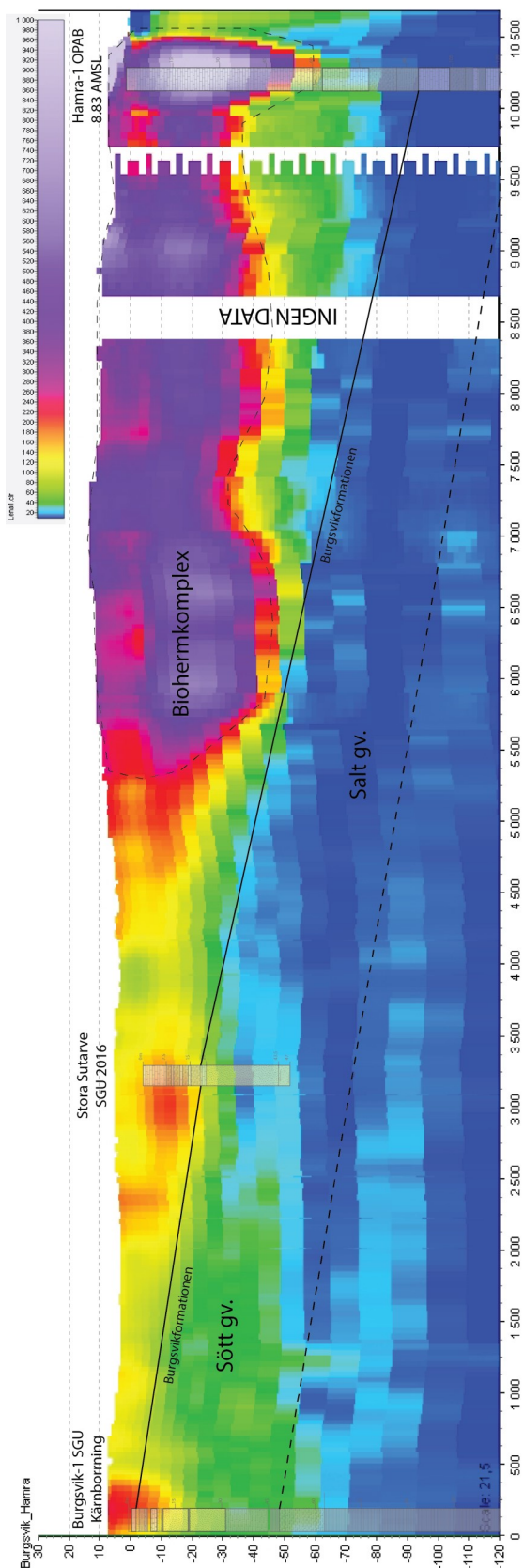
Den laterala korrelationen mellan borrhålen har kopplats till tvärsnitt som visar resistiviteten i marken utförda med SkyTEM (figur 19). SkyTEM-profilerna Burgsvik-Faludden samt Burgsvik-Hamra överensstämmer inte med de exakta lägena för borrhålen. Generellt tolkas det lågresistiva blå områdena som potentiell saltvatteninträngning, de gröna som vätskeförande lager under grundvattenytan med sötvatten. Röda och lila områden är möjligtvis områden ovanför grundvattenytan eller högresistiva och täta revkomplex. I profilen Burgsvik-Faludden (figur 20) är det låga resistivetsvärden <40 ohmm i Burgsvikformationens djupare delar i öster vilket indikerar en viss saltvatteninträngning i den måttligt porösa sandstenen. Saltvatten ser ut att vara närvarande även i väst men inte i den övre delen av Burgsviksandstenen. De höga värdena i Faludden kan vara ett mindre biohermkomplex från Hamra- och Sundreformationen. Burgsvik-Hamra profilen är av liknande karaktär med en tolkad saltvatteninträngning i den SO djupare delen av Burgsvikformationen. Det ser ut som att saltvatten kan förväntas påträffas på ca 30–50 meters djup över större delen av Sudret. I SO vid Hamra syns ett stort högresistivt biohermkomplex (figur 21), det ser också ut att agera som akvitard med en del sötvatten underliggande.

6 Diskussion

Syftet med arbetet var att bidra med kunskap om berggrunden och potential för grundvattenuttag på södra Gotland. Sammanfogningen av tolkade borrhål till tvärsnitt och en kombination med SkyTem data illustrerar tydlig SSO-lig stупning av berggrunden på Sudret, vilket stödjer tidigare tolkningar och observationer (Munthe 1921; Regnéll & Hede 1960; Calner et al. 2004; Eriksson & Calner 2008; Erlström 2009). Genom att korrelera de tolkade tvärsnitten med resistivetsundersökningar (SkyTEM) bedöms ett salt grundvatten påträffas på 30–50 meters djup. Den största potentialen för uttag av sött grundvatten är sannolikt därför i porösa och sprickrika lager i de ytligare



Figur 20: Resistivetsprofil från Burgsvik till Faludden, läget till profilen illustreras i figur 19. Blått till ljusblått indikerar salt grundvatten, grönt är möjligtvis berggrund med sött grundvatten. Röd-lila färg indikerar en tät bioherm.



Figur 21: Resistivetsprofil från Burgsvik till Hamra, läget till profilen illustreras i figur 19. En stort lila högresistivt område syns i högra delen av figuren, det tolkas som ett biohermkomplex.

delarna. Burgsviksandstenens lagerserie bedöms vara en viktig potentiell akvifer i detta avseende. Resultaten från borrhålskorrelationen utgör ett bra underlag för kompletterande geologiska hydrologiska undersökningar på Sudret.

Det var förväntat att stöta på en mer homogent uppbyggd lagerföljd i både Burgsvikformationen och Ekeformationen med sandsten respektive algkalksten. Som illustrerat och tolkat från Hamra-1 borrhningen (figur 9) är det jämfört med de andra borrhningarna en kalkrik siltsten tillhörande Ekeformationen, och en siltsten varvat med mägersten och kalksten i sekvensen tolkad att tillhöra Burgsvikformationen. Relativt stor vikt har lagts vid geologiska beskrivningar av borrhkax från OPAB:s borrhålsrapporter som indikerar en litologisk förändring av bägge formationerna österut. Valet att lägga stor vikt vid borrhkax var grundat på att borrhkax ger direkt information om förekommande bergarter men inte exakt djup för lagergränser, det gör däremot GR kurvan. En samtolkning av dessa data ger den bästa förutsättningen för bra korrelation och beskrivning av lagerserien. En möjlig förklaring som stödjer tolkningen kan vara att det beror på lokala skillnader i avsättningsmiljöer där Hamra-1 området representerar ett mer distalt avsättningsområde mer lite djupare vatten i jämförelse med Burgsviksområdet. En osäkerhet är dock att borrhkaxbeskrivningarna från OPAB borrhningen är relativt summariska vilket kan betyda att de inte dokumenterats närvaro av algkalksten och sandsten från Hamra-1 borrhningen. Om borrhkax från samtliga borrhål funnits tillgängligt hade det varit av stor hjälp i arbetet. Dahlqvist (2017) har i borrhningen Hamra-1 tolkat formationsgränserna till samma nivåer, men ger en alternativ tolkning av litologi, där Ekeformationen består av en homogen kalksten och Burgsvikformationen med tydliga sekvenser av sandsten. Eriksson och Calner (2008) erbjuder en tredje tolkning av Hamra-1 med Burgsviksandstenen mellan 78,17-85,1 meter och Ekeformationen under det. Det ger en viss inblick i svårigheten att tolka OPAB:s data från den siluriska berggrundens övre del som är av betydande lägre kvalitét jämfört med den djupare informationen från ordovicium och kambrium. I SGU borrhningen Stora Sutarve är det från 20 meter och neråt tolkat som Burgsvikformationen, vars GR signatur inte riktigt överensstämmer med GR signaturen för OPAB:s Burgsvikformation i ex. Hamraborrhningen. Den annorlunda GR kurvan kan möjligen förklaras av att OPAB använt API som standard där SGU använt CPS. En stor del av problemet att tolka GR kurvorna är att en kvartsandsten och kalksten ofta har en jämförbar halt av gammastrålande mineral. Kurvorna kan således ha ungefär samma signatur. För att kunna mer exakt korrelera olika sandstens och kalkstenslager mellan borrhål hade en kombination av kärnborrhning och loggning i ett borrhål varit till stor hjälp. Nu finns endast Burgsvikskärnan utan loggningsdata vilket gör det svårare att tolka andra borrhningar med endast geofysiska loggningar och borrhkax. Generellt sett verkar dock Burgsvikformationen karaktäriseras av en mer heterogen lagerföljd med lager med varierande halt av kvarts, lermineral, glimmer och karbonat vilket resulterar i en GR-kurva som växlar mellan höga och låga värden. Men att exakt definiera från GR nivåerna inom Burgsvikformationen vad det repre-

senterar är svårare att göra enbart med GR-loggning. För detta hade andra typer av borrhålsmätningar behövts, ex Neutron-Density för ex. särskiljning av kalksten och lera/lersten. För att bygga vidare på kunskapen om södra Gotlands geologi är det viktigt att det utförs utföra fler kärnborrhål med geofysik borrhålsmätning. En kärnborrning på sydöstra delen av Sudret för att komplettera de osäkerheter som finns kring Hamra-1 och få en mer detaljerad bild av berggrunden som senare kan fungera som referensmaterial likt Burgsvik-borrningen, skulle vara strategiskt bra. I syftet att bygga på bilden om var grundvatten kan utvinnas hade ytligare borrhål varit av intresse, dels för karteringen av det salta grundvatten som är närvarande men också för att undersöka parametrar som porositet, permeabilitet och uttagskapacitet.

6.1 Potential för grundvattenuttag och energilagring

Formationen med mest potential för grundvattenuttag ser ut till att vara Burgsviksandstenen med ett par indikationer på att den har en viss porositet. I Hamra-1 har den en uppmätt porositet på 25–28%. Däremot ser det ut till att vara en genomgående saltvatteninträngning under hela Sudret, så sötvatten utvinns troligen bäst ur de översta 30–40 meterna av berggrunden. Därför är det potentiellt bäst grundvattenuttag ur de ytligare delarna av Burgsviksandstenen som har funnits just i området vid Burgsvik och Grötlingbo. Ett flertal parametrar som nederbörd, grundvattenbildning, volym, och permeabilitet bör undersökas närmre innan rekommendationer kan ges. På samma sätt kan den delen av Burgsviksandstenen som innehåller saltvatten möjligen användas till energilagring förutsatt att fler parametrar undersöks.

7 Slutsatser

- Berggrunden på Gotland har en tydlig lutning åt SSO som illustreras i de framtagna tvärsnitten.
- Ekeformationen är en exceptionell marker bed vid gamma ray loggning på Gotland.
- Salt grundvatten kan förväntas att finnas på djup mellan 30–50 meter på Sudret.
- Burgsvikformationen har kraftig variation borrhål emellan.

8 Tackord

Stort tack till Mikael Erlström på Sveriges Geologiska Undersökning i Lund för ovärderliga diskussioner och vägledning igenom hela arbetet. Vill också tacka Peter Dahlgvist även han på SGU i Lund för framställning av SkyTEM profiler och hjälp med korrelationer kring saltvatteninträngning.

9 Referenser

- Alm, P.-G., 2012: "Logging" Geofysisk borrhålsmätning. Lunds Universitet. 85 sid.
- Alm, P.-G., 2015: *Loggningrapport. Borrhålsloggning Gotland, diarienummer: 423-2354/2015*. Sveriges geologiska undersökning (SGU). 60 sid.

Alm, P.-G., 2016: *Loggningrapport. Borrhålsloggning Gotland, diarienummer: 423-2454/2016*. Sveriges geologiska undersökning (SGU). 79 sid.

Calner, M., Jeppsson, L. & Munnecke, A., 2004: The Silurian of Gotland—Part I: Review of the stratigraphic framework, event stratigraphy, and stable carbon and oxygen isotope development: *Erlanger geologische Abhandlungen, Sonderband 5*, 113-131.

Cherns, L., 1982: Paleokarst, tidal erosion surfaces and stromatolites in the silurian eke formation of Gotland, Sweden: *Sedimentology* 29, 819-833. doi: 10.1111/j.1365-3091.1982.tb00086.x

Dahlgvist, P., 2015: *SkyTEM-undersökningar på Gotland*. Uppsala : Sveriges geologiska undersökning (SGU), 2015.

Dahlgvist, P., 2017: *SkyTEM-undersökningar på Gotland, del 2*. Uppsala : Sveriges geologiska undersökning (SGU), 82 sid.

Dewan, J. T., 1983: *Essentials of modern open-hole log interpretation*. PennWell Books. 361 sid.

Eriksson, M. E. & Calner, M., 2005: *The dynamic Silurian earth : subcommission on Silurian Stratigraphy Field Meeting 2005, August 15th-22nd, Gotland, Sweden : field guide and abstracts*. Uppsala : Sveriges geologiska undersökning (SGU), 2005.

Eriksson, M. J. & Calner, M., 2008: A sequence stratigraphical model for the Late Ludfordian (Silurian) of Gotland, Sweden: implications for timing between changes in sea level, palaeoecology, and the global carbon cycle: *Facies* 54, 253-276. doi: 10.1007/s10347-007-0128-y

Erlström, M., 2009: *Beskrivning till regional berggrundskarta över Gotlands län*. Uppsala : Sveriges geologiska undersökning (SGU). 60 sid.

Hede, J. E., 1919: *Djupborrningen vid Burgsvik på Gotland 1915 : paleontologiska-stratigrafiska resultat*. Stockholm, 1919.

Länsstyrelsen Gotlands Län, 2017: Hur är vattenläget i Gotlands län? Hämtad 17.03.30, från <http://www.lansstyrelsen.se/Gotland/Sv/miljo-och-klimat/vatten-och-vattenanvandning/vattenlaget%20p%C3%A5%20Gotland/Sidor/default.aspx>.

Munthe, H., 1921: *Beskrivning till kartbladet Burgsvik jämte Hoburgen och Ytterholmen: med 1 tavla*. Norstedt.

Regnéll, G. & Hede, J. E., 1960: *The lower paleozoic of Scania : the silurian of Gotland : guide to excursions nos A 22 and C 17*. Stockholm, [1960] ; (Stockholm : Norstedt).

Bilaga

Djup, m	Beskrivning av borrhärdar Burgsvik
0–1	Lösa jordlager
1–2,38	Blågrå, hård, osiktad oftast tät kristallin kalksten eller mägerkalk, i undre delen finoolitisk. Hamraformationen
2,38–2,71	Ljusgrå, lös, finkornig, kalkhaltig, något lerblandad, glimmerförande kvartssandsten. Burgsviksanden
2,71–2,95	Något oolitisk, fossilrik sandsten
2,95–3,43	Obetydligt kalkhaltig, fossilfattig sandsten
3,43–5,5	Ljust grå till blågrå, lös och finkornig, glimmerförande, skiffrig sandsten, lerblandad med låg kalkhalt
5,5–5,88	Ljust grå till brungrå, hård kalksten med oolitisk struktur <1 mm
5,88–6,48	Blågrå, tät, osiktad kalkfri lersten, fossilfri
6,48–7,49	Borrhärd saknas
7,49–7,54	Blågrå, tät, osiktad lersten
7,54–9,50	Oolit. Hård, ljust grå eller brungrå kalksten med jämnkornig oolitstruktur 1-4 mm
9,50–9,85	Sandsten, låg kalkhalt, fossilfattig
9,85–10,65	Borrhärd saknas
10,65–11,44	Grå till blågrå, lös och finkornig, rikt glimmerförande sandsten, lerblandad med låg kalkhalt
11,44–19,46	Sandsten, låg kalkhalt, sporadiska lerklumpar och lameller, obetydliga kolfragment, fossilfattig
19,46–19,50	Grå till blågrå, lös och finkornig, lerblandad, glimmerförande sandsten, inga fossil
19,50–19,62	Blågrå, tät, osiktad, kalkfri lersten
19,62–19,69	Grå till blågrå, lös och finkornig, lerblandad och rikt glimmerförande något skiffrig sandsten, obetydlig kalkhalt, inga fossil
19,69–32,20	Sandsten, låg kalkhalt, sporadiska lerklumpar och lameller. Mellan 30.72-32.20 kalkrikare och hårdare
32,20–33,40	Starkt lerblandad och rikt glimmerförande, skiffrig kalksten. Obetydlig kalkhalt
33,40–33,55	Blågrå, tät, lersten med låg kalkhalt
33,55–36,45	Starkt lerblandad och glimmerförande, skiffrig sandsten
36,45–36,57	Tät, obetydligt kalkhaltig lersten
36,57–43,57	Starkt lerig och rikt glimmerförande, skiffrig sandsten. Låg kalkhalt
43,57–43,64	Tät, lersten med låg kalkhalt
43,64–44,40	Starkt lerig och rikt glimmerförande, skiffrig sandsten.
44,40–44,60	Kalkrik, hård, innehåll av svavelkis, sandsten
44,60–44,90	Starkt lerig, rikt glimmerförande, skiffrig sandsten
44,90–45,60	Borrhärd saknas
45,60–49,60	Tät, något glimmerförande lersten med låg kalkhalt.
49,60–63,50	Blågrå, något sandig och glimmerhaltig, osiktad mägersten. Fossil av <i>Sphaerocodium gotlandicum</i> . Ekeformationen
63,50–128,68	Ljusgrå till mörkgrå, mjuk och obetydligt sandig och glimmerhaltig, svagt kalkhaltig lerskiffer. Växellagrad med tunna band eller linser med hård, tät finkristallinisk kalksten. Närformationen

Tidigare skrifter i serien

”Examensarbeten i Geologi vid Lunds universitet”:

451. Andersson, Klara, 2015: Undersökning av sluttestsmetodik. (15 hp)
452. Ivarsson, Filip, 2015: Hur bildades Bushveldkomplexet? (15 hp)
453. Glommé, Alexandra, 2015: $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ in plagioclase, evidence for a crustal origin of the Hakefjorden Complex, SW Sweden. (45 hp)
454. Kullberg, Sara, 2015: Using Fe-Ti oxides and trace element analysis to determine crystallization sequence of an anorthositenorite intrusion, Ålgön SW Sweden. (45 hp)
455. Gustafsson, Jon, 2015: När började platttektoniken? Bevis för platttektoniska processer i geologisk tid. (15 hp)
456. Bergqvist, Martina, 2015: Kan Ölands grundvatten öka vid en uppdämning av de utgrävda diken genom strandvallarna på Ölands östkust? (15 hp)
457. Larsson, Emilie, 2015: U-Pb baddeleyite dating of intrusions in the south-easternmost Kaapvaal Craton (South Africa): revealing multiple events of dyke emplacement. (45 hp)
458. Zaman, Patrik, 2015: LiDAR mapping of presumed rock-cored drumlins in the Lake Åsnen area, Småland, South Sweden. (15 hp)
459. Aguilera Pradenas, Ariam, 2015: The formation mechanisms of Polycrystalline diamonds: diamondites and carbonados. (15 hp)
460. Viehweger, Bernhard, 2015: Sources and effects of short-term environmental changes in Gullmar Fjord, Sweden, inferred from the composition of sedimentary organic matter. (45 hp)
461. Bokhari Friberg, Yasmin, 2015: The paleoceanography of Kattegat during the last deglaciation from benthic foraminiferal stable isotopes. (45 hp)
462. Lundberg, Frans, 2016: Cambrian stratigraphy and depositional dynamics based on the Tomten-1 drill core, Falbygden, Västergötland, Sweden. (45 hp)
463. Flindt, Anne-Cécile, 2016: A pre-LGM sandur deposit at Fiskarheden, NW Dalarne - sedimentology and glaciotectionic deformation. (45 hp)
464. Karlatou-Charalampopoulou, Artemis, 2016: Vegetation responses to Late Glacial climate shifts as reflected in a high resolution pollen record from Blekinge, south-eastern Sweden, compared with responses of other climate proxies. (45 hp)
465. Hajny, Casandra, 2016: Sedimentological study of the Jurassic and Cretaceous sequence in the Revinge-1 core, Scania. (45 hp)
466. Linders, Wictor, 2016: U-Pb geochronology and geochemistry of host rocks to the Bastnäs-type REE mineralization in the Riddarhyttan area, west central Bergslagen, Sweden. (45 hp)
467. Olsson, Andreas, 2016: Metamorphic record of monazite in aluminous migmatitic gneisses at Stensjöstrand, Sveconorwegian orogen. (45 hp)
468. Liesirova, Tina, 2016: Oxygen and its impact on nitrification rates in aquatic sediments. (15 hp)
469. Perneby Molin, Susanna, 2016: Embryologi och tidig ontogeni hos mesozoiska fisködlor (Ichthyopterygia). (15 hp)
470. Benavides Höglund, Nikolas, 2016: Digitization and interpretation of vintage 2D seismic reflection data from Hanö Bay, Sweden. (15 hp)
471. Malmgren, Johan, 2016: De mellankambrika oelandicuslagren på Öland - stratigrafi och facietyper. (15 hp)
472. Fouskopoulos Larsson, Anna, 2016: XRF-studie av sedimentära borrhärdar - en metodikstudie av programvarorna Q-spec och Tray-sum. (15 hp)
473. Jansson, Robin, 2016: Är ERT och Tidsdomän IP potentiella karteringsverktyg inom miljögeologi? (15 hp)
474. Heger, Katja, 2016: Makrofossilanalys av sediment från det tidig-holocena undervattenslandskapet vid Haväng, östra Skåne. (15 hp)
475. Swierz, Pia, 2016: Utvärdering av vattenkemisk data från Borgholm kommun och dess relation till geologiska förhållanden och markanvändning. (15 hp)
476. Mårdh, Joakim, 2016: WalkTEM-undersökning vid Revingehed provpumpningsanläggning. (15 hp)
477. Rydberg, Elaine, 2016: Gummigranulat - En litteraturstudie över miljö- och hälsopåverkan vid användandet av gummigranulat. (15 hp)
478. Björnfors, Mark, 2016: Kusterosion och äldre kustdyners morfologi i Skälderviken. (15 hp)

479. Ringholm, Martin, 2016: Klimatutlöst matbrist i tidiga medeltida Europa, en jämförande studie mellan historiska dokument och paleoklimatarkiv. (15 hp)
480. Teilmann, Kim, 2016: Paleomagnetic dating of a mysterious lake record from the Kerguelen archipelago by matching to paleomagnetic field models. (15 hp)
481. Schönström, Jonas, 2016: Resistivitets- och markradarmätning i Ängelholmsområdet - undersökning av korrosiva markstrukturer kring vattenledningar. (15 hp)
482. Martell, Josefin, 2016: A study of shock-metamorphic features in zircon from the Siljan impact structure, Sweden. (15 hp)
483. Rosvall, Markus, 2016: Spår av himlakropps-kollisioner - bergarter i nedslag-skratrar med fokus på Mien, Småland. (15 hp)
484. Olausson, My, 2016: Resistivitets- och IP-mätningar på den nedlagda deponin Gustavsfält i Halmstad. (30 hp)
485. Plan, Anders, 2016: Markradar- och resistivitetsmätningar – undersökningar utav korrosionsförhöjande markegenskaper kring fjärrvärmeledningar i Ängelholm. (15 hp)
486. Jennerheim, Jessica, 2016: Evaluation of methods to characterise the geochemistry of limestone and its fracturing in connection to heating. (45 hp)
487. Olsson, Pontus, 2016: Ekologiskt vatten från Lilla Klåveröd: en riskinventering för skydd av grundvatten. (15 hp)
488. Henriksson, Oskar, 2016: The Dynamics of Beryllium 10 transport and deposition in lake sediments. (15 hp)
489. Brådenmark, Niklas, 2016: Lower to Middle Ordovician carbonate sedimentology and stratigraphy of the Pakri peninsula, north-western Estonia. (45 hp)
490. Karlsson, Michelle, 2016: Utvärdering av metoderna DCIP och CSIA för identifiering av nedbrytningszoner för klorerade lösningsmedel: En studie av Färgaren 3 i Kristianstad. (45 hp)
491. Elali, Mohammed, 2016: Flygsanddyners inre uppbyggnad – georadarundersökning. (15 hp)
492. Preis-Bergdahl, Daniel, 2016: Evaluation of DC Resistivity and Time-Domain IP Tomography for Bedrock Characterisation at Önnelöv, Southern Sweden. (45 hp)
493. Kristensson, Johan, 2016: Formation evaluation of the Jurassic Stø and Nordmela formations in exploration well 7220/8-1, Barents Sea, Norway. (45 hp)
494. Larsson, Måns, 2016: TEM investigation on Challapampa aquifer, Oruro Bolivia. (45 hp)
495. Nylén, Fredrik, 2017: Utvärdering av borrhålskartering avseende kalksten för industriella ändamål, File Hajdarbrottet, Slite, Gotland. (45 hp)
496. Mårdh, Joakim, 2017: A geophysical survey (TEM; ERT) of the Punata alluvial fan, Bolivia. (45 hp)
497. Skoglund, Wiktor, 2017: Provenansstudie av detritala zirkoner från ett guldförande alluvium vid Ravlunda skjutfält, Skåne. (15 hp)
498. Bergcrantz, Jacob, 2017: Ett fönster till Kattegatts förflutna genom analys av botenlevande foraminiferer. (15 hp)
499. O'Hare, Paschal, 2017: Multiradionuclide evidence for an extreme solar proton event around 2610 BP. (45 hp)
500. Goodship, Alastair, 2017: Dynamics of a retreating ice sheet: A LiDAR study in Värmland, SW Sweden. (45 hp)
501. Lindvall, Alma, 2017: Hur snabbt påverkas och nollställs luminiscenssignaler under naturliga ljusförhållanden? (15 hp)
502. Sköld, Carl, 2017: Analys av stabila isotoper med beräkning av blandningsförhållande i ett grundvattenmagasin i Älvkarleby-Skutskär. (15 hp)
503. Sällström, Oskar, 2017: Tolkning av geofysiska mätningar i hammarborrhål på södra Gotland. (15 hp)



LUNDS UNIVERSITET

Geologiska institutionen
Lunds universitet
Sölvegatan 12, 223 62 Lund