Berggrunden på Sudret, Gotland

Underlag för bedömning av grundvattentillgångar, geoenergipotential samt koldioxidlagring

Mikael Erlström, Daniel Sopher & Peter Dahlqvist

september 2022

SGU-rapport 2022:11





Omslagsbild: Sundrekalksten i klinten sydväst om Digrans (6312963, 692197) Fotograf: Mikael Erlström

Författare: Mikael Erlström, Daniel Sopher och Peter Dahlqvist Granskad av: Lena Persson Ansvarig enhetschef: Jakob Levén Redaktör: Johan Sporrong

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

www.sgu.se

INNEHÅLL

Sammanfattning	5
Summary	6
Inledning	7
Projekt Sudret – bakgrund, syfte och målsättning	7
Underlagsdata och tidigare undersökningar	11
OPAB:s borrhålsdata	
SGU:s kärnborrning St.Sutarve-2018	
Övriga kärnborrningar	15
Borrningar i samband med SkyTEM-projektet	15
Seismiska profiler (OPAB)	
Flyggeofysik	
Markgeofysik	
Helikopterburna TEM-mätningar	
Geologiska kartor och publikationer om berggrunden på Sudret	
Berggrundens uppbyggnad	
Kambrium	
Ordovicium	
Silur	
Indelning av den siluriska djupberggrunden på södra Gotland	
Stratigrafisk utvärdering av den siluriska djupgeologiska berggrunden	
Burgsvikformationen	
Utbredning, mäktighet, lagerföljd	
Petrografi, kemisk sammansättning och fysikaliska egenskaper	
Användning och brytning	41
Faluddensandstenen	
Utbredning, mäktighet och lagerföljd	
Petrografi, kemisk sammansättning, fysikaliska egenskaper	
Modeller av berggrundens strukturella uppbyggnad	
Strukturkartor och 3D-modell	
Volymberäkningar av Faludden- och Burgsviksreservoarerna	
Resistivitetsmodeller från SkyTEM-undersökningen	
Hydrogeologisk tolkning av Burgsvikssandstenen	
Berggrundens termiska egenskaper och geotermiska potential	55

Geotermisk gradient och värmeledningsförmåga	55
Geotermisk potential	57
Energilagring	58
Förutsättningar för lagring av koldioxid	59
Allmänt om lagring i djupa akviferer	59
Potential i Södra Östersjön	61
Berggrunden på Sudret och koldioxidlagring	61
Projektspecifika data – lagring och tillgänglighet	63
Slutsatser – möjligheter och framtid	64
Referenser	65
Bilaga 1. Djupnivåer för stratigrafiska intervall i djupa borrhål på Sudret	69
Bilaga 2. Porositet, permeabilitet och korndensitet på kärnprov av Faluddensandstene	en72
Bilaga 3. Sammanställning av XRF-data från Burgsvikformationen i St.Sutarve-2018	73

SAMMANFATTNING

Sudret är ett av de områden som Sveriges geologiska undersökning under 2015 undersökte med flygburen transient elektromagnetisk mätning (ATEM). SkyTEM är namnet på själva systemet som användes vid undersökningen. Förutom för den övre delen av marken visade mätresultaten på goda möjligheter att med stöd av bland annat OPAB:s seismik och borrhålsinformation göra en karaktärisering av berggrunden på djupet. Störst betydelse för den djupgeologiska modellen i rapporten har en 564,95 m djup ny kärnborrning på centrala Sudret. Borrkärnan från St.Sutarve-2018 och geofysisk borrhålsloggning har möjliggjort en litologisk korrelation och klassificering av berggrundslagren med övriga borrningar på Sudret där det endast finns kaxprover och geofysiska loggar. Främst har arbetet fokuserat på en beskrivning av Burgsvikssandstenen och Faluddensandstenen för bedömning av deras förutsättningar för grundvattenuttag, geotermi, energilagring och koldioxidlagring.

I rapporten illustreras berggrundens uppbyggnad i profiler, kartor och 3D-modeller. Dessutom redovisas resultat från undersökningar av berggrundens petrografiska, fysikaliska (porositet och permeabilitet) och termiska egenskaper. I rapporten ges även en presentation av den omfattande mängd data som finns från olika geologiska undersökningar på Sudret.

Modellering av andelen nettosand och utbredningen av de individuella sandstenslagren i Burgsvikssandstenen visar att det finns flest sandlager i de västra och nordvästra delarna av Sudret. Där utgör sandstenslager uppernot 40 % av den cirka 50 m mäktiga Burgsvikssandstenen. Resterande lager i enheten domineras av tät lersten. I sydostlig riktning tunnar sandstenslagren ut och blir färre. Sandstenslagren domineras av finkornig, glimmerrik och i varierande grad karbonathaltig kvartssandsten. SGU:s analyser visar en god porositet (medelvärde=16,6 %) men sandstenslagren har oftast en låg gaspermeabilitet (medelvärde 63 mD), motsvarande en transmissivitet < 10⁻⁵ m/s. De mäktigaste och mest permeabla sandstenslagren med bäst akviferegenskaper för grundvatten återfinns i de övre metrarna av lagerföljden och främst i de västra delarna av Sudret. På den östra och sydöstra delen av Sudret innehåller Burgsvikssandstenen sannolikt salthaltigt grundvatten eftersom den här påträffas på djup kring 100 m. Med stöd av vår modell för sandstenslagrens utbredning, mäktighet, och permeabilitet samt med information från befintliga brunnar kan en förfinad grundvattenmodell för sandstenen nu tas fram.

Den mellankambriska Faluddensandstenen på drygt 500 m djup har en mycket homogen uppbyggnad. Enheten domineras av meter-tjocka lager med medelkornig kvartssandsten. Andelen sandstenslager är 80–90 %. I enskilda borrningar finns decimeter-tunna lager med lersten eller lerskiffer insprängda i den uppemot 36 m mäktiga sandstensdominerade lagerföljden. Relativt höga medelvärden för den horisontella gaspermeabiliteten (655 mD) och en medelporositet på 15,6 % indikerar goda förutsättningar för både geotermi och koldioxidlagring.

Sammantaget finns det nu för Sudret en omfattande databas och modeller för berggrundens uppbyggnad på djupet som kan användas för framtida studier av bland annat Burgsviks- och Faluddensandstenarna. Metodiken som vi testat för bedömning av nettosand kan användas som en referens till modellering av andra områden med likartade sandstensformationer. Med stöd av geofysiska borrhålsloggar, som ger information om porositet, kan man göra en nettosandberäkning där andelen sand även baseras på olika gränsvärden för porositeten.

SUMMARY

Sudret is one of the areas on Gotland that The Geological Survey of Sweden investigated in 2015 with airborne transient electromagnetic measurements (ATEM). The SkyTEM system was used in the survey. In addition to the visualisation of the upper part of the subsurface, the results showed good opportunities for a deeper characterization of the bedrock with the support of OPAB's seismic and borehole information. Information from a new fully cored borehole (St.Sutarve-2018), drilled to a depth of 564.95 m in the central part of Sudret, has been of significant importance for the deep geological model presented in this study. The combination of drill core and geophysical borehole logging from this new well has enabled a lithological correlation and classification of the rock successions in other boreholes on Sudret where there are only descriptions of rock cuttings and geophysical logs available. Foremost, the work has focused on a description of the Burgsvik Sandstone and the Faludden Sandstone in order to assess their properties for groundwater, geothermal energy, energy storage and carbon dioxide storage.

Beside several structural maps, profiles, isopach maps and 3D-models, results from petrographic studies, porosity and permeability analysis and thermal properties are presented. The report also presents a compilation of a great amount of data from older surveys.

Modeling of the net sand ratio and distribution of the individual sandstone beds in the Burgsvik Sandstone shows an increasing amount of sandstone beds in the north-western parts of Sudret. In this part the sandstone beds accounts for up to 40% of the approximately 50 m thick Burgsvik Sandstone. The remaining part predominantly consists of claystone. In the south-east direction, the sandstone layers thin out and become fewer. The sandstone is dominated by fine-grained mica-rich quartz sandstone, with a varying amount of carbonate particles and cement. Analyses of the sandstones give a moderately high average porosity of 16.6% and a low average permeability of 63 mD, corresponding to a transmissivity of about < 10^{-5} m/s. The thickest and most permeable sandstone layers with the best aquifer properties for groundwater are found in the upper meters of the Burgsvik Sandstone in the west parts of Sudret. Here the sandstone often lies above the saline groundwater level. On the east and southeast side of Sudret the sandstone is found at depths around 100 m which likely results in saline groundwater conditions. With the support of our model for the distribution, thickness, and permeability of the sandstone layer, combined with information from existing wells, a refined groundwater model for the sandstone can now be developed.

The Middle Cambrian Faludden Sandstone at c. 500 m depth is a very homogeneous sandstone aquifer. The unit is dominated by meter-thick layers of medium-grained quartz sandstone. The net sand ratio is 80–90%. There are only a few thin layers of claystone and shale interbedding (of the order of several 10s of cm thick) within the up to 36 m thick sandstone-dominated unit. A relatively high average horizonal gas permeability (655 mD) and fair average total porosity (15.6%) indicate good reservoir properties for both geothermal applications and carbon dioxide storage.

All in all, the study has resulted in an extensive database for the Sudret area that can be used for in-depth studies. Furthermore, the methodology developed in this study for assessing the net sand can be used as a reference for similar modelling for other areas with sedimentary bedrock. Specifically, where interpolation of information from geophysical borehole logs combined with cut off values can be used to model the net sand throughout the reservoir interval across an area of interest.

INLEDNING

Region Gotland presenterar i sitt regionala utvecklingsprogram en vision och övergripande mål om en ekologiskt, socialt och ekonomiskt hållbar samhällsutveckling. Ett av regionens mål är att öka den bofasta befolkningen. I den fördjupade översiktsplanen för Sudret och Burgsvik lyfts flera frågor, där bland annat vatten- och avloppsfrågorna har en central roll (Region Gotland 2013).

Det är allmänt känt att grundvattensituationen på Gotland är problematisk, speciellt under sommarperioden. Eftersom det saknas större grundvattenmagasin i jordlagren är grundvattenförekomsterna i berggrunden den viktigaste resursen. Ytvatten och avsaltat havsvatten bidrar endast i begränsad omfattning. Magasineringskapaciteten i berggrunden är oftast inte mer än några få procent av den totala bergvolymen. Förekomster av uppsprucken berggrund och porös sandstensberggrund är därför viktiga, eftersom där kan det finnas möjligheter till större magasinering och uttag av grundvatten. En ytterligare försvårande faktor, på Gotland, är att salthaltigt grundvatten påträffas relativt ytligt, speciellt i kustnära områden. Detta begränsar hur djupt man kan borra för att grundvattnet fortfarande ska hålla dricksvattenkvalitet.

De senaste åren har grundvattenmagasinen i jordlagren och berggrunden inte fyllts på i lika hög grad som tidigare och grundvattennivåerna har därför varit allmänt lägre än normalt. Detta har påverkat såväl kommunal som enskild dricksvattenförsörjning. För att lösa grundvattensituationen och ge förutsättningar för en ökad tillväxt har regionen som en del i arbetet byggt en mindre avsaltningsanläggning i Herrvik 2016 och en större i Kvarnåkershamn 2018. Sveriges geologiska undersökning (SGU) har även undersökt hur man kan öka grundvattenbildningen vid ett antal av regionens vattentäkter, främst genom infiltration av ytvatten (Dahlqvist m.fl. 2017a). Under 2013 och 2015 utförde SGU omfattande ATEM-undersökningar (flygburna transient elektromagnetiska) med det helikopterburna SkyTEM-systemet för att ta fram ett bättre geologiskt underlag för bedömning av grundvattenförhållandena i Gotlands jordlager och berggrund (Dahlqvist m.fl. 2015, 2017b). Det har även utförts en utvärdering av möjligheterna för så kallad "*Managed Aquifer Recharge*", främst inriktat på var på Gotland det finns goda möjligheter att infiltrera och magasinera grundvatten i marken (Dahlqvist m.fl. 2019).

ATEM-undersökningarna visade att det är möjligt, att med stöd av information från bland annat OPAB:s oljeprospekteringsborrhål och seismik från 1970-talet, göra en 3D-modell av berggrundens uppbyggnad till flera hundra meters djup (Dahlqvist m.fl. 2017b). Redovisning av 3D-arbetet presenterades av Jørgensen m.fl. (2018) och Persson (2021). I denna framkom att genom ytterligare bearbetning skulle tolkningen kunna bli mer detaljerad rörande de djupgeologiska förhållandena. Den här rapporten redovisar resultaten från en sådan fördjupade analys av berggrundsförhållandena på Sudret som SGU genomförde 2018–2020.

Projekt Sudret – bakgrund, syfte och målsättning

Sudret är halvön som utgör den allra sydligaste delen av Gotland och som omfattar socknarna Sundre, Vamlingbo, Hamra, Öja och Fide (fig. 1). Hela Sudrets fasta befolkning är knappt 1 000 personer med Burgsvik som den största tätorten med cirka 350 bofasta. Antalet åretruntboende har stadigt minskat de senaste 20 åren. På Sudret finns 828 fastigheter varav 579 används endast delar av året (Region Gotland 2013). Sannolikt fördubblas antalet boende på Sudret under sommarperioden då merparten av fastigheterna är bebodda. Antalet tillfälliga besökare är under samma period avsevärt fler.



Figur 1. Översiktskarta som visar den geografiska avgränsningen av Sudret.

Sudret består till stora delar av områden som är klassade som naturreservat, riksintresse för naturvård och Natura 2000-områden. Tunna jordlager, stora hällområden, ytnära karst med mera ger förutsättningar för den säregna naturtypen. Sudret är extra känslig för variationer i vattenbalansen i landskapet. Denna påverkas förutom av nederbörd av avdunstning, ytavrinning, magasineringsmöjligheter i våtmarker och ytvatten, och grundvattenbildning, samt inte minst hur stora grundvattenuttagen är och när dessa sker. För att tillgodose en långsiktigt hållbar vattenförsörjning har Gotlands kommun därför tagit fram riktlinjer för hur man ska gå till väga vid etablering av en ny vattentäkt för enskilt bruk. Utgångspunkten är att dricksvattenuttaget inte får överstiga den mängd vatten som naturligt tillförs grundvattenmagasinet och inte heller riskera att påverka vattenkvaliteten negativt.

På Sudret är grundvattensituationen även speciellt utsatt på grund av det kustnära läget med begränsade områden och förutsättningar för grundvattenbildning, tunna jordlager med dålig magasineringsförmåga och av relativt ytligt liggande salt grundvatten. Området ingick därför som ett av åtta delområden på Gotland som undersöktes med SkyTEM-systemet. Undersökningarna kombinerades med geofysiska markmätningar, kontrollborrningar och geofysisk borrhålsloggning (Dahlqvist m.fl. 2017b).



Figur 2. Kustklint med Burgsvikssandsten vid Kättelvik (6316085, 69208). Fotograf: Mikael Erlström.

Från dessa insamlade ATEM-data har resistivitetsmodeller tagits fram som ger en bild av markens elektriska ledningsförmåga ner till cirka 200 m djup. Resultaten används för att kartlägga utbredningen av jord- och berggrundslager och som indirekta underlag till en bedömning av grundvattenförhållandena. Resultaten har även bidragit till projektet "Testbädd Storsudret" för utveckling av system för en hållbar vattenförsörjning. Utmaningen och visionen i detta projekt är att finna platser, teknik och system för magasinering och infiltrering av ytvatten eller nederbörd för att öka och balansera grundvattentillgångarna. Projektet som pågår leds av Svenska Miljöinstitutet (IVL) med hjälp av bland annat SGU och finansieras av Vinnova och Region Gotland (www.ivl.se/om-oss/forskningsstationer-och-testbaddar/storsudret.html).

Berggrunden på Sudret består till cirka 150 m djup av en varierad lagerföljd med sandsten, oolit, revkalksten, grov krinoidékalksten, lersten och märgelsten. Förekomst av sandsten, så kallad Burgsvikssandsten gör att berggrunden skiljer sig från den man finner på andra delar av Gotland. Sandstenen är blottad längs Sudrets västra kust, exempelvis vid Kättelviken finns en upp till fyra meter hög kustklint (fig. 2). I ett stråk som sträcker sig från Burgsvik, norrut mot Uddvide och Ronehamn påträffas sandstenen som ytberggrund och är här blottad i några mindre stenbrott. Sandstenen har sedan medeltiden mer eller mindre kontinuerligt brutits för användning som byggnadssten, ornamentsten, kvarnsten och brynsten. Kunskapen om sandstenens uppbyggnad är därför främst kopplad till dess tekniska egenskaper. Sandstenens potential som grundvattenakvifer är inte lika väl undersökt, speciellt där den överlagras av Hamra- och Sundrekalksten. Den sedimentära berggrunden på Gotland lutar svagt åt sydost vilket betyder att Burgsvikssandstenen påträffas kring 100 m djup i de östra och sydöstra delarna av Sudret.

Sandstenar är normalt mycket goda akviferer och en viktig frågeställning i den här undersökningen är om Burgsvikssandstenen kan ha sådana egenskaper som gör den intressant som grundvattenmagasin på Sudret. En av de viktigaste målsättningarna för att kunna svara på den frågan har varit att ta fram en modell som visar Burgsvikssandstenens utbredning, djupnivåer, mäktighet, och fysikaliska egenskaper (porositet och permeabilitet).

Projektet har även haft fokus på bedömning av förutsättningar för energilagring i berggrunden för hållbart nyttjande av den överskottsenergi som periodvis skapas från Gotlands vindkraft, bland annat finns en stor vindkraftspark på Näsudden som ligger på andra sidan Burgsviken från Sudret (fig. 1). Sveriges övergång till koldioxidneutrala energisystem ökar betydelsen av förnybara energikällor som sol och vind, vilket innebär att det behövs mer flexibilitet i energisystemet med bland annat möjligheter till periodvis lagring av energi i berggrunden. Energilagring i berggrunden har en stark koppling till implementering av det som Miljömålsberedningen påtalar, bland annat i avsnittet som handlar om närings- och innovationspolitik med klimatinriktning, att det är viktigt att det finns goda förutsättningar för tillväxt, förnyelse och företagande med koppling till teknikskiften (SOU 2016). Tillgång och närhet till förnybar energi och nya tekniklösningar för geoenergi är en del i detta. Förutom Burgsvikssandstenen finns det kambriska sandstenslager på större djup under Sudret som kan vara lämpliga för geotermi och energilagring. Den uppemot 36 m mäktiga mellankambriska Faluddensandstenen som påträffas på 450–600 m djup är en av den mest intressanta att undersöka avseende energilagring (Sopher m.fl. 2019).

Förutom grundvatten och energilagring eller energiutvinning finns intresse från industrin och forskarvärlden att utforska de kambriska sandstenslagren för deras lämplighet avseende koldioxidlagring i södra Östersjön (Energiforsk 2015). Faluddensandstenen är även för koldioxidlagring ett av de mest intressanta alternativen. Även om dessa sandstenslager inte ligger tillräckligt djupt på Sudret är de ändå högst intressanta för undersökningar eftersom kostnaden för borrning och tester på land är avsevärt lägre än om de ska utföras till havs i södra Östersjön där sandstenen finns på lämpligt djup (> 800 m) för lagring. En förstudie med tester i borrhål på Sudret skulle kunna bidra med betydande data- och kunskapsinsamling som kan utgöra ett viktigt underlag för en mer kvalitativ bedömning av förutsättningarna till havs. Svenska forskargrupper har vid flera tillfällen ansökt om medel från bland annat Energimyndigheten och Vetenskapsrådet för borrning och tester på södra Gotland men ingen har blivit beviljad.

Det finns även ett behov av en övergripande geologisk beskrivning av den siluriska berggrunden på djupet. Till skillnad från den ytnära siluriska berggrunden har denna hittills varit mycket summariskt beskriven. Detta beror till stor del på att den inte varit intressant för undersökningar i samband med de oljeprospekteringar som gjorts vilka främst fokuserat på oljereservoarerna i den ordoviciska lagerföljden. Merparten av den geofysiska borrhålsloggningen som OPAB utfört över det siluriska intervallet har därför i stort sett varit otolkad. Korrelationen till den stratigrafiska indelningen av den ytnära siluriska lagerföljden har också tidigare försvårats på grund av bristen på kärnmaterial som möjliggör dateringar av lagerföljden (Erlström m.fl. 2009).

Utifrån dessa intressen och frågeställningar har SGU bearbetat och tolkat djupborrningar, borrhålsgeofysik, seismiska profiler och ATEM-data. Studien baseras både på äldre borrhålsdata och seismik men framför allt med resultat från undersökningar av en ny kärnborrning (St.Sutarve-2018) som SGU utfört på centrala Sudret. Borrningen går genom hela den siluriska–ordoviciska lagerföljden och slutar i den nedre delen av den mellankambriska Faluddensandstenen på 564,95 m djup.

Ett flertal olika frågeställningar belyses i rapporten men arbetet har främst inriktats på en karaktärisering av Burgsvikssandstenen och Faluddensandstenen i form av strukturkartor, profiler och 3D-modeller samt beskrivningar av deras fysikaliska egenskaper och petrografiska uppbyggnad. Detta eftersom de är intressanta för bedömningar rörande grundvattentillgång, geoenergipotential och koldioxidlagring.

UNDERLAGSDATA OCH TIDIGARE UNDERSÖKNINGAR

OPAB:s borrhålsdata

OPAB utförde under 1970-talet ett stort antal oljeprospekteringsborrningar på Gotland. Inledningsvis var intresset riktat mot att undersöka oljepotentialen i de kambriska sandstensreservoarerna. I sandstenslagren gjordes inga fynd av olja men däremot i den övre delen av den ordoviciska lagerföljden fann man exploaterbara fynd av olja i så kallade "mounds". OPAB och senare Gotlandsolja AB borrade fram till 1992 sammanlagt 323 undersöknings- och prospekteringshål. OPAB:s första borrningar på 1970-talet gick genom hela den kambro–siluriska lagerföljden ner till toppen av det prekambriska urberget. Eftersom inga oljefynd gjordes i den kambriska lagerföljden kom senare borrningar placerades i 18 borrhålskluster över seismiskt identifierade oljeförande mounds på Gotland. Ur dessa kluster producerades totalt cirka 100 000 m³ råolja, merparten i Risugns- och Rutemyrfälten på norra Gotland. På Sudret producerade OPAB mellan 1974 och 1986 knappt 7 500 m³ råolja från produktionsklustren Bonsarve, Grunnet, Hamra och Rums (tabell 1).

OPAB:s borrningar utfördes som rotationsborrningar med lerbaserad borrvätska ("*mud*"). Ett standardutförande var att ner till cirka 30 m djup borra ett 9,875 tums hål som kläddes med 7 tums foderrör. Därunder borrades ett 6,25 tums hål ner till måldjupet för borrningen. I de flesta borrningar användes en polymerbaserad borrvätska. På Sudret gjorde OPAB 58 borrningar varav 13 borrades ner till toppen av det prekambriska urberget. Flertalet av borrningarna utfördes som tätare borrhålskluster där oljefynd gjorts, som till exempel vid Hamra och Grunnet. Totalt har 26 OPAB-borrningar ingått i SGU:s studie (fig. 3) varav merparten har använts för modellering av främst Burgsvikformationen och Faluddensandstenen (bilaga 1). Vi har främst utelämnat de borrningar där det saknas geofysiska borrhålsloggar samt gjort ett urval av borrningar som ligger nära varandra inom samma kluster, exempelvis vid Hamra har vi gjort ett urval av två av totalt 10 borrningar (Hamra-1 och Hamra-2).

OPAB:s beskrivning av berggrunden baserades främst på borrkax och geofysiska borrhålsmätningar samt på knappt 900 m borrkärna fördelat på olika borrhål och intervall på Sudret. Främst kärnborrade OPAB den övre delen av den ordoviciska berggrunden. Av den totala mängden kärnor kommer cirka 100 m från de kambriska sandstenslagren och endast ett fåtal meter från det siluriska intervallet.

Geofysiska mätningar med Caliper, Gamma Ray (GR), Sonic (BHC) och "spontaneous potential" (SP) har utförts i de flesta OPAB-borrhålen. Därutöver finns i vissa borrhål och intervall Densitets-, Neutron- och olika typer av resistivitetsloggar. Samtliga loggningar i OPAB:s borrhål på Sudret har utförts av Schlumberger, som är ett globalt serviceföretag inom petroleumbranschen. Caliper-loggen mäter borrhålets diameter och ger information om lösare och hårdare avsnitt. Med GR-loggen mäts berggrundens naturliga innehåll av radioaktiva isotoper som uran (U²³⁸), torium (Th²³²) och framför allt kalium (K⁴⁰). Eftersom grundämnet kalium främst ingår i olika lermineral kan GR-loggens resultat indirekt kopplas till bergarternas lermineralhalt.

Borrhålskluster/fält	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	Totalt
Bonsarve	21	444	526	210	101	81	54	56	44	36	34	31	31	1 669
Grunnet		1 045	1 844	664	356	237	187	146	176	119	107	84	71	5 036
Hamra	7	406	36	17	4									470
Rums		59	90	16	11	8	8	7	4					203
Total volym, m ³														7 478

Tabell 1. Översiktlig sammanställning av OPAB:s oljeproduktion (m³) 1974–1986 på Sudret.

GR-mätningen presenteras i API ("American Petroleum Institute") som är en kalibrerad standard som gör att resultaten från olika mätinstrument och borrhål i samma geologiska miljö är jämförbara och därmed möjliga att korrelera. Sonic är en akustisk logg som mäter utsända ljudvågors hastighet i berggrunden. Resultaten kan användas för att beräkna bergartens porositet och som stöd för tolkning av de seismiska profilerna. SP-loggen mäter potentialskillnaden mellan olika berggrundslager. Den fungerar bäst i en lagerföljd med både täta leriga, porösa och permeabla vattenförande lager samt när det råder en tillräckligt stor potentialskillnad mellan borrvätskan och formationsvätskan. Dessa förutsättningar är inte de bästa i borrhålen på Sudret vilket medfört att SP-mätningarna sällan fungerat i det siluriska intervallet.

Neutron- och Densitets-sonderna sänder ut neutroner respektive gammastrålning i berggrunden. Neutronerna kolliderar med vätejoner i formationen och förlorar energi samtidigt som emitterad gammastrålning detekteras av loggningssonden. Eftersom vätejonerna främst sitter i vattenmolekyler kan vatteninnehållet (indirekt porositet) beräknas. Förenklat mäter Densitetssonden hur mycket av utsänd gammastrålning som kommer tillbaka till detektorn vilket kan omräknas till formationens densitet och porositet.



Figur 3. Översiktskarta med borrningar på Sudret, södra Gotland, som använts i projektet. Stratigrafin för flertalet av borrningarna redovisas i bilaga 1.



Figur 4. Foton av kärnborrningen vid St.Sutarve-2018. Fotograf: Per-Gunnar Alm.

I vårt arbete har främst GR-loggen använts eftersom det är den kvalitativt bästa loggen för en litologisk indelning av lagerföljden. Samtidigt är det den loggen som finns för flertalet av borrningarna på Sudret. GR-kurvans utseende, som mestadels beror på variationer i förhållandet mellan ler- och kvartshalt, kan även användas som stöd till tolkning av förändringar i avsättningsmiljön. Övriga loggar har använts för bedömning av förekomsten av porösa och vattenförande lager och som stöd till tolkningen av GR-loggen. Tyvärr finns det inte lika omfattande loggningsdata från den siluriska berggrunden som för de ordoviciska och kambriska lagerföljderna.

SGU:s kärnborrning St.Sutarve-2018

Som ett led i att öka kunskapen om berggrundens uppbyggnad utförde SGU hösten 2018 en kärnborrning centralt på Sudret vid St. Sutarve (fig. 3, 4). Ursprungligen var målsättningen att genomföra en 150 m djup borrning genom Burgsvikformationen. Syftet var att få kärnmaterial för tekniska analyser och utföra geofysisk borrhålsloggning till stöd för tolkning av OPAB:s borrningar där det enbart finns geofysiska loggar och borrkax-beskrivningar. Speciellt för Burgsvikformationen, där det oftast endast finns en GR-logg, är det svårt att exakt tolka lagerföljdens litologiska uppbyggnad. Eftersom både kalksten och sandsten ger likartat låga signaler på GR-loggen är det speciellt svårt att beskriva formationens heterogena lagerserie med kalksten, märgelsten, lersten och sandsten enbart med hjälp av GR-loggen. De Sonic-loggar som finns ger heller inget stöd till att skilja sandstens- och kalkstenslagren åt. Med hjälp av kärnborrningen i St.Sutarve-2018, där det även utfördes geofysisk borrhålsloggning kan nu även OPAB:s loggdata bättre tolkas. Andelen sandstenslager (nettosand) i Burgsvikformationen har med stöd av St.Sutarve-2018-borrningen bestämts i totalt tretton borrningar på Sudret.

När arbetet med 3D-modellen för Gotlands sedimentära berggrund påbörjades 2017 blev det viktigt att kunna koppla den geofysiska signalen i borrhålsloggningarna med seismiska data och resistivitetsmodeller från ATEM-data till rätt bergartstyp. På Sudret ger de geofysiska borrhålsloggarna, speciellt i det siluriska avsnittet, signaturer som även kan korreleras med förändringar i resistivitetsmodellen (Jørgensen m.fl. 2018). Däremot fanns det före borrningen av St.Sutarve-2018 ingen tydlig koppling till hur lagren exakt är uppbyggda, mer än vad OPAB:s borrkaxbeskrivningar indikerar och vad som finns beskrivet från SGU:s äldre kärnborrningar från

slutet av 1960-talet, exempelvis Grötlingbo-1. Detta tillsammans med behovet av att karaktärisera djupare liggande berggrund med avseende på koldioxidlagring, geotermi och energilagring medförde ett beslut att fördjupa St.Sutarve-2018-borrningen ner till den mellankambriska Faluddensandstenen.

Borrningen utfördes av GEO-gruppen AB. En sammanställning av information om borrhålet ges i tabell 2. Överst i borrhålet sitter ett foderrör fastgjutet i berggrunden till fem meters djup. Borrkärnan från denna del är endast fragmentariskt bevarad. Kärnborrningen därunder resulterade i en kärna med diametern 47,6 mm ner till 211,65 m djup. Borrningen fick här avbrytas på grund av problem med urspolningar, vilket skapade vibrationer av borrstången som gjorde att borrningen inte kunde fortsätta djupare utan åtgärder. En geofysisk borrhålsloggning utfördes av Per Gunnar Alm från Lunds Tekniska Högskola (LTH) som visade att det mellan 50 och 80 m djup i Burgsvikformationen fanns flera partier med betydande urspolningar. Detta åtgärdades genom att ett N-borrör fördes ner till 211 m och avskärmade de urspolade sektionerna. Från denna nivå kunde kärnborrningen fortsätta med B-dimensionen vilken gav en borrkärna med diametern 42 mm. Vid 496 m djup påträffades en zon med olja. Efter cementering och rensning av borrhålet kunde borrningen fortsätta. Totalt omhändertogs cirka 100 liter råolja. Vid 564,95 m djup avbröts borrningen eftersom borrkronan gått sönder i botten av hålet. Djupet motsvarar den understa delen av den mellankambriska Faluddensandstenen. En ny loggning utfördes av LTH mellan 211 m och botten av borrhålet. Endast sonden med GR och Caliper nådde ner till totaldjupet. Resistivitetssonden kunde inte komma förbi 493 m djup, sannolikt orsakat av urspolningar eller trasigt borrhål vilket Caliper-loggen registrerat mellan 491 och 495 m.

Borrentreprenör	Geo-gruppen AB Gö	iteborg					
Utrustning	Sandvik 130 wire-line coring						
Koordinater Sweref 99	N 6320673 E 699981						
Höjd över havet, m	6 m						
Totaldjup, m	564,95 m röröverkant, 15 cm över markytan						
Status	Pluggad med cement, brunnshuvud = HW-casing förseglad med ventilförsett						
	lock. Brunnen skydd	lock. Brunnen skyddad av brunnsring (900x1200 mm) och brunnslock i					
	betong	betong					
Borrdimensioner							
0–5 m	131 mm, 100,7 mm	kärna					
5–211,65 m	N 75,6 mm, 47,6 mr	N 75,6 mm, 47,6 mm kärna					
211,65–564,95 m	B 60 mm, 42 mm kä	B 60 mm, 42 mm kärna					
Foderrör							
0–5 m	HW 101,6 mm ID						
0–7,6 m	NW 76,4 ID						
Borrhålsloggning	Teknisk geologi LTH, Lund						
3,08–207,17 m	Naturlig gamma (GR), Caliper,						
10,49–205 <i>,</i> 1 m	Naturlig gamma, Short, Long Resistivity, Single point resistivity, Spontaneous						
2,8–116,2 m	Potential (SP)						
	Acoustic Televiewer	Acoustic Televiewer					
Stratigrafi	Djup i meter	Enhet	Mäktighet, meter				
	från markytan						
Topp Burgsvik	49,8	Burgsvik	52				
Topp Eke	101,8	Eke	12,3				
Торр Е	114,1	Enhet E	73,9				
Topp enhet F	188 Enhet F 52						
Topp enhet E	240	Enhet E	52				
Topp enhet D (Topp Fröjel)	292	Enhet D	20				
Topp enhet C (Bas Fröjel)	312	Enhet C	67				
Topp enhet B	379	Enhet B	35				
Topp enhet A	414	Enhet A	53,6				
Topp Ordovicium	467,6	Ordovicium	75,4				

Tabell 2. Sammanställning av borrhålsinformation för St.Sutarve-2018

Borrningen blev trots att den inte nådde igenom hela Faluddensandstenen lyckad. En komplett kärna med minimala kärnförluster (bedömd kärnåtervinning > 95 %) och resultat från en geofysisk borrhålsloggning har möjliggjort att SGU nu kan analysera och korrelera andra borrningar med stöd av St.Sutarve-2018.

Övriga kärnborrningar

Svenska Diamantborrnings AB utförde 1915 på uppdrag av SGU en kärnborrning i Burgsvik till ett djup av 128,68 m (fig. 3, 5). Borrningen genomfördes enbart för paleontologiska och stratigrafiska studier. Tyvärr finns inga kärnor bevarade men dokumentationen ger ändå viktig information om Burgsvikformationens uppbyggnad (Hede 1919).

I samband med SGU:s oljegeologiska arbeten på 1960-talet utfördes ett antal kärnborrhål på Gotland, det vill säga När-1, Hemse-1, File Haidar-1 och Grötlingbo-1 (Anderegg m.fl. 1968). Det senare har använts för korrelation av borrhålsloggarna i OPAB:s intilliggande borrhål Grötlingbo-2. Borrkärnorna har under åren utsatts för omfattande provtagning för främst olika paleontologiska studier.

Förutom dessa finns information från en kärnborrning genom Burgsvikformationen vid Uddvide (fig. 3, 5). Denna 70 m djupa borrning utfördes av Geologiska Institutionen vid Lunds universitet och beskrivs i ett arbete av Eriksson och Calner (2008). Utöver dessa arbeten finns en studie av Pusch (1969) där han beskriver lagerföljdens strukturella uppbyggnad och geotekniska egenskaper i kustskärningar och några grunda kärnborrningar vid Kättelviken (fig. 3, 5).

Borrningar i samband med SkyTEM-projektet

I anslutning till tolkningen av ATEM-data på Sudret gjordes sex 20–50 m djupa hammarborrhål (tabell 3). I tre av dessa utfördes även geofysiska borrhålsmätningar med Caliper, GR, resistivitet, temperatur och akustisk televiewer. Detta gjordes för att förbättra tolkningen av ATEM-resultaten med hänsyn till berggrundens uppbyggnad och möjliga grundvattenförekomster (Dahlqvist m.fl. 2015, 2017b). Öja Strand-borrningen nådde ner i toppen av Burgsvikformationen medan de övriga gav information om den överliggande kalkstensdominerade Hamraformationen (fig. 6).

Borrhål	Koordinater Sweref 99	Djup, m*	Formation
Öja Strand	6324421/697222	20,95	Hamra–övre Burgsvik
St. Sutarve-2016	6322222/700252	49,36	Hamra
Austre	6315582/698619	38,94	Hamra–Sundre

 Tabell 3. Borrhålsinformation från hammarborrningar utförda inom SkyTEM-projektet (Dahlqvist m.fl. 2017b).

*Djup under markytans nivå



Figur 5. Illustration som visar läget och litologiska profiler för kärnborrhålen Uddvide, Burgsvik-1 och Puschs kärnborrningar (Pusch 1969). Kartskissen visar även läget för SGUkärnborrningarna Grötlingbo-1 och St.Sutarve-2018. Fotograf: Mikael Erlström.

Öja Strand



Figur 6. Tolkade lagerföljder och resultat av geofysiska loggningar (GR, temperatur och konduktivitet) för de grunda hammarborrhålen utförda inom SkyTEM-projektet (Dahlqvist m.fl. 2015, 2017b). Notera att konduktivitetsloggen enbart gav användbara värden i borrningen från Öja Strand.

Seismiska profiler (OPAB)

Mellan 1970 och 1990 samlade OPAB in en stor mängd reflektionsseismik i Sverige och på Gotland finns mer än 2 300 linjekilometer OPAB-seismik. Merparten av denna är insamlad längs befintliga vägar med hjälp av vibratorer med en huvudsaklig frekvens på cirka 60 Hz. Vanligtvis är den insamlad med 12 kanaler ("*fold*") och ett "*Common depth point*" (CDP) avstånd mellan 10 och 30 m. Idag finns cirka 600 km av dessa profiler tillgängliga i digitalt SEGY-format. Resterande profiler finns endast i TIF-format vilket gör att det är svårt att tolka, visualisera och bearbeta dessa med modern mjukvara. Mellan 2016 och 2017 utvecklade Institutionen för Geovetenskaper vid Uppsala universitet en metodik för att konvertera TIF-profilerna till SEGY-format (Sopher 2017). Detta resulterade i ett stort antal konverterade profiler som gjorde det möjligt att bearbeta och förtydliga signalerna samt att profilerna nu kunde importeras i olika tolkningsprogram. Figur 7a–c visar ett exempel på hur konverteringsresultatet ser ut.

På Sudret finns ett relativt tätt linjenät med OPAB-seismik (fig. 8). Totalt har 73 profiler på Sudret konverterats till SEGY-format och använts vid tolkningen.

Figur 9a visar ett exempel på ett sammansatt seismogram med flera profiler över Sudret i ungefär syd-nordlig riktning. Figur 9b visar en tolkning av samma profil. I de flesta fallen är den seismiska signalen för den övre delen av berggrunden inte lika tydlig som för de djupare delarna. Detta beror delvis på att det sannolikt inte finns lika stora skillnader i akustisk impedans i den siluriska lagerföljden men också på att utformningen av insamlingsparametrarna anpassats till att ge bättre upplösning av de djupare liggande ordoviciska och kambriska lagerföljderna.



Figur 7. a) Exempel på seismisk sektion från Gotland i ursprungligt TIF-format, b) samma sektion efter konvertering till SEGY-format (visualiserad på samma sätt som originalet), c) samma sektion efter konvertering till SEGY-format (visualiserad i "variable density" format) (Sopher 2017).



Figur 8. Illustration av den reflektionsseismiska databasen som ingått i SGU:s projekt. Den blå linjen visar läget för den tolkade sammanlagda profilen i figur 9a–b.



Figur 9. **a)** Exempel på reflektionsseismikens utseende i en sammansatt sektion som sträcker sig från söder till norr över Sudret. **b)** Geologisk tolkning av samma sektion. Notera att djupet är angivet i tvåvägs seismisk gångtid vilket motsvarar att urbergsnivån ligger på 700–750 m djup utmed profilen. Profilens läge visas i figur 8.

Flyggeofysik

Under 2006 utförde SGU, i samband med den senaste berggrundsgeologiska undersökningen av Gotland, flygburna magnetiska, elektromagnetiska (VLF, "very low frequency") och radiometriska mätningar över hela Gotland (Erlström m.fl. 2009). Nominell flyghöjd och linjeavstånd för flygmätningar var 60 m respektive 400 m. Mätningarna gjordes utmed nord-sydliga flygstråk. Resultat från flygmätningarna över södra Gotland importerades tillsammans med Lantmäteriets höjddata och markmätta tyngdkraftsdata i programvaran Oasis Montaj där dessa bearbetades för att skapa ett antal plottade grid (fig. 10). Kartan för det magnetiska residualfältet (fig. 10b) visar främst variationer i det underliggande urberget. Kartbilden visar en magnetisk anomali som stryker nordväst–sydost tvärs Sudret mellan Näsudden och Faludden. Likartade anomalier framträder även ytligare i höjdreliefkartan och i kartan som visar den skenbara resistiviteten (fig. 10c–d). Tyngdkraftfältet visar också avvikelser som kan vara knutna till samma zon. Vår tolkning är att dessa är kopplade till förkastningszonen som indikeras i seismiken (fig. 9).



Figur 10. Kartor som visar resultaten från flygburna och markgeofysiska mätningar samt Lantmäteriets höjddata. a) Residual bougeranomali (tyngdkraft). b) Magnetiskt residualfält. c) Skenbar resistivitet (beräknat från flygburna elektromagnetiska mätningar). d) Höjdrelief på södra delen av Gotland.

Markgeofysik

Förutom OPAB:s reflektionsseismiska undersökningar finns det en databas med mätningar av tyngdkraftfältet utförda under 1900-talet. SGU utförde även i samband med SkyTEM-projektet ett antal georadarprofiler på centrala delen av Sudret. Syftet med dessa var att få fram mäktigheten på olika sand- och svallsediment samt att avgränsa jordlagren från berggrunden (Dahlqvist m.fl. 2017b).

Helikopterburna TEM-mätningar

Under 2013 och 2015 utförde SGU undersökningar med det helikopterburna TEM-systemet SkyTEM på Gotland (Dahlqvist m.fl. 2015, 2017b). Totalt undersöktes cirka 1 100 km² med ett linjeavstånd på 200 m och ett av områdena täckte stora delar av Sudret. SkyTEM-systemet är ett helikopterburet elektromagnetiskt mätsystem som mäter den elektriska resistiviteten till 200–300 m djup. Den elektriska resistiviteten är inversen av den elektriska konduktiviteten (ledningsförmågan). Variationerna i den elektriska resistiviteten i marken beror framför allt på jordlagrens och bergrundslagrens olika porositet, vattenmättnadsgrad och innehåll av lermineral. Vattnets salthalt är också avgörande då ett salt grundvatten markant sänker den elektriska resistiviteten. För utförlig beskrivning av SkyTEM-metoden samt kvalitetskontroll och bearbetning av data se Dahlqvist m.fl. (2015, 2017b).

Geologiska kartor och publikationer om berggrunden på Sudret

Gotlands geologi beskrevs redan under 1700-talet av Carl von Linné som under sin gotländska resa 1741 noterade den rika förekomsten av välbevarade fossil. Murchinson (1846) var dock en av de första som beskrev sandstenslagren på södra Gotland.

Under perioden 1920–42 gjorde Hede och hans medarbetare en första sammanhållande stratigrafisk indelning och kartläggning av den siluriska berggrunden på Gotland (SGU:s kartserie Aa). Hedes indelning i 13 stratigrafiska enheter (det vill säga undre Visby, övre Visby, Högklint, Tofta, Slite, Halla, Mulde, Klinteberg, Hemse, Eke, Burgsvik, Hamra och Sundre) är än i dag basen för den stratigrafiska indelningen av Gotlands berggrund (Hede 1921, 1960).

Den första kartan som visar Eke, Burgsvik, Hamra och Sundreformationerna på södra Gotland gjordes av Munthe (1921). Munthe hade dock redan 1910 gjort en beskrivning av Burgsviklagrens uppbyggnad på Sudret.

Den senaste berggrundskartläggningen utfördes av SGU 2006-2008 (Erlström m.fl. 2009).

Förutom geologiska kartbladsbeskrivningar finns ett stort antal vetenskapliga publikationer varav några har varit särskilt betydelsefulla för vårt arbete. Viktiga bidrag till karaktäriseringen av Burgsvikformationen är Eriksson och Calner (2008) Stel och Coo (1977) och Long (1993). Mer generellt är Mantens arbete (1971) ett viktigt bidrag till beskrivningen av den siluriska berggrunden på Sudret. Avseende uppbyggnaden av den ordoviciska och kambriska berggrunden är arbeten av Nielsen och Schovsbo (2007, 2015), Erlström och Sopher (2019) och Levendal m.fl. (2019) viktiga informationskällor.

BERGGRUNDENS UPPBYGGNAD

Den kambro-siluriska berggrunden vilar på det prekambriska urberget och är på Sudret mellan 650 m (Skåls-1) och 791 m (Hamra-1) mäktig (fig. 11). En svagt sydsydostligt stupande lagerföljd gör att lagerserien successivt blir tunnare norrut på Gotland, för att kring Fårösund endast vara 300–400 m mäktig (Erlström m.fl. 2009). Förutom att den siluriska ytberggrunden norrut inte innefattar yngre delar av silur beror skillnaden i mäktighet även på att mellersta kambrium inte är lika mäktig i norr jämfört med i söder på Sudret

Den stratigrafiska indelningen av den kambriska berggrunden baseras främst på arbeten av Nielsen och Schovsbo (2007, 2015) som bland annat beskriver uppbyggnaden av den kambriska delen av Grötlingbo-1-kärnan. Den ordoviciska lagerföljden har relativt nyligen beskrivits och delats in i ett antal enheter som kan identifieras i samtliga djupborrningar på Gotland och i södra Östersjön (Erlström & Sopher 2019). Indelningen har främst gjorts med hjälp av OPAB:s borrhålsgeofysik och borrkärnor.



Figur 11. Isokarta för djup i meter till den prekambriska urbergsytan.

Den siluriska ytberggrunden är mycket väldokumenterad på Gotland (se till exempel Eriksson & Calner 2005, Erlström m.fl. 2009). Den djupgeologiska utbredningen och identifieringen av motsvarande stratigrafiska enheter har hittills varit mer osäker. I samband med arbetet med en 3D-modell av berggrunden har ett antal enheter med särskiljande geofysiska egenskaper identifierats i borrhålsloggningarna (Jørgensen m.fl. 2018). Nedan följer en översiktlig beskrivning av den kambro–siluriska berggrunden.

Kambrium

Kambrisk berggrund påträffas på Gotland på flera hundra meters djup under siluriska och ordoviciska berggrundslager. I de centrala delarna av Sudret påträffas toppen av den kambriska lagerföljden vanligtvis på 520–550 m djup (fig. 12). Den kambriska berggrunden delas in i File Haidar-, Borgholm- och Alunskifferformationerna. På Gotland ökar mäktigheten av den kambriska lagerföljden i sydostlig riktning, från cirka 140 m i kärnborrhålet Visby-1 till 200 m i Grötlingbo-1 och 220 m i Hamra-1. Söder om Gotland är den kambriska lagerserien uppemot 300 m mäktig.



Figur 12. Isokarta för djupet i meter till den kambriska lagerföljdens överyta motsvarande Faluddenledet.



Figur 13. Litologisk och stratigrafisk uppbyggnad av den kambriska lagerföljden i Grötlingbo-1 och Hamra-1.

Ett fåtal borrningar på Sudret går genom hela den kambriska lagerföljden. En representativ bild av den kambriska sekvensen illustreras i figur 13 med lagerföljderna i Grötlingbo-1 och Hamra-1. Undre kambrium består till största delen av File Haidarformationen som indelas i Viklauledet, Närskiffer och Närsandstenen. Dominerande bergarter är fin- och medelkornig sandsten, siltsten och lersten. Sandstenslagren består mest av finkorniga relativt välcementerade kvartsareniter.



Figur 14. Struktur och isokarta för ordoviciums överyta. Djup i meter.

File Haidarformationen överlagras av Borgholmformationen som delas in i Grötlingbo-, Mossberga- och Faluddenleden. Merparten av formationen har en mellankambrisk ålder. Grötlingboledet och delar av Mossbergaledet förs till övre miaolingian (övre delen av undre kambrium) medan övriga delar förs till furongian (mellersta kambrium) (Nielsen & Schovsbo 2007, 2015). Mossbergaledet består huvudsakligen av tunna lager med siltsten och lersten med underordnat inslag av sandsten. Faluddenledet däremot består huvudsakligen av sandsten. Ofta jämställs ledet med Faluddensandsten. På Sudret är denna uppemot 36 m mäktig. Norrut kilar den ut och saknas på merparten av nordvästra och norra Gotland. Söderut i Östersjön är den däremot drygt 50 m mäktig. Berggrund från övre kambrium (Alunskifferformationen) saknas nästan helt på Gotland. Lokalt finns en kraftigt kondenserad lagerföljd med konglomerat med alunskifferfragment och glaukonitisk sandsten. I kärnan från St.Sutarve-2018 finns ett cirka 5 cm tjockt, glaukonitiskt alunskifferkonglomerat som överlagrar Faluddensandstenen. Sandstenens övre



Figur 15. Sammanställning av olika stratigrafiska indelningar av den ordoviciska lagerföljden som är mycket likartat uppbyggd på Gotland och i södra Östersjön. Illustrationen är modifierad efter Erlström och Sopher (2019).

meter är här kraftigt uppsprucken och karstvittrad vilket indikerar exponering av lagren under yngre kambrium och allra äldsta ordovicium. Avsaknaden av lager tillhörande övre kambrium och understa ordovicium förklaras av en omfattande erosion som resulterat i en betydande lucka i lagerföljden.

Ordovicium

Den ordoviciska lagerföljden är generellt cirka 80 m mäktig på Gotland. I St.Sutarve-2018 är den 75,4 m mäktig. På Sudret ligger ordoviciums överyta som djupast på cirka 480 m djup (fig. 14). OPAB delade in den ordoviciska sekvensen i Klasenkalksten, Kvarnekalksten och bentonitförande kalksten. Denna indelning följer inte indelningen för motsvarande lager på fastlandet utan baseras enbart på resultat från geofysiska borrhålsloggar, kaxprover och seismiska data. En biostratigrafisk indelning av ordovicium har hittills bara utförts på kärnan från Grötlingbo-1. Kjellström (1971) gjorde redan före OPAB:s undersökningar en indelning baserad på chitinozoer och korrelerade lagerföljden i Grötlingbo-1 till kända kalkstenslager i Östergötland och på Öland. Vidare har Männik m.fl. (2015) gjort en detaljerad stratigrafisk beskrivning av övre ordovicium i Grötlingbo-1, vilket idag är den vetenskapligt mest tillförlitliga indelningen av detta avsnitt.

OPAB:s undre bentonitförande kalkstensenhet är 30-60 m mäktig och består av lersten och lerig kalksten med inslag av tunna bentonitlager vars antal ökar uppåt i enheten. På denna lagerserie

följer en 5–10 m mäktig sekvens med lerstenar som av OPAB benämns Kvarnekalksten. Övre delen av den ordoviciska lagerföljden består av den 25–75 m mäktiga Klasenkalkstenen som domineras av lerig kalksten med tunna skifferlager samt ett tydligt inslag av revliknande strukturer, så kallade "*mounds*" (Sivhed m.fl. 2004, Levendal m.fl. 2019). Dessa strukturer som kan vara uppemot 50 m höga och två kilometer i diameter har varit huvudmålet för den oljeprospektering och oljeproduktion som skett på Gotland.

Vid jämförelse av samtliga borrhålsloggade ordoviciska intervall i borrningar på Gotland och i södra Östersjön finner man att lagerföljderna ger en mycket likartad geofysisk signatur. Fem intervall med särskiljande logg-signaturer har identifierats vilka korrelerats till en etablerad litostratigrafisk indelning för de ordoviciska lagerföljderna i Östergötland och på Öland (Erlström & Sopher 2019, fig. 15). Karaktäristiskt är ett intervall med lersten och slamsten som påträffas i samtliga borrningar. Detta tolkas motsvara Fjäckaskiffern i till exempel Östergötland. Avsnittet ger under gynnsamma förhållanden också en tydlig reflektor i de seismiska profilerna på Gotland.

Sammanfattningsvis karaktäriseras den ordoviciska lagerserien underifrån av glaukonitisk kalksten följt av ett 30–50 m mäktigt parti med röd och grå kalksten, så kallad typisk ortocerkalksten. På detta följer Kinnekullebentoniten och en varierande lagerföljd med leriga kalkstenar och röd-bruna lerstenar (Fjäckaskiffer). Överst förekommer en kalkstenssekvens med mounds och leriga kalkstenar. Till skillnad från sekvensen till och med Fjäckaskiffern varierar mäktigheten för övre ordovicium på grund av förekomsten av dessa lokala mounds. På Sudret har ett 20-tal mounds identifierats i de seismiska profilerna (fig. 14). I anslutning till dessa, exempelvis vid Ollajvs-1, Augstens-1 och Grunnet-1 är den ordoviciska mäktigheten därför 95–115 m (se fig. 24).

Silur

Den siluriska ytberggrunden på Gotland omfattar cirka 10 miljoner år (428–418 Ma) motsvarande tidsepokerna wenlock och ludlow. Den siluriska lagerföljden har en sammanlagd mäktighet på 500–750 m och stupar svagt åt sydsydost (0,2–0,4°). De bergartsbildande sedimenten avsattes på en grund kontinentshelf som täckte stora delar av centrala Östersjöbäckenet under silurisk tid. Uppemot 10 cykler med avsättning har dokumenterats (Calner m.fl. 2004). Mellan cyklerna förekom perioder med erosion då Gotland ofta låg ovanför erosionsbasen (Eriksson 2004, 2007). Inom varje enhet som motsvarar en cykel är bergarterna generellt grövre och mer karbonatrika i nordost jämfört med i sydväst där inslag av märgel och märgelsten är mer påtagligt. Detta till följd av successivt djupare marina avsättningsförhållanden i sydvästlig riktning.

Den stratigrafiska indelningen av den siluriska berggrunden på Gotland är en reviderad version av Hedes (1960) indelning och nya formationer och led som bygger på både litostratigrafiska och biostratigrafiska data (Jeppsson m.fl. 2006). Begreppet topostratigrafi introducerades av Jaanusson (1976) och är en kombination av litologiska och biologiska data. Förutom den traditionella stratigrafiska indelningen finns det även en klassificering som bygger på en så kallad "event"-stratigrafi där berggrunden indelas i relation till klimatändringar och variationer av havsytans nivå (se bland annat Jeppsson 1993, 1997, 1998, 2005, Aldridge m.fl. 1993, Jeppsson m.fl. 1995, Jeppsson & Aldridge 2000, Calner & Jeppsson 2003, Calner m.fl. 2004).

Indelning av den siluriska djupberggrunden på södra Gotland

Främst har GR-loggen använts eftersom den i stort sett använts i samtliga borrningar som loggats. Förutom GR-loggar finns det i enstaka borrningar även Sonic- och resistivitetsloggar. GR-loggen är den logg som ger de bästa förutsättningarna för en tolkning av berggrundens olika bergarter. Den indikerar främst lerhalten i sedimentära bergarter, på grund av lermineralens kaliuminnehåll. Indirekt ger den också en indikation om resistiviteten där lermineralrikare bergarter (till exempel märgel) har en relativt lägre resistivitet i jämförelse med exempelvis högresistiv kalksten. Den siluriska djupberggrunden under Gotland har än så länge endast undersökts i begränsad omfattning. En allmän uppfattning har varit att det inte är möjligt att korrelera ytberggrunden med berggrundslagren som påträffats i OPAB:s borrningar. Genomgången av loggningarna visar att det är fullt möjligt att genomföra. Anmärkningsvärt är att de undre delarna av den siluriska berggrunden är relativt homogent uppbyggd vilket möjliggör en god kartläggning av de enheter som bedöms motsvara Visby-, Högklint- och Toftaformationerna. Det verkar dessutom som de så kallade *"events"* som Jeppsson och Aldridge (2000) samt Jeppsson och Calner (2003) identifierat återspeglas i loggsignaturerna exempelvis Ireviken-, Mulde- och Lau-event. I samband med dessa event ökar tillfälligt karbonathalten i lagerföljden vilket ofta leder till hårdare lager som återspeglas i lägre GR-nivåer och högre ljudvågshastigheter i Sonic-loggen.

Med stöd av den geofysiska logg-signaturen har den siluriska lagerföljden indelats i enheterna A–J som kan korreleras mellan samtliga borrningar på Sudret och södra Gotland, exemplifierat med borrningarna Hamra-1 och St.Sutarve-2018 (fig. 16).

Enhet A

Relativt homogent 30–50 m mäktigt lersten-märgelstensavsnitt med höga GR-nivåer. Denna enhet motsvarar sannolikt undre och övre Visbyformationen och överlagrar ordovicisk hård och högresistiv kalksten. Enheten har en relativt enhetlig uppbyggnad och förekomst på mellersta och södra Gotland. På norra Gotland är övergången från ordovicisk kalksten och de lerigare lagren i enheten gradvis och inte lika tydlig. GR-kurvan indikerar även en gradvis tilltagande lerhalt uppåt i lagerföljden. Inom enheten är andelen kalkstenslager högre på norra Gotland vilket resulterat i en mer oregelbunden GR-kurva. Det högre inslaget av karbonat i norr kan eventuellt kopplas till förekomsten av små rev.

Enhet B

Karaktäriseras av ett cirka 20 m mäktigt avsnitt med kalksten och märgelsten. GR-kurvan har ett oregelbundet utseende men med generellt lägre API-värden i jämförelse med enhet A och C. Stratigrafiskt tolkas avsnittet höra samman med "*Ireviken-event*" som var en period med torrare klimat vilket ledde till att mindre mängd lera transporterades ut i havet vilket i sin tur ledde till karbonatdominerade avsättningsförhållanden. Enheten tolkas motsvara Högklint-, Tofta- och Hangvarformationerna. Enheten har signifikant högre resistivitet i jämförelse med enhet A.

Enhet C

Den 50–60 m mäktiga enheten består av relativt homogent lagrad märgelsten utan några signifikanta avvikelser i sammansättning eller lagring. Enheten bedöms motsvara Slitegruppen som söderut består av märgeldominerade berggrundslager vars sediment avsattes ute på relativt djupare vatten i förhållande till mer karbonatbetonad avsättning i grundare miljöer i norr. I borrningar på mellersta Gotland och öster om Visby är enheten avsevärt mäktigare och här domineras lagren av karbonatbergarter (rev) bildade inne på plattformen. Enhet C blir också tunnare söderut.

Enhet D

Enheten är cirka 20 m mäktig och karaktäriseras av låga värden på GR-kurvan följt av en markant smal topp med höga GR-värden. I borrningen i St.Sutarve-2018 består dessa lager av karbonatrika tunna siltstenslager följt av ett cirka två decimeter mäktigt bentonitlager (Grötlingbobentoniten). Avsnittet motsvarar "*Mulde-event*" som innefattar en regression med avsättning av Fröjelformationens siltstenar följt av Halla- och Muldelagrens leriga algkalkstenar. Avsnittet innefattar även en erosionsyta i den underliggande Sliteformationens (enhet C) kalkstenslager vilket återspeglas i områden med paleokarst och ooliter (Calner 2002). Enhet D sammanfaller även med en anomali i Sonic-loggen vilket eventuellt kan kopplas till den så kallade "*mid-silurian reflector*" i seismiken.

Enheterna E, F, och G

Dessa enheter är de mest problematiska att korrelera och särskilja med hjälp av de geofysiska loggarna. De motsvarar sannolikt Klintebergs- och Hemsegruppernas olika delar. Lateralt varierar uppbyggnaden från märgelstensdominerade lager till lagrad kalksten och rev. Den undre delen av enhet E är relativt homogen, men närmare Klintebergslagrens utbredningsområde på mellersta Gotland tilltar mäktigheten markant. Detta indikerar att Klintebergsgruppens revdominerade kalkstenar, som framträder som höjdområden på mellersta Gotland, relativt snabbt avtar i mäktighet söderut vilket antas vara kopplat till att de är rev bildade på kanten till en "*shelf slope*". Följaktligen uppvisar Klintebergsgruppen mycket avtagande mäktighet söderut, från 150 till cirka 40 m.

Klintebergsgruppens berggrundslager har i de inre delarna av sitt utbredningsområde, uppe på karbonatplattformen, blivit utsatt för erosion innan Hemselagren avsattes. En paleokarst-yta är dokumenterad på flera platser kring Altjame-Ala-Buttle (Eriksson & Calner 2008). Ytan sammanfaller med gränsen wenlock–ludlow. Förutom märgel finns i de undre Hemselagren revartade kalkstensmassiv som är lokalt bildade vilket möjligtvis motsvaras av enhet F där GR-loggen indikerar ett större inslag av kalksten. Detta gör det svårt att enbart från GR-loggen dra en exakt gräns mellan Hemselagren (enhet G) och Klintebergslagren (enhet E). Övre Hemselagren (enheten G) är generellt mycket homogent uppbyggda av märgelsten med hög GR-signal.

Enhet H

Denna cirka 15 m mäktiga enhet framträder tydligt i de geofysiska loggarna i samtliga djupa borrningar på Sudret och södra Gotland. Enheten motsvarar Ekelagren som i huvudsak består av algkalksten. Enheten karaktäriseras av ett avsnitt med signifikant lägre GR-värden som indikerar mindre leriga kalkstenslager.

Enhet I

Enheten motsvarar den 45–55 m mäktiga Burgsvikformationen och uppvisar en mycket varierande GR-signal med både låga som höga GR-signaler vilket återspeglar alternerade lager med siltsten, kalksten, lersten, märgel och sandsten.

Enhet J

Enheten finns enbart på Sudret och domineras av kalkstenslager med mycket låga GR-värden. Stratigrafiskt tillhör den Hamra- och Sundregruppens kalkstenskomplex. Lokalt finns i vissa borrningar inslag med märgel, exempelvis i hammarborrningen St.Sutarve-2016 och i Faludden-1.

Stratigrafisk utvärdering av den siluriska djupgeologiska berggrunden

Arbetet med att korrelera den geofysiska signaturen och de olika tolkade enheterna i den siluriska djupberggrunden med den etablerade ytnära siluriska berggrunden på Gotland kommer att fortsätta i samarbete med geologiska institutionen i Lund. Kärnan St.Sutarve-2018 med tillhörande geofysiska borrhålsloggningar utgör en viktig referens som möjliggör att en korrelation går att göra. Bland annat krävs biostratigrafiska analyser av kärnmaterial för att kunna datera de olika geofysiskt identifierade enheterna, främst enheterna A–G.



Figur 16. Geofysisk indelning (A–J) av den siluriska djupberggrunden i Hamra-1 och St.Sutarve-2018. Intervallen är preliminärt även korrelerade till etablerade stratigrafiska enheter för den siluriska ytnära berggrunden på Gotland. TD = Totaldjupet.

BURGSVIKFORMATIONEN

Utbredning, mäktighet, lagerföljd

Burgsvikformationen påträffas som ytberggrund inom ett oregelbundet område från Havdhem till Hoburgen (fig. 3) och ett mindre område kring Ronehamn (se Eriksson & Calner 2008). Formationen består av två led, Burgsvikssandsten och Burgsviksoolit (Munthe 1921, Hede 1921, Stel & de Coo 1977, Long 1993). Burgsvikssandstenen har även kallats för Burgsvikslagren "Burgsvik Beds" som informellt delats upp i tre led i Burgsvik-1-kärnan (Hede 1921, Manten 1971). Underifrån består denna indelning av 17 m lersten följt av en 23 m mäktig sandstensdominerad sekvens och överst 7 m oolit, sandsten, lersten/märgel och algkalksten. Baserat på Mantens indelning gör även Eriksson och Calner (2008) en treindelning av Burgsvikssandstenen i Uddvide-1-kärnan, undantaget att de oolitförande lagren i Mantens övre del förs till Burgsviksooliten. I Uddvide-1 består Burgsvikssandstenen av 11 m karbonathaltig lerskiffer och lersten följt av 9 m siltsten och överst 11 m glimmerrik sandsten.

Lagerföljden i St.Sutarve-2018 är inte lika enkel att dela in i tre delar eftersom den består av en mer heterogen sekvens med siltsten, lersten och en mindre andel finkornig, glimmerrik sandsten. Sandstenslagren är vanligtvis tunna förutom några enstaka meter-mäktiga lager i den övre delen av lagerföljden. I St.Sutarve-2018 är Burgsvikssandstenen 52,9 m mäktig (49,1–102 m djup). Burgsviksooliten är 5 m mäktig och uppdelad på två oolitska kalkstensnivåer. Inom Burgsvikssandstenen finns ytterligare en nivå med oolit i den övre delen (fig. 17).



Figur 17. Illustration som visar Burgsvikformationens lagerföljd, provnivåer och GR-kurvan i kärnborrningen St.Sutarve-2018.



Figur 18. Burgsvikssandstenen på Sudret. Isokarta som visar överytans läge i meter under havsytans nivå. Färgat område anger var Burgsvikssandstenen överlagras av yngre berggrund, det vill säga Hamra och Sundreformationerna. Den streckade linjen anger den västra gränsen för förekomst av hela Burgsvikssandstenen, det vill säga väster om linjen påträffas inte hela lagerföljden som hör till Burgsvikssandstenen.

Burgsvikssandstenens övre gräns mot Burgsviksooliten är tydligt markerad i blottade sekvenser på västra Sudret och i kärnborrningarna Uddvide-1, Burgsvik-1 och St.Sutarve-2018. Gränsen är också tydligt markerad i GR-loggen i borrningar på Sudret (jfr. fig. 17, 19). GR-anomalin har använts som referensnivå för framtagningen av isokartan för Burgsvikssandstenens topp (fig. 18).

Formationen avgränsas neråt av Ekeformationens kalkstensenhet som även den markeras tydligt i de geofysiska borrhålsloggarna (fig. 17, 19). Den cirka 15 m mäktiga Ekeformationen med algkalksten karaktäriseras som ett homogent intervall med låga GR-värden vilket kan identifieras i samtliga borrhålsloggar på Sudret (fig. 19). Förändringen i GR-loggen, motsvarande gränsen mot Ekelagren, har använts som referensnivå för isokartan för Burgsvikssandstenens bas vilken i det här fallet även sammanfaller med formationens bas (fig. 20).

I sydöstlig riktning påträffas den cirka 50 m mäktiga Burgsvikformationen på allt större djup. I de östra delarna av Sudret ligger toppen på 50–60 m djup under havsytans nivå. I väster är övre delen av Burgsvikformationen och gränsen mot Hamraformationen blottad utmed kuststräckan från Kättelviken till Hoburgen. Burgsvikssandstenen (ledets) totala mäktighet är stort sett den samma på





Figur 19. Tolkad mellanhålskorrelation för berggrundslagren ner till och med Ekeformationen. Överst illustreras lagerföljden med Ekeformationens topp som referensnivå samt fördelningen och mängden sandstenslager. Notera att för flertalet borrningar saknas information från den allra översta delen av berggrunden.

SGU-RAPPORT 2022:11 35

Sudret (fig. 21). Variationen är inte mer än några få meter mellan olika borrhål. Däremot finns en tydlig variation i andelen sandstenslager i förhållande till andelen lersten och märgelsten. Andelen sandlager, så kallad nettosand, har beräknats med stöd av GR-loggen och borrkärnan från St.Sutarve-2018.

GR-signalen är förhållandevis hög för sandstenslagren, bland annat beroende på hög halt av glimmer och lermineral. Vi fann i vår analys av loggar och kärnor att värden under 87 API-enheter på GR-loggen representerar sandstenslager. Denna nivå har definierats som gränsvärde, så kallat "*cut-off value*", för beräkning av andelen nettosand och modellering av de individuella sandstenslagrens utbredning lateralt. Andelen nettosand varierar mellan 22 % och 36 % motsvarande 11–18 m sandstenslager. Den största andelen sandsten finns i de västra och nordvästra delarna av Sudret (fig. 22). Speciellt tydligt är också att sandstenslagren i den övre delen av Burgsvikssandstenen är mäktigare i väst och nordväst.



Figur 20. Burgsvikssandstenen på Sudret. Isokarta som visar undre gränsytans (basens) läge i meter under havsytans nivå. Streckad linje visar läget för Burgsvikssandstenens kontakt mot den underliggande Ekeformationen.


Figur 21. Karta som visar Burgsvikssandstenens mäktighet på Sudret i meter. Mäktigheten i området mellan de streckade linjerna visar inte Burgsvikssandstenens totala mäktighet eftersom här saknas i varierande omfattning de övre delarna av formationen.

Petrografi, kemisk sammansättning och fysikaliska egenskaper

En petrografisk studie av 19 tunnslip från olika sandstenslager i St.Sutarve-2018 (se provnivåer i figur 17) visar en dominans av ljusgrå finkorniga till mycket finkorniga kvartsareniter. Texturen karaktäriseras av kantig finkornig kvarts, mikritiska klaster, lermineral, glimmer samt en mindre andel tungmineral och enstaka fältspatskorn (fig. 23a–h). I varierande grad är lagren cementerade med mikrosparit och dolomit. Enligt Long (1993) domineras sandstenslagren av kvarts (medelvärde 44,5 %) och mikritiska klaster (medelvärde 49,4 %) samt en mindre andel fältspat och tungmineral (medelvärde 6,1 %).

SGU har även gjort försök till en kemisk karaktärisering av Burgsvikssandstenen med hjälp av en handhållen XRF (bilaga 3). Mellan 48 och 105 m djup gjordes 105 analyser med ett punktavstånd på cirka 0,5 m. Resultat från XRF-skanningen indikerar en viss förändring av haltförhållandena vid



Figur 22. Karta som visar modellering av den sammanlagda mäktigheten i meter för sandlagren (nettosand) inom Burgsvikssandstenen. Nettosanden mellan de streckade linjerna motsvarar inte hela formationen (jfr. fig. 20 och 21).

cirka 80 m djup. Främst framträder detta som en något högre kiselhalt och kalciumhalt under 80 m djup i jämförelse med intervallet ovanför. XRF-analysen antyder även en större variation av magnesium-, järn- och svavelhalterna samt något högre aluminiumhalt i den övre delen av formationen. Detta kan möjligtvis vara kopplat till högre av glimmhalt i den övre delen av Burgsvikformationen. Det ska poängteras att XRF-analyserna inte ger en exakt halt utan resultaten är mest användbara för att se relativa förändringar i lagerföljden.

I tabell 4 redovisas resultaten från en ICP-MS-analys av Burgsvikssandstenen som ger en mer detaljerad bild av den kemiska sammansättningen. Det analyserade provet kommer från ett av de övre sandstenslagren inom Burgsvikssandstenens lagerföljd och bedöms representera typisk sandsten inom denna del av lagerföljden. Den kemiska sammansättningen indikerar förutom en stor dominans av kvarts (80 %) även att det förekommer karbonat, fältspat och lermineral som bidrar till den kemiska signaturen.



Figur 23. Mikroskopfotografier av Burgsvikssandstenen från fyra olika sandstenslager. Varje nivå med två förstoringar. Samtliga fotografier är tagna med genomfallande ljus utom fotografiet i fig. 23d som är taget med polariserat ljus. Skalstrecket motsvarar 0,1 mm. Notera den mycket finkorniga och kantiga korntexturen samt den stora mängden ljusbruna karbonatklaster (23a–b, e–f) och avlånga glimmerflak (23g–h), Blå partier är infärgade porutrymmen. Provet från 58,2 m (23c–d) innehåller även en stor mängd sparitiskt cement och dolomit. Fotografier: Mikael Erlström.



Figur 24. Fotografier av sedimentära strukturer i Burgsvikssandstenen i kustskärningar vid Hoburgen. **a)** Hummockykorsskiktning. **b)** Korsskiktning och gränsen mot Burgsvikooliten. **c)** Vågripples. **d)** Kuddstrukturer i sandstenslager. Fotografier: Mikael Erlström.

Provenansstudier (Karlsson 2005) visar att den troliga källan till sandstenens mineralkorn kan hittas i områden påverkade av de svekonorvegiska och kaledoniska orogeneserna. Korsskiktning, vågmärken och hummocky korsskiktning indikerar också en snabb avsättning i ett delta där stormar spelade en betydelsefull roll (Eriksson & Calner 2008, fig. 24a–c). Sandstenslagren som är blottade i sandstensbrott vid Uddvide och i kustskärningar på västra Sudret visar också oregelbundna flammiga strukturer vilka tolkats som avvattningsstrukturer. Dessa orsakades eventuellt av jordbävningar som skapade störningar av vattenmättade porösa sandlager som överlagrade tixotropa lerigare lager (Pusch 1969, fig. 24d).

Porositets- och permeabilitetsanalyser utförda av GEUS kärnlaboratorium i Köpenhamn på sandstensprov från St.Sutarve-2018 ger en medelporositet på 16,6 % (tabell 5). De övre sandstenslagren har oftast något högre porositet i jämförelse med de undre. Även om porositeten är medelgod är sandstenslagrens genomsläpplighet (gaspermeabilitet) inte särskilt god. De högsta värden som vi uppmätt är cirka 200 mD, men medelvärdet är endast 63,6 mD. Ett värde på 1 Darcy medger ett flöde av en milliliter vätska per sekund med viskositeten 1,0 kg/(s·m) genom en area på en kvadratcentimeter vid en tryckgradient på en atm/cm. Permeabiliteten för sandstenslagren i Burgsvikformationen bedöms motsvara värden för finsand och grovsilt, det vill säga mestadels lager med relativt låg genomströmningsförmåga (fig. 25) motsvarande ett K-värde på 10⁻⁵–10⁻⁶ m/s.

Tabell 4. Resultat från kemisk analys av Burgsvikssandsten från Kättelviken. Halterna är angivna i procent. Analysen är utförd av ALS Geochemistry med ICP-MS-teknik.

	SiO2	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na₂O	K₂O	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅	Glödförlust
Kättelviken	80,0	4,19	1,59	3,92	1,1	0,64	1,85	0,28	0,03	0,05	4,52

Användning och brytning

Burgsvikssandstenen har använts som byggnadssten och i dopfuntar under olika perioder, inte bara på Gotland utan även i stora delar av Östersjöområdet. Den första storhetstiden var från 1000-talet till 1200-talets mitt. Under 1500-talet och 1600-talet var brytningsverksamheten också omfattande. Sandstenen användes bland annat i Fredriksborgs slott i Hilleröd och Kronborgs slott i Helsingör (Danmark), i byggnader längs polska och tyska Östersjökusten, samt i Gamla Stan i Stockholm. Den senaste storhetstiden för brytning av Burgsvikssandstenen var mellan 1890 och 1910. Den användes då som fasadsten och till utsmyckning i en rad svenska städer, men även i St. Petersburg. Den viktigaste användningen har varit tillverkning av slipstenar och brynen samt delvis som takflis. Under 2006 bröts 44 ton sandsten vid Botvide av Gotlandsbrynet. Brytning sker även vid Uddvide av Slite stenhuggeri AB.



Figur 25. Diagram som visar spridningen av mätvärdena för porositet och permeabilitet på sandstensprov av Faluddensandsten och Burgsvikssandsten. Förutom mätvärden från analyser av kärnprov från kärnborrningen St.Sutarve-2018 visas även resultat från äldre OPAB- och SGU-analyser. V=vertikal analys, H=horisontell analys

Prov id.	Djup, m KB	Orientering	Gas perm, mD	Porositet, %	Korndensitet, g/cm³
1	50,39	Horisontellt	203,6	20,8	2,672
2	50,43	Vertikalt	189,5	20,4	2,667
3	52,43	Horisontellt	102,1	17,9	2,663
4	62,62	Horisontellt	29,0	17,4	2,683
5	67,37	Horisontellt	31,8	17,4	2,676
6	67,83	Horisontellt	77,0	18,4	2,67
7	69,93	Horisontellt	13,5	12,5	2,678
8	92,28	Horisontellt	6,1	11,4	2,673
9	96,59	Horisontellt	61,7	16,7	2,658
10	96,63	Vertikalt.	69,4	16,8	2,654
11	96,98	Horisontellt	56,2	17,4	2,67
12	97,48	Horisontellt	0,2	7,2	2,686
medelvärde			63,6	16,6	2,669

Tabell 5. Sammanställning av resultat från mätningar av porositet, permeabilitet och korndensitet på kärnprov av Burgsvikssandstenen från St.Sutarve-2018.

FALUDDENSANDSTENEN

Utbredning, mäktighet och lagerföljd

Faluddensandstenen är den yngsta av de mäktigare sandstensenheterna som finns i den kambriska lagerföljden i södra Östersjön (fig. 26). OPAB namngav sandstenen från förekomsten i deras borrningar i Faludden i början av 1970-talet. Redan tidigare hade sandstenslagren noterats i SGUborrningarna File Haidar-1, Grötlingbo-1 och När-1 (Anderegg m.fl. 1968). Senare gjorde Hagenfeldt och Bjerkéus (1991), Hagenfeldt (1994) samt Nielsen och Schovsbo (2007) stratigrafiska studier som visar att sandstenen tillhör den mellankambriska trilobitzonen *Acadoparadoxides pinus–Ptyghagnostus praecurrens*. Sandstenen är ett informellt litostratigrafiskt led inom Borgholmformationen. Gränsen mot det underliggande siltstensdominerade Mossbergaledet är skarp och sandstenen markerar en successiv regression av det kambriska havet västerut. Sandstenen är som mäktigast 50–60 m i de centrala delarna av Östersjön. I borrningen B-9 söder om Gotland är sandstenenen 48 m mäktig (fig. 26–27). På den baltiska sidan kallas Faluddensandstenen för Deimenaformationen. I västlig och nordvästlig riktning blir sandstenenen successivt tunnare och kilar ut. Den påträffas därför inte i borrningar på Öland eller nordvästra Gotland (fig. 27).

På Sudret är Faluddensandstenen cirka 14 m i norr och uppemot 36 m i söder (fig. 28). Toppen på sandstenen ligger mellan 450 m i norr (Skåls-1) och 570 m djup i söder (Hamra-1). I St.Sutarve-2018 ligger toppen av Faluddensandstenen på 542,8 m. St.Sutarve-2018 nådde inte riktigt helt igenom sandstenen utan slutar någon meter ovanför det underliggande Mossbergaledet. Den totala mäktigheten på sandstenen är 24–28 m i området kring St.Sutarve-2018 där 22,15 m genomborrats. Figur 29 illustrerar sandstenens homogena uppbyggnad (jämn låg nivå på GR-kurvan) och tilltagande mäktighet söderut samt den lokala förekomsten av tunna lerstens-lerskifferlager.



Figur 26. Schematisk stratigrafisk indelning och korrelation av de kambriska sandstenslagren i Östersjöområdet (från Erlström m.fl. 2011).



Figur 27. Faluddensandstenens regionala utbredning, djup (överyta) och mäktighet (modifierad efter Erlström m.fl. 2011).

Faluddensandstenen överlagras oftast av tunna, kraftigt glaukonitiska och omlagrade konglomeratiska berggrundslager samt lokalt någon meter med alunskiffer eller alunskifferkonglomerat. Dessa lager visar på en kraftigt kondenserad lagerföljd, det vill säga motsvarande merparten av mellankambrium, övre kambrium och understa ordovicium. Enstaka borrningar visar att Faluddensandstenen överlagras direkt av underordovicisk kraftigt glaukonitisk kalksten, det vill säga Björkåsholmenformationen (Erlström & Sopher 2019). I St.Sutarve-2018 överlagras sandstenen av ett cirka fem centimeter tjockt glaukonitiskt alunskifferkonglomerat. Den översta delen av Faluddensandstenen i St.Sutarve-2018 är kraftigt vittrad, uppsprucken och mineraliserad med bland annat kalcit vilket indikerar exponering, vittring och erosion av sandstenen, och de yngre kambriska lagren som nu endast är representerade av tunna kondenserade



Figur 28. Faluddensandstenens mäktighet på Sudret. Modellen är baserad på borrningar som går igenom hela sandstenen och tolkade seismiklinjer.

och konglomeratiska lager med bland annat alunskiffer. Tyvärr vet vi inte mäktigheten på den ursprungliga lagerföljden som borteroderats under yngre kambrium och äldre ordovicium mer än att det är en betydande lucka i lagerföljden.

Faluddensandstenen består av en enhetlig sekvens med ljusgrå-vit, fin- och medelkornig kvartssand. Lokalt förekommer decimeter-mäktiga lager med mörkgrå-svartgrå lersten och lerskiffer. Lagerserien i St.Sutarve-2018 består av upprepade meter-tjocka lager med i varierande grad korsskiktad sandsten. De geofysiska borrhålsloggarna visar endast små avvikelser i loggsignalen. GR-kurvan visar på mycket låga värden som överensstämmer med en ren kvartssandsten. Enstaka högre toppar kan kopplas till förekomsten av tunna lersten- eller lerskifferlager. I vissa borrhål visar de individuella sandstenslagren gradvis lägre GR-nivåer uppåt vilket indikerar att de blir successivt grövre (renare). Detta återspeglar sannolikt en avsättning med successivt allt grundare och mer strandnära avsättningsförhållanden.



Figur 29. Tvärsektion som visar en korrelation av Faluddensandstenen och överliggande ordovicisk berggrund i nord–sydlig riktning på Sudret. Korrelationen baseras på loggsignaturen för den naturliga gammastrålningen. Faluddensandstenens överyta har använts som referensnivå. Korrelationen och indelningen av den ordoviciska lagerföljden baseras på resultat presenterade i Erlström och Sopher (2019). Alla djup i meter från kelly bushing (referensnivå på borriggen).

Petrografi, kemisk sammansättning, fysikaliska egenskaper

Modalanalyser visar att sandstenen domineras av kvartskorn, har en hög andel porer (17 %) och att andelen cement (kisel och kalcit) utgör cirka fem procent av bergarten (tabell 6). Modalanalysen är gjord med polarisationsmikroskopering av sju tunnslip på kärnprov från borrningarna B-7, B-9, När-1 och File Haidar-1. Totalt har 500 punkter på varje tunnslip klassificerats (tabell 6) (Chitindingu 2018). Under 2019 gjordes ytterligare 30 tunnslip på kärnor av Faluddensandstenen i Frigsarve-1, Hamra-1, Kvarne-1 och St.Sutarve-2018. Dessa har inledningsvis studerats med polarisationsmikroskop avseende främst textur och cementets utseende. Modalanalys och kemiska analys återstår att utföra.

Mikroskoperingen av proven från St.Sutarve-2018 bekräftar i stort resultaten från modalanalysen. Den porösa kvartssandstenen var ursprungligen dominerad av medelkornig kvarts med relativt hög rundningsgrad (fig. 30a–c, e–f). På ursprungskornen finns sekundära utfällningar av kisel som i varierande grad cementerar bergarten (fig. 30a–c). Ofta markerar en grå randzon "*dust rim*" gränsen mellan utfällningarna och ursprungskornet (fig. 30c). Kiselcementet bedöms komma från tryckupplösning i kornkontakter där kiselsyra har frigjorts (fig. 30d). Tryckupplösning mellan kvartskorn är i jämförelse med de djupare liggande sandstenslagren (När och Viklau) mindre omfattande i Faluddensandstenen (Chitindingu 2018). I den övre delen av Faluddensandsten i St.Sutarve-2018 förekommer däremot utfälld kalcit relativt frekvent (fig. 30e). På liknade sätt förekommer även pyrit som spridda mineraliserade mm-stora aggregat (fig. 30f). Det har även observerats utfällningar av fosfat (apatit) i enstaka prov av Faluddensandsten på 574 m djup i Hamra-1 (Chitindingu 2018). Sannolikt bildades först utfällningarna av apatit, därefter kvarts och sist kalcit följt av pyrit. Ytterligare undersökningar krävs dock för att kunna tolka den diagentiska processen, det vill säga sekundära mineraliseringar i sandstenen.

Hittills har endast två kemiska analyser av sandstenen utförts (tabell 7). Analyserna gjordes i samband med SGU:s arbeten med bedömning av lagringspotentialen för koldioxid i de kambriska sandstenslagren i södra Östersjön (Erlström m.fl. 2011). Resultaten verifierar höga kvartshalter och låga halter av grundämnen som främst kan kopplas till förekomsten av karbonat, fältspat och pyrit.

	Kvarts, %	Fältspat, %	Cement (kalcit, kisel, pyrit), %	Porer, %	Övrigt (glimmer, zirkon, opaka mineral, mikrit, lera), %
Medelvärde	75,2	1,7	5,1	17,0	< 0,5
Min	73,6	1,2	4,0	16,0	< 0,5
Max	77,0	2,0	6,2	18,8	< 0,5

Tabell 6. Resultat från modalanalys (punkträkning) av sju tunnslip på kärnor av Faluddensandsten från borrningarna B-7, B-9, När-1, och File Haidar-1 (data från Chitindingu 2018).

Tabell 7. Resultat från kemisk analys av kärnprov av Faluddensandsten från borrningarna B-7 och B-9 i södra Östersjön. Halterna angivna i procent. Analysen är utförd av ALS Geochemistry med ICP-MS-teknik.

	SiO ₂	Al_2O_3	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na₂O	K₂O	TiO ₂	MnO	P_2O_5	Glödförlust
B-7, 857 m	95,7	0,44	2,27	0,34	0,1	0,06	0,05	0,08	0,02	0,05	1,58
B-9, 1 029 m	94,8	0,52	1,28	0,34	0,15	0,02	0,05	0,06	0,04	0,01	1,12



Figur 30. Mikroskopfotografier av Faluddensandsten från St.Sutarve-2018. Skalstrecken motsvarar 0,25 mm. **a)** Porös relativt välsorterad kvartsarenit med kiselcement i kornkontakter. **b)** Porös kvartsarenit med relativt hög andel kiselcement i kornkontakter och kristallisation av pyrit (svart) runt kvartskorn i övre delen av fotot. **c)** Detalj av kvartskorn med kiselcement, där de ursprungliga kornytorna syns som en grå grynig zon. **d)** Kluster med sammankittade kvartskorn, bildat genom tryckupplösning av kisel i kornkontakter. **e)** Kalcitkristall som omsluter flera kvartskorn, notera att kalcitcement även omsluter det tidigare bildade kiselcementet. **f)** Större kristallisering med pyrit som omsluter flera kvartskorn.

Porositeten och gaspermeabiliteten har tidigare analyserats i anslutning till SGU:s arbeten med bedömning av sandstenens potential som lagringsakvifer för koldioxid. Även OPAB har tidigare utfört ett antal analyser på Faluddensandstenen. Dessa har nu kompletterats med analyser på 19 prov från St.Sutarve-2018 och 20 analyser från olika OPAB-borrhål på Sudret där det funnits kärnmaterial (Hamra-1, Frigsarve-1 och Kvarne-1). Provnivåerna och resultaten redovisas i bilaga 2 och figur 25. Totalt finns nu resultat från 76 porositets- och gaspermeabilitetsanalyser varav 47 av dessa ger permeabiliteten i horisontalled och resterade 29 i vertikalled. Medelporositeten är 15,6 %

och den horisontella medelpermeabiliteten 655 mD. Den vertikala medelpermeabiliteten är något lägre, 406 mD. I jämförelse med Burgsvikssandstenen uppvisar Faluddensandstenen generellt mycket högre permeabilitetsvärden.

MODELLER AV BERGGRUNDENS STRUKTURELLA UPPBYGGNAD

Information från OPAB:s borrhål och seismiska undersökningar samt SkyTEM-projektet har använts för att ta fram modeller av berggrundens strukturella uppbyggnad på djupet. Förutom strukturkartor för urberget, Faluddensandstenen (toppen på den kambriska lagerföljden), ordovicium och Burgsvikssandstenen (se fig. 11–12, 14, 16, 18) har ett antal 3D-modeller gjorts. För Burgsvikssandstenen ingår även en 3D-modellering av nettosandförhållandet med stöd av tolkningar och klassning av GR-kurvan i borrhål på Sudret.

Strukturkartor och 3D-modell

Strukturkartorna baseras på tolkning av seismiskt uthålliga reflektorer i de seismiska linjerna. Sju nivåer har kartlagts: urbergets överyta, Faluddenledets överyta, ordoviciums överyta och förutom basen på Burgsviksledet även tre reflektorer inom den siluriska sekvensen (jfr. fig. 9). Tolkningen har utförts i programmet OpendTect. Interpolering och omräkning av seismisk tvåvägs gångtid i sekunder till metriskt djup gjorts i MATLAB med stöd av borrhålsinformation. Med stöd av programmet har interpolering av de tolkade och djupkonverterade linjerna gjorts för framställning av isokartor för de olika nivåerna. Ner till 200 m djup har även resistivitetsmodeller från SkyTEMmätningarna använts som stöd till framställningen av kartorna.



Figur 31. a) 3D-modell som visar Faludden- och Burgsviksreservoarernas strukturella utbredning och mäktighet på Sudret. b) 3D-modell av berggrundens uppbyggnad med visualisering av de olika kartlagda nivåerna.

Strukturkartorna visar tydligt att lagerföljden stupar svagt åt sydost. Den är också relativt opåverkad av större förkastningar. Mindre lokala förkastningar med < 30 m vertikal förskjutning av berggrundslagren förekommer dock relativt frekvent. Den största förkastningen har en vertikal förskjutning på cirka 40 m och stryker i nordvästlig riktning (135°) från Stockviken, via Burgsvik till Näsudden. Den indikeras även i höjdreliefkartan, resistivitetskartan, bougeranomalikartan och kartan över magnetfältet (fig. 10a–d). Den vertikala förskjutningen är tydligast i de undre delarna av den paleozoiska lagerföljden, exempelvis i ordoviciums överyta. Högre upp i lagerföljden verkar det som om förkastningen övergår från spröd till plastisk deformation vilket ger en mer flexurartad omböjning av berggrundlagren. Förutom den större förkastningen är det svårt att följa de mindre förkastningarna mellan olika seismiska linjer vilket tyder på att de har en lokal utbredning. Eftersom de enbart kan identifieras på enstaka seismiska linjer går det inte att säkerställa hur de är orienterade. Sannolikt följer flertalet den nordvästliga huvudriktningen. Den större förkastningen bedömer vi orsakad av reaktivering av äldre förkastningar i urberget i samband med den kaledoniska orogenesen.

Förutom strukturkartorna har en 3D-modell av de seismiskt tolkade nivåerna tagits fram (fig. 31) med framför allt fokus på att visualisera Faluddensandstenen och Burgsvikssandstenens utbredning. Modellen har utgjort underlag till volymberäkningarna av de båda akvifererna på Sudret.

Volymberäkningar av Faludden- och Burgsviksreservoarerna

Magasineringskapaciteten för de båda reservoarerna har beräknats utifrån porvolymen i sandstenslagren med stöd av framtagna modeller för mäktigheter och porositetsmätningar. Mäktighetskartan för Faluddensandstenen är gjord genom att interpolera brunnsuppgifter från tretton borrningar på Sudret (se bilaga 1). Inom modellområdet varierar mäktigheten från cirka 20 m kring Burgsvik till 36 m på sydligaste delarna av Sudret (fig. 28). Mäktighetskartan visar bruttomäktigheten, det vill säga utan hänsyn till förekomsten av andra bergartslager i den sandstensdominerade sekvensen. GR-kurvan från de geofysiska borrhålsloggningarna och kärnan i St.Sutarve-2018 visar en mycket homogen reservoar med endast spridda förekomster av tunna lerstenoch lerskifferlager. Vid beräkningen av nettosandvolymen har därför



Bruttovolym: 3,3 x 10⁹m³

Nettovolym (net to gross = 0,8): 2,6 x $10^9 m^3$

Porvolym (porositet 0,15): 3,9 x 108 m3



Bruttovolym: 6,4 x 10⁹m³

Nettovolym (modell): 1,9 x 10⁹m³

Porvolym (porositet 0,15): 2,8 x 108m3

Figur 32. Ungefärliga prognoser för reservoarvolymen av **a**) Faludden- och **b**) Burgsviksreservoarerna. Blå markering anger avgränsningen av området för volymberäkningarna. Figurerna baseras på kartorna presenterade i figurerna 21 och 28 med tillhörande legend.



Figur 33. Exempel på tvärsnitt genom-3D-modellen som visar utbredningen och förekomsten av sandstenslager i Burgsvikssandstenen. Den övre delfiguren **a**) visar enbart den interpolerade signalen för GR-loggen medan den undre **b**) visar den modellerade förekomsten av sandstenslager baserat på kalibrering av signalen avseende bergart.



Figur 34. Exempel på tvärsnitt genom 3D-modellen som visar utbredningen och förekomsten av sandstenslager i Burgsvikssandstenen. Den övre delfiguren **a**) visar enbart den interpolerade signalen för GR-loggen medan den undre **b**) visar den modellerade förekomsten av sandstenslager baserat på kalibrering av signalen avseende bergart.

en relativt hög nettosandfaktor på 0,8 använts. Porvolymen har beräknats på en medelporositet av 15 %. Beräkningarna ger en total porvolym eller magasineringskapacitet av cirka $3,9 \times 10^8$ m³ inom modellområdet (fig. 32). Som jämförelse har sandstenslagren i Burgsvikssandstenen en betydligt mindre total porvolym på $2,8 \times 10^8$ m³ trots en mycket större bruttomäktighet men med mindre total mängd nettosand. Volymberäkningarna kan användas för bedömning av geotermisk energiproduktion och energilagring samt för Burgsvikssandstenen även magasineringskapaciteten för grundvatten.

Utbredningen och volymen nettosand för Burgsvikssandstenen har bestämts genom att använda och interpolera tolkade GR-loggar. Med stöd från GR-loggen och kärnan i St.Sutarve-2018 har loggsignalen kalibrerats för vilket gränsvärde (API-värde på GR-loggen) som skiljer sandsten från lersten eller lerskiffer. De geofysiska borrhålsloggarna i OPAB-borrhålen har digitaliserats och signalen kalibrerats så att den är densamma för ett homogent enhetligt intervall. Som kalibreringsintervall valdes Hemselagren inom enhet G (se fig. 14). Med stöd av loggresultaten i St.Sutarve-2018 sattes ett gränsvärde på 87 API för att skilja sandsten från lersten. Modellen gav då ungefärligt samma resultat som det net–gross-förhållande som tolkats manuellt (fig. 19). Därefter interpolerades sandlagren i borrhålsloggarna med varandra med stöd av en voxelmodell för Sudret med en cellstorlek (x, y, z) på $100 \times 100 \times 0,5$ m. Den skapade kartan visar nettosandfördelningen (fig. 22) och en 3D-modell visar de enskilda sandlagrens utbredning och förekomst. Två tvärsnitt genom 3D-modellen exemplifierar att andelen sandstenslager är avsevärt högre i den västra och nordvästra delen av Sudret. Enskilda sandlager blir också tunnare i sydvästlig riktning (fig. 33–34).

Resistivitetsmodeller från SkyTEM-undersökningen

Resultaten från SkyTEM-undersökningarna har också använts för att skapa 3D-modeller av jordlagrens och berggrundens uppbyggnad på Gotland. Dessa har i olika delar redovisats av SGU (Dahlqvist m.fl. 2017b) och i en publikation av Jørgensen m.fl. (2018). En övergripande beskrivning av dataunderlaget och modellerna redovisas även i en SGU-rapport av Persson (2021). Modellerna finns även tillgängliga via 3D-kartvisaren på SGU:s webbplats. I modellerna illustreras resistivitetsfördelningen på djupet, en stratigrafisk modell för berggrundens uppbyggnad, en litologisk modell och en modell för förekomsten av saltpåverkat grundvatten. Resistivitetsmodeller finns enbart inom de SkyTEM-undersökta områdena medan övriga modeller, med stöd av tolkning av OPAB:s seismik och borrningar finns för hela Gotland.

Förutom den lagerbaserade stratigrafiska modellen är modellerna så kallade voxelmodeller där varje voxel är $100 \times 100 \times 2$ m. Jordlagren på Sudret är generellt tunna, ofta mindre än en meter. I den befintliga voxelmodellen är jordlagrens mäktighet överskattad då SGU valt att hellre visa var det finns jordtäcke än att detta inte visas. Anledningen är att jordlagren, trots sin ringa mäktighet, har stor betydelse när det gäller grundvattenbildning och tillfällig magasinering av ytligt grundvatten.

Variationen av resistiviteten i marken ner till fem meters djup beror på var det finns jordlager, speciellt om de består av lera eller om det finns ytvatten och även till viss del på berggrundens uppbyggnad. Områden med ytligt liggande högresistiva områden med Hamra- och Sundrekalksten påverkar också tydligt resistivitetsskillnader i de ytnära marklagren.

I figur 35 illustreras resistiviteten ner till cirka 80 m djup längs ett nätverk av utvalda sektioner på Sudret. Resistivitetsfördelningen visar tydligt utbredningen av högresistiv kalksten på djupet. Profilerna visar också var det förekommer mäktigare högresistiva kalkstenskroppar på djupet. Dessa motsvarar kalkstensmassiv som till merparten består av tät revkalksten tillhörande Hamraoch Sundreformationerna, och man kan även tydligt se hur kalkstenen blir mäktigare mot sydost samt att en zon med lägre resistivitet motsvarande Burgsvikssandstenen ligger allt djupare i samma riktning.



Figur 35. Illustration av resistivitetsmodell längs utvalda profiler på Sudret. I profilerna framträder tydligt högresistiva områden (lila) som representerar tät Hamrakalksten. Den svagt sluttande kontakten mot underliggande lager motsvarande mer lågresistiv Burgsvikssandsten framträder också tydligt.

HYDROGEOLOGISK TOLKNING AV BURGSVIKSSANDSTENEN

Analys av data i SGU:s brunnarkiv visar att dricksvattenbrunnar som slutar i Burgsvikssandstenen (n =116) har en mediankapacitet på cirka 500 l/tim. Enligt Ryd (2017) motsvarar det en hydraulisk konduktivitet (K) på cirka 5×10^{-7} m/s. Detta är ett lågt värde i jämförelse med andra sandstensakviferer där konduktiviteten oftast är i storleksordningen 10^{-4} till 10^{-6} m/s och som ger betydligt högre uttagskapacitet. Att veta vilka nivåer grundvattnet kommer från i brunnar på Gotland är oftast svårt då de flesta är så kallade öppna brunnar där i stort sett hela berggrunden som borrningen går genom bidrar till den totala kapaciteten. Dock är det troligt att man inte borrar djupare än man behöver för att få vatten, vilket gör det relativt säkert att säga att dessa siffror är rimliga och i alla fall inte överdriver kapaciteten för brunnar på Sudret och K-värde, vilket gör att man snarare kan betrakta att uttagskapaciteten från brunnar på Sudret ofta är kopplade till liten grundvattenbildning och dålig magasineringsförmåga. Det finns helt enkelt inte så mycket grundvatten att tillgå.

Den heterogenitet som Burgsvikssandstenen uppvisar, med sekvenser av renare sandsten åtskilda av siltsten och lersten som trots namnet på formationen oftast dominerar sekvensen, är en bidragande faktor till den låga uttagskapaciteten. Dessa silt- och lerstenar är att betrakta som en akvitard, vilket innebär att dessa partier är svårgenomsläpplig för vatten. Partierna hindrar därmed kontakt mellan de sandigare partierna och därmed minskar även grundvattenbildningen och uttagskapaciteten. Porositeten i de sandiga partierna ligger på cirka 16,6 % i medeltal, med en medelpermeabilitet på cirka 63 mD. Porositeten är tillräckligt hög för att man ska tänka att Burgsvikssandstenen kan vara en god akvifer, däremot är permeabiliteten låg och motsvarar värden för siltiga jordlager, vilka brukar betraktas som dåliga akviferer. Proverna från de översta sandstenslagrena visar upp en betydligt högre permeabilitet (över 100 mD) vilket gör att vi bedömer de övre partierna som bättre än övriga delar av Burgsvikssandstenen. Det betyder att om man borrar en brunn och har kommit igenom de övre metrarna av Burgsvikssandstenen så är det inte troligt att kapaciteten ökar väsentligt om man fortsätter borra. Det är däremot en stor risk att få saltpåverkat grundvatten då stora delar av Burgsvikssandstenen beräknas ligga under den nivå där det är troligt att det är ett saltpåverkat grundvatten (se figur 67 i Dahlqvist m.fl. 2017b).

BERGGRUNDENS TERMISKA EGENSKAPER OCH GEOTERMISKA POTENTIAL

Geotermisk gradient och värmeledningsförmåga

Det är sedan länge känt att den termiska gradienten i den paleozoiska berggrunden i centrala Östersjön är relativt hög. I den regionala beskrivningen till den översiktliga grundvattenkartan över Gotland (Karlqvist m.fl. 1982) redovisas isotermer för den kambriska sandstenen under Gotland som indikerar att den termiska gradienten är allmänt över 35 °C/km. Det gör att det redan på 500 m djup är formationstemperaturen ofta drygt 25 °C (fig. 36a). Exempelvis uppmättes 26,7 °C i borrningen St.Sutarve-2018 på knappt 500 m djup (fig. 36b). Det ska poängteras att mätningarna utförts i nära anslutning till att borrningarna avslutats och sannolikt motsvarar därför de uppmätta temperaturerna inte fullt normaliserade förhållanden. Påverkan från cirkulerande borrvätska gör oftast att uppmätta temperaturer direkt efter avslutad borrning är något lägre än normalt. Spridningen på de uppmätta temperaturerna som visas i figur 30a är sannolikt orsakade av hur de enskilda borrningarna utförts (dimensioner, spoltryck, borrvätskans temperatur med mera). Trots dessa felkällor är bilden samstämmig att den termiska gradienten är högre än övrig berggrund i Sverige. Eftersom St.Sutarve-2018 gjordes som en kärnborrning med mindre spolning i jämförelse med OPAB:s rotationsborrningar bedöms temperaturmätningen mer tillförlitlig. Mätningarna ger en gradient på 38,1 °C/km för intervallet mellan 225 och 494 m (fig. 36b).

Berggrundsenhet	Värmeledningsförmåga, medelvärde, W/mK	Antal analyser	Provtyp
Hoburgskalksten	2,77	1	Stuff från Hallbjäns
Sundrekalksten	2,71	1	Stuff från Sundre
Hamrakalksten	3,05	1	Stuff från Hoburgen
Burgsvikssandsten	2,23	2	Stuff från Kättelviken
Ordovicisk kalksten	2,72	2	Kärnprov från Skåls-1 och Hamra-1
Faluddensandsten	4,17	12	Kärnprov från B-7, File Haidar-1 och När-1
Viklausandsten	3,24	18	Kärnprov från När-1, och File Haidar-1
Ospec. kambrisk sandsten	3,24	34	Kärnprov från Böda hamn-1, Segerstad-1, Gotska Sandön-1 och När-1

Tabell 8. Sammanställning av resultat från mätningar av värmeledningsförmågan. Mätningarna utförda av SGU med hjälp av en termisk skanner (TCS, Thermal conductivity scanner).



Figur 36. a) Graf som visar uppmätta borrhålstemperaturer i OPAB:s borrhål på Gotland och i södra Östersjön. **b)** Graf som visar temperaturkurva för borrningen St.Sutarve-2018 för intervallet 225–494 m med beräknad termisk gradient. Samtliga mätningar utförda i samband med geofysiska borrhålsloggningar direkt efter avslutad borrning.

Som jämförelse har nästan lika höga gradienter, i storleksordningen 30 °C/km, uppmätts i sydvästra Skånes sedimentära berggrund. Däremot är den termiska gradienten vanligtvis inte mer än 16–20 °C/km i det svenska urberget. En av anledningarna till den höga termiska gradienten anses vara att den sedimentära berggrunden, speciellt kalksten och lersten, har generellt låg värmeledningsförmåga. Det gör att värmetransporten till markytan inte blir lika stor som i områden där urberget inte är täckt av mäktig sedimentär berggrund. Merparten av värmen i den övre delen av berggrunden kommer från värmekonvektion och radioaktivt sönderfall av isotoperna kalium, uran och torium i manteln. Förutom jordskorpans tjocklek påverkar berggrundens uppbyggnad i jordskorpans övre delar värmeproduktionen, värmeflödet och därmed den termiska gradienten. Det vill säga att sedimentär berggrund med låg värmeledningsförmåga kan ha en isolerande effekt på värmeflödet underifrån.

Sannolikt finns det för Gotlands del även djupare liggande anledningar till den höga termiska gradienten eftersom värmeledningsförmågan på den sedimentära berggrunden trots allt är relativt god. På den kambriska sekvensen har det utförts ett stort antal mätningar med hjälp av en termisk skanner (TCS-mätningar utförda av SGU) som visar ett medelvärde på 3,34 W/mK vilket är i samma nivå som ledningsförmågan för granit. Analysmetodiken finns utförligt beskriven i Andolfsson (2013).

Mätningar på enstaka kärnprov på ordovicisk kalksten och på stuffer från olika silurformationer på Sudret visar på relativt goda värmeledande egenskaper (tabell 8). Vi saknar däremot mätningar på den flera hundra meter mäktiga siluriska lerstensdominerade sekvensen. Därför kan vi inte fullständigt bedöma den sedimentära berggrundens termiskt isolerande förmåga eller om en hög värmeproduktivitet i det underliggande urberget i centrala Östersjön ligger till grund för de relativt höga uppmätta formationstemperaturerna.

Formationstemperaturen i Faluddensandstenen på Sudret är drygt 25 °C och den termiska ledningsförmågan 4,17 W/mK. Burgsvikssandstenens värde på 2,23 W/mK är avsevärt lägre vilket beror på lägre kvartshalt i jämförelse med Faluddensandstenen. Formationstemperaturen är 12–15 °C i de sydvästra delarna av Sudret där sandstenen ligger på cirka 100 m djup.

Geotermisk potential

Redan 1981 gjordes bedömningar av förutsättningar för geotermi på Gotland (Flodén m.fl. 1981, Wesslén m.fl. 1981). Slutsatserna var att de kambriska sandstenslagren har egenskaper som lämpar sig för traditionella akviferbaserade geotermiska system. Den sammanlagda sandstensmäktigheten är cirka 80 m uppdelad på Viklau-, När- och Faluddensandstenarna, det vill säga motsvarande cirka 50 % av den totala kambriska mäktigheten. Den relativt höga geotermiska gradienten medför också att man redan i toppen av de övre kambriska lagren och på djup kring 400 m har en temperatur kring 20 °C. Detta medför bland annat relativt okomplicerad borrning till förhållandevis låg kostnad för att nå acceptabla temperaturer för lågentalpisystem med geotermi. För att kunna överföra värmen till uppvärmning krävs att geotermalvattnet cirkuleras via värmeväxlare och ett tvåhålssystem med en varm och en kall sida. Värmeeffekten som kan tas ut beror på en kombination av hur mycket vatten som kan pumpas upp utan för stor avsänkning i produktionsbrunnen, samt hur mycket man kan sänka temperaturen via värmeväxlaren och återföra via injektionsbrunnen.

Med stöd av resultaten från förundersökningarna 1981 genomförde VIAK en 500 m djup geotermisk borrning i Klintehamn 1983. Syftet var en försöksanläggning med en värmepumpsanläggning baserad på geotermalvatten för uppvärmning av ett bostadsområde vid Odvalds, ett pensionärshem vid Åvalla och Klinteskolan. Projektet genomfördes med bland annat experimentbyggnadslån från Statens råd för byggnadsforskning. Sammanfattningsvis visade pumptester en stabil produktionstemperatur på 17,5–18 °C och ett möjligt uttag på 5–10 l/s. Med en temperatursänkning till fem grader beräknades den möjliga uttagseffekten till cirka 500 kW. Transmissiviteten beräknades från pumptester till 3,4 × 10⁴ m/s (Andersson m.fl. 1983, Rydergren 1990). Systemet driftsattes 1987 och var sedan i drift några år innan det stängdes ner. Anledningen var bland annat tillåtligheten att pumpa ut det järnhaltiga och salthaltiga formationsvattnet i Östersjön samt en successiv trycksänkning i akviferen eftersom man inte återinjekterade formationsvattnet i den kambriska sandstenen. Analyser av formationsvattnet visar att det har en salthalt på sju procent (Andersson m.fl. 1983).

Noterbart är att i den kambriska lagerföljden i Klintehamn saknas Faluddensandstenen vilken är en avsevärt bättre akvifer jämfört med Viklau och När. Det betyder att de geotermiska förutsättningarna bedöms vara avsevärt bättre på Sudret, där Faludden är uppemot 36 m mäktig. Dessutom ligger toppen av den kambriska sandstenssekvensen cirka 150–200 m djupare och har därmed även några grader högre formationstemperatur jämfört med förhållandena i Klintehamn. Sannolikt kan ett antal tvåhålssystem med en effekt på 1–2 MW byggas på Sudret. Det krävs dock att det finns lokala mottagare till värmen som till exempel växthus, bostäder, idrottsanläggningar eller skolor. Egentligen är det bara i Burgsvik som begränsande förutsättningar att finna avnämare finns.

Energilagring

För ett bättre användande av förnybara energiresurser, som till exempel vindkraft, krävs att man kan lagra det energiöverskott som skapas när efterfrågan är lägre än produktionen. Med stöd av buffertlager blir förutsättningarna för att öka andelen förnybar energi i våra energisystem avsevärt bättre. Dessutom finns det med ökad andel vind- och solkraft, som kopplas till våra elnät, en risk för ojämn elproduktion där lösningar för att utjämna tillgång och efterfrågan är nödvändiga. Lagring är ett av flera sätt att få mer flexibilitet. I en övergripande studie av Vinnova (Larsson & Ståhl 2012) ges en god bild av vilka alternativ som finns avseende lagring av el.

Internationellt sker idag den avgjort största lagringen via pumpkraftverk där man med överskottsel pumpar upp vatten till en högre nivå, till exempel en högt liggande damm, Vid behov släpps vattnet sedan ner via turbindrivna elgeneratorer. Oftast rör det sig om storskaliga anläggningar som kräver topografiska och geografiska förutsättningar.

Förutom den helt dominerande lagringen med hjälp av pumpkraftverk sker lagring med batterier, tryckluft, så kallad *Compressed Air Energy Storage* (CAES), *Gas to Power*, bränsleceller och svänghjul. Den senare är ett sätt att lagra energi i snabbt roterande svänghjul där genererad rörelseenergi omvandlas till elektricitet när hjulet bromsas in. Detta syftar mest till kortare lagring för att skapa stabilitet i elnätet.

Den största potentialen för lagring av el i framtiden bedöms finnas inom avancerade batterilösningar, pumpkraftverk och CAES (Larsson & Ståhl 2012). En nackdel med batterier, även om det skett stora tekniksprång med bland annat NaS-batterier (natrium-svavel) på sistone, är att de är relativt kostsamma och begränsade i antalet laddningscykler innan de måste bytas ut. Dessutom kräver tillverkningen av batterier tillgång till kritiska metaller där brytning och anrikning av dessa oftast är kopplade till negativa effekter på nettoutsläpp av koldioxid samt hög energiförbrukning.

För Gotlands vidkommande finns det enligt en rapport från Statens energimyndighet (2017) ett tydligt behov av att kunna utjämna och lagra elproduktionen från vindkraften med hjälp av olika former av energilagring. Mestadels anser man att olika batteritekniker kan vara lämpliga alternativ men på senare tid har även *Gas to Power*-teknik lanserats. Denna teknik möjliggör att man med vindkraftsel kan framställa vätgas genom elektrolys. Vätgasen kan sedan användas för att antingen driva bränsleceller eller genom reaktion med koldioxid bilda metangas som kan distribueras till biogaskunder. Det senare har bland annat undersökts som alternativ för vindkraftsel på Gotland (Mohseni m.fl. 2017). Deras studie visar dock på att det krävs betydande investeringsstöd med rådande prisbild för att det ska kunna bli aktuellt.

En annan beprövad teknik för energilagring är, som nämnts ovan, CAES där tryckluft förvaras i trycktankar, bergrum, saltkaverner eller i porutrymmet i djupa akviferer. Den lagrade tryckluften kan vid behov släppas ut ur lagret och driva en turbin och elgenerator. Tekniken är beprövad, relativt prisvärd i förhållande till andra lagringsalternativ och lämplig för större energilagringsapplikationer. De största potentialerna finns vid lagring i djupa akviferer, främst porösa och permeabla sandstenslager som är täckta av tät berggrund, exempelvis lersten, lerig kalksten, lerskiffer. I dagsläget är lagring djupare än 600-700 m inte lönsamt, bland annat då det blir för dyrt att komprimera luften till allt för höga tryck. För Gotlands vidkommande finns möjligheter till CAES i Faluddensandstenen (Sopher m.fl. 2019). Med utgångspunkt från en studie av Succar och Williams (2008) uppfyller Faluddensandstenen flertalet krav som de anger för permeabilitet > 300 mD, porositet > 15 %, 500–600 m djup och formationstryck max 50–60 bar. Däremot anses att strukturella fällor (domer, veck, antiklinaler) i berggrunden är mest lämpade för CAES då den lagrade gasen lättare kan hållas på plats. Hittills har sju lämpliga strukturer identifierats i Faluddensandstenen på södra och sydöstra Gotland, där det i den största strukturen bedöms kunna lagras uppemot 1 300 MWh energi (Sopher m.fl. 2019). En principskiss för hur CAES i Faluddensandstenen kan se ut illustreras i figur 37.



Figur 37. Schematisk illustration av hur en CAES-anläggning skulle kunna se ut på Gotland (efter Sopher m.fl. 2019).

Det finns dock studier som visat att det inte enbart är möjligt med lagring i slutna strukturer utan även plana eller svagt sluttande homogena sandstensformationer, liknande Faluddensandstenen, kan vara lämpliga för lagring med rätt design av borrhålsplaceringar och upphållstider för den lagrade tryckluften i lagret (Jarvis 2015, Sopher m.fl. 2019). Även om SGU:s preliminära bedömningar indikerar att lagring skulle vara möjligt behövs testborrhål där det utförs dynamiska pumptester med gas för att kvantifiera lagringspotentialen. Dessutom behövs provtagning och kemisk karaktärisering av formationsvätskor och bergarter för bedömning av eventuella kemiska förändringar och mikrobiologisk påverkan när tryckluft förs ner i akviferen.

FÖRUTSÄTTNINGAR FÖR LAGRING AV KOLDIOXID

Allmänt om lagring i djupa akviferer

Av de alternativ för geologisk lagring av koldioxid som utvärderats bedöms lagring i djupa akviferer i sedimentär berggrund ha den största potentialen. Djupt liggande rena sandstensformationer anses vara de mest lämpade akvifererna. För att minska volymen och lättare kunna övervaka lagrad koldioxid krävs att den lagras i superkritiskt tillstånd. Koldioxiden är en superkritisk vätska i lagringsakviferen, det vill säga över den termodynamiska kritiska punkten, när formationstrycket är högre än 73,9 bar och temperaturen över 31,1 °C. Densiteten är då cirka 600 kg/m^3 . Under normala förhållanden krävs att lagringsakviferen ligger djupare än 800 m.

Vid värdering av lagringspotentialen i djupa akviferer måste hänsyn också tas till några ytterligare grundläggande faktorer. Först och främst ska ett lager ha en kapacitet att ta emot stora mängder koldioxid, helst mer än vad koldioxidkällan till lagret genererar under sin livslängd. Som exempel genereras i ett större koleldat kraftverk i Tyskland cirka 10 Mt CO_2 /år vilket motsvarar cirka 400 Mt CO_2 under en driftperiod på 40 år. Motsvarande mängder för de större koldioxidkällorna i Sverige är mellan 100 och 200 Mt CO_2 .

Teoretisk mängd koldioxid som kan lagras i berggrunden är, förutom lagringsakviferens totala volym, beroende på hur stor mängd porer det finns, det vill säga porositeten. En porositet på mer än 10 % anses nödvändigt för lagring vilket har angetts av bland andra CO2STORE-projektet (Chadwick m.fl. 2008). Den faktiska lagringskapaciteten är generellt sett avsevärt mindre än den teoretiska, vilket beror på en mängd andra faktorer. Det kan vara förekomsten av förkastningar, litologisk heterogenitet, kemiska förhållanden, temperatur, formationstryck, bergspänningar med mera. Den effektiva lagringskapaciteten är även beroende på hur stor andel av det teoretiska porutrymmet som kan utnyttjas. Detta brukar anges som lagringsfaktorn. I litteraturen anges en stor variation på lagringsfaktorn, från 0,01 till 0,4, vilket beror på en mängd faktorer som till exempel förhållandet mellan primär och sekundär porositet, textur, andelen matrix, cementets utseende och förekomst, formationsvätskans elasticitet, tryckförhållande med mera.

En viktig faktor vid bedömningen av lagringsplatser är hur lätt det är att få ner koldioxiden i berggrunden, det vill säga injekterbarheten. Genomsläppligheten (permeabiliteten) är en mätbar parameter som ger en indikation på hur lätt vätskor och gaser kan transporteras genom bergarten. Börvärden på > 300 mD har nämnts (Chadwick m.fl. 2008). De viktigaste börvärdena sammanfattas i tabell 9.

Tätheten är en tredje avgörande faktor som måste bedömas vid utvärderingen av möjliga lagringsplatser. Överliggande berggrund, så kallad "*caprock*", "*seal*" eller takbergart måste vara tillräckligt tät för att garantera säkerheten och förhindra läckage från lagret.

Parameter	Börvärde	Kommentar
Lagringskapacitet	> 100 Mt CO ₂	Motsvarande produktion av cirka 2 Mt CO ₂ /år från en källa under 40 år. Lagringskapaciteten ska generellt vara mycket större än vad närliggande källa producerar under sin livslängd
Djup	800–2 500 m	Kring 800 m djup övergår koldioxiden i superkritiskt tillstånd. Under 2 500 m djup är berggrunden (akviferen) allmänt för tät på grund av höga tryck
Tjocklek på akviferen	20–50 m	Nettotjocklek. Kan således vara uppdelat på ett till flera akviferavsnitt (sandstensnivåer) med mellanliggande täta bergarter
Porositet	> 10 %	Helst över 15 %
Temperatur	> 31,1 °C	
Salinitet i formations- vätskan (Cl ⁻)	> 30 g/l	Helst över 100 g/l
Tryck	> 73,9 bar	
Permeabilitet	> 300 mD	Olika uppgifter finns rapporterade
Tjocklek på takbergarten	> 100 m	Helst lersten, lerskiffer

Tabell 9. Sammanställning av olika börvärden för utvärdering av möjliga lagringsalternativ.

Potential i Södra Östersjön

De kambriska sandstenslagren, Viklau, När och Faludden, i södra Östersjön har i flera publikationer bedömts som lämpliga för lagring av koldioxid (Erlström m.fl. 2011, Sopher m.fl. 2014, Mortensen m.fl. 2017). De bedömningar och modelleringar som gjorts bygger i stort på äldre information från OPAB:s borrningar och seismiska undersökningar. Dessa ger främst information om djup, mäktighet och sandstenslagrens litologiska uppbyggnad. För de flesta egenskaper saknas det eller så finns det för få mätvärden för en tillförlitlig bedömning av lagringspotentialen. De modeller av lagringskapaciteten som gjorts visar på en stor variation av kapaciteten beroende på både vilken modell som använts och osäkerheten i lagringsfaktorn (Erlström m.fl. 2011, Jodaki m.fl. 2013, Sopher m.fl. 2014, Elforsk 2014). Lagringsfaktorn beror på fysikaliska och hydrauliska heterogeniteter i lagringsformationen vilka påverkar hur koldioxiden kan förflytta sig och tillgängliggöra porutrymmet i formationen. Goodman m.fl. (2011) anger ett värde på 0,02 för djupa salina sandstensakviferer. Teoretisk beräkning utförda inom projektet NORDICCS visar att lagringskapaciteten i Faluddensandstenen är 745 Mt CO₂ (Mortensen 2016, Mortensen m.fl. 2017). Beräkningen baserades på en lagringsfaktor på 0.02 och en medelporositet på 14 %. Notera att kapaciteten gäller den svenska delen av området i södra Östersjön där sandstenen ligger djupare än 800 m (jfr. fig. 27). Dynamisk modellering visar att en lagring av 250 respektive 500 Mt CO2 injekterat över en period på 50 respektive 100 år skulle vara möjligt (Mortensen m.fl. 2016).

Förutom för Faluddensandstenen visar statiska modeller att Viklau- och Närsandstenarna skulle var och en kunna lagra ytterligare 400–550 Mt CO₂. Dessa har dock generellt sämre porositet och permeabilitet samt uppvisar en avsevärt högre litologisk heterogenitet (Mortensen m.fl. 2017).

Berggrunden på Sudret och koldioxidlagring

En stor del av den kunskap vi har om de kambriska sandstenslagrens potential för koldioxidlagring och den överliggande berggrundens egenskaper som takberggrund bygger på borrhålsinformation från södra Gotland. Speciellt gäller detta för Faluddensandstenen eftersom den saknar eller har en obetydlig mäktighet på mellersta och norra Gotland. På Sudret är den däremot uppemot 36 m mäktig vilket gör att information från borrningar här är högst relevanta för bedömningar av Faluddensandstenens uppbyggnad i södra Östersjön, där den är avsevärt mäktigare och ligger tillräckligt djupt för koldioxidlagring (> 800 m, se fig. 27). På Sudret är formationstrycket i Faluddensandstenen 50–62 bar. Trycket är vidare 3–5 bar över det hydrostatiska (fig. 38). Med en formationstemperatur på 25–30 °C och rådande formationstryck är förhållandena i Faluddensandstenen på Sudret nära de som krävs för superkritiska förhållanden för koldioxid. Detta stärker ytterligare relevansen av borrhålsinformation på Sudret för bedömning av reservoarens egenskaper där den finns på tillräckligt stort djup i Östersjön sydost om Sudret.

Före borrningen av St.Sutarve-2018 fanns endast spridda kärnintervall över det ordoviciska och kambriska intervallet. Den närmast liggande kärnborrningen är Grötlingbo-1 som borrades av SGU 1968. Tidigare tolkningar baserades främst på studier av dessa kärnor och tolkningar av geofysiska borrhålsloggar samt äldre OPAB-analyser av till exempel porositet och permeabilitet. I anslutning till det här projektet gjordes en övergripande korrelation och litologisk beskrivning av den ordoviciska takberggrunden baserat på befintliga spridda kärnintervall och framför allt en tolkning av geofysiska borrhålsloggar (Erlström & Sopher 2019). Den studien resulterade i en indelning och karaktärisering av den 75–125 m mäktiga ordoviciska lagerföljden i fem regionalt korrelerabara enheter. OPAB utförde ett antal porositets- och permeabilitetsanalyser på kalkstenslager från den del av övre ordovicium som innehåller oljeförande mounds (OPAB 1976). Resultaten visar en medelporositet på 2,45 % och en medelpermeabilitet på 0,93 mD (fig. 39). Även om det är relativt låga värden är de inte fullt representativa för resten av ordovicium som karaktäriseras av lerigare och bedömt tätare kalkstenslager. Ett bättre statistiskt underlag krävs därför för en högre kvalitet

på bedömningen av tätheten för den ordoviciska lagerföljden. I och med att vi nu har en komplett kärna från markytan och ner till Faluddensandstenen i St.Sutarve-2018 finns nu möjligheter till att öka antalet analyser för att få ett bättre underlag och säkrare bedömningar av både takberggrundens och Faluddensandstenens uppbyggnad och egenskaper.

Sudret är också den plats där det kan vara lämpligt för borrning och hydrauliska tester av sandstenen för att bedöma bland annat injekterbarheten och även få bättre kunskap om vilken lagringsfaktor som kan appliceras i beräkningarna av lagringskapaciteten. För en relativt låg kostnad skulle en testborrning för koldioxidlagring på Sudret kunna ge viktiga resultat som stöd till planering, genomförande och optimering av eventuellt mångfalt dyrare undersökningar i södra Östersjön.



Figur 38. Sammanställning av uppmätta formationstryck för olika kambriska sandstenslager samt beräknad kurva för hydrostatiskt tryck baserat på densiteten 1,0 för färskvatten samt gränsvärdet 73,9 bar för superkritisk koldioxid. Formationstrycken hämtade från OPAB:s rapportering (Grossi 1973).



Figur 39. Diagram som visar porositet och permeabilitetsvärden för kalkstensprov från den övre delen av den ordoviciska lagerföljden, så kallad Klasenkalksten motsvarande intervallet O_d (jfr. fig. 15). Analysresultaten är hämtade från OPAB:s rapportering (OPAB 1976). Den svarta markören anger medelvärdena.

PROJEKTSPECIFIKA DATA – LAGRING OCH TILLGÄNGLIGHET

I rapporten redovisas en hel del data och modeller som bara delvis finns lagrade i SGU:s databaser. Detta beror bland annat på att det ännu inte finns någon lämplig databasstruktur för inlagring av exempelvis porositets- och permeabilitetsdata, analysdata för termiska egenskaper, formationstryck och temperaturdata i borrhål. Dessa typer av projektspecifika data finns sammanställda i ett antal Excel-filer som tills vidare är sparade under projektmappen på SGU:s server. Likaså finns för närvarande ingen databas för inlagring av geofysiska borrhålsmätningar, till exempel de som utförts i St.Sutarve-2018. För närvarade finns logg-data från St.Sutarve-2018 lagrade under projektmappen i LAS-format (Log Askii Standard) och som PDF-filer.

Djupnivåkartorna för olika stratigrafiska nivåer, isokartor, 3D-modeller, volymberäkningar och nettosandberäkningar bygger på voxelmodellering och interpolering med programvaran Opendtect / MATLAB och visualisering i Geoscene. Samtliga filer finns också tills vidare lagrade i en mapp under projektkatalogen.

De modeller över Gotland som tagits fram (Persson 2021), bygger på data som tidigare samlats in och gjorts 2013 och 2015. Dessa finns lagrade i SGU:s geofysikdatabas och även tillgängliga på 3D-visaren på SGU:s webbplats.

Tunnslip och kärnan från St.Sutarve-2018 förvaras på SGU:s kontor i Lund. En förteckning av provnivåer för tunnslip och för porositet och permeabilitetsanalyser finns sparad under projektkatalogen.

SLUTSATSER – MÖJLIGHETER OCH FRAMTID

Arbetet med att generera strukturkartor och 3D-modeller med stöd av borrhålsgeofysik och seismik för Sudret visar på en stor potential att med samma angreppssätt göra detsamma för resten av Gotland och andra områden med sedimentär berggrund, som till exempel Skåne. Speciellt avseende nettosandmodellering av djupa akviferer för bedömning av geotermisk potential och framställning av resurskartor som visar in situ värme som PJ/km² (1 Petajoule = 10^{15} Joule). Arbetet visar också att det finns ett behov av att utveckla databasstrukturer för inlagring av geofysiska borrhålsdata, porositets- och permeabilitetsdata, termiska data och temperaturer i djupa borrhål.

Resultaten från modelleringen av nettosanden i Burgsvikssandstenen ger en helt ny bild av sandstenslagrens utbredning och frekvens. Borrkärnan i St.Sutarve-2018 är också den enda kompletta på Sudret där det även har utförts geofysisk borrhålsloggning. Den kombinerade informationen utgör en mycket viktig referens för tolkningen av övriga djupa borrningar på Sudret. Utan denna referens hade det inte varit möjligt att göra nettosandmodelleringen. Detta visar på betydelsen av geofysisk borrhålsloggning i kärnborrhål. Modelleringen visar på en högre andel nettosand i de västra och nordvästra delarna av Sudret. Störst magasineringspotential för grundvatten finns följaktligen i dessa delar. Med hjälp av nettosandmodellen och ytterligare hydrogeologisk information, bland annat rörande transmissiviteten i sandstenslagren, bör det kunna gå att förbättra grundvattenmodellen för Sudret. Noterbart är att SGU nu också kunnat verifiera en nordvästligt orienterad förkastningszon tvärs Sudret mellan Stockviken, Burgsvik och Näsudden. Eftersom förkastningen är identifierad även i höjddata kan det finnas anledning till att vidare undersöka om det kan finns möjligheter till grundvattenuttag i den förmodat uppspruckna ytberggrunden i zonen.

Modeller för Faluddensandstenen (porvolym, mäktighet, djupnivåer) utgör ett betydelsefullt underlag för eventuella framtida undersökningsborrningar för koldioxidlagring, geotermi och energilagring. Dessutom finns nu, genom kärnan i St.Sutarve-2018, möjlighet till ytterligare detaljerade och kompletterande analyser och studier av sandstenens fysikaliska egenskaper, mineralogiska uppbyggnad och diagenetiska omvandling, det vill säga sekundära mineraliseringar i porerna. Detta har bland annat betydelse för bedömningen av lagringsfaktorn och den kemiska påverkan av sandstenen vid koldioxidlagring. Vidare finns också möjlighet att öka antalet analyser av porositet, permeabilitet, termisk ledningsförmåga, kemi och mekaniska egenskaper för att få ett bättre statistiskt underlag. I och med att vi nu har en komplett kärna av takberggrunden finns möjligheter till mer omfattande undersökningar av denna.

Kärnan från St.Sutarve-2018 har också ett stort geologiskt värde för forskning om stratigrafi, korrelation och geologisk utveckling i Baltiska Bassängen. För närvarande pågår samarbete med geologiska institutionen i Lund angående fördjupade studier av övre ordovicium–undre silur med bland annat isotopstratigrafi. Det pågår även ett samarbete kring en fördjupad petrologisk och sedimentologisk studie av Burgsvikformationen samt en övergripande stratigrafisk klassificering av den siluriska djupberggrunden. Det är bara några exempel på fördjupade studier som kan utföras framöver för att öka kunskapen om den undre paleozoiska berggrunden.

Sammanfattningsvis har SGU:s studie resulterat i ett omfattande material och modeller som gör att Sudret kanske är det sedimentära berggrundsområde i Sverige där vi vet mest om de djupgeologiska förhållandena. Modellering och tolkningar av multidisciplinära data har också gett viktig kunskap för framtida liknande arbeten där Sudretstudien kan utgöra en viktig referens.

REFERENSER

- Aldridge, R.J., Jeppsson, L. & Dorning, K.J., 1993: Early Silurian oceanic episodes and events. Journal of the Geological Society, London 150, 501–513.
- Anderegg, H.J., Norling, E., Skoglund, R., 1968: SGUs oljegeologiska arbeten 1967–68. Sveriges geologiska undersökning, SGU-rapport, 67 s.
- Andersson, O. & Eriksson, L.O., 1983: Geotermisk värmecentral i Klintehamn. Förprojektering. Byggforskningsrådet, Rapport R36:1983.
- Andersson, O., Lindgren, L. & Petersson, A., 1984: Geotermisk värmecentral i Klintehamn. Resultat av undersökningsborrning, provpumpning och fortsatt projektering. Byggforskningsrådet opublicerad rapport, 48 s.
- Andolfsson, T., 2013: Analyses of thermal conductivity from mineral composition and analyses by use of Thermal Conductivity Scanner: A study of thermal properties in Scanian rock types. *Dissertations in Geology at Lund University, Master thesis 361*, 84 s.
- Calner, M., 2002: A lowstand epikarstic intertidal flat from the middle Silurian of Gotland, Sweden. *Sedimentary Geology, 148*, 389–403.
- Calner, M. & Jeppsson, L., 2003: Carbonate platform evolution and conodont stratigraphy during the middle Silurian Mulde Event, Gotland, Sweden. *Geological Magazine 140*, 173–203.
- 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. *I* A. Munnecke, T. Servais & C. Schulbert (red.): Early Palaeozoic Palaeogeography and Palaeoclimate (IGCP 503). Abstracts and Field Guides. *Erlanger geologische Abhandlungen, Sonderband 5*, 113–131.
- Chadwick, A., Arts, R., Bernstone, C., May, F., Thibeau, S. & Zweigel, P., 2008: Best Practice for the Storage of CO2 in Saline Aquifers Observations and Guidelines from the SACS and CO2STORE projects. *British Geological Survey Occasional Publication* 14, 267 s.
- Chitindingu, T., 2018: Petrological characterization of the Cambrian sandstone reservoirs in The Baltic Basin, Sweden. *Dissertations in Geology at Lund University, Master Thesis 543*, 51 s.
- Dahlqvist, P., Triumf, C.-A., Persson, L., Bastani, M., Erlström, M., Jørgensen, F., Thulin Olander, H., Gustafsson, M., Thorsbrink, M., Schoning, K. & Curtis, P., 2015: SkyTEMundersökningar på Gotland. Rapporter och meddelanden 136. Sveriges geologiska undersökning, 108 s.
- Dahlqvist, P., Thorsbrink, M., Holgersson, B., Nisell, J., Maxe, L. & Gustafsson, M., 2017a: Våtmarker och grundvattenbildning om möjligheten till ökad kapacitet vid grundvattentäkter på Gotland. *SGU-rapport 2017:01*. Sveriges geologiska undersökning, 73 s.
- Dahlqvist, P., Triumf, C.-A., Persson, L., Bastani, M., Erlström, M. & Schoning, K., 2017b: SkyTEM-undersökningar på Gotland, del 2. *Rapporter och meddelanden 140*. Sveriges geologiska undersökning, 135 s.
- Dahlqvist, P., Sjöstrand, K., Lindhe, A., Rosén, L., Nisell, J., Hellstrand, E. & Holgersson, B., 2019: Potential Benefits of Managed Aquifer Recharge MAR on the Island of Gotland, Sweden. *Water 11*, 2164.
- Elforsk, 2014: CCS in the Baltic Sea region Bastor 2. Elforsk report 14:50, 66 s.
- Elforsk, 2015: Processindustrin och nollvisionen, CCS en nyckel till ambitiösa klimatmål. *Elforsk rapport 2015:138*, 28 s.
- Eriksson, M.J., 2004: Formation and significance of a middle Silurian ravinement surface on Gotland, Sweden. *Sedimentary Geology 170,* 163–175.

- Eriksson, M.J., 2007: Silurian carbonate platforms of Gotland, Sweden achieves of local, regional and global environmental changes. *Litholund thesis 13*, 19 s.
- Eriksson, M. & Calner, M., 2005: The Dynamic Silurian Earth. Subcommision on Silurian Stratigraphy Field Meeting 2005. Field guide and Abstracts. *Rapporter och meddelanden 121*. Sveriges geologiska undersökning, 99 s.
- Eriksson, M.J. & Calner, C., 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.
- Erlström, M., Persson, L., Sivhed, U. & Wickström, L., 2009: Beskrivning till regional berggrundskarta över Gotlands län. *Sveriges geologiska undersökning K 221*, 60 s.
- Erlström, M., Fredriksson, D., Juhojuntti, N., Sivhed., U. & Wickström, L., 2011: Lagring av koldioxid i berggrunden krav, förutsättningar och möjligheter. *Rapporter och meddelanden 131*. Sveriges geologiska undersökning, 96 s.
- Erlström, M. & Sopher, D., 2019: Geophysical well log-motifs, lithology, stratigraphical aspects and correlation of the Ordovician succession in the Swedish part of the Baltic Basin. *International Journal of Earth Sciences 108*, 1387–1407.
- Flodén, T., Hagenfeldt, S. & Wadstein, P., 1981: Geotermisk energiutvinning på Gotland förundersökning. *Stockholms universitet, geologiska institutionen, opublicerad rapport*, 6 s, 20 ritningar, 3 tabeller och 4 bilagor.
- Grossi, B., 1973: Formation pressures in Gotland. OPAB, opublicerad rapport, Stockholm, 10 s.
- Hagenfeldt, S.E., 1994: The Cambrian File Haidar and Borgholm Formations in the Central Baltic and south central Sweden. *Stockholm Contributions in Geology 43*, 69–110.
- Hagenfeldt, S. & Bjerkéus, M., 1991: Cambrian acritarch stratigraphy in the central Baltic Sea, Sweden. *GFF 113*, 83–84.
- Hede J.E., 1919: Djupborrningen vid Burgsvik på Gotland 1915. Paleontologisk–stratigrafiska resultat. *Sveriges geologiska undersökning C 298*, 1–59.
- Hede, J.E., 1921: Gotlands Silurstratigrafi. Sveriges geologiska undersökning C 305, 100 s.
- Hede, J.E., 1960: The Silurian of Gotland. I G. Regnéll & J.E. Hede (red.): The Lower Palaeozoic of Scania. The Silurian of Gotland. International Geological Congress XXI. Session Norden. Guidebook Sweden d. Stockholm. 89 s.
- Jaanusson, V., 1976: Faunal dynamics in the Middle Ordovician (Viruan) of Balto-Scandia. I M.G. Basset (red.): The Ordovician System: Proceedings of a Palaeontological Association Symposium. University of Wales Press, Cardiff, 301–326.
- Jarvis, A.S., 2015: Feasibility study of porous media compressed air energy storage in South Carolina, Unites States of America. Clemson University. All Theses, paper 2256, 137 s.
- Jeppsson, L., 1993: Silurian events: the theory and the conodonts. Proceedings of the Estonian Academy of Sciences, *Geology 42, 23–27*.
- Jeppsson, L., 1997: Recognition of a probable secundo-primo event in the Early Silurian. *Lethaia* 29, 311–315.
- Jeppsson, L., 1998: Silurian oceanic events: Summary of general characteristics. I E. Landing & M.E. Johnson (red.): Silurian cycles: Linkages of dynamic stratigraphy with atmospheric, oceanic, and tectonic changes. New York State Museum Bulletin 491, 239–257.
- Jeppsson, L., 2005: A revision of the Early Wenlock stratigraphy of Gotland. *SGU-rapport 2005:7*. Sveriges geologiska undersökning, 20–21.
- Jeppsson, L. & Aldridge, R.J., 2000: Ludlow (late Silurian) oceanic episodes and events. *Journal of the Geological Society, London 157*, 1137–1148.

- Jeppsson, L. Aldridge, R.J. & Dorning, K.J., 1995: Wenlock (Silurian) oceanic episodes and events. *Journal of the Geological Society, London 152*, 487–498.
- Jeppsson, L., Eriksson, M.E. & Calner, M., 2006: A latest Llandovery to latest Ludlow high-resolution biostratigraphy based on the Silurian of Gotland a summary. *GFF 128,* 109–114.
- Jodaki, S., Niemi, A., Juhlin, C., Sopher, D., Ivanidic, M. & Erlström, M., 2013: Simulation of O2 injection into a Baltic Sea saline aquifer and seismic monitoring of the plume. *Energy Procedia* 40, 355–364.
- Jørgensen, F., Erlström, M., Persson, L., Bastani, M., Sopher, D., Lund Gulbrandsen, M. & Dahlqvist, P., 2018: A 3D-geological model of the island of Gotland based on extensive airborne EM mapping, seismic data and log stratigraphy. *Proceedings from* 7th *International Workshop on Airborne Electromagnetics*, Kolding, Denmark, 4 s.
- Karlsson, C., 2005: Provenance of storm generated siliciclastic strata of the Upper Silurian Burgsvik Formation, southern Gotland, Sweden. *GFF 127*, 49–50.
- Karlqvist, L., Fogdestam, B. & Engqvist, P., 1982: Hydrogeologisk karta över Gotlands län med berggrundskarta, infiltrationskarta och jorddjupskarta. *Sveriges geologiska undersökning Ah 3*.
- Kjellström, G., 1971: Ordovician microplancton (Baltisphaerids) from Grötlingbo borehole no. 1 in Gotland, Sweden. *Sveriges geologiska undersökning C 655*, 75 s.
- Larsson, Ö. & Ståhl, B., 2012: Lösningar på lager Energilagringstekniken och framtidens hållbara energiförsörjning. *Vinnova Analys VA 2012:02,* 46 s.
- Levendal, T., Lehnert, O., Sopher, D., Erlström, M. & Juhlin, C., 2019: Ordovician carbonate mud mounds of the Baltoscandian Basin in time and space – A geophysical approach. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology 535*:109345. Doi:10.1016/j.palaeo.2019.109345
- Long, G.F.D., 1993: The Burgsvik Beds, an Upper Silurian storm generated sand ridge complex in southern Gotland. *Geologiska Föreningens i Stockholm Förhandlingar 115*, 299–309.
- Manten, A.A., 1971: Silurian reefs of Gotland. *Developments in sedimentology 13*. Elsevier, Amsterdam, 537 s.
- Mohseni, F., Görling, M., Lindén, M. & Larsson, M., 2017: Genomförbarhetsstudie för Power to Gas på Gotland. Rapport till konsortium PfG Gotland. *Energiforsk rapport 2017:378*, 69 s.
- Mortensen, G.M., 2016: Koldioxidlagring i Sverige sammanställning och resultat från NORDICCS. *SGU-rapport 2016:20*. Sveriges geologiska undersökning, 52 s.
- Mortensen, G.M., Bergmo, P.E.S. & Emmel, B.U., 2017: Characterization and estimation of CO₂ storage capacity for the most prospective aquifers in Sweden. *Energy Procedia 2016:86*, 352–360.
- Munthe, H., 1910: On the sequence of strata within southern Gotland. *Geologiska Föreningens i* Stockholm Förhandlingar 32, 1397–1453.
- Munthe, H., 1921: Beskrivning till kartbladet Burgsvik jämte Hoburgen och Ytterholmen. Sveriges geologiska undersökning Aa 152, 172 s.
- Murchinson, R.J., 1846: On the Silurian and associated rocks in Dalecarlia and on the successions from Lower to Upper Silurian in Smoland, Öland and Gothland, and in Scania. *Quarterly Journal of the Geological Society of London 3*, 46 s.
- Männik, P., Loydell, D.K., Nestor, V. & Nõlvak, J., 2015: Integrated Upper Ordovician–lower Silurian biostratigraphy of the Grötlingbo-1 core section, Sweden. *GFF 137*, 225–234.
- Nielsen, A.T. & Schovsbo, N.H., 2007: Cambrian to basal Ordovician lithostratigraphy in Southern Scandinavia. *Bulletin of the Geological Society of Denmark 53*, 47–92.
- Nielsen, A.T. & Schovsbo, N.H., 2015: The regressive Early–Mid Cambrian "Hawke Bay Event" in Baltoscandia: Epeirogenic uplift in concert with eustacy. *Earth-Science Reviews 151*, 288–350.

- OPAB, 1976: Gotland Exploration activities 1972–76, geology and petroleum prospects. OPAB opublicerad rapport, Stockholm, 49 s.
- Persson, L., 2021: Geologisk 3D-modell. Gotland. SGU-rapport 2021:27. Sveriges geologiska undersökning, 30 s.
- Pusch, R., 1969: Geotechnical aspects of the interpretation of distorted strata in Silurian deposits of Gotland, Sweden. *Stockholm Contributions in Geology 21*, 21–42.
- Region Gotland, 2013: Fördjupad översiktsplan Sudret och Burgsvik 2025. Ledningskontoret, Samhällsbyggnadsförvaltningen, Region Gotland, 126 s.
- Ryd, E., 2017: Samband mellan kapacitet vid borrning och transmissivitet i kristallint och sedimentärt berg. Examensarbete 30p. Uppsala universitet, 101 s.
- Rydergren, A., 1990: Geotermal värmeanläggning utvärdering Klintehamn. Byggforskningsrådet rapport R30:1990, 27 s.
- Sivhed. U., Erlström, M., Bojesen-Koefoed, J.A. & Löfgren, A., 2004: Upper Ordovician carbonate mounds on Gotland, central Baltic Sea: distribution, composition and reservoir characteristics. *Journal of Petroleum Geology* 27, 115–140.
- Sopher, D., Juhlin, C. & Erlström, M., 2014: A probabilistic assessment of the effective CO₂ storage capacity within the Swedish sector of the Baltic Basin. *International Journal of Greenhouse Gas Control 30*, 148–170.
- Sopher, D., 2017: Converting scanned images of seismic reflection data into SEG-Y format. *Earth Science Informatics*, doi.org/10.1007/s12145-017-0329-z.
- Sopher, D., Juhlin, C., Levendal, T., Erlström, M., Nilsson, K. & Da Silva Soares, J.P., 2019: Evalutation of the subsurface compressed air energy storage (CAES) potential on Gotland, Sweden. *Environmental Earth Sciences* 78:197, doi.org/10.1007/s12665-019-8196-1.
- SOU, 2016: Ett klimatpolitiskt ramverk för Sverige. Delbetänkande från Miljömålsberedningen. Staten offentliga utredningar 2016:21, 356 s.
- Statens energimyndighet, 2019: Energipilot Gotland. Färdplan för att möjliggöra att Gotland blir pilot för ett hållbart energisystem, Energimyndigheten, rapport 2019:09, 128 s.
- Stel, J.H. & de Coo, J.C.H., 1977: The Silurian Upper Burgsvik and Lower Hamra–Sundre Beds, Gotland. *Scripta Geologica* 44, 1–43.
- Succar, S. & Williams, R.H., 2008: Compressed Air Energy Storage: Theory, Resources, and Applications For Wind Power. *Princeton environmental institute report*, 81 s.
- Wesslén, A., Andersson, O., Eriksson, A., Flodén, T., Hagenfeldt, S. & Wadstein, P., 1981: Geotermisk energi – undersökning av möjligheterna att utvinna geotermisk energi på Gotland. NE-Projekt 4560 251, opublicerad rapport, 28 s.

Borrhål	AUGSTENS-1	BOTVIDE-1	FALUDDEN-2	FRIGSARVE-1	GERVALDS-1	GERVALDS-2	GRÖTLINGBO-2	HALLBJÄNS-1	HAMRA-1	HAMRA-2
E (Sweref 99)	697200	702773	704526	702884	693578	693782	708598	690793	701204	699500
N (Sweref 99)	6315641	6325913	6322646	6333970	6316740	6316772	6335990	6312153	6315462	6316794
Topp Burgsvikfm.	47	i.u	39,03	i.u	i.u	i.u.	my.	i.u	78,45	58,3
Topp Ekefm.	95	71,9	90,83	38,6	39,3	53,8	i.u	i.u	126,5	107,8
Bas Ekefm.	107	84	102,8	52,2	52,3	66,8	i.u	i.u.	138,9	120,3
Topp Enhet F	184	161	180,3	163	132,3	*)	i.u	*)	216	200
Topp Enhet E	233,8	207,4	228,3	208	180,3	*)	*)	*)	263	248
Topp Enhet D	274,3	268,4	277,8	265	246,3	*)	238,5	*)	306	298
Topp Enhet C	300,8	292,9	301,8	284	267,3	*)	255,5	*)	329,5	317
Topp Enhet B	365	356	369,8	327	329,8	*)	322,5	*)	401	389
Topp Enhet A	392	382,4	398,3	352	357,3	*)	332,5	*)	428	417
Topp ordovicium	438	429	443,4	403,1	395	404,1	384,3	425,1	478	468
Topp Alunskiffer	saknas	saknas	saknas	494,3	saknas	saknas	saknas	saknas	saknas	saknas
Topp Faludden	544	519,5	530,8	495,5	506,6	512,8	477,5	509	565	553
Bas Faludden	566	545,7	546	495,5	543,3		485,5	533	595	574
Topp När	667	*)	648,7	616,9			575,5	629,2	691	*)
Topp Viklau		*)		653,5			621,2	679,8	740	725
Topp prekamb.		742,5		699,1			-	732,8	791	
Totaldjup (TD)	678	746,5	698,4	707,5	545,5	540,6	666	736,3	793	741
Avslut	Mossbergaledet	Prekambrium	Närskiffer	Prekambrium	Mossbergaledet	Mossbergaledet	Viklauledet	Prekambrium	Prekambrium	Viklauledet

BILAGA 1. DJUPNIVÅER FÖR STRATIGRAFISKA INTERVALL I DJUPA BORRHÅL PÅ SUDRET

Samtliga djup i meter under havsytans nivå. i.u. (inga uppgifter), my. (markytan), *) inte tolkat

Borrhål	KASTELLE-1	KAUPARVE-1	KVARNE-1	KVARNE-2	LINHATTE-1	OLLAJVS-1	ROJRVIKEN-1	RUMS-1	SINDARVE-1	SKÄRSBOD-1
E (Sweref 99)	695188	706369	694467	695187	700909	701183	700306	701235	702856	698047
N (Sweref 99)	6321337	6335754	6319785	6319997	6318049	6322521	6320373	6320812	6320094	6332218
Topp Burgsvikfm.	i.u.	i.u.	i.u.	i.u	60,37	44,8	46	49,1	67	
Topp Ekefm.	46	25	53,53	51,79	110	92,7	94	97	115	my.
Bas Ekefm.	60	35	67	65	121,9	103,9	106	110	127	i.u.
Topp Enhet F	*)	98	147	146,4	200	185,4	185	185,8	205	95
Topp Enhet E	*)	148	194	192,9	249	232	232	235,3	252	139,5
Topp Enhet D	*)	237	249	248,4	301	291	289	284,8	305	206
Topp Enhet C	*)	260	272	273,9	321	315	307	312,3	324,9	235,5
Topp Enhet B	*)	328	339	341,4	392	385	377	379,8	393	301
Topp Enhet A	*)	348	368	366,9	418	410	402	405,3	420,9	324,5
Topp ordovicium	389,3	391	423	411	472	456,4	444	456	477	351
Topp Alunskiffer		saknas	saknas	saknas	saknas	saknas	saknas	saknas	saknas	saknas
Topp Faludden		484	502	502	555	557	539	541	557	462
Bas Faludden		494	528	521	578	584				
Topp När		591	622							
Topp Viklau			670							
Topp prekamb.			721							
Totaldjup (TD)	453,3	614	723	632	589	584	555	573	575	477
Avslut	Ordovicium.	Närsandsten	Prekambrium	Mossbergaledet	Mossbergaledet	Faluddenledet	Faluddenledet	Mossbergaledet	Faluddenledet	Faluddenledet

Bilaga 1 (forts.). Djupnivåer för stratigrafiska intervall i djupa borrhål på Sudret.

Samtliga djup i meter under havsytans nivå. i.u. (inga uppgifter), my. (markytan), *) inte tolkat

Borrhål	SKÅLS-1	STORMS-1	ST.SUTARVE-2018	SUNDRE-1	VAMBLINGBO-1	VÄNNES-1	VÄSTERGÅRDE-1
E (Sweref 99)	693786	696836	699981	693246	696888	694836	700905
N (Sweref 99)	6329632	6319401	6320673	6314774	6318001	6315901	6328663
Topp Burgsvikfm.	-	18	43,1	i.u.	27,51	12,45	m.y.
Topp Ekefm.	my.	68,59	96,0	40	77	62,85	32
Bas Ekefm.	29,06	81,34	109,4	54	91	75	46
Topp Enhet F	73	163	183,9	131	165,9	157	121,9
Topp Enhet E	113	208,8	229,9	182	216,4	203,9	164,4
Topp Enhet D	195	265	287,4	231	264,4	252	238,4
Topp Enhet C	221	284,8	307,9	284,1257	294,4	274	260,9
Topp Enhet B	290	355	378,4	327	359,9	342	327,4
Topp Enhet A	309	379	402,4	352	386,3	367	349,4
Topp ordovicium	353	423	461,9	397	431	405	390,4
Topp Alunskiffer	saknas	saknas	537,5	saknas	saknas	518	saknas
Topp Faludden	447	516	537,5	515	525	518	486
Bas Faludden	461	549			556		
Topp När	556						
Topp Viklau	601						
Topp prekamb.	650						
Totaldjup (TD)	662	552	556,5	525	669	546	504
Avslut	Prekambrium	Mossbergaledet	Mossbergaledet	Faluddenledet	Mossbergaledet	Mossbergaledet	Faluddenledet

Bilaga 1 (forts.) Djupnivåer för stratigrafiska intervall i djupa borrhål på Sudret.

Samtliga djup i meter under havsytans nivå. i.u. (inga uppgifter), my. (markytan), *) inte tolkat

BILAGA 2. POROSITET, PERMEABILITET OCH KORNDENSITET PÅ KÄRNPROV AV FALUDDENSANDSTENEN

Frigsarve-1 499.00 Hori. 218.81 17.14 2.657 Frigsarve-1 500.00 Hori. 218.54 14.50 2.664 Frigsarve-1 501.00 Hori. 406.49 16.60 2.657 Frigsarve-1 501.00 Hori. 300.15 17.43 2.646 Frigsarve-1 508.00 Hori. 147.34 14.04 2.656 Frigsarve-1 509.45 Hori. 0.47 8.36 2.656 Frigsarve-1 511.35 Hori. 84.12 2.644 2.644 Kvarne-1 511.35 Hori. 303.38 15.00 2.643 Kvarne-1 513.450 Hori. 333.38 15.80 2.645 Kvarne-1 517.20 Vert. 28.393 17.06 2.648 Kvarne-1 517.25 Hori. 3.80 9.25 2.729 Hamra-1 577.35 Hori. 3.80 9.25 2.729 Hamra-1 577.35 Hori.	Borrhål	Djup, m KB*	Orientering	Gas perm, mD	Porositet, %	Korndensitet g/cm ³
Frigsarve-1 500,00 Hori. 218,54 14,50 2,664 Frigsarve-1 501,00 Hori. 661,39 18,76 2,657 Frigsarve-1 500,00 Hori. 300,15 17,43 2,664 Frigsarve-1 508,38 Hori. 757,63 15,07 2,647 Frigsarve-1 509,45 Hori. 0,47 8,36 2,668 Frigsarve-1 510,40 Vert. 169,35 14,12 2,648 Frigsarve-1 511,40 Vert. 169,35 14,12 2,648 Kvarne-1 511,40 Vert. 2,71 6,64 2,643 Kvarne-1 511,50 Hori. 32,38 15,80 2,645 Kvarne-1 511,50 Hori. 32,38 16,85 2,645 Kvarne-1 511,50 Hori. 3,80 9,25 2,729 Hamra-1 572,28 Hori. 3,80 9,25 2,729 Hamra-1 572,35 Vert. 15,62 14,46 2,655 Hamra-1 572,35 Hori.	Frigsarve-1	499,00	Hori.	218,81	17,14	2,657
Frigsarve-1 501,00 Hori. 406,49 16,60 2,657 Frigsarve-1 501,00 Vert. 661,39 18,76 2,646 Frigsarve-1 507,71 Hori. 147,34 14,04 2,656 Frigsarve-1 503,45 Hori. 77,763 15,07 2,647 Frigsarve-1 503,45 Hori. 0,47 8,36 2,665 Frigsarve-1 511,45 Hori. 30,15 14,12 2,648 Kvarne-1 511,35 Hori. 32,31 15,80 2,645 Kvarne-1 514,50 Hori. 36,02 16,79 2,648 Kvarne-1 517,20 Vert. 223,93 17,06 2,645 Kvarne-1 517,20 Vert. 223,55 16,85 2,650 Hamra-1 572,95 Vert. 223,56 18,19 2,644 Hamra-1 573,65 Vert. 223,56 18,19 2,644 Hamra-1 580,92 Hori. <	Frigsarve-1	500,00	Hori.	218,54	14,50	2,664
Frigsarve-1 506,00 Vert. 661,39 18,76 2,669 Frigsarve-1 506,00 Hori. 300,15 17,43 2,646 Frigsarve-1 508,38 Hori. 77,73 15,07 2,647 Frigsarve-1 509,45 Hori. 0,47 8,36 2,656 Frigsarve-1 511,35 Hori. 8,362 11,17 2,644 Kvarne-1 512,12 Hori. 384,12 15,44 2,652 Kvarne-1 513,85 Vert. 2,71 6,64 2,643 Kvarne-1 513,85 Vert. 2,72 6,64 2,648 Kvarne-1 517,20 Vert. 283,93 17,06 2,648 Kvarne-1 517,20 Vert. 152,62 14,46 2,655 Hamra-1 572,28 Hori. 3,80 9,25 2,729 Hamra-1 572,35 Hori. 13,946 17,55 2,644 Hamra-1 570,35 Hori. 139,46 17,55 2,644 Hamra-1 570,35 Hori. 1	Frigsarve-1	501,00	Hori.	406,49	16,60	2,657
Frigsarve-1 506,00 Hori. 300,15 17,43 2,646 Frigsarve-1 507,71 Hori. 147,34 14,04 2,654 Frigsarve-1 509,35 Hori. 0,47 8,36 2,664 Frigsarve-1 510,40 Vert. 169,35 14,12 2,648 Frigsarve-1 511,35 Hori. 834,12 15,44 2,664 Kvarne-1 512,12 Hori. 332,38 15,80 2,645 Kvarne-1 513,85 Vert. 233,33 17,66 2,648 Kvarne-1 517,20 Vert. 28,85 16,85 2,665 Hamra-1 572,28 Hori. 328,93 17,06 2,648 Kvarne-1 512,02 Vert. 138,00 9,25 2,729 Hamra-1 572,95 Vert. 1326,25 14,46 2,665 Hamra-1 572,35 Hori. 149,44 14,26 2,665 Hamra-1 577,35 Hori. <td< td=""><td>Frigsarve-1</td><td>501,00</td><td>Vert.</td><td>661,39</td><td>18,76</td><td>2,659</td></td<>	Frigsarve-1	501,00	Vert.	661,39	18,76	2,659
Frigsarve-1 507,71 Hori. 147,34 14,04 2,654 Frigsarve-1 509,45 Hori. 0,77,63 15,07 2,647 Frigsarve-1 510,40 Vert. 169,35 14,12 2,648 Frigsarve-1 511,35 Hori. 80,82 11,17 2,644 Kvarne-1 512,12 Hori. 332,38 15,60 2,645 Kvarne-1 514,50 Hori. 332,38 15,80 2,645 Kvarne-1 517,00 Vert. 283,93 17,06 2,648 Kvarne-1 517,00 Vert. 283,93 17,06 2,648 Kvarne-1 517,00 Vert. 282,85 16,85 2,660 Hamra-1 572,28 Hori. 13,60 9,25 2,729 Hamra-1 574,17 Hori. 14,97 14,44 2,665 Hamra-1 570,36 Vert. 282,56 18,19 2,645 Hamra-1 570,37 Hori. 13,94 1,755 2,644 Hamra-1 570,36 Vert.	Frigsarve-1	506,00	Hori.	300,15	17,43	2,646
Frigsarve-1 508,38 Hori. 757,63 15,07 2,647 Frigsarve-1 510,40 Vert. 169,35 14,12 2,648 Frigsarve-1 511,35 Hori. 80,82 11,17 2,644 Kvarne-1 512,12 Hori. 384,12 15,44 2,652 Kvarne-1 513,85 Vert. 2,71 6,64 2,643 Kvarne-1 515,90 Hori. 363,02 16,79 2,648 Kvarne-1 517,20 Vert. 28,83 16,65 2,663 Kvarne-1 512,20 Vert. 28,85 16,65 2,650 Hamra-1 572,28 Hori. 3,80 9,25 2,729 Hamra-1 572,85 Vert. 28,26 18,19 2,645 Hamra-1 576,36 Vert. 28,26 18,19 2,645 Hamra-1 570,23 Hori. 114,97 14,48 2,666 Hamra-1 580,92 Hori. 21,95 13,61 2,641 Hamra-1 580,92 Hori. 21,95 </td <td>Frigsarve-1</td> <td>507,71</td> <td>Hori.</td> <td>147,34</td> <td>14,04</td> <td>2,654</td>	Frigsarve-1	507,71	Hori.	147,34	14,04	2,654
Frigsarve-1 50,945 Hori. 0,47 8,36 2,656 Frigsarve-1 510,40 Vert. 169,35 14,12 2,648 Frigsarve-1 511,35 Hori. 380,82 11,17 2,644 Kvarne-1 512,12 Hori. 384,12 15,44 2,652 Kvarne-1 513,50 Hori. 332,38 15,80 2,645 Kvarne-1 517,20 Vert. 283,93 17,06 2,648 Kvarne-1 517,20 Vert. 283,93 17,06 2,648 Kvarne-1 518,15 Hori. 58,85 2,650 14,46 2,655 Hamra-1 572,28 Hori. 13,80 9,25 2,729 Hamra-1 574,17 Hori. 14,46 2,655 Hamra-1 574,17 Hori. 14,466 2,644 Hamra-1 579,23 Hori. 129,24 14,66 2,641 Hamra-1 579,23 Hori. 129,59 13,61 2,641 Hamra-1 580,92 Hori. 13,21 2,	Frigsarve-1	508,38	Hori.	757,63	15,07	2,647
Frigsarve-1 510,40 Vert. 169,35 14,12 2,648 Frigsarve-1 511,35 Hori. 80,82 11,17 2,644 Kvarne-1 512,12 Hori. 382,12 15,44 2,652 Kvarne-1 513,85 Vert. 2,71 6,64 2,643 Kvarne-1 515,90 Hori. 332,38 15,80 2,648 Kvarne-1 517,20 Vert. 283,93 17,06 2,648 Kvarne-1 518,15 Hori. 528,85 16,85 2,650 Hamra-1 572,25 Vert. 152,62 14,46 2,655 Hamra-1 572,35 Hori. 149,97 14,48 2,666 Hamra-1 579,32 Hori. 25,16 14,55 2,644 Hamra-1 580,92 Hori. - 13,21 2,661 Hamra-1 580,92 Hori. - 13,21 2,661 Hamra-1 580,92 Hori. - 13,21 2,661 Hamra-1 580,92 Hori. 25,16 <t< td=""><td>Frigsarve-1</td><td>509,45</td><td>Hori.</td><td>0,47</td><td>8,36</td><td>2,656</td></t<>	Frigsarve-1	509,45	Hori.	0,47	8,36	2,656
Frigsarve-1 511,35 Hori. 80,82 11,17 2,644 Kvarne-1 512,12 Hori. 384,12 15,44 2,652 Kvarne-1 513,85 Vert. 2,71 6,64 2,643 Kvarne-1 515,90 Hori. 332,38 15,80 2,645 Kvarne-1 517,20 Vert. 283,39 17,06 2,648 Kvarne-1 518,15 Hori. 528,85 16,85 2,650 Hamra-1 572,28 Hori. 138,0 9,25 2,729 Hamra-1 574,17 Hori. 114,497 14,46 2,655 Hamra-1 574,36 Vert. 282,56 18,19 2,645 Hamra-1 579,32 Hori. 12,92,44 14,66 2,652 Hamra-1 580,92 Hori. 25,16 12,85 2,647 Hamra-1 580,92 Hori. 20,798 14,80 2,646 Hamra-1 580,92 Hori. 20,798 14,80 2,647 Hamra-1 580,92 Hori. 20,19 </td <td>Frigsarve-1</td> <td>510,40</td> <td>Vert.</td> <td>169,35</td> <td>14,12</td> <td>2,648</td>	Frigsarve-1	510,40	Vert.	169,35	14,12	2,648
kvarne-1 512,12 Hori. 384,12 15,44 2,652 Kvarne-1 513,85 Vert. 2,71 6,64 2,643 Kvarne-1 514,50 Hori. 363,02 16,79 2,648 Kvarne-1 517,70 Vert. 283,93 17,06 2,648 Kvarne-1 517,20 Vert. 283,93 17,06 2,648 Kvarne-1 572,28 Hori. 3,80 9,25 2,729 Hamra-1 572,25 Vert. 125,62 14,46 2,655 Hamra-1 574,17 Hori. 114,97 14,48 2,666 Hamra-1 576,36 Vert. 282,36 18,19 2,645 Hamra-1 579,32 Hori. 25,16 12,85 2,637 Hamra-1 580,92 Hori. 21,59 13,61 2,641 Hamra-1 580,92 Hori. 21,59 13,61 2,647 Hamra-1 580,92 Hori. 214,28 <t< td=""><td>Frigsarve-1</td><td>511,35</td><td>Hori.</td><td>80,82</td><td>11,17</td><td>2,644</td></t<>	Frigsarve-1	511,35	Hori.	80,82	11,17	2,644
kvarne-1 \$13,85 Vert. 2,71 6,64 2,643 kvarne-1 \$14,50 Hori. 332,38 15,80 2,648 kvarne-1 \$15,00 Hori. 383,02 16,79 2,648 kvarne-1 \$17,20 Vert. 283,93 17,06 2,648 kvarne-1 \$72,28 Hori. 3,80 9,25 2,729 Hamra-1 \$72,28 Hori. 136,02 14,46 2,655 Hamra-1 \$76,36 Vert. 282,56 18,19 2,643 Hamra-1 \$76,36 Vert. 282,56 18,19 2,644 Hamra-1 \$77,35 Hori. 192,44 14,66 2,652 Hamra-1 \$79,23 Hori. 192,44 14,66 2,652 Hamra-1 \$80,92 Hori. 219,59 13,61 2,641 Hamra-1 \$80,92 Hori. 219,59 13,61 2,647 Hamra-1 \$80,90	Kvarne-1	512,12	Hori.	384,12	15,44	2,652
Kvarne-1 \$14,50 Hori. 332,38 15,80 2,645 Kvarne-1 \$15,90 Hori. 363,02 16,79 2,648 Kvarne-1 \$17,20 Vert. 283,93 17,06 2,648 Kvarne-1 \$18,15 Hori. 528,85 16,85 2,650 Hamra-1 \$72,28 Hori. 152,62 14,46 2,655 Hamra-1 \$72,75 Vert. 152,62 14,46 2,655 Hamra-1 \$76,36 Vert. 282,56 18,19 2,645 Hamra-1 \$77,35 Hori. 192,44 14,66 2,652 Hamra-1 \$79,23 Hori. - 13,21 2,661 Hamra-1 \$80,92 Hori. - 13,21 2,661 Hamra-1 \$80,92 Hori. 20,15 14,28 2,647 Hamra-1 \$80,92 Hori. 20,15 14,28 2,647 Hamra-1 \$84,90 Vert. 92,15 14,28 2,647 St.Sutarve-2018 \$44,90 Vert. 1668	Kvarne-1	513,85	Vert.	2,71	6,64	2,643
Kvarne-1 515,90 Hori. 363,02 16,79 2,648 Kvarne-1 517,70 Vert. 283,93 17,06 2,648 Kvarne-1 518,15 Hori. 528,85 16,85 2,650 Hamra-1 572,28 Hori. 13,80 9,25 2,729 Hamra-1 572,95 Vert. 152,62 14,46 2,655 Hamra-1 576,36 Vert. 282,56 18,19 2,644 Hamra-1 576,36 Vert. 282,56 18,19 2,644 Hamra-1 579,23 Hori. 192,44 14,66 2,652 Hamra-1 580,92 Hori. 2,16 12,85 2,641 Hamra-1 580,92 Hori. 219,59 13,61 2,641 Hamra-1 580,92 Hori. 219,59 14,80 2,645 St.Sutare-2018 544,90 Vert. 92,15 14,28 2,647 Hamra-1 586,96 Hori. 1803	Kvarne-1	514,50	Hori.	332,38	15,80	2,645
Kvarne-1 517,20 Vert. 283,93 17,06 2,648 Kvarne-1 518,15 Hori. 528,85 16,85 2,729 Hamra-1 572,28 Hori. 3,80 9,25 2,729 Hamra-1 572,28 Vert. 152,62 14,46 2,655 Hamra-1 576,36 Vert. 282,56 18,19 2,645 Hamra-1 576,36 Vert. 282,56 18,19 2,645 Hamra-1 579,23 Hori. 439,46 17,55 2,644 Hamra-1 580,92 Hori. 25,16 12,85 2,637 Hamra-1 580,92 Hori. 219,59 13,61 2,641 Hamra-1 580,92 Hori. 201,59 14,28 2,647 Hamra-1 584,59 Vert. 92,15 14,28 2,647 Hamra-1 586,96 Hori. 207,98 14,80 2,649 St.Sutare-2018 544,10 Hori. 1633	Kvarne-1	515,90	Hori.	363,02	16,79	2,648
Kvarne-1 518,15 Hori. 528,85 16,85 2,650 Hamra-1 572,28 Hori. 3,80 9,25 2,729 Hamra-1 572,295 Vert. 152,62 14,46 2,655 Hamra-1 576,36 Vert. 282,56 18,19 2,645 Hamra-1 576,35 Hori. 192,44 14,66 2,652 Hamra-1 579,23 Hori. 192,44 14,66 2,652 Hamra-1 580,92 Hori. 2,516 12,85 2,637 Hamra-1 580,92 Hori. 219,59 13,61 2,641 Hamra-1 580,92 Hori. 207,98 14,80 2,645 Hamra-1 586,96 Hori. 207,98 14,80 2,647 Hamra-1 586,96 Hori. 207,98 14,80 2,649 St.Sutare-2018 544,90 Vert. 1668 17,16 2,649 St.Sutare-2018 544,94 Hori. 1803	Kvarne-1	517,20	Vert.	283,93	17,06	2,648
Hamra-1 572,28 Hori. 3,80 9,25 2,729 Hamra-1 572,95 Vert. 152,62 14,46 2,655 Hamra-1 576,36 Vert. 282,56 18,19 2,645 Hamra-1 576,36 Vert. 282,56 18,19 2,644 Hamra-1 577,35 Hori. 192,44 14,66 2,652 Hamra-1 580,92 Hori. 25,16 12,85 2,637 Hamra-1 580,92 Hori. 219,59 13,61 2,641 Hamra-1 582,03 Hori. 219,59 14,28 2,647 Hamra-1 584,59 Vert. 92,15 14,28 2,647 Hamra-1 586,96 Hori. 207,98 14,80 2,645 St.Sutarve-2018 544,90 Vert. 1668 17,16 2,649 St.Sutarve-2018 546,16 Hori. 1803 16,55 2,649 St.Sutarve-2018 549,54 Hori. 1051	Kvarne-1	518,15	Hori.	528,85	16,85	2,650
Hamra-1572,95Vert.152,6214,462,655Hamra-1574,17Hori.114,9714,482,696Hamra-1576,36Vert.282,5618,192,645Hamra-1577,35Hori.192,4414,662,652Hamra-1579,23Hori13,212,661Hamra-1580,92Hori13,212,661Hamra-1580,92Hori13,212,661Hamra-1582,03Hori.219,5914,282,647Hamra-1586,96Hori.207,9814,802,645St.Sutarve-2018544,90Vert.166817,162,661St.Sutarve-2018544,94Hori.154617,042,649St.Sutarve-2018546,16Hori.180316,552,649St.Sutarve-2018549,54Hori.121517,012,648St.Sutarve-2018550,52Hori.108716,412,653St.Sutarve-2018550,52Hori.108716,412,653St.Sutarve-2018550,52Hori.108716,412,649St.Sutarve-2018552,14Vert.90415,142,649St.Sutarve-2018552,18Hori.77115,112,646St.Sutarve-2018555,51Hori.110316,822,647St.Sutarve-2018556,11Hori.110316,822,645St.Sutarve-2018559,16Ho	Hamra-1	572,28	Hori.	3,80	9,25	2,729
Hamra-1574,17Hori.114,9714,482,696Hamra-1576,36Vert.282,5618,192,645Hamra-1577,35Hori.439,4617,552,644Hamra-1579,23Hori.192,4414,662,652Hamra-1580,92Hori13,212,661Hamra-1580,92Hori13,212,661Hamra-1580,92Hori.20,1514,282,647Hamra-1580,96Hori.207,9814,802,645St.Sutarve-2018544,90Vert.92,1514,802,645St.Sutarve-2018544,90Vert.166817,162,649St.Sutarve-2018544,94Hori.180316,552,649St.Sutarve-2018547,23Hori.105117,222,649St.Sutarve-2018549,54Hori.121517,012,648St.Sutarve-2018550,13Hori.51416,872,656St.Sutarve-2018550,52Hori.108716,412,653St.Sutarve-2018550,52Hori.108716,412,653St.Sutarve-2018550,52Hori.108716,412,654St.Sutarve-2018552,14Vert.90415,142,649St.Sutarve-2018552,14Vert.90415,142,649St.Sutarve-2018555,51Hori.41312,652,641St.Sutarve-2018555,51 </td <td>Hamra-1</td> <td>572,95</td> <td>Vert.</td> <td>152,62</td> <td>14,46</td> <td>2,655</td>	Hamra-1	572,95	Vert.	152,62	14,46	2,655
Hamra-1576,36Vert.282,5618,192,645Hamra-1577,35Hori.439,4617,552,644Hamra-1579,23Hori.192,4414,662,652Hamra-1580,92Hori13,212,661Hamra-1580,92Hori13,212,661Hamra-1582,03Hori.219,5913,612,641Hamra-1584,59Vert.92,1514,282,647Hamra-1584,90Vert.156817,162,661St.Sutarve-2018544,90Vert.166817,162,649St.Sutarve-2018546,16Hori.180316,552,649St.Sutarve-2018546,16Hori.105117,222,649St.Sutarve-2018549,54Hori.121517,012,648St.Sutarve-2018550,09Vert.31515,172,647St.Sutarve-2018550,13Hori.108716,412,653St.Sutarve-2018550,13Hori.108716,412,653St.Sutarve-2018552,14Vert.90415,142,649St.Sutarve-2018552,14Vert.90415,142,646St.Sutarve-2018552,14Hori.41312,652,645St.Sutarve-2018553,80Hori.41312,652,645St.Sutarve-2018555,51Hori.68114,682,651St.Sutarve-2018559,92 <t< td=""><td>Hamra-1</td><td>574,17</td><td>Hori.</td><td>114,97</td><td>14,48</td><td>2,696</td></t<>	Hamra-1	574,17	Hori.	114,97	14,48	2,696
Hamra-1577,35Hori.439,4617,552,644Hamra-1579,23Hori.192,4414,662,652Hamra-1580,92Hori.25,1612,852,637Hamra-1580,92Hori13,212,661Hamra-1580,92Hori13,212,661Hamra-1582,03Hori.219,5913,612,641Hamra-1586,96Hori.207,9814,802,645St.sutarve-2018544,90Vert.166817,162,661St.Sutarve-2018544,94Hori.154617,042,649St.Sutarve-2018546,16Hori.180316,552,649St.Sutarve-2018546,16Hori.105117,222,649St.Sutarve-2018547,23Hori.105117,222,649St.Sutarve-2018550,99Vert.31515,172,647St.Sutarve-2018550,13Hori.51416,872,653St.Sutarve-2018550,12Hori.108716,412,653St.Sutarve-2018551,71Hori.108716,412,649St.Sutarve-2018552,14Vert.90415,142,649St.Sutarve-2018552,14Vert.90415,142,649St.Sutarve-2018555,51Hori.41312,652,647St.Sutarve-2018555,51Hori.68114,682,651St.Sutarve-2018555,5	Hamra-1	576,36	Vert.	282,56	18,19	2,645
Hamra-1579,23Hori.192,4414,662,652Hamra-1580,92Hori.25,1612,852,637Hamra-1580,92Hori13,212,661Hamra-1582,03Hori.219,5913,612,641Hamra-1582,03Hori.207,9814,802,645Hamra-1586,96Hori.207,9814,802,645St.Sutarve-2018544,90Vert.166817,162,661St.Sutarve-2018544,94Hori.154617,042,649St.Sutarve-2018546,16Hori.180316,552,649St.Sutarve-2018547,23Hori.105117,222,649St.Sutarve-2018549,54Hori.105117,222,649St.Sutarve-2018550,09Vert.31515,172,647St.Sutarve-2018550,13Hori.112517,012,648St.Sutarve-2018550,13Hori.108716,412,653St.Sutarve-2018551,71Hori.77115,112,646St.Sutarve-2018552,14Vert.90415,142,649St.Sutarve-2018552,18Hori.41312,652,647St.Sutarve-2018555,51Hori.68114,682,651St.Sutarve-2018555,51Hori.110316,822,647St.Sutarve-2018559,16Hori.110316,822,646St.Sutarve-2018 </td <td>Hamra-1</td> <td>577,35</td> <td>Hori.</td> <td>439,46</td> <td>17,55</td> <td>2,644</td>	Hamra-1	577,35	Hori.	439,46	17,55	2,644
Hamra-1580,92Hori.25,1612,852,637Hamra-1580,92Hori13,212,661Hamra-1582,03Hori.219,5913,612,641Hamra-1582,03Vert.92,1514,282,647Hamra-1586,96Hori.207,9814,802,645St.Sutarve-2018544,90Vert.166817,162,661St.Sutarve-2018544,90Vert.166817,042,649St.Sutarve-2018544,94Hori.180316,552,649St.Sutarve-2018546,16Hori.105117,222,649St.Sutarve-2018547,23Hori.105117,222,649St.Sutarve-2018550,99Vert.31515,172,647St.Sutarve-2018550,13Hori.51416,872,655St.Sutarve-2018550,52Hori.108716,412,653St.Sutarve-2018550,52Hori.108716,412,649St.Sutarve-2018551,71Hori.77115,112,646St.Sutarve-2018552,14Vert.90415,142,649St.Sutarve-2018552,51Hori.41312,652,647St.Sutarve-2018555,51Hori.68114,682,651St.Sutarve-2018556,11Hori.110516,522,645St.Sutarve-2018559,16Hori.110316,522,645St.Sutarve-20	Hamra-1	579,23	Hori.	192,44	14,66	2,652
Hamra-1580,92Hori13,212,661Hamra-1582,03Hori.219,5913,612,641Hamra-1584,59Vert.92,1514,282,647Hamra-1586,96Hori.207,9814,802,645St.Sutarve-2018544,90Vert.166817,162,661St.Sutarve-2018544,94Hori.154617,042,649St.Sutarve-2018546,16Hori.180316,552,649St.Sutarve-2018547,23Hori.105117,222,649St.Sutarve-2018549,54Hori.121517,012,648St.Sutarve-2018550,99Vert.31515,172,647St.Sutarve-2018550,13Hori.51416,872,656St.Sutarve-2018550,52Hori.108716,412,653St.Sutarve-2018552,14Vert.90415,142,649St.Sutarve-2018552,18Hori.77115,112,646St.Sutarve-2018552,18Hori.41312,652,645St.Sutarve-2018555,51Hori.68114,682,651St.Sutarve-2018556,11Hori.110316,822,647St.Sutarve-2018559,11Hori.95116,522,648St.Sutarve-2018559,16Hori.110316,822,647St.Sutarve-2018559,16Hori.110316,822,646St.Suta	Hamra-1	580,92	Hori.	25,16	12,85	2,637
Hamra-1582,03Hori.219,5913,612,641Hamra-1584,59Vert.92,1514,282,647Hamra-1586,96Hori.207,9814,802,645St.Sutarve-2018544,90Vert.166817,162,661St.Sutarve-2018544,94Hori.154617,042,649St.Sutarve-2018546,16Hori.180316,552,649St.Sutarve-2018546,16Hori.105117,222,649St.Sutarve-2018549,54Hori.121517,012,648St.Sutarve-2018549,54Hori.121517,012,648St.Sutarve-2018550,09Vert.31515,172,647St.Sutarve-2018550,13Hori.108716,412,653St.Sutarve-2018550,52Hori.108716,412,649St.Sutarve-2018552,14Vert.90415,142,649St.Sutarve-2018552,18Hori.77115,112,646St.Sutarve-2018553,80Hori.41312,652,647St.Sutarve-2018555,51Hori.110516,392,650St.Sutarve-2018556,11Hori.110316,822,647St.Sutarve-2018559,11Hori.110316,822,647St.Sutarve-2018559,11Hori.173918,252,646St.Sutarve-2018559,16Hori.173918,252,646<	Hamra-1	580,92	Hori.	-	13,21	2,661
Hamra-1584,59Vert.92,1514,282,647Hamra-1586,96Hori.207,9814,802,645St.Sutarve-2018544,90Vert.166817,162,661St.Sutarve-2018544,94Hori.154617,042,649St.Sutarve-2018546,16Hori.180316,552,649St.Sutarve-2018547,23Hori.105117,222,649St.Sutarve-2018549,54Hori.121517,012,648St.Sutarve-2018550,09Vert.31515,172,647St.Sutarve-2018550,13Hori.51416,872,656St.Sutarve-2018550,52Hori.108716,412,649St.Sutarve-2018550,52Hori.108716,412,649St.Sutarve-2018550,52Hori.108716,412,649St.Sutarve-2018551,71Hori.77115,112,646St.Sutarve-2018552,18Hori.77115,112,646St.Sutarve-2018552,18Hori.41312,652,647St.Sutarve-2018555,51Hori.68114,682,651St.Sutarve-2018556,11Hori.110316,822,647St.Sutarve-2018556,11Hori.110316,822,647St.Sutarve-2018559,16Hori.110316,822,647St.Sutarve-2018559,16Hori.110316,822,648 </td <td>Hamra-1</td> <td>582,03</td> <td>Hori.</td> <td>219,59</td> <td>13,61</td> <td>2,641</td>	Hamra-1	582,03	Hori.	219,59	13,61	2,641
Hamra-1586,96Hori.207,9814,802,645St.Sutarve-2018544,90Vert.166817,162,661St.Sutarve-2018544,94Hori.154617,042,649St.Sutarve-2018546,16Hori.180316,552,649St.Sutarve-2018547,23Hori.105117,222,649St.Sutarve-2018549,54Hori.121517,012,648St.Sutarve-2018550,09Vert.31515,172,647St.Sutarve-2018550,13Hori.51416,872,656St.Sutarve-2018550,52Hori.108716,412,653St.Sutarve-2018550,52Hori.108716,412,649St.Sutarve-2018552,14Vert.90415,142,649St.Sutarve-2018552,18Hori.77115,112,646St.Sutarve-2018552,18Hori.41312,652,647St.Sutarve-2018555,51Hori.68114,682,651St.Sutarve-2018555,51Hori.110316,522,647St.Sutarve-2018557,68Hori.95116,522,647St.Sutarve-2018559,11Vert.84617,622,648St.Sutarve-2018559,16Hori.110316,822,647St.Sutarve-2018559,16Hori.110316,822,646St.Sutarve-2018559,20Hori.100314,942,646 </td <td>Hamra-1</td> <td>584,59</td> <td>Vert.</td> <td>92,15</td> <td>14,28</td> <td>2,647</td>	Hamra-1	584,59	Vert.	92,15	14,28	2,647
St.Sutarve-2018 544,90 Vert. 1668 17,16 2,661 St.Sutarve-2018 546,16 Hori. 1803 16,55 2,649 St.Sutarve-2018 547,23 Hori. 1051 17,22 2,649 St.Sutarve-2018 547,23 Hori. 1215 17,01 2,648 St.Sutarve-2018 549,54 Hori. 1215 17,01 2,647 St.Sutarve-2018 550,09 Vert. 315 15,17 2,647 St.Sutarve-2018 550,13 Hori. 514 16,87 2,656 St.Sutarve-2018 550,52 Hori. 1087 16,41 2,653 St.Sutarve-2018 552,14 Vert. 904 15,14 2,649 St.Sutarve-2018 552,18 Hori. 771 15,11 2,646 St.Sutarve-2018 552,18 Hori. 428 13,26 2,647 St.Sutarve-2018 555,51 Hori. 413 12,65 2,645 St.Sutarve-2018 555,51 Hori. 1105 16,39 2,650 St.Sut	Hamra-1	586,96	Hori.	207,98	14,80	2,645
St.Sutarve-2018 544,94 Hori. 1546 17,04 2,649 St.Sutarve-2018 546,16 Hori. 1803 16,55 2,649 St.Sutarve-2018 547,23 Hori. 1051 17,22 2,649 St.Sutarve-2018 549,54 Hori. 1215 17,01 2,648 St.Sutarve-2018 550,09 Vert. 315 15,17 2,647 St.Sutarve-2018 550,13 Hori. 1087 16,41 2,653 St.Sutarve-2018 550,52 Hori. 1087 16,41 2,653 St.Sutarve-2018 551,71 Hori. 752 16,21 2,649 St.Sutarve-2018 552,14 Vert. 904 15,14 2,649 St.Sutarve-2018 552,18 Hori. 771 15,11 2,646 St.Sutarve-2018 554,80 Hori. 413 12,65 2,647 St.Sutarve-2018 555,51 Hori. 1105 16,39 2,650 St.Sutarve-2018 556,11 Hori. 1103 16,82 2,647 St.Su	St.Sutarve-2018	544,90	Vert.	1668	17,16	2,661
St.Sutarve-2018 546,16 Hori. 1803 16,55 2,649 St.Sutarve-2018 547,23 Hori. 1051 17,22 2,649 St.Sutarve-2018 549,54 Hori. 1215 17,01 2,648 St.Sutarve-2018 550,09 Vert. 315 15,17 2,647 St.Sutarve-2018 550,13 Hori. 514 16,87 2,656 St.Sutarve-2018 550,52 Hori. 1087 16,41 2,653 St.Sutarve-2018 551,71 Hori. 752 16,21 2,649 St.Sutarve-2018 552,14 Vert. 904 15,14 2,649 St.Sutarve-2018 552,18 Hori. 771 15,11 2,646 St.Sutarve-2018 552,18 Hori. 413 12,65 2,647 St.Sutarve-2018 554,80 Hori. 413 12,65 2,645 St.Sutarve-2018 555,51 Hori. 681 14,68 2,651 St.Sutarve-2018 557,68 Hori. 1103 16,52 2,647 St.Sutar	St.Sutarve-2018	544.94	Hori.	1546	17.04	2.649
St.Sutarve-2018 547,23 Hori. 105 17,22 2,649 St.Sutarve-2018 549,54 Hori. 1215 17,01 2,648 St.Sutarve-2018 550,09 Vert. 315 15,17 2,647 St.Sutarve-2018 550,13 Hori. 514 16,87 2,656 St.Sutarve-2018 550,52 Hori. 1087 16,41 2,653 St.Sutarve-2018 551,71 Hori. 752 16,21 2,649 St.Sutarve-2018 552,14 Vert. 904 15,14 2,649 St.Sutarve-2018 552,18 Hori. 771 15,11 2,646 St.Sutarve-2018 552,18 Hori. 771 15,11 2,646 St.Sutarve-2018 552,51 Hori. 413 12,65 2,647 St.Sutarve-2018 555,51 Hori. 1105 16,39 2,650 St.Sutarve-2018 555,51 Hori. 1103 16,82 2,647 St.Sutarve-2018 559,11 Hori. 1103 16,82 2,647 St.Sutar	St.Sutarve-2018	546.16	Hori.	1803	16.55	2.649
St.Sutarve-2018 549,54 Hori. 1215 17,01 2,648 St.Sutarve-2018 550,09 Vert. 315 15,17 2,647 St.Sutarve-2018 550,13 Hori. 514 16,87 2,656 St.Sutarve-2018 550,52 Hori. 1087 16,41 2,653 St.Sutarve-2018 550,52 Hori. 1087 16,41 2,669 St.Sutarve-2018 551,71 Hori. 752 16,21 2,649 St.Sutarve-2018 552,14 Vert. 904 15,14 2,649 St.Sutarve-2018 552,18 Hori. 771 15,11 2,646 St.Sutarve-2018 552,18 Hori. 428 13,26 2,647 St.Sutarve-2018 553,80 Hori. 413 12,65 2,645 St.Sutarve-2018 555,51 Hori. 681 14,68 2,651 St.Sutarve-2018 555,51 Hori. 1105 16,52 2,651 St.Sutarve-2018 557,68 Hori. 1103 16,82 2,647 St.Sutar	St.Sutarve-2018	547.23	Hori	1051	17.22	2.649
St.Sutarve-2018 550,09 Vert. 315 15,17 2,647 St.Sutarve-2018 550,13 Hori. 514 16,87 2,656 St.Sutarve-2018 550,52 Hori. 1087 16,41 2,653 St.Sutarve-2018 551,71 Hori. 752 16,21 2,649 St.Sutarve-2018 551,71 Hori. 752 16,21 2,649 St.Sutarve-2018 552,14 Vert. 904 15,14 2,649 St.Sutarve-2018 552,18 Hori. 771 15,11 2,646 St.Sutarve-2018 553,80 Hori. 413 12,65 2,647 St.Sutarve-2018 554,80 Hori. 413 12,65 2,645 St.Sutarve-2018 556,11 Hori. 1105 16,39 2,650 St.Sutarve-2018 557,68 Hori. 1013 16,82 2,647 St.Sutarve-2018 559,11 Vert. 846 17,62 2,648 St.Sutarve-2018 559,16 Hori. 1103 16,82 2,646 St.Sutarv	St.Sutarve-2018	549.54	Hori.	1215	17.01	2.648
St.Sutarve-2018 550,13 Hori. 514 16,87 2,656 St.Sutarve-2018 550,52 Hori. 1087 16,41 2,653 St.Sutarve-2018 551,71 Hori. 752 16,21 2,649 St.Sutarve-2018 552,14 Vert. 904 15,14 2,649 St.Sutarve-2018 552,18 Hori. 771 15,11 2,646 St.Sutarve-2018 552,18 Hori. 428 13,26 2,647 St.Sutarve-2018 553,80 Hori. 413 12,65 2,645 St.Sutarve-2018 554,80 Hori. 413 12,65 2,645 St.Sutarve-2018 555,51 Hori. 681 14,68 2,651 St.Sutarve-2018 556,11 Hori. 1105 16,52 2,650 St.Sutarve-2018 557,68 Hori. 951 16,52 2,647 St.Sutarve-2018 559,11 Vert. 846 17,62 2,648 St.Sutarve-2018 559,16 Hori. 1739 18,25 2,646 St.Sutarve	St.Sutarve-2018	550.09	Vert.	315	15.17	2.647
St.Sutarve-2018550,52Hori.108716,412,653St.Sutarve-2018551,71Hori.75216,212,649St.Sutarve-2018552,14Vert.90415,142,649St.Sutarve-2018552,18Hori.77115,112,646St.Sutarve-2018553,80Hori.42813,262,647St.Sutarve-2018554,80Hori.41312,652,645St.Sutarve-2018555,51Hori.68114,682,651St.Sutarve-2018556,11Hori.110516,392,650St.Sutarve-2018557,68Hori.95116,522,647St.Sutarve-2018558,30Hori.110316,822,647St.Sutarve-2018559,11Vert.84617,622,648St.Sutarve-2018559,16Hori.173918,252,646St.Sutarve-2018559,92Hori.97616,972,648St.Sutarve-2018561,96Hori.100314,942,646St.Sutarve-2018562,87Hori.119616,492,650St.Sutarve-2018563,97Vert.333918,492,644St.Sutarve-2018564,08Hori267218,252,644	St.Sutarve-2018	550.13	Hori	514	16.87	2.656
St.Sutarve-2018551,71Hori.75216,712,649St.Sutarve-2018552,14Vert.90415,142,649St.Sutarve-2018552,18Hori.77115,112,646St.Sutarve-2018553,80Hori.42813,262,647St.Sutarve-2018554,80Hori.41312,652,645St.Sutarve-2018555,51Hori.68114,682,651St.Sutarve-2018556,11Hori.110516,392,650St.Sutarve-2018557,68Hori.95116,522,647St.Sutarve-2018559,11Vert.84617,622,648St.Sutarve-2018559,16Hori.173918,252,646St.Sutarve-2018559,92Hori.97616,972,648St.Sutarve-2018561,96Hori.100314,942,646St.Sutarve-2018562,87Hori.119616,492,650St.Sutarve-2018563,97Vert.333918,492,644St.Sutarve-2018564,08Hori267218,252,644	St.Sutarve-2018	550,52	Hori.	1087	16,41	2,653
St.Sutarve-2018552,14Vert.90415,142,649St.Sutarve-2018552,18Hori.77115,112,646St.Sutarve-2018553,80Hori.42813,262,647St.Sutarve-2018554,80Hori.41312,652,645St.Sutarve-2018555,51Hori.68114,682,651St.Sutarve-2018556,11Hori.110516,392,650St.Sutarve-2018557,68Hori.95116,522,647St.Sutarve-2018558,30Hori.110316,822,647St.Sutarve-2018559,11Vert.84617,622,648St.Sutarve-2018559,16Hori.173918,252,646St.Sutarve-2018559,92Hori.97616,972,648St.Sutarve-2018561,96Hori.100314,942,646St.Sutarve-2018562,87Hori.119616,492,650St.Sutarve-2018563,97Vert.333918,492,644St.Sutarve-2018564,08Hori267218,252,644	St.Sutarve-2018	551,71	Hori	752	16.21	2,649
St.Sutarve-2018 552,18 Hori. 771 15,11 2,646 St.Sutarve-2018 553,80 Hori. 428 13,26 2,647 St.Sutarve-2018 554,80 Hori. 413 12,65 2,645 St.Sutarve-2018 555,51 Hori. 413 12,65 2,645 St.Sutarve-2018 555,51 Hori. 681 14,68 2,651 St.Sutarve-2018 556,11 Hori. 1105 16,39 2,650 St.Sutarve-2018 557,68 Hori. 951 16,52 2,647 St.Sutarve-2018 558,30 Hori. 1103 16,82 2,647 St.Sutarve-2018 559,11 Vert. 846 17,62 2,648 St.Sutarve-2018 559,16 Hori. 1739 18,25 2,646 St.Sutarve-2018 559,92 Hori. 976 16,97 2,648 St.Sutarve-2018 561,96 Hori. 1003 14,94 2,646 St.Sutarve-2018 562,87 Hori. 1196 16,49 2,650 St.Sutar	St.Sutarve-2018	552.14	Vert.	904	15,14	2,649
St.Sutarve-2018 553,80 Hori. 428 13,26 2,647 St.Sutarve-2018 554,80 Hori. 413 12,65 2,645 St.Sutarve-2018 555,51 Hori. 681 14,68 2,651 St.Sutarve-2018 555,51 Hori. 105 16,39 2,650 St.Sutarve-2018 556,11 Hori. 1105 16,52 2,647 St.Sutarve-2018 557,68 Hori. 951 16,52 2,647 St.Sutarve-2018 558,30 Hori. 1103 16,82 2,647 St.Sutarve-2018 559,11 Vert. 846 17,62 2,648 St.Sutarve-2018 559,16 Hori. 1739 18,25 2,646 St.Sutarve-2018 559,92 Hori. 976 16,97 2,648 St.Sutarve-2018 561,96 Hori. 1003 14,94 2,646 St.Sutarve-2018 562,87 Hori. 1196 16,49 2,650 St.Sutarve-2018 563,97 Vert. 3339 18,49 2,644 St.Suta	St.Sutarve-2018	552,18	Hori	771	15 11	2 646
St.Sutarve-2018 555,60 Hori. 413 12,65 2,645 St.Sutarve-2018 555,51 Hori. 681 14,68 2,651 St.Sutarve-2018 555,51 Hori. 1105 16,39 2,650 St.Sutarve-2018 556,11 Hori. 1105 16,52 2,651 St.Sutarve-2018 557,68 Hori. 951 16,52 2,647 St.Sutarve-2018 558,30 Hori. 1103 16,82 2,647 St.Sutarve-2018 559,11 Vert. 846 17,62 2,648 St.Sutarve-2018 559,16 Hori. 1739 18,25 2,646 St.Sutarve-2018 559,92 Hori. 976 16,97 2,648 St.Sutarve-2018 561,96 Hori. 1003 14,94 2,646 St.Sutarve-2018 562,87 Hori. 1196 16,49 2,650 St.Sutarve-2018 563,97 Vert. 3339 18,49 2,644 St.Sutarve-2018 564,08 Hori. 2672 18,25 2,644	St.Sutarve-2018	553.80	Hori	428	13,26	2,647
St.Sutarve-2018 555,51 Hori. 681 14,68 2,651 St.Sutarve-2018 556,11 Hori. 1105 16,39 2,650 St.Sutarve-2018 557,68 Hori. 951 16,52 2,651 St.Sutarve-2018 557,68 Hori. 1103 16,82 2,647 St.Sutarve-2018 558,30 Hori. 1103 16,82 2,647 St.Sutarve-2018 559,11 Vert. 846 17,62 2,648 St.Sutarve-2018 559,16 Hori. 1739 18,25 2,646 St.Sutarve-2018 559,92 Hori. 976 16,97 2,648 St.Sutarve-2018 561,96 Hori. 1003 14,94 2,646 St.Sutarve-2018 562,87 Hori. 1003 14,94 2,646 St.Sutarve-2018 562,87 Hori. 1196 16,49 2,650 St.Sutarve-2018 563,97 Vert. 3339 18,49 2,644 St.Sutarve-2018 564,08 Hori. 2672 18,25 2,644	St.Sutarve-2018	554,80	Hori	413	12,20	2,645
St.Sutarve-2018 555,51 Hori. 661 14,66 2,651 St.Sutarve-2018 556,11 Hori. 1105 16,39 2,650 St.Sutarve-2018 557,68 Hori. 951 16,52 2,651 St.Sutarve-2018 558,30 Hori. 1103 16,82 2,647 St.Sutarve-2018 559,11 Vert. 846 17,62 2,648 St.Sutarve-2018 559,16 Hori. 1739 18,25 2,646 St.Sutarve-2018 559,92 Hori. 976 16,97 2,648 St.Sutarve-2018 561,96 Hori. 1003 14,94 2,646 St.Sutarve-2018 562,87 Hori. 1003 14,94 2,646 St.Sutarve-2018 562,87 Hori. 1196 16,49 2,650 St.Sutarve-2018 563,97 Vert. 3339 18,49 2,644 St.Sutarve-2018 564,08 Hori. 2672 19,35 2,645	St.Sutarve-2018	555 51	Hori	681	14.68	2,651
St.Sutarve-2018 557,68 Hori. 951 16,52 2,651 St.Sutarve-2018 558,30 Hori. 1103 16,82 2,647 St.Sutarve-2018 559,11 Vert. 846 17,62 2,648 St.Sutarve-2018 559,16 Hori. 1739 18,25 2,646 St.Sutarve-2018 559,92 Hori. 976 16,97 2,648 St.Sutarve-2018 561,96 Hori. 1003 14,94 2,646 St.Sutarve-2018 562,87 Hori. 1196 16,49 2,650 St.Sutarve-2018 563,97 Vert. 3339 18,49 2,644 St.Sutarve-2018 564,08 Hori. 2672 19,35 2,644	St.Sutarve-2018	556 11	Hori	1105	16.39	2,001
St.Sutarve-2018 558,30 Hori. 1103 16,82 2,647 St.Sutarve-2018 559,11 Vert. 846 17,62 2,648 St.Sutarve-2018 559,16 Hori. 1739 18,25 2,646 St.Sutarve-2018 559,92 Hori. 976 16,97 2,648 St.Sutarve-2018 561,96 Hori. 1003 14,94 2,646 St.Sutarve-2018 562,87 Hori. 1196 16,49 2,650 St.Sutarve-2018 563,97 Vert. 3339 18,49 2,644 St.Sutarve-2018 564,08 Hori. 2672 18,25 2,644	St.Sutarve-2018	557.68	Hori	951	16,55	2,650
St.Sutarve-2018 559,11 Vert. 846 17,62 2,648 St.Sutarve-2018 559,16 Hori. 1739 18,25 2,646 St.Sutarve-2018 559,92 Hori. 976 16,97 2,648 St.Sutarve-2018 561,96 Hori. 1003 14,94 2,646 St.Sutarve-2018 562,87 Hori. 1196 16,49 2,650 St.Sutarve-2018 563,97 Vert. 3339 18,49 2,644 St.Sutarve-2018 564,08 Hori. 2673 18,25 2,645	St.Sutarve-2018	558 20	Hori	1103	16.82	2,031
St.Sutarve-2018 559,16 Hori. 1739 18,25 2,646 St.Sutarve-2018 559,92 Hori. 976 16,97 2,648 St.Sutarve-2018 561,96 Hori. 1003 14,94 2,646 St.Sutarve-2018 562,87 Hori. 1196 16,49 2,650 St.Sutarve-2018 563,97 Vert. 3339 18,49 2,644 St.Sutarve-2018 564,08 Hori. 2673 18,25 2,644	St.Sutarve-2018	550,50	Vert	846	17.62	2,047
St.Sutarve-2018 559,92 Hori. 976 16,97 2,648 St.Sutarve-2018 561,96 Hori. 1003 14,94 2,646 St.Sutarve-2018 562,87 Hori. 1196 16,49 2,650 St.Sutarve-2018 563,97 Vert. 3339 18,49 2,644 St.Sutarve-2018 564,08 Hori. 2672 18,25 2,644	St.Sutarve-2018	559,11	Hori	1720	19.25	2,040
St.Sutarve-2018 561,96 Hori. 1003 14,94 2,646 St.Sutarve-2018 562,87 Hori. 1196 16,49 2,650 St.Sutarve-2018 563,97 Vert. 3339 18,49 2,644 St.Sutarve-2018 564,08 Hori 2672 18,25 2,644	St.Sutarve-2018	550 02	Hori	1/33	16,25	2,040
St.Sutarve-2018 562,87 Hori. 1003 14,94 2,640 St.Sutarve-2018 562,87 Hori. 1196 16,49 2,650 St.Sutarve-2018 563,97 Vert. 3339 18,49 2,644 St.Sutarve-2018 564.08 Hori 2672 18,25 2,645	St.Sutarve-2018	553,32	Hori	1002	14.04	2,040
St.Sutario 2010 562,87 Fight 1196 16,49 2,650 St.Sutarve-2018 563,97 Vert. 3339 18,49 2,644 St.Sutarve-2018 564.08 Hori 2672 18.25 2.645	St Sutarve-2018	562.97		1100	16.40	2,040
St.Sutarve-2018 564.08 Hori 2672 19.25 2.644	St. Sutarve-2018	502,87	Nort	2220	10,49	2,000
	St.Sutarve-2018	56/ 02	Hori	2672	18 25	2,044

*KB= Kelly bushing, Hori. Vert. = horisontell respektive vertikal riktning på mätningen av permeabiliteten.


BILAGA 3. SAMMANSTÄLLNING AV XRF-DATA FRÅN BURGSVIKFORMATIONEN I ST.SUTARVE-2018