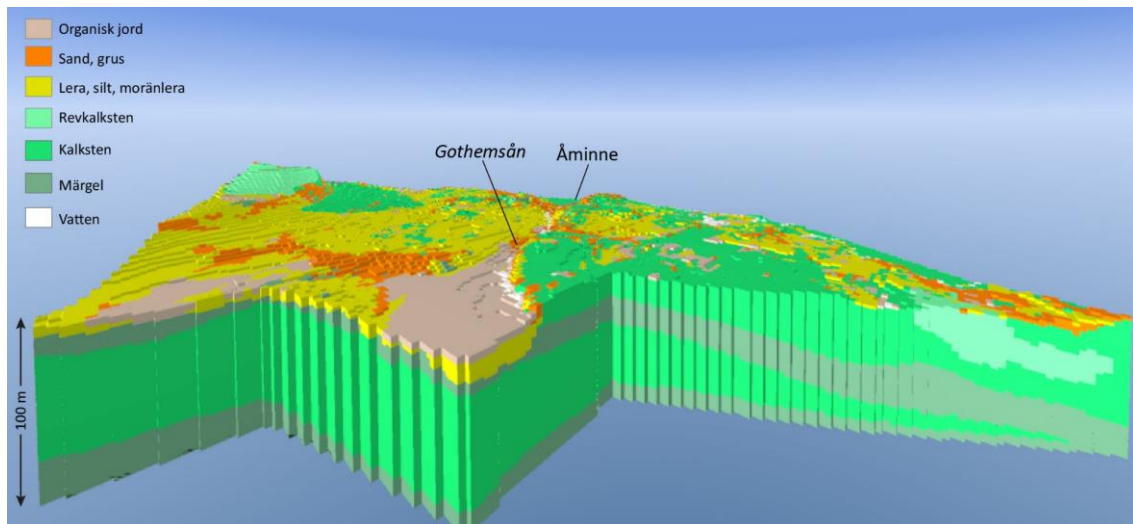


Gotland

Lena Persson

september 2021

SGU-rapport 2021:27



Omslagsbild: Utsnitt ur 3D litologisk voxelmodell på östra sidan av Gotland i närheten av Åminne. Beträktelsepunkten ligger i sydväst och den vertikala skalan är överdriven 25 gånger i förhållande till den horisontella.
Modellen är framtagen av Lena Persson.

Författare: Lena Persson

Granskad av: Linda Wickström och Colby Smith

Ansvarig avdelningschef: Helena Kjellson

Redaktör: Åsa Gierup

Sveriges geologiska undersökning

Box 670, 751 28 Uppsala

tel: 018-17 90 00

e-post: sgu@sgu.se

www.sgu.se

INNEHÅLL

Sammanfattning.....	4
Inledning.....	4
Intressenter och samarbetspartner	4
Syfte och mål.....	5
Underlag.....	5
Flygburna TEM-mätningar.....	5
Geofysiska markmätningar.....	5
ERT och RMT.....	5
Reflektionsseismik.....	5
Brunnsarkiv och borrhningar	7
Övriga kartor och databaser.....	7
Terrängläge och geologisk översikt.....	8
Jordlager	8
Berggrund.....	8
Hydrogeologiska förhållanden och vattenförsörjning på Gotland.....	8
Grundvatten i jord	9
Grundvatten i berg.....	9
Metoder.....	9
Stratigrafisk lager- och voxelmodell.....	9
Litologisk modell	9
Jordartsmodell.....	10
Berggrundsmodell	10
Saltvattenmodell.....	11
Modellens begränsningar och osäkerhet.....	12
Resultat.....	12
Stratigrafisk lager- och voxelmodell.....	12
Litologisk modell	13
Saltvattenmodell.....	15
Resistivitetsmodell	15
Referenser.....	16
Bilaga 1. Lithological model construction, documentation	

SAMMANFATTNING

Geologiska 3D-modeller har tagits fram över jord- och berglagren på Gotland. Modellerna bygger på resistivitetsmodeller från flygburna transient elektromagnetiska mätningar (TEM), reflektionsseismiska data, markgeofysiska data, analys av borrhålsuppgifter samt jordarts- och berggrundsinformation från SGUs databaser. Fyra olika 3D-modeller har tagits fram:

- Stratigrafisk lager- och voxelmodell
Modellen visar den sedimentära berggrunden på Gotland som innefattar berggrundsavsnittet från Hamraformationen i silur ner till ca 250 m under havsytans nivå motsvarande djupet till toppen av den ordoviciska berggrunden. Cellstorleken på voxelmodellen är $100 \times 100 \times 5$ m.
- Litologisk voxelmodell
Modellen visar berggrunden och jordlagren som slagits ihop till en gemensam modell med cellstorleken $100 \times 100 \times 2$ m. Den litologiska modellen går ner till 76 m under havsytans nivå.
- Saltvattenmodell
Modellen finns både som lagermodell (gräns till salt grundvatten) och voxelmodell. Voxelmodellen består av två klasser, för salt och sött vatten, som visas med en cellstorlek på $100 \times 100 \times 2$ m.
- Resistivitetsmodell
Modellen är en voxelmodell som består av resistivitetsdata framtagna från flygburna TEM-mätningar som har interpolerats över de områden som täcks av mätningarna. Voxelmodellen finns i två storlekar, en med högre vertikal upplösning ($100 \times 100 \times 2$ m) ner till 76 m under havsytans nivå och en med lägre upplösning ($100 \times 100 \times 5$ m) ner till 250 m under havsytans nivå.

INLEDNING

Modellerna har tagits fram inom projektet ”Geodata i 3D” vid SGU. Projektets syfte är att utveckla SGUs arbete med 3D-modellering med särskilt fokus på grundvatten och dricksvattenförsörjning. Projektet ingår som en del av regeringens uppdrag till SGU angående utökad kartläggning och karaktärisering av grundvattenresurser (2018–2020). Även Region Gotland har finansierat delar av arbetet.

Modellerna bygger till stor del på de undersökningar och tolkningar som utförts inom projekten ”SkyTEM-undersökningar på Gotland del 1” och ”SkyTEM-undersökningar på Gotland del 2” (Dahlqvist m. fl. 2015, 2017). Modellerna har tagits fram i samarbete med Flemming Jørgensen (tidigare GEUS numera Region Midtjylland) och Mats Lundh Gulbrandsen (I-GIS A/S) enligt en metodik baserad på en kombination av lager- och voxelmodellering (Jørgensen m. fl. 2013, 2018, Gulbrandsen m.fl. 2018).

All modellering har skett i programvaran Geoscene 3D (I-GIS).

Modelleringsledare på SGU har varit Peter Dahlqvist och Lena Persson.

Intressenter och samarbetspartner

Huvudsakliga intressenter som modellen vänder sig till är Region Gotland, länsstyrelsen, vattenmyndigheten, konsulter och universitet. Modellerna kan även användas av privatpersoner för att t.ex. hitta lämpliga platser för att borra nya brunnar.

SYFTE OCH MÅL

3D-modellerna täcker hela Gotland och Fårö (fig. 1). Syftet är att ge en översiktlig bild av den sedimentära berggrundens och jordlagrens uppbyggnad. Exempel på användningsområden är grundvattensprospektering, undermarksarbeten, vattenförvaltning samt sårbarhets- och riskanalyser kopplade till markanvändning.

Den litologiska voxelmodellen är tänkt att användas i skalan 1:200 000, med beaktande av de osäkerheter som finns i klassningar och avgränsningar av jord- och berglager under markytan. Modellen är mer översiktlig i områden som inte har undersökts med SkyTEM.

UNDERLAG

Flygburna TEM-mätningar

Undersökningar med flygburen TEM har utförts i två omgångar (2013 och 2015) och täcker ca 1 200 km², dvs. drygt en tredjedel av Gotlands yta (fig. 1). Undersökningarna utfördes av det danska företaget SkyTEM Aps, längs parallella linjer med 200 m linjeavstånd. SkyTEM (som även är benämningen på själva mätsystemet) är ett helikopterburet elektromagnetiskt mätsystem (för en utförlig beskrivning av metoden se bl.a. Dahlqvist m.fl. 2015, 2017).

Insamlade data har bearbetats och modellerats i programvaran Aarhus Workbench (Aarhus GeoSoftware). Vid bearbetningen rensas data som är påverkade av t.ex. kraftledning bort. Med så kallad inversionsteknik skapas därefter en resistivitetsmodell för varje mätpunkt som visar resistivitetsfördelningen i marken ner till 200–300 m djup. Variationerna i jordlagrens och berggrundens elektriska resistivitet på Gotland beror framför allt på förekomst av lermineral och skillnader i vattenhalt och porositet. Även vattnets salthalt är avgörande, eftersom salt grundvatten markant sänker den elektriska resistiviteten.

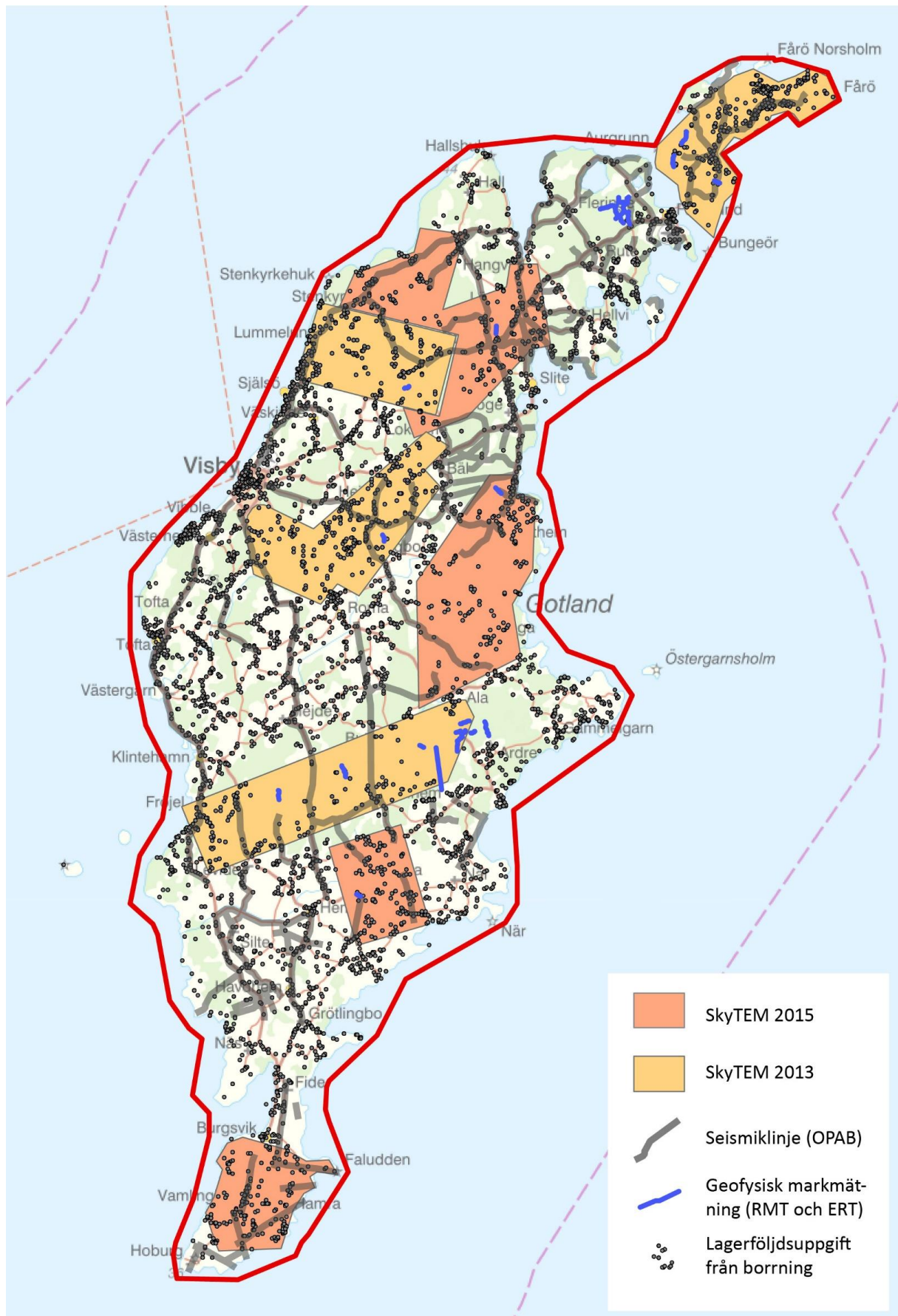
Geofysiska markmätningar

ERT och RMT

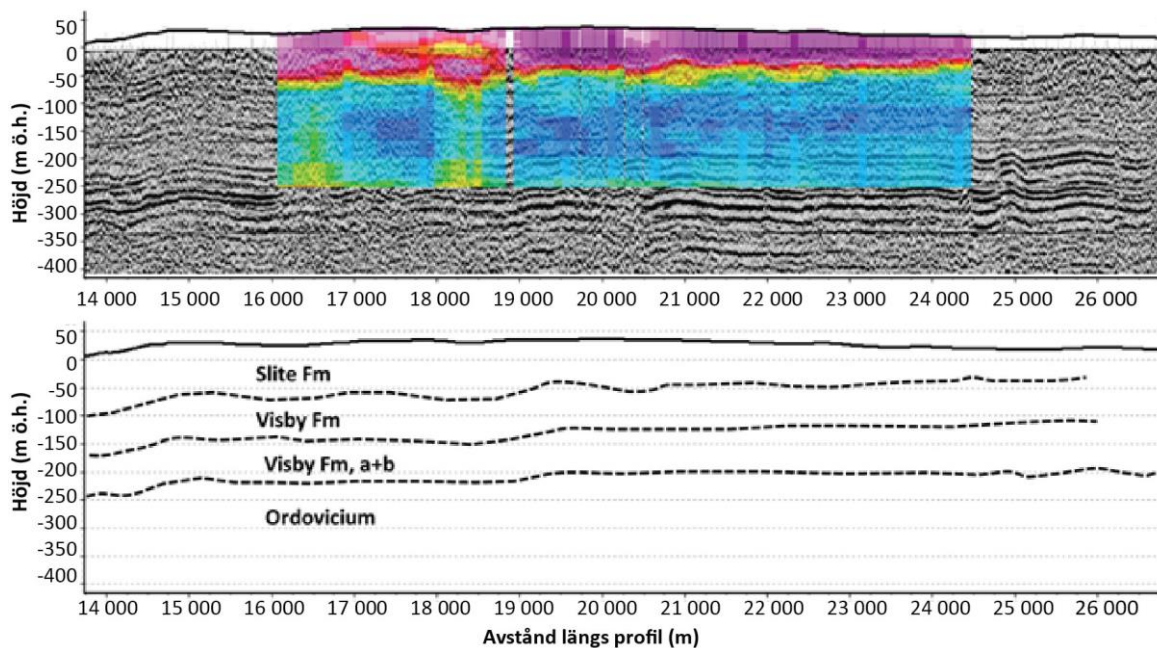
SGU har i samband med olika kartläggnings- och uppdragsprojekt utfört elektriska och elektromagnetiska profilmätningar med ERT (elektrisk resistivitetstomografi) respektive RMT (radiomagnetotellurik). Totalt har 30 profiler från dessa mätningar använts i 3D-modelleringen. Resistivitetsmodellerna från 2D-inversion av data längs profilerna har importerats till Geoscene-arbetsytan som bildar tagna från tidigare rapporter (Erlström m.fl. 2009, Erlström & Persson 2014, Perttu m.fl. 2012, Dahlquist m.fl. 2015, 2017).

Reflektionsseismik

Seismiska data från oljeprospekteringsmätningar (OPAB) har använts i tolkningen av främst den stratigrafiska lagermodellen. Totalt finns 650 linjer tillgängliga över Gotland. Av dessa valdes 102 linjer ut, där det finns geologisk och stratigrafisk information från de översta 300 m. Linjerna importerades, som rasterbilder (skannade seismiska sektioner), till GeoScene 3D (fig. 1, 2).



Figur 1. Modellområdet på Gotland och det dataunderlag som använts vid modelleringen. Röd linje visar modellens avgränsning.



Figur 2. Exempel på seismisk sektion (ovan i svartvitt) och resistivitetsmodell (ovan i färg) som använts vid tolkningen av stratigrafiska lager (nedan) (modifierad från Jørgensen m.fl. 2018). För mer information om de stratigrafiska lagren hänvisas läsaren till tabell 1 (där "Visby Fm"="Visby övre" och "Visby Fm, a+b"="Zon A" och "Zon B").

Brunnsarkiv och borrhningar

Information om jordlagerföljder har hämtats från SGUs databaser. Majoriteten av lagerföljdsinformationen kommer från Brunnsarkivet som består av borrhprotokoll inskickade från borrhningar, framför allt för enskild vattenförsörjning och energibrunnar. Totalt har data från 5 583 brunnar och sammanlagt 775 sonderingar från SGUs jord- och grundvattenkartläggning ingått som underlag (fig. 1). Den geografiska noggrannheten för brunnsuppgifter kan ha en positionsosäkerhet på över 200 m.

Kvaliteten på inhämtat underlag om lagerföljder varierar stort beroende på vad syftet med borrhningen varit. En borrhning från SGUs jordartskartläggning har i regel pålitlig information för i princip varje meter, medan det vid en borrhning för en energibrunn till en villa ibland endast anges övergång mellan jord och berg. I arbetet med att ta fram en enhetlig lagerföljdsbedömning har en sammanslagning och förenkling gjorts av de hundratals olika uppgifter om lagerföljder som finns i databaserna.

Information från 31 borrhningar med geofysiska borrhlogslogningar, som utförts av Oljeprospektering AB (OPAB) under 1960-, 70- och 80-talen har tolkats.

Övriga kartor och databaser

- Lantmäteriets höjddata GSD-Höjddata, grid 2+ (2018), som sedan har gjorts om till ett 50×50 m grid.
- SGUs jorddjupsmodell. Modellen har använts för att initialt definiera berggrundsytan. Denna yta har efter hand justerats med hänsyn till ny information, framför allt resistivitetsmodeller från SkyTEM-data och nya borrhlogsuppgifter.
- SGUs jordartskarta. Skalan i modellområdet är 1:100 000.
- SGUs berggrundskarta. Skalan i modellområdet är 1:250 000.

TERRÄNGLÄGE OCH GEOLOGISK ÖVERSIKT

En kortfattad beskrivning av Gotlands jordarter, berggrund och hydrogeologiska förhållanden ges. För en mer utförlig beskrivning se Dahlqvist m.fl. (2015, 2017) och referenser i rapporterna.

Jordlager

Ungefär en fjärdedel av Gotlands yta saknar, eller har ett mycket tunt och osammanhängande, jordtäckte. Morän är den vanligast förekommande jordarten på Gotland. Moränen är finkornig med hög lerhalt, vilket är en konsekvens av att berggrunden till stor del utgörs av relativt mjuka karbonatbergarter. De största områdena med morän påträffas i de centrala norra delarna av ön. I de kalkstensdominerade områdena som oftast sammanfaller med den högre liggande terrängen saknas morän och ofta även andra jordarter.

Den enda större isälvsavlagringen är Tingstädeåsen vid Tingstäde träsk. Avsaknaden av isälvsavlagringar är en konsekvens av den omfattande omlagringen av jordarter som skett. De isälvsavlagringar som tidigare fanns har successivt bearbetats av vågor och omlagrats och påträffas nu som svallgrus och svallsand. Ett exempel på omlagring av en trolig isälvsavlagring är Sveriges största sanddynsområde, Avanäs, på östra delen av Fårö.

De torvmarker som finns på Gotland är ofta grunda och utdikade. I anslutning till dikade större torvmarker förekommer ofta områden med kalkrika sjösediment, i form av bleke och kalkgyttja, som också har torrlagts i samband med utdikning.

Berggrund

Gotlands berggrund domineras av siluriska karbonatbergarter som successivt tilltar i mäktighet och stratigrafisk representation söderut. Den siluriska lagerföljden har en sammanlagd mäktighet på 500–750 m och stupar svagt ($0,2\text{--}0,4^\circ$) åt sydsydost. Under dessa lager påträffas en ca 100 m mäktig ordovicisk kalkstensekvens och ca 125 m med kambrisk siltsten, sandsten och lerskiffer som i sin tur överlagrar den prekambrisk kristallina berggrunden. De siluriska bergarterna som bygger upp den översta delen av berggrunden representerar en tidsperiod på ca 10 miljoner år (428–418 Ma). De äldsta siluriska berggrundsavsnitten är blottade utmed Gotlands nordvästra kust, t.ex. vid Lickershamn och Ireviken, medan de yngsta blottade lagren påträffas på Sudret längst ner på södra Gotland.

Till skillnad från de ytligt liggande berggrundslagren är den siluriska berggrundens uppbyggnad på djupet inte lika väl känd. Baserat på tillgänglig information domineras den djupare liggande siluriska berggrunden av lerig kalksten, mörkelsten, mörkel och lersten, till skillnad från den mer kalkstensdominerade ytliga berggrunden.

På Gotland finns tre större kalkstensdominerade områden, ett som sträcker sig från strax söder om Visby upp till Fårö, ett på mellersta Gotland och ett tredje längst ner i söder på Sudret. Mellan dessa områden i låglänt terräng domineras ytberggrunden av lerig kalksten, mörkel och mörkelsten, t.ex. Slite mörkel och Hemse mörkel.

Hydrogeologiska förhållanden och vattenförsörjning på Gotland

Gotland har ofta brist på dricksvatten under sommarperioden. Orsaken är främst den ökade vattenförbrukningen på grund av turister och sommarboende, samtidigt som påfyllningen av grundvattenmagasinen under perioden är försumbar. Ytterligare en orsak till vattenbristen är att det saknas större grundvattenmagasin. Tunna jordlager i kombination med en relativt tät berggrund gör att merparten av nederbörden som faller under höst–vinter–vår inte bildar grundvatten utan rinner av från markytan, ofta som tillfälliga ytvattendrag till Östersjön. Grund-

vattenbildningen under sommarperioden är också begränsad på grund av liten nederbördsmängd, hög avdunstning och vegetationens vattenupptag. Förutom bristen på större grundvattenmagasin påträffas salt grundvatten relativt ytligt i berggrunden, vilket ytterligare begränsar bergvolymen där det kan finnas grundvatten med god dricksvattenkvalitet.

Grundvatten i jord

Eftersom jordlagrens mäktighet vanligtvis är mindre än 5 m har uttagsmöjligheterna i jordlagren oftast en marginell betydelse. De få sand- och grusavlagringar som finns är små, och har mest en lokal betydelse för vattenförsörjningen. Störst betydelse har grundvattenförekomsterna i jordlagren genom att tjäna som utjämningsmagasin för grundvattenbildningen till berggrunden. Jordtäcknet kan genom sin relativt höga porositet lagra stora mängder nederbörd som så småningom tillförs grundvattenmagasinen i berggrunden.

Grundvatten i berg

På Gotland finns grundvatten framför allt i berggrundens sprickor och porer. I huvudsak kan berggrunden klassificeras som en sprickakvifer. Det skapar i sin tur anisotropa hydrauliska egenskaper, vilket betyder att grundvattnet företrädesvis påträffas i sprickrika områden och att det är svårt att förutsäga de laterala och vertikala grundvattenförhållandena. Förutom variationer inom respektive bergartsdomän finns även hydrauliska barriärer och uthålliga konduktiva sprickor som påverkar grundvattensituationen. Förekomst av karstvittrad kalkstensberggrund är ytterligare en faktor att ta hänsyn till när det gäller bedömning av grundvattenmagasinens påfyllnad och sårbarhet.

METODER

All modellering har skett i programvaran Geoscene 3D (I-GIS).

Stratigrafisk lager- och voxelmodell

Lagermodellen har tagits fram genom att tolkningspunkter lagts in manuellt längs profiler så att de bildar ett regelbundet nätverk med ungefär samma avstånd mellan varje punkt. I områden med dålig täckning av data kan avståndet mellan tolkningspunkterna vara större. Därefter har varje punktskikt interpolerats till en yta med cellstorlek 500×500 m. För överytan på ordovicium är cellstorleken 250×250 m.

Tolkningspunkterna är lagrade i en Access-databas där punkttypen anger vilken typ av data som tolkningen baseras på: borrhning, geofysiska markmätningar (ERT, RMT, seismik), flygburna TEM-data eller ingen data (hjälpunkt).

Voxelmodellen har tagits fram från lagermodellen med en cellstorlek på $100 \times 100 \times 5$ m och går ner till 250 m under havsytans nivå.

Litologisk modell

Den litologiska modellen består av berggrunden och jordlagren som slagits ihop till en gemensam voxelmodell med cellstorlek på $100 \times 100 \times 2$ m. Över de områden som är täckta med SkyTEM-mätningar har en ny tolkning av berggrundens överyta gjorts och i övriga områden har SGUs jorddjupsmodell (som främst är baserad på borrhningar) använts.

Jordartsmodell

Den litologiska jordartsmodellen har gjorts med voxelmodellering för jordlagren och har utförts enligt följande arbetsflöde (Gulbrandsen m.fl. 2018):

Utanför områden med SkyTEM-mätningar:

- Alla celler från terrängen ner till berggrundens överyta har tilldelats litologin från SGUs jordartskarta.
- De voxlar som genomskärs av ett borrhål har tilldelats den jordartsinformation som finns i borrhålet.

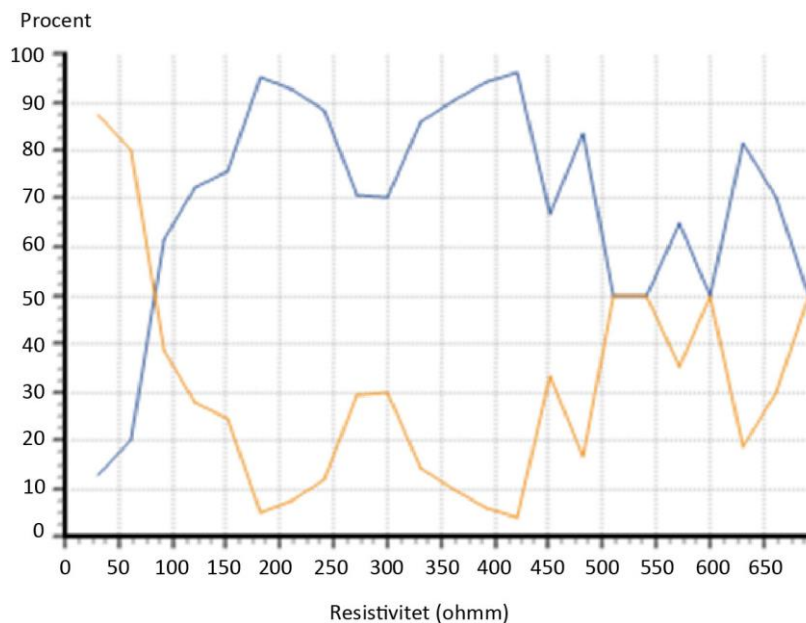
Inom områden med SkyTEM mätningar:

- Områden med lera har generellt betydligt lägre resistivitet än sand och grus. Med hjälp av sannolikhetsanalys på de resistivitetsmodeller som tagits fram ur SkyTEM-data och litologi från borrhningar har en gräns på 80 ohmm uppskattats (fig. 3). Voxlar med en resistivitet mindre än 80 ohmm har klassats som lera, medan voxlar med en resistivitet större än 80 ohmm har klassats som sand.
- För de tre klasserna sand/grus, lera/moränlera och fyllning har den översta voxeln (från markytan och 2 m ner) tilldelats litologin från SGUs jordartskarta. För klasserna vatten och organisk jord har två voxlar (från markytan och 4 m ner) tilldelats litologin från SGUs jordartskarta.
- De voxlar som genomskärs av ett borrhål har tilldelats den jordartsinformation som finns i borrhålet.

Berggrundsmodell

Den litologiska berggrundsmodellen har tagits fram enligt en metodik baserad på en kombination av lager- och voxelmodellering (Jørgensen m.fl. 2013, 2018). Metoden (detaljerat beskriven i bilaga 1) varierar från område till område på Gotland.

Den stratigrafiska lagermodellen har använts som grund vid den litologiska modelleringen eftersom vissa litologiska gränser även sammanfaller med lagermodellens gränser. Inom områden med flygburna TEM-mätningar har resistivitetsmodellerna använts för att urskilja mägerl, kalksten och revkalksten. Mägerl och mägerlsten har generellt låg resistivitet (mindre än 70 ohmm) och kan därför urskiljas från kalksten med högre resistivitet. Revkalksten har mycket hög resistivitet (större än 400 ohmm) och kan därför urskiljas från kalksten med något lägre resistivitet. Sandsten (Burgsviksformationen) är kartlagd i ett flertal borrhningar och kan i vissa fall även urskiljas i resistivitetsmodellerna.



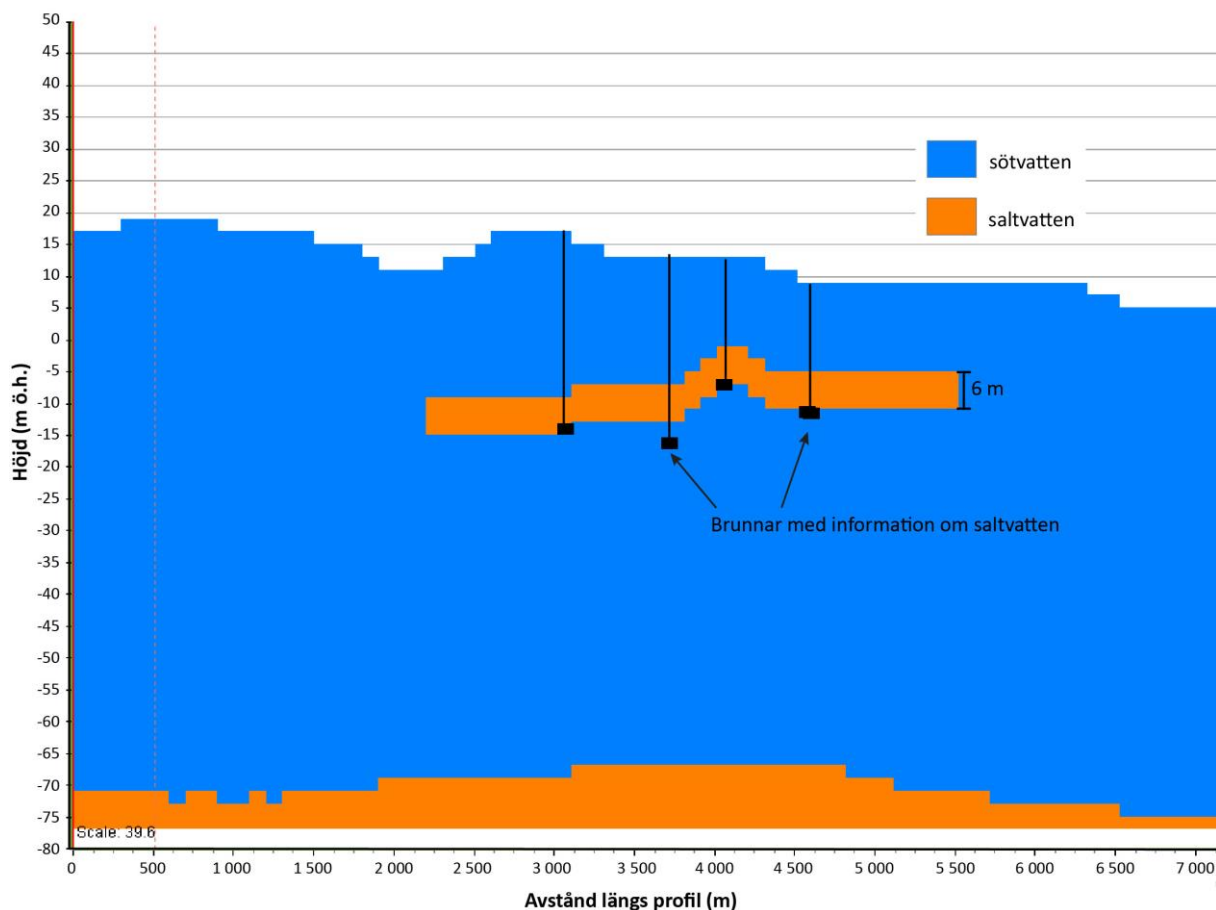
Figur 3. Kurvorna i diagrammet visar sannolikheten för förekomst av sand (blå linje) respektive lera (gul linje) för olika resistiviteter inom områden undersökta med flygburna TEM-mätningar på Gotland.

Saltvattenmodell

Förekomst av salt grundvatten sänker den elektriska resistiviteten och undersökningar inom projekten ”SkyTEM-undersökningar på Gotland del 1” och ”SkyTEM-undersökningar på Gotland del 2” (Dahlqvist m.fl. 2015, 2017) har visat att resistiviteter mindre än ca 40 ohmm indikerar förekomst av saltpåverkat vatten i berggrunden. Gränsen på 40 ohmm sammanfaller i många fall med gränsen till ett undre märgellager, och det är därför svårt att avgöra om den sänkta resistiviteten beror på förekomst av saltvatten eller lermineral (eller både saltvatten och lermineral). I vissa områden, t.ex. på mellersta Gotland och på nordvästra Fårö finns revkalksten med hög resistivitet och relativt stort djupgående (ner till 100 m). Eftersom porositeten är mycket låg inom områden med revkalksten är det möjligt att saltvattengränsen i dessa områden ligger ytligare än vid resistiviteten 40 ohmm.

Inom områden med flygburen TEM-mätning har resistivitetsmodellerna använts för att lägga in tolkningspunkter vid 40 ohmm, som sedan interpolerats till en yta. I områden som saknar flygburen TEM-mätning har överytan av det undre märgellagret använts som gräns. Inom Bungeområdet (se bilaga 1) har överytan av enheten ”Visby övre” använts som gräns. Från saltvattenytan har sedan en voxelmodell tagits fram med de två klasserna sötvatten och saltvatten.

Voxelmodellen har sedan kompletterats med information från Brunnarsarkivet där det finns kommentar om att saltvatten påträffats i borrhål som ligger ovanför gränsen till saltvattenytan. Inom modellområdet finns 655 brunnar med kommentar om salt grundvatten eller där uppmätt kloridhalt överstiger 300 mg/l. I 80 av dessa brunnar finns även information om vid vilket djup saltvatten har påträffats. Dessa data har lagts in i modellen som punkter (x,y,z). Där djupuppgift (z) saknas har brunnens totaldjup använts. Punkterna har sedan interpolerats (sökradie 500 m och cellstorlek 50 m) till en (osammanhängande) yta som sedan konverterats till voxelceller med en total tjocklek på 6 m. Dessa voxelceller har sedan klassats som saltvatten (fig. 4).



Figur 4. Profil som visar hur brunnsinformation använts i saltvattenmodellen.

MODELLENS BEGRÄNSNINGAR OCH OSÄKERHET

3D-modellerna ger en generaliserad bild av jordlagren och berggrunden, och osäkerheten i enheternas utbredning och mäktighet kan därför vara betydande. Modellen har betydligt högre säkerhet inom områden undersökta med flygburen TEM (fig. 1.)

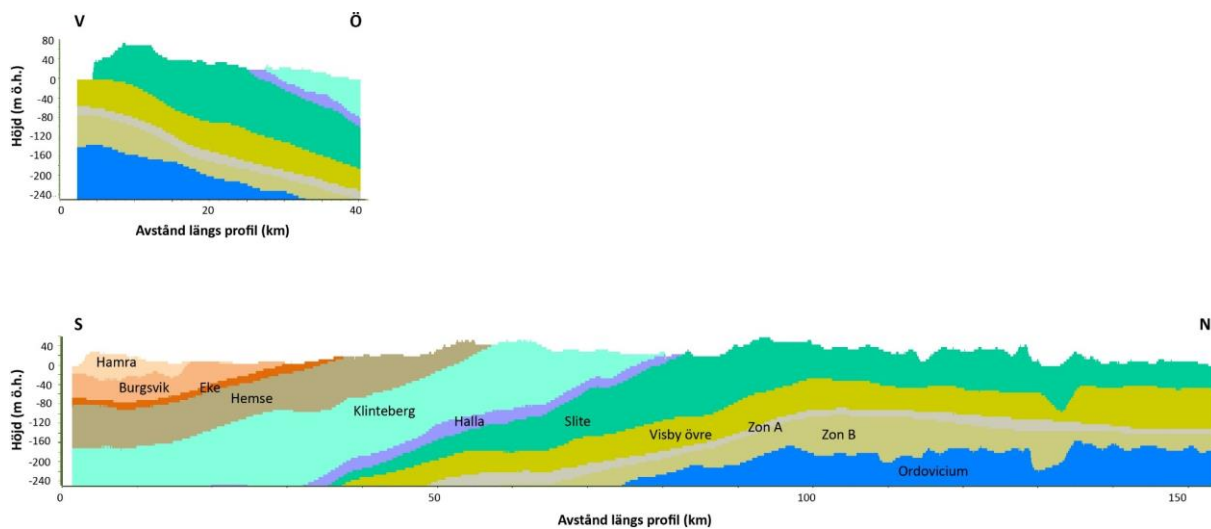
RESULTAT

Stratigrafisk lager- och voxelmodell

Lagermodellens indelning (tabell 1) innehåller totalt 11 lager från ordovicium upp till övre silur (Hamraformationen) (fig. 5). De lager som kallas Zon A och Zon B tillhör troligtvis de understa delarna av Visbyformationen. De är inte korrelerade till befintliga stratigrafiska enheter utan enbart geofysiskt definierade från borrhållsloggar i detta projekt. Den stratigrafiska modellen finns både som lagermodell och voxelmodell.

Tabell 1. Modellerade lager och voxlar i den stratigrafiska modellen.

Lager	Bergart_geoenhet	Beskrivning	Kommentar
Hamra	314_538	Lerig kalksten, algekalksten och mörgel	
Burgsvik	303_538	Sandsten, siltsten, mörgel	
Eke	313_538	Algekalksten	
Hemse	314_536, 312_538	Domineras av mörgel och mörgelsten men med ett relativt stort inslag av revkalksten i öster.	
Klinteberg	312_541, 313_538	I de nordvästra delarna dominerar kalksten och revkalksten medan växellagrad kalksten och mörgelsten dominerar i de västra delarna.	
Halla	314_541	Växellagrad mörgel och kalksten i väster, kalkstensdominerad.	
Slite	312,313, 314_541	Kalksten, mörgelsten, revkalksten	
Visby övre	314_513	Mörgelsten	
Zon A	314_513	Mörgelsten	Inte blottad i markytan
Zon B	314_513	Mörgelsten	”-
Ordovicium	312_513	Kalksten	



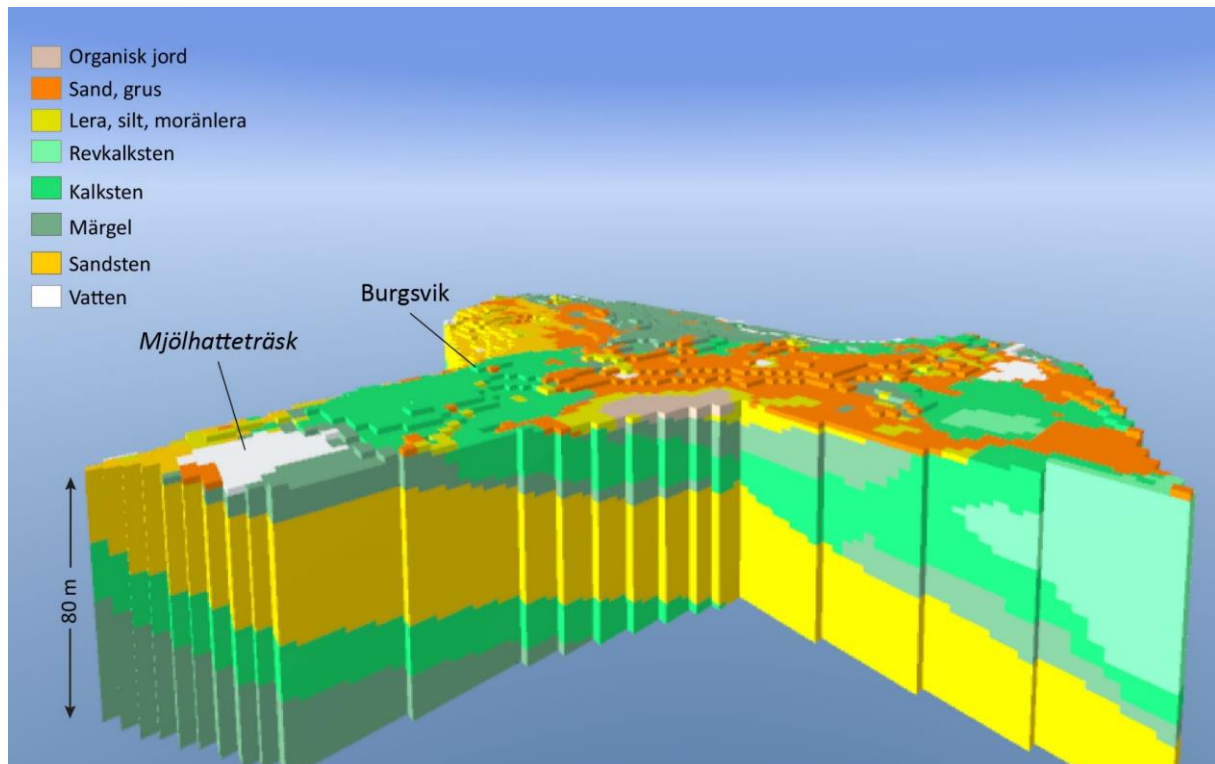
Figur 5. Stratigrafisk voxelmodell längs en öst–västlig profil (ovan) och en nord–sydlig profil (nedan) över Gotland.

Litologisk modell

Voxelmodellens jordarts- och bergartsindelning är en förenkling jämfört med SGUs jordarts- och berggrundskartor över området (tabell 2). Jordarterna har delats in i tre klasser (utöver fyllning och vatten) med liknande hydrogeologiska egenskaper: genomsläppliga jordarter (postglacial sand, grus och isälvsediment), mindre genomsläppliga jordarter (lera-silt, morän och moränlera) och organiska jordarter. Berggrunden har delats in i fyra klasser: revkalksten, kalksten, mörgel och sandsten (fig. 6).

Tabell 2. Modellerade lager och voxlar i den litologiska modellen.

Lager	Kod enligt SGUs ramverk	Beskrivning	Kommentar
Vatten	VATTEN	Vattenpolygoner har hämtats från jordartskartan.	Djupet är generaliserat i de fall uppgifter om vattendjup saknas.
Fyllning	FYLLNING	Av människan påförda jordmassor.	Fyllning utgörs av jordmassor av med skiftande sammansättning eller andra deponimassor.
Organisk jord	1_TORV_OSPEC_0		
Sand/grus ospecificerad	1_OSED_S-G_0		
Lera/silt/moränlera	1_OSED_L-Si_0		P.g.a. moränlerans innehåll kan sedimenten ibland innehålla sand, grus, och block.
Revkalksten	312		Benämns även som biohermkalksten.
Kalksten	311		Innefattar även lager med fragmentkalksten kod 313.
Märgel	314		
Sandsten	303		Inte enbart sandsten, även ett stort inslag av märgelsten.



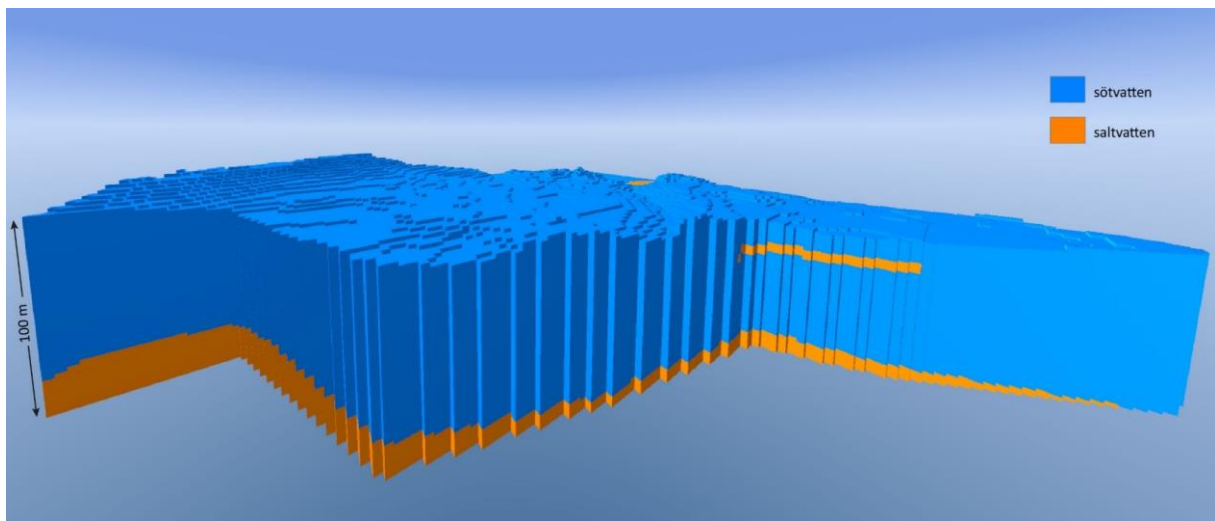
Figur 6. Utsnitt ur 3D-litologisk voxelmodell på södra delen av Gotland (Sudret) i närheten av Burgsvik. Beträktelsepunkten ligger i sydväst och den vertikala skalan är överdriven 25 gånger i förhållande till den horisontella.

Saltvattenmodell

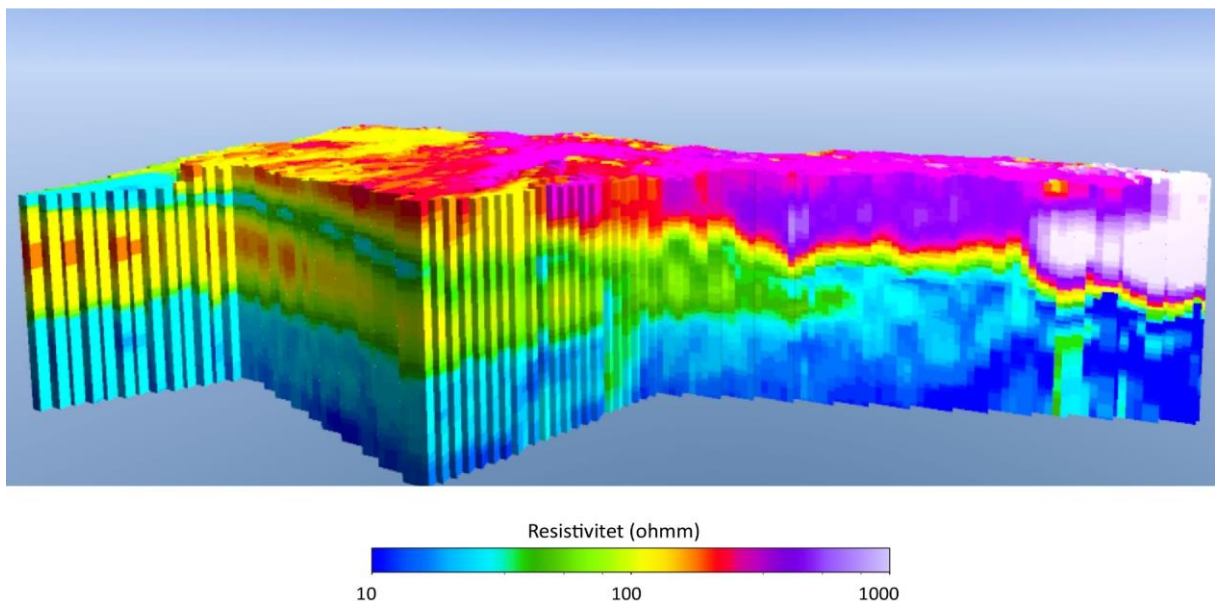
Saltvattenmodellen finns både som lagermodell (gräns till förmodad förekomst av salt grundvatten) och voxelmodell (fig. 7). Voxelmodellen har en cellstorlek på $100 \times 100 \times 2$ m.

Resistivitetsmodell

Resistivitetsdata framtagna från flygburna TEM-mätningar har interpolerats till en voxelmodell över de områden som täcks av mätningarna. Vid interpolationen användes programvaran LN GeoData Studio (GEUS). Voxelmodellen finns i två storlekar, en med högre vertikal upplösning ($100 \times 100 \times 2$ m) ner till 76 m under havsytans nivå och en med lägre upplösning ($100 \times 100 \times 5$ m) ner till 250 m under havsytans nivå (fig. 8).



Figur 7. Utsnitt ur saltvattenmodell över området Gothem-Åminne. Beträktelsepunkten ligger i sydväst och den vertikala skalan är överdriven 25 gånger i förhållande till den horisontella.



Figur 8. Utsnitt ur 3D-resistivitetsmodell över området Åminne-Ala. Beträktelsepunkten ligger i sydväst och den vertikala skalan är överdriven 25 gånger i förhållande till den horisontella.

REFERENSER

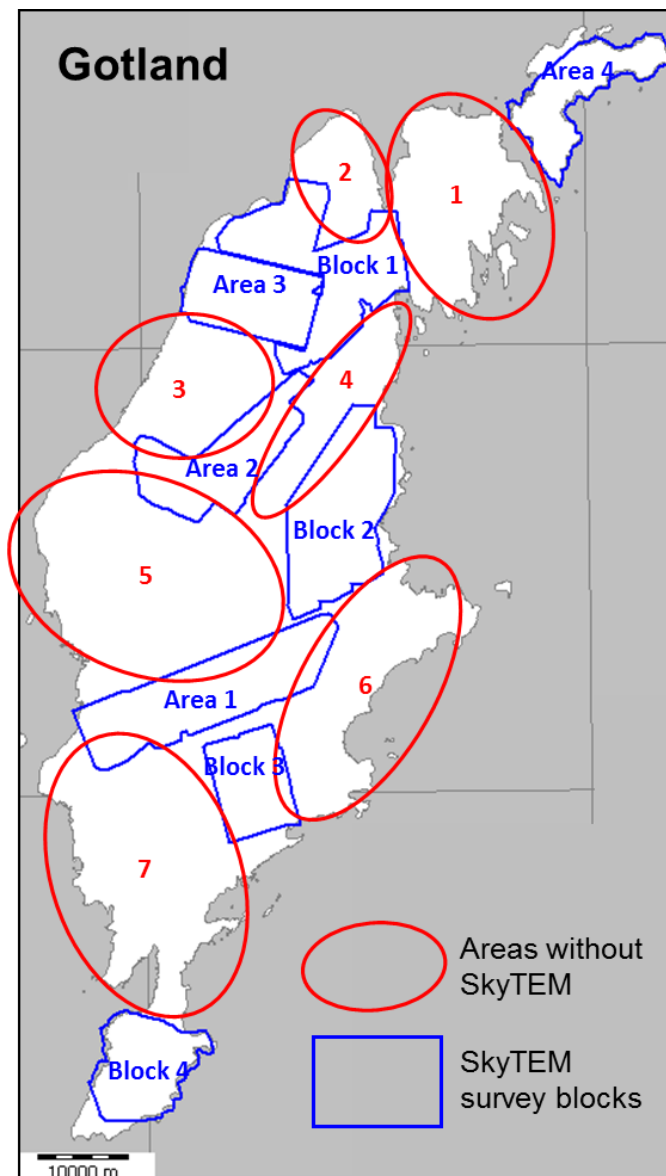
- Dahlqvist, P., Triumf, C.-A., Persson, L., Bastani, M., Erlström, M., Jørgensen, F., Thulin Olander, H., Gustafsson, M., Thorsbrink, M., Schoning, K. & Curtis, P., 2015: SkyTEM-undersökningar på Gotland. *Rapporter och Meddelanden 136*, Sveriges geologiska undersökning, 116 s.
- Dahlqvist, P., Triumf, C.-A., Persson, L., Bastani, M., Erlström, M., & Schoning, K. 2017: SkyTEM-undersökningar på Gotland, del 2. *Rapporter och Meddelanden 140*, Sveriges geologiska undersökning, 139 s.
- 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. & Persson, L., 2014: Radiomagnetotelluric mapping of marlstone and limestone in the Silurian bedrock of Gotland. *GFF 136*, 571–580.
- 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.
- Gulbrandsen, M., Jørgensen, F., Dahlqvist, P., Persson, L., Bastani, M., 2018: *A 3D geological soil-modelling workflow using AEM data – A case study from Gotland, Sweden*. Conference Paper, The 7th International Workshop on Airborne Electromagnetics.
- 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.
- Jørgensen, F., Møller, R.R., Nebel, L., Jensen, N.-P., Christensen, A. V., & Sandersen, P. B., 2013: A method for cognitive 3D geological voxel modelling of AEM data. *Bull. of Engineering Geology and the Environment 72*, 421-432.
- Jørgensen, F., Erlström, M., Persson, L., Bastani, M., Sopher, P., Gulbrandsen M.L. & Dahlqvist, P., 2018: *A 3D geological model of the Island of Gotland based on extensive airborne EM mapping, seismic data and log stratigraphy*. The 7th International Workshop on Airborne Electromagnetics.
- Karlqvist, L., Fogdestam, B. & Enqvist, P., 1982: Hydrogeologisk karta över Gotlands län. Beskrivning och bilagor till hydrogeologiska kartan över Gotlands län. *Sveriges geologiska undersökning Ab 3*, 60 s.
- Perttu, N., Persson, Lena., Erlström, M. & Elming, S., 2012: Magnetic resonance sounding and radiomagnetotelluric measurements used to characterize a limestone aquifer in Gotland, Sweden. *Journal of Hydrology 425-425*, 185-195.
- Svantesson, S-I., 2008: Beskrivning till jordartskartan Gotland, *Sveriges geologiska undersökning K 4*, 1-48.
- SGU, 2020a: jorddjupsmodell– databas. Gotland. 2017-06-30.
- SGU, 2020b: Jordarter 1:50 000–1:250 000 – databas. Gotland. 2017-06-30.
- SGU, 2020c: Grundvattenmagasin – databas. Gotland. 2017-06-30.
- SGU, 2020d: Berggrund 1:50 000–1:250 000 – databas. Gotland. 2017-06-30.
- SGU, 2020e: Brunnar– databas. Gotland. 2017-06-30.
- SGU, 2020f: Geofysiska markmätningar, seismik – databas. Gotland. 2017-06-30.
- SGU, 2020g: Geofysiska markmätningar, markradar – databas. Gotland. 2017-06-30.
- SGU, 2020j: Jordlagerföljder – databas. Gotland. 2017-06-30.

BILAGA 1. LITHOLOGICAL MODEL CONSTRUCTION, DOCUMENTATION

Flemming Jørgensen

This appendix describes how the lithological model has been constructed. The description is performed area-wise beginning with the 8 SkyTEM areas and followed by areas not covered by SkyTEM.

The areas will be described from north to south, beginning with Area 4 and ending with Block 4.



Map showing the subdivision of areas used to describe the construction of the lithological model.

Area 4 (SkyTEM)

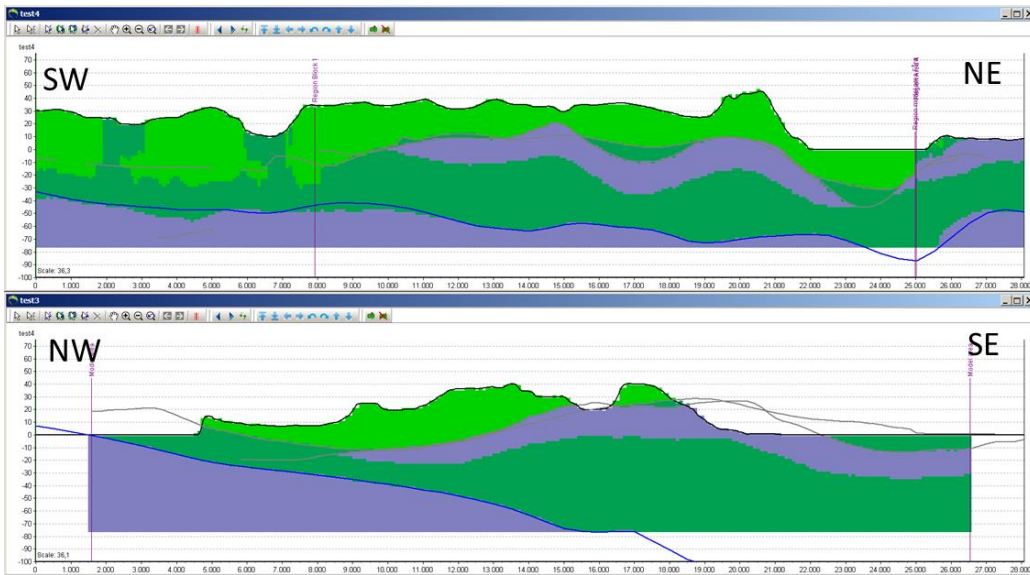
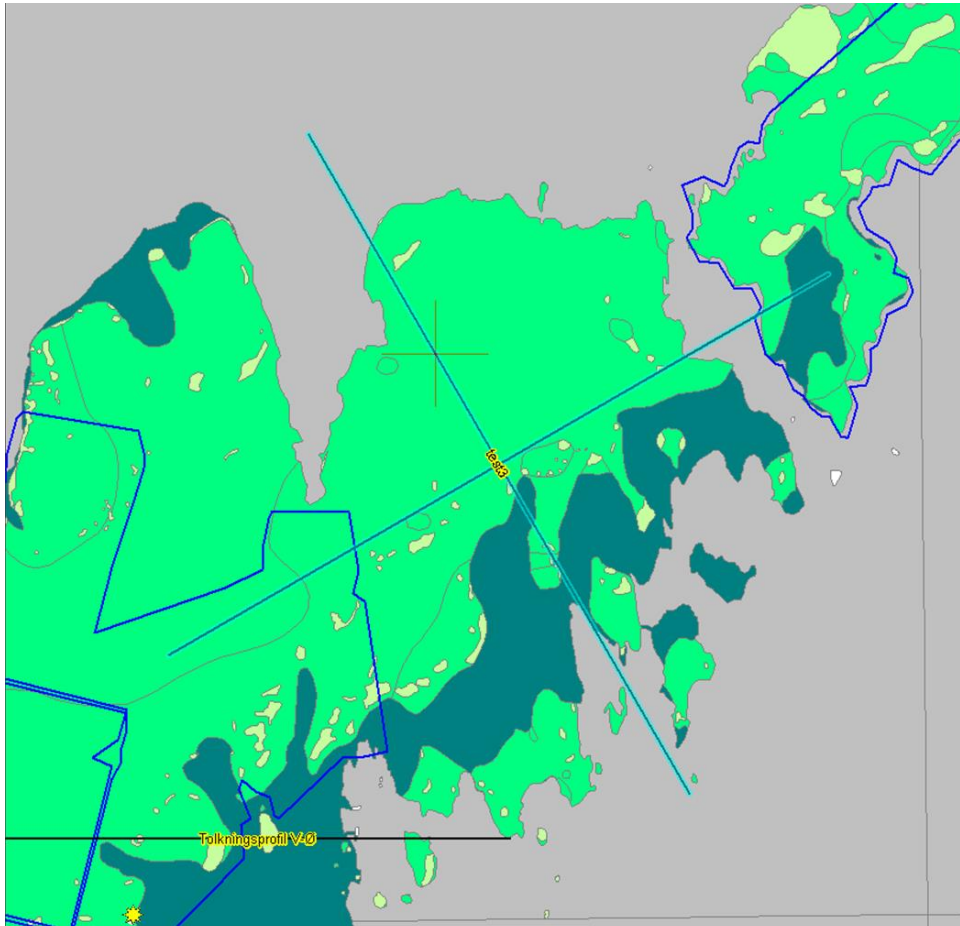
In Area 4 the lithological model is constructed in the following way:

1. A surface for the top of layers with resistivities below 40 ohmm has been constructed (40_ohmm_top_Omr_4). Below this surface voxels have been populated with "Marl". In the area close to Fårö Sund the stratigraphical surface of Top Visby Övre has been used for constraining instead.
2. "Marl" is attributed to voxels between two working surfaces "Ovre_mergel_top_Omr_4" and "Ovre_mergel_bottom_Omr_4". This marlstone appears with resistivities between 100 and 300 ohmm.
3. "Reefal limestone" is partly modelled using region grow with resistivities >400 for large bodies and >300 ohmm for smaller bodies, and partly by using the working surface "Revkalk_bottom_1" as the lower boundary.
4. "Marl" is assigned to voxels along ERT15, where this indicates a marl layer at depths of about 10 m. This layer is not seen in the SkyTEM-data, most likely due to limited resolution.

1 - Bunge area (no SkyTEM)

In the Bunge area between Area 4 and Area 3/Block 1 the lithological model is constructed in the following way:

1. "Marl" has been attributed to voxels below the stratigraphical surface of Top Visby Övre (blue line on the profiles in the figure below).
2. "Marl" has been attributed to voxels between two working surfaces "Ovre_mergel_top_nst_1" and "Ovre_mergel_bottom_nst_1" (grey lines on the profiles in the figure). Modelling of this marl layer is based on the bedrock map, the RMT data (Erlström och Persson 2008, Persson 2009) and the to a minor degree borehole data.
3. "Reefal limestone" has been attributed to voxels above the working surface "Revkalk_bottom_2" (grey line on the profiles in the figure). This surface is constructed on the basis of the bedrock map, topographical expression of reef structures in the digital elevation model and the resistivity map (Skenbar resistivitet, Erlstrom et al. 2009) from the AEM surveys in 2006.
4. "Limestone" is finally attributed to empty voxels.

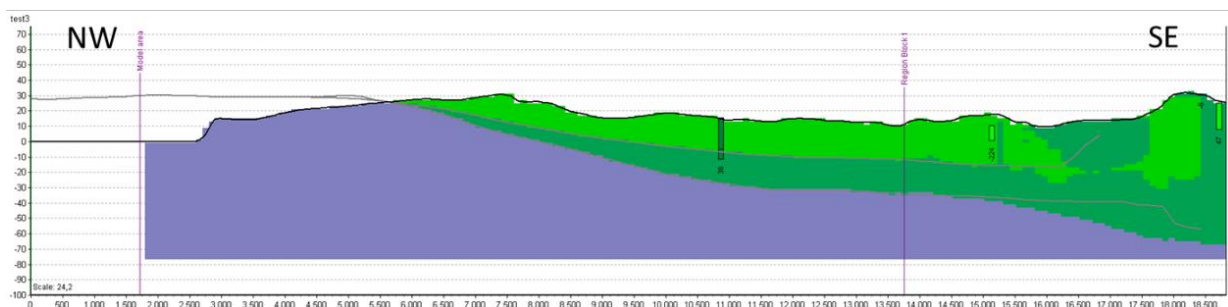
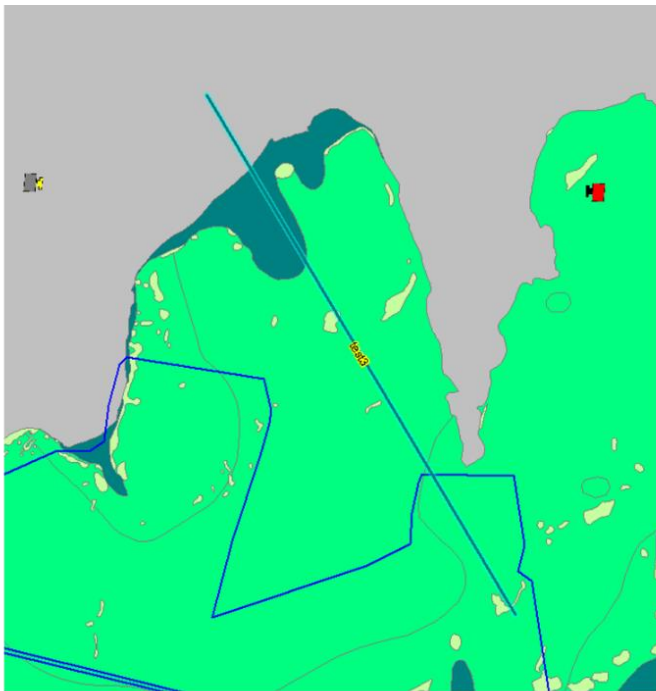


The Bunge area. Bedrock map and two cross sections.

2 - Kappelshamn area (no SkyTEM)

In the Kappelshamn area north of Area 3/Block 1 the model is constructed in the following way:

1. "Marl" has been attributed to voxels below the working surface "Nedre_mergel_top_1" (grey line in the figure below) which is very close to the stratigraphical surface of Top Visby. This surface is constructed on the basis of the bedrock map which shows exposures of marl in the Northwestern part of the area (close to the coast).
2. The near-surface geology of the Kappelshamn area north of Area 3/Block 1 is dominated by the Slite Formation. High resistivities are seen in the SkyTEM-data just south and west of the area in Area 3/Block 1 and here the outcropping bedrock layers are mainly interpreted as "reefal limestone". "Reefal limestone" has been attributed to voxels above the working surface "Revkalk_bottom_2" (grey line on the profiles in the figure). This surface is in some parts constructed on the basis of the bedrock map and topographical expression of reef structures in the digital elevation model, but in general the interpretation and location of this surface is very uncertain.
3. "Limestone" is finally attributed to empty voxels.



The Karlshamn Area. Bedrock map and one cross section.

Area 3 + Block 1 (SkyTEM)

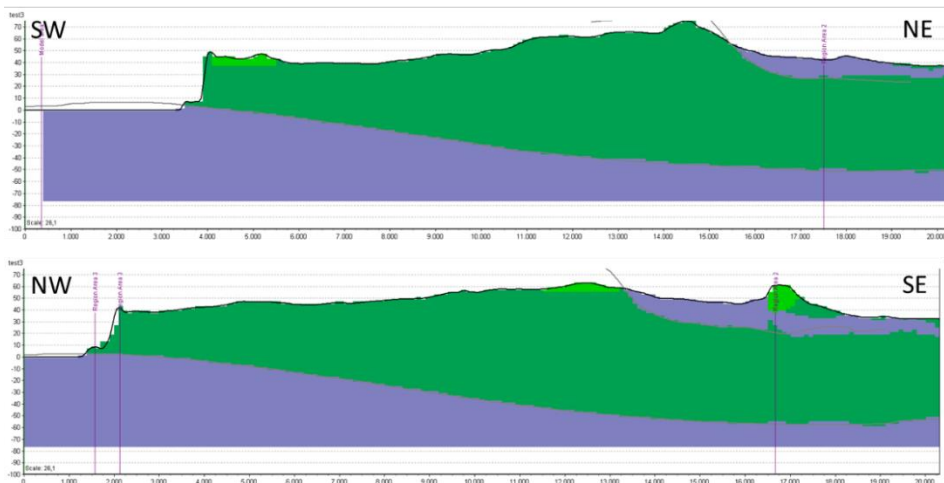
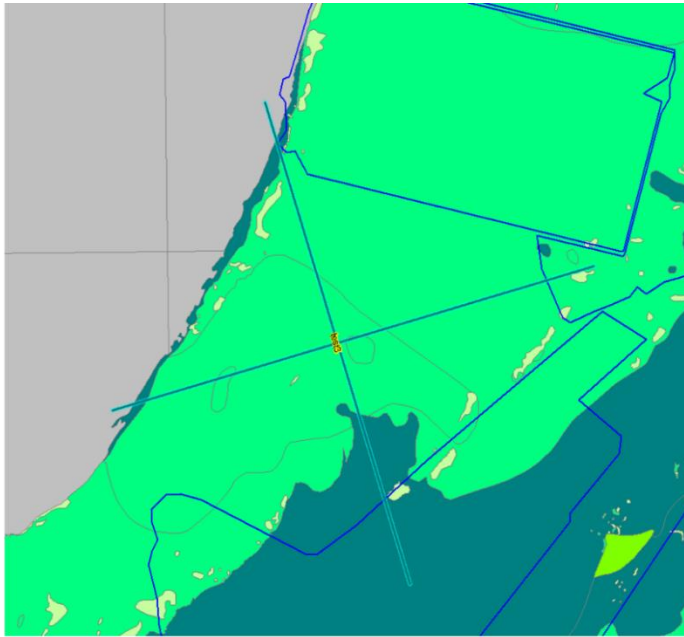
The lithological model in Area 3 + Block1 is constructed in the following way:

1. A working surface for the top of layers below 40 ohmm has been constructed (40_ohmm_top_Omr_3_Block_1).
2. "Marl" has been attributed to voxels below the 40 ohmm-surface.
3. A low-resistive layer close to the surface has been attributed with "marl" by constraining it with two working surfaces (top surface: "Ovre_mergel_top_Block_1", bottom surface: "Ovre_mergel_bottom_Block_1").
4. The marl layer has been adjusted by manual voxel modelling, so that it fits within the boundary as outlined on the bedrock map (in the eastern part of the area).
5. "Reefal limestone" has been attributed to voxels with resistivities above 300 ohmm by using the region grow tool. For smaller structures, a limit of 250 ohmm is used.
6. "Limestone" has been attributed to empty voxels.

3 - Väskinde area (no SkyTEM)

The lithological model in the Väskinde area is constructed in the following way:

1. "Marl" has been attributed to voxels below the working surface "Nedre_mergel_top_1" (grey line in the figure) which is very close to the stratigraphical surface of Top Visby. This surface is constructed on the basis of the bedrock map, which shows exposures of marl in the western part of the area (in the coastal cliffs).
2. The shallow geology of the Väskinde area is dominated by the Slite Formation. The Slite Formation in the two neighbouring areas (Area 2 and Area 3) is mainly interpreted to be "Limestone" but with inclusions of "Reefal limestone", especially towards the East. Based on correlation to the occurrences of "Reefal limestone" in the neighbouring areas the working surface "Revkalk_bottom_2" (grey line on the profiles in the figure) has been produced to delimit "Reefal limestone" from "Limestone" in the eastern part of the area. The resistivity map (Skenbar resistivitet, Erlstrom et al. 2009) from the AEM surveys in 2006 is also used to support this interpretation.
3. Occurrences of "Reefal limestone" seen in the bedrock map and expressed in the topography by the digital elevation model are populated either by using the working surface "Revkalk_bottom_2" to delimit voxels or by manual voxel editing.
4. "Limestone" is finally attributed to empty voxels.



The Väskeindet Area. Bedrock map and two cross sections.

Area 2 (SkyTEM)

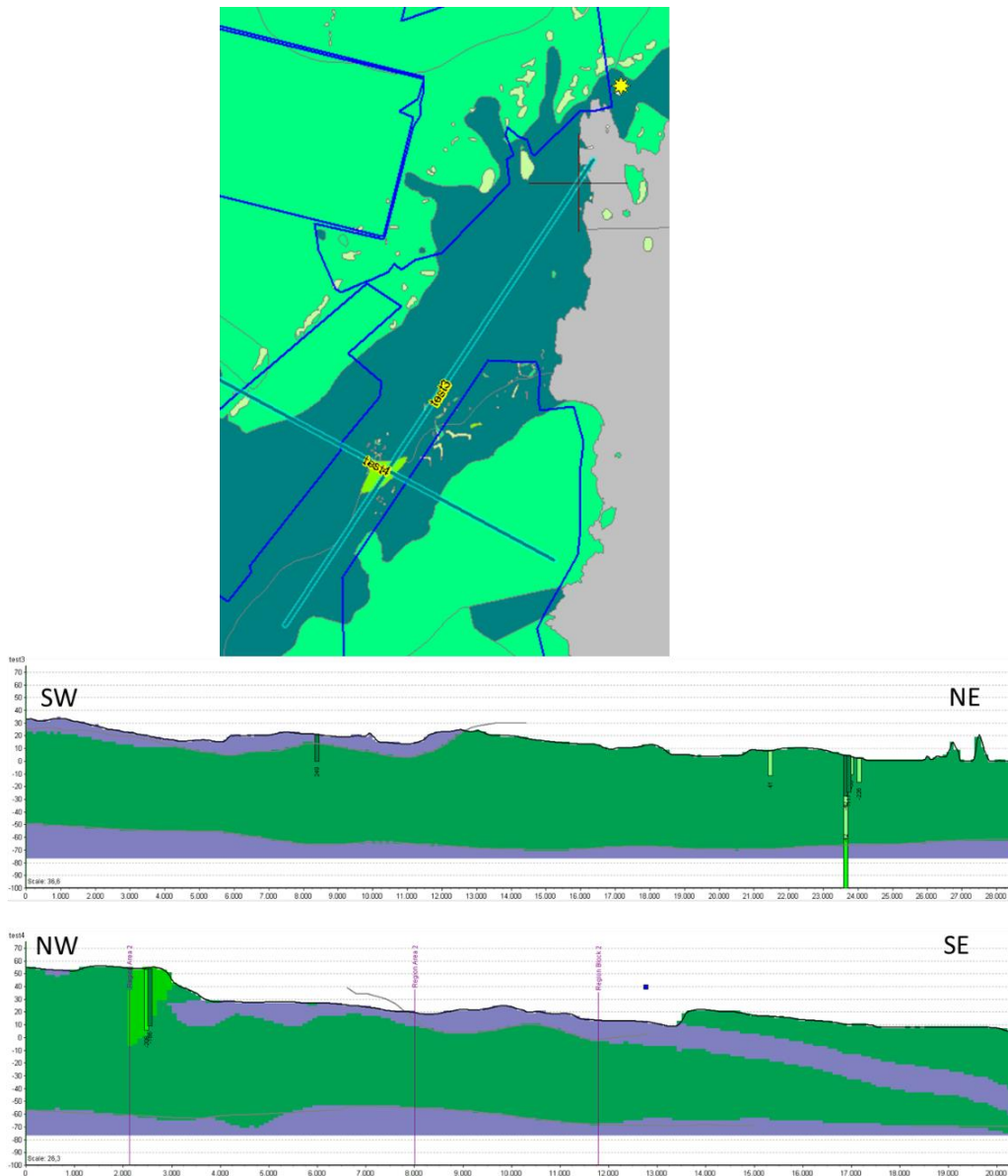
The lithological model in the Area 2 is constructed in the following way:

1. "Reefal limestone" has been attributed to voxels with resistivities above 300 ohmm.
2. A few reef structures are additionally modelled manually. Region grow was used with different resistivity limits.
3. A surface for the top of layers below 40 ohmm has been constructed (40_ohmm_top_omr_2).
4. "Marl" has been attributed to voxels below the 40 ohmm-surface.
5. A low-resistive layer close to the surface has been attributed with "marl" by constraining it with two constructed working surfaces (top surface: "Ovre_mergel_top_Omr_2", bottom surface: "Ovre_mergel_bottom_Omr_2") and the region "Region Area 2".
6. "Limestone" has been attributed to all empty voxels.

4 - Area between Block 1, Block 2 and Area 2 (no SkyTEM)

The lithological model in the area between Block 1, Block 2 and Area 2 is constructed in the following way:

1. "Marl" has been attributed to voxels below the working surface "Nedre_mergel_top_1" (grey line in the figure) which is very close to the stratigraphical surface of Top Visby.
2. The shallow geology of the area is dominated by marls which are partly related and connected to the Halla Formation. This marl is seen in the bedrock map and is mapped with relatively low resistivities in the neighbouring areas. The marl is delimited by the working surface "Ovre_mergel_bottom_nst_2" and all voxels above this surface have been populated with "Marl".
3. "Limestone" is finally attributed to empty voxels between the working surfaces of "Nedre_mergel_top_1" and "Ovre_mergel_bottom_nst_2".



The area between Block 1, Block 2 and Area 2. Bedrock map and two cross sections.

Block 2 (SkyTEM)

The lithological model in Block 2 is constructed in the following way:

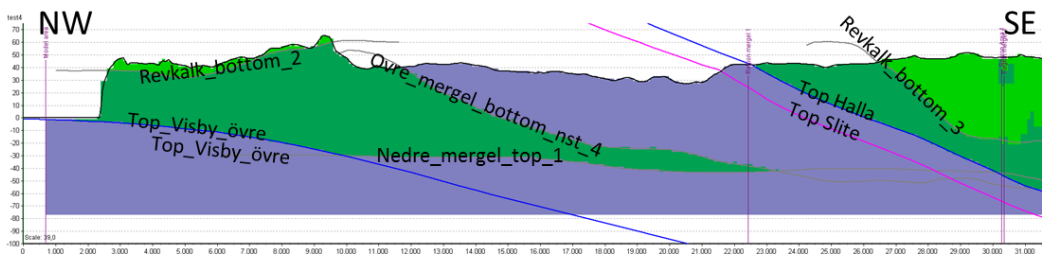
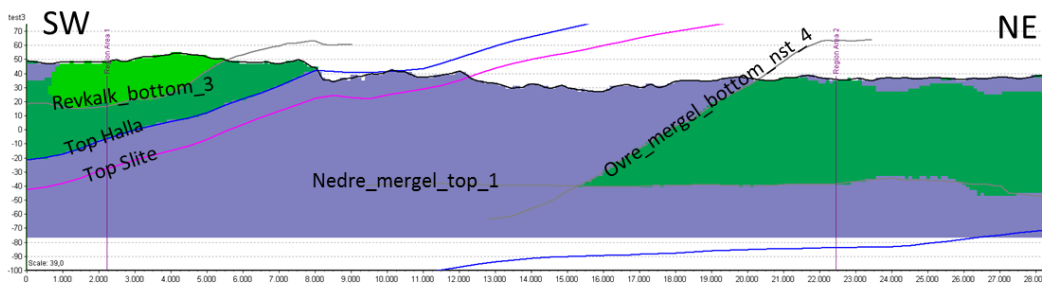
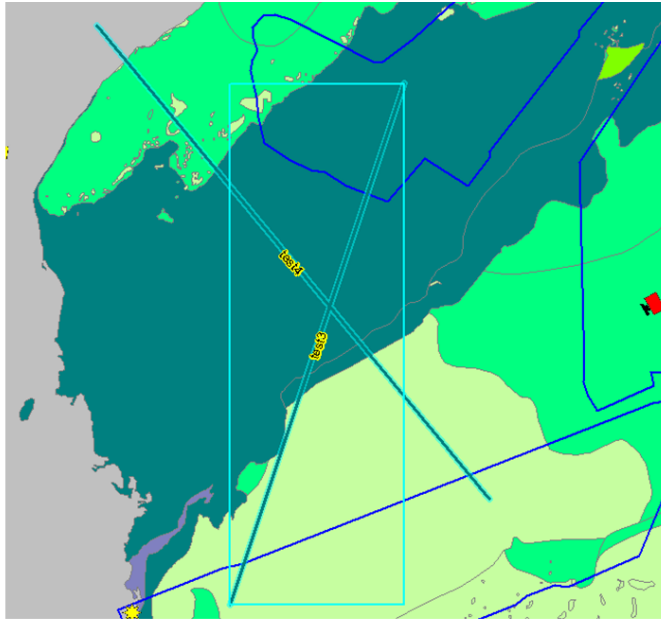
1. A surface for the top of layers below 40 ohmm has been constructed (40_ohmm_top_block_2).
2. "Marl" has been attributed to voxels between the stratigraphical surfaces of Top Halla and Top Slite
3. "Reefal limestone" has been attributed to voxels with resistivity above 400 ohmm by using the region grow tool above the stratigraphical surface of Top Halla.
4. A few reef structures are additionally modelled manually. Region grow is used with different resistivity limits.
5. "Limestone" has been attributed to empty voxels above the stratigraphical surface of Top Halla
6. A few, small units with relatively low resistivities have been attributed with "marl" at the surface (supported by the bedrock map). Region grow is used with different resistivity limits.
7. "Limestone" has been attributed to voxels between the stratigraphical surface of Top Slite and the 40 ohmm-surface.
8. "Marl" has been attributed to voxels below the 40 ohmm-surface.

5 - Area between Area 1, Block 2 and Area 2 (no SkyTEM)

The lithological model in the area between Area 1, Block 2 and Area 2 is constructed in the following way:

1. "Marl" has been attributed to voxels below the working surface "Nedre_mergel_top_1" (grey line in the figure).
2. "Marl" has been attributed to voxels below the working surface "Top_Visby_övre" (blue line in the figure).
3. "Marl" has been attributed to voxels between the surfaces of Top_Halla and Top_Slite (blue and pink lines in the figure).
4. Empty voxels are filled with "Limestone" below the working surface of "Ovre_mergel_bottom_nst_4" and below the terrain surface. Interpretation/modelling of "Ovre_mergel_bottom_nst_4" is partly based on the bedrock map.
5. Empty voxels are filled with "Limestone" above the working surface of "Ovre_mergel_top_nst_4" and below the terrain surface. Interpretation/modelling of "Ovre_mergel_top_nst_4" is partly based on the bedrock map.
6. Empty voxels are filled with "Marl" (below terrain surface).
7. "Reefal limestone" is overwritten to voxels above the working surface of "Revkalk_bottom_2" and outside "Region Area 2". Interpretation is based on the bedrock map.
8. "Reefal limestone" is overwritten to voxels above the working surface of "Revkalk_bottom_3" and outside "Region Area 1". Interpretation is based on the bedrock map.

The surfaces have mainly been interpreted on the basis of general geological background knowledge, the bedrock map and extrapolation of the interpretations/models from the SkyTEM covered areas.



The area between Area 1, Block 2 and Area 2. Bedrock map and two cross sections.

Area 1 (SkyTEM)

The lithological model in Area 1 is constructed in the following way:

1. The Halla Fm is defined as marl, and “marl” has therefore been attributed to voxels between the stratigraphical layer surfaces of Top Halla and Top Slite.
2. “Reefal limestone” has been attributed to voxels with resistivities above 400 ohmm by using the region grow tool.
3. Empty voxels are attributed with “limestone”.

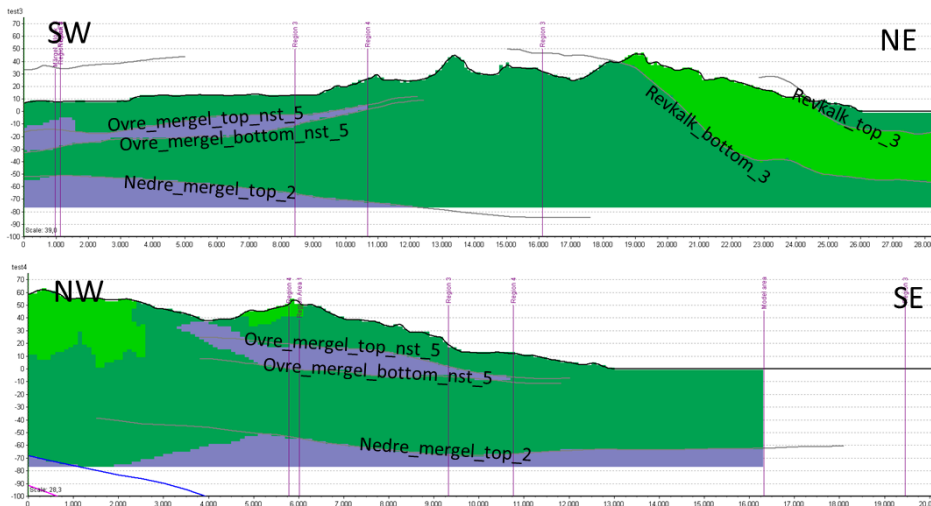
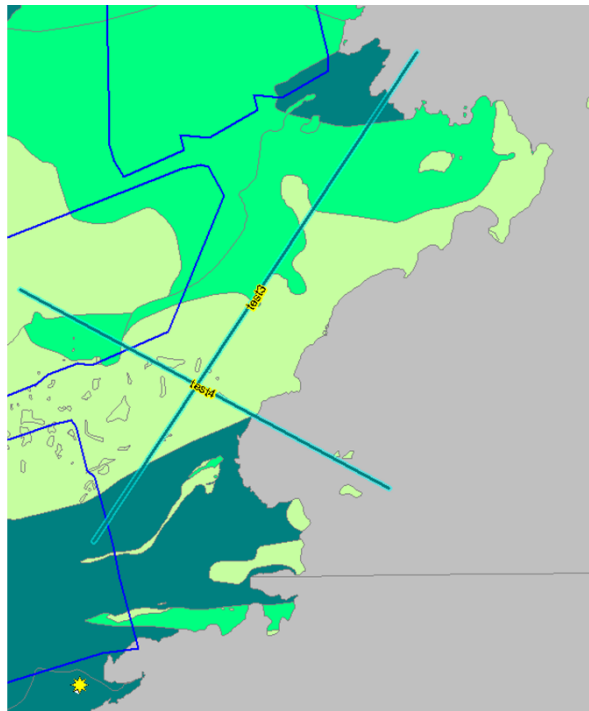
4. A low-resistive layer close to the surface has been attributed with “marl” by constraining it with two working surfaces (top surface: Ovre_mergel_top_Omr_1, bottom surface: Ovre_mergel_bottom_Omr_1) and the region Region Area 1.
5. Another low-resistive layer close to the surface has been attributed with “marl” by constraining it with two working surfaces (top surface: Ovre_mergel_2_top_Omr_1, bottom surface: Ovre_mergel_2_bottom_Omr_1). This fits with the two ERT profiles ERT 10 and 11.
6. The Slite Formation is interpreted to be composed of mainly marl in the southern part of Gotland. Voxels below the Top Slite surface are therefore populated with “marl”.
7. Some reef structures exposed in the surface (supported by clear topographical expression and the bedrock map) primarily along the southern margin of the area do not show resistivities above 400 ohmm. Each of these are subsequently manually populated by using a limit of 300 ohmm.
8. A 40-ohmm top surface has been manually constructed within the area. All voxels below this surface have been populated with “marl”.

ERT and RMT measurements and the core drilling Ala-1 acquired within the area (e.g. SGU 2007) match the lithological model. However, the layers in the RMT data are interpreted as “limestone” and “marl”, whereas the same layers in the lithological model are interpreted as “reefal limestone” and “limestone” respectively.

6 - Area east of Area 1, Block 2 and Block 3 (no SkyTEM)

The lithological model in the area east of Area 1, Block 2 and Block 3 is constructed in the following way:

1. ”Marl” has been attributed to voxels below the working surface “Nedre_mergel_top_2” (grey line in the figure).
2. ”Marl” has been attributed to voxels between the surfaces of the working surface “Ovre_mergel_bottom_nst_5” and the working surface “Ovre_mergel_top_nst_5” (grey lines in the figure). This is delimited by the working region “Region 4”. The modelling/interpretation of the marl is based on extrapolation from the neighbouring SkyTEM-covered areas/models.
3. All empty voxels below the terrain surface are filled with “Limestone”
4. “Reefal limestone” is overwritten in voxels between the working surfaces of “Revkalk_bottom_3” and “Revkalk_top_3” (but below the terrain surface) (grey line in the figure). The modelling/interpretation of this reefal limestone is based on extrapolation from the neighbouring SkyTEM-covered area Block 2.
5. Manual voxel modelling has been performed in the area between Block 3 and Area 1 in order to connect the layers across the gap.
6. The Eke formation as shown in the bedrock map has been incorporated in the model by manual voxel modelling (limestone)



The area between Area 1, Block 2 and Block 3. Bedrock map and two cross sections.

Block 3 (SkyTEM)

The lithological model in Block 3 is constructed in the following way:

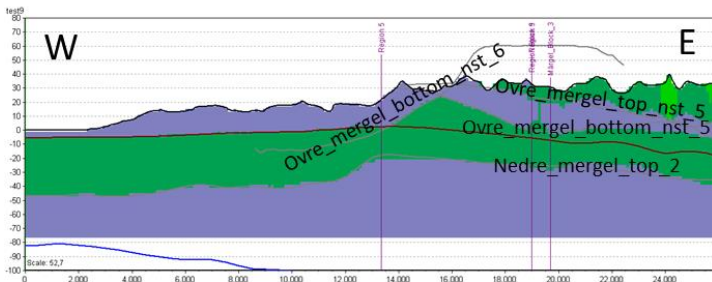
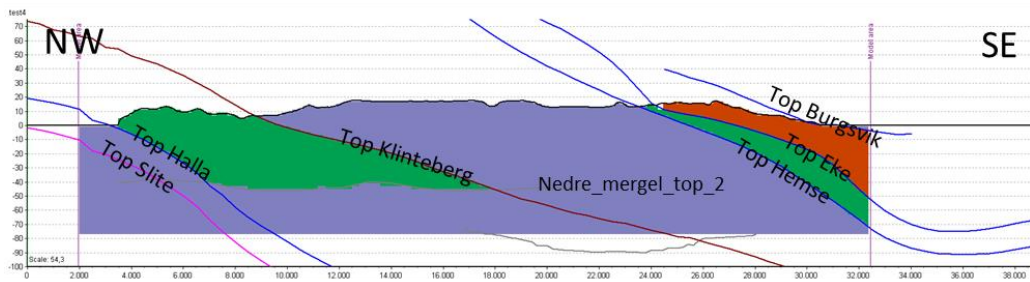
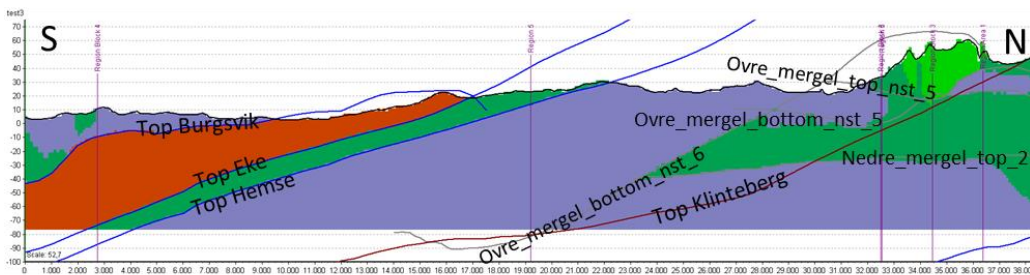
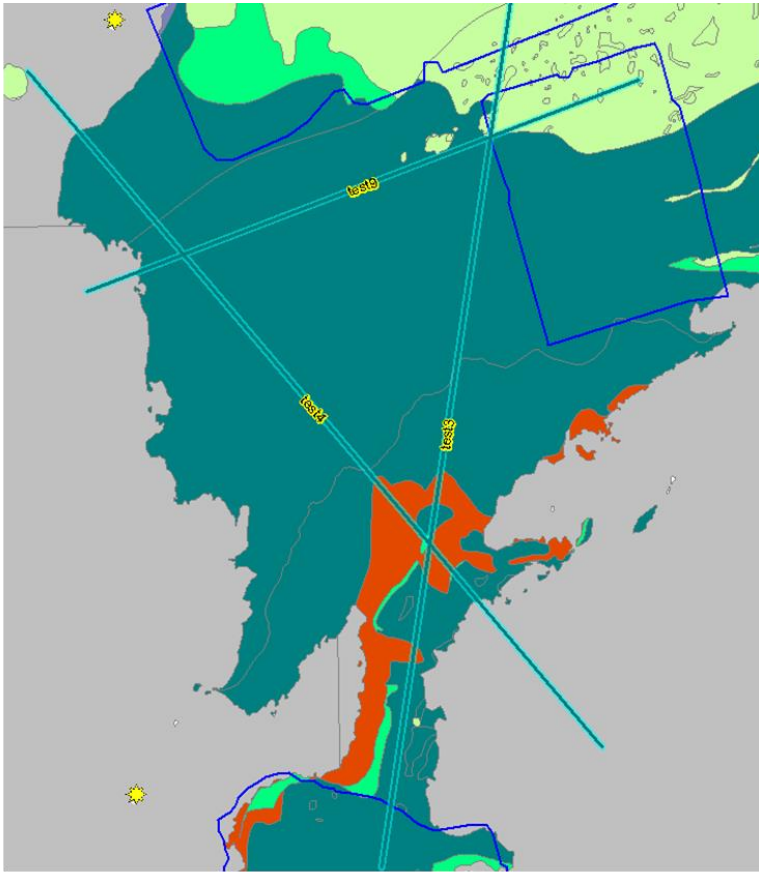
1. “Reefal limestone” has been attributed to voxels with resistivity above 300 ohmm by using the region grow tool.
2. Small reef structures (mainly exposed in the surface and supported by clear topographical expression and the bedrock map) do not show resistivities above 300 ohmm. Each of these are subsequently manually populated by using a limit of 200 ohmm (sometimes down to 150 ohmm for the smallest units).
3. A low-resistive layer close to the surface has been attributed with “marl” by constraining it with two working surfaces (top surface: “Ovre_mergel_top_Block_3”, bottom surface: “Ovre_mergel_bottom_Block_3”) and the region “Region Block 3”.

4. The lower marlstone unit has been populated by using the working surface “40_ohmm_top_block_3” which has been manually constructed within the area.
5. The southernmost Eke unit is populated with “limestone” based on a resistivity of 125 ohmm.
6. Empty voxels are attributed with “limestone” using the surface “40_ohmm_top_block_3” as the lower limit.
7. The Slite Formation is interpreted to be composed of mainly marl in the southern part of Gotland. Voxels below the Top Slite surface are therefore populated with “marl”.
8. A 40-ohmm top surface has been manually constructed within the area. All voxels below this surface have been populated with “marl”.

7 - Area between Sudret, Area 1 and Block 3 (no SkyTEM)

The lithological model in the area between Sudret, Area 1 and Block 3 is constructed in the following way:

1. ”Marl” has been attributed to voxels between the terrain surface and the stratigraphical surface Top Burgsvik.
2. ”Sandstone” has been attributed to voxels between the stratigraphical surfaces of Top Eke and Top Burgsvik.
3. ”Limestone” has been attributed to voxels between the stratigraphical surfaces of Top Eke and Top Hemse.
4. ”Marl” has been attributed to voxels between the stratigraphical surfaces of Top Halla and Top Slite.
5. “Marl” has been attributed to voxels between the stratigraphical surfaces of Top Hemse/Terrain (as upper limit) and the working surfaces of Ovre_mergel_bottom_nst_6/Top_Klinteberg (as lower limit). The Hemse Formation is expected to consist partly of limestone in the northeastern part of the area. The working surface Ovre_mergel_bottom_nst_6 is here used to incorporate a limestone body in the model.
6. “Marl” is attributed to voxels below the working surfaces of “Nedre_mergel_top_2”/”Ovre_mergel_bottom_nst_6” (combined).
7. “Marl” is attributed to voxels between the working surfaces of ”Ovre_mergel_top_nst_5” and “Ovre_mergel_bottom_nst_5”.
8. “Limestone” is assigned to empty voxels in the area.
9. The “Eke-ridge” west of Block 3 has been incorporated as “reefal limestone” by manual voxel modelling.
10. Minor manual voxel adjustments have been performed – especially along the borders to the SkyTEM surveyed regions.



The area between Sudret, Area 1 and Block 3. Bedrock map and three cross sections.

Block 4 (SkyTEM)

The lithological model in Block 4 is constructed in the follow way :

1. "Reefal limestone" has been attributed to voxels with resistivities above 300 ohmm by using the region grow tool.
2. "Limestone" has been attributed to voxels with resistivities above 100 ohmm and below 300 ohmm by using the region grow tool.
3. "Sandstone" has been attributed to all voxels between the stratigraphical surfaces of Top Eke and Top Burgsvik (the Burgsvik Sandstone).
4. "Limestone" has been attributed to all voxels between the stratigraphical surfaces of Top Klinteberg and Top Hemse (equivalent to the Hemse Fm).
5. "Marl" has been attributed to all voxels between the stratigraphical surfaces of Top Hemse and Top Eke (equivalent to the Eke Fm).
6. "Marl" has been attributed to empty voxels.

Hamra and Sunde Formations: Reefal limestone > 300 ohmm, Limestone 100-300 ohmm, Marlstones < 80 ohmm.

According to the bedrock map, much of the bedrock surface should be composed of marlstones, but the high resistivities measured in the SkyTEM data does not immediately support this. Few exposures of the bedrock in the area makes the bedrock map uncertain