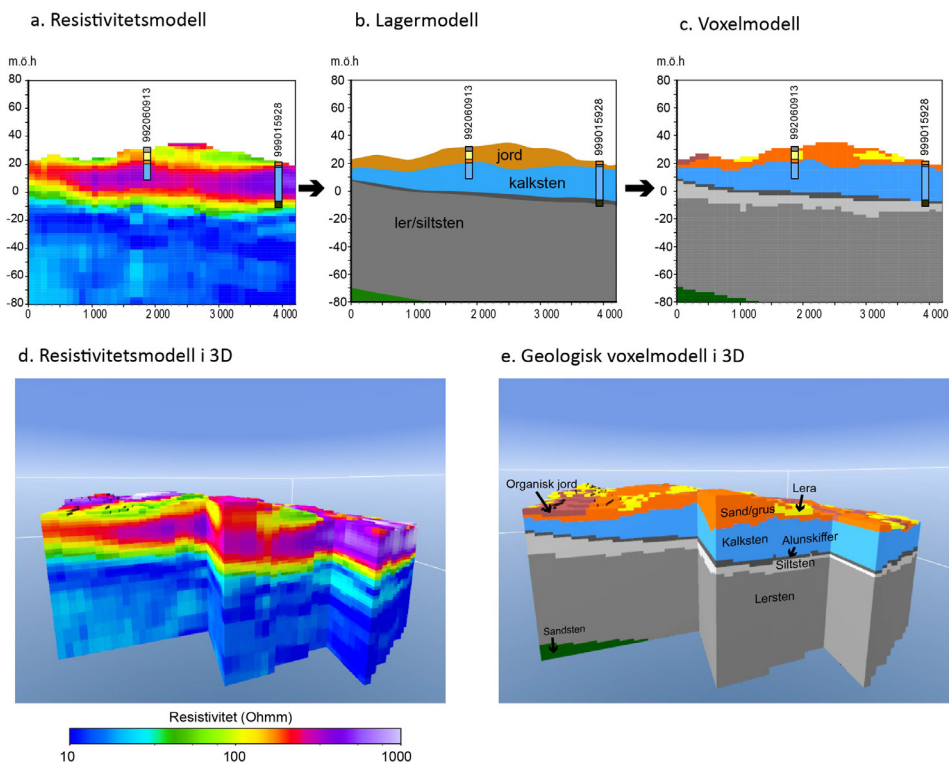


# Öland

SGU-rapport 2021:25



Omslagsbild: Arbetsgången vid 3D modellering i GeoScene3D. Figurerna visar en profil samt 3D-vy över sand- och grusavlagringarna vid Lindbyfältet, sydöst om Borgholm. Modellen är framtagen av Mehrdad Bastani.

Författare: Mehrdad Bastani

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](mailto:sgu@sgu.se)

[www.sgu.se](http://www.sgu.se)

## INNEHÅLL

Sammanfattning.....	4
Inledning.....	4
Intressenter och samarbetspartner .....	5
Syfte och mål.....	5
Underlag.....	5
Flygburna TEM-mätningar.....	5
Brunnsarkiv och borrhningar .....	7
Geofysiska markmätningar.....	7
Övriga kartor och databaser.....	7
Terrängläge och geologisk översikt.....	8
Jordlager .....	8
Berggrund.....	10
Hydrogeologiska förhållanden och vattenförsörjning på Öland .....	10
Grundvatten i jord .....	10
Grundvatten i berg.....	11
Metoder.....	11
Jordartsmodell.....	11
Berggrundsmodell.....	12
Modellens begränsningar och osäkerhet.....	12
Resultat.....	15
Modellerade ytor, lager och volymer.....	15
Resistivitetsmodell.....	15
Lagermodell.....	15
Litologisk modell.....	17
Referenser.....	18

## SAMMANFATTNING

Öland har ofta brist på dricksvatten under sommarperioden. En viktig anledning till grundvattenbristen på Öland är jordlagrens och berggrundens begränsade magasineringkapacitet. Tunna jordlager i kombination med en relativt tät berggrund och ett sedan länge utdikad landskap gör, att merparten av nederbörden som faller under vinterhalvåret inte bildar grundvatten utan snabbt rinner ut i Östersjön. Grundvattenbildningen under sommarhalvåret är begränsad på grund av små nederbörds mängder, hög avdunstning och vegetationens vattenupptag. Under 2016 kulminerade problemen med låga grundvattennivåer, vilket gjorde att man var tvungen att hitta alternativ för dricksvattenförsörjningen. SGU utförde mätningar under hösten 2016 med en helikopterburen transient elektromagnetisk (TEM) geofysisk metod (genomfördes av SkyTEM) över ett område på 800 km<sup>2</sup> på Öland. Syftet var att samla in information och öka kunskapen om de hydrogeologiska förhållandena. Målsättningen var att identifiera potentiella områden på Öland där det finns förutsättningar för större grundvattenuttag.

Insamlade SkyTEM-data är av god kvalitet och utgörs av ca 120 000 geofysiska sonderingar ner till ca 250 m djup. Vidare har mätdata och tolkningar utgjort underlag till geologiska 3D-modeller över jord- och berglagren på Öland. Modellerna bygger på resistivitetsmodeller framtagna från SkyTEM-mätningar, markgeofysiska data (ERT, RMT och georadar), analys av ett stort antal borrhålsuppgifter (inklusive geofysisk loggning) och jordartskarta och berggrundskarta från SGUs databaser. Resultaten lämpar sig som underlag för t.ex. planering av vattentäkter, vattenskyddsområden, arbete med vattenförvaltningsfrågor, tillståndsgivning och tillsyn av t.ex. vattenverksamhet och energibrunnar.

Två olika typer av geologiska 3D-modeller har tagits fram över Öland. En lagermodell ner till 250 m och en ytlig voxelmodell ner till 80 m under havsytans nivå. Modellerna som presenteras i den här rapporten är:

- Lagermodell över den sedimentära berggrunden som täcker hela ön. Cellstorleken på modellen är 500 × 500 m och går ner till 250 m under havsytans nivå.
- Litologisk voxelmodell som täcker hela ön och består av de två delarna berggrund och jordlager. De har sedan slagits ihop till en gemensam modell med cellstorlek 100 × 100 × 2 m. Den litologiska modellen går ner till 80 m under havsytans nivå.
- En resistivitetsmodell, som är framtagen från 1D-inversion av flygburna TEM mätningar, som täcker stora delar av ön (ca 63 %). Modellen har interpolerats till en voxelmodell över de områden som täcks av mätningarna. Voxelmodellen finns i två storlekar, en med högre vertikal upplösning (100 × 100 × 2 m) ner till 80 m under havsytans nivå, och en med lägre upplösning (100 × 100 × 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). Medel beviljades även från MSB för helikopterburna geofysiska mätningar.

Modellerna bygger till stor del på de undersökningar och tolkningar som utförts inom projekten ”SkyTEM-undersökningar på Öland–Geologiska tolkningar och hydrogeologisk tillämpning” (Dahlqvist m.fl. 2018). Modellerna har tagits fram i samarbete med Flemming Jørgensen (tidigare GEUS numera Region Midtjylland, Danmark) och Mats Lundh Gulbrandsen (I-GIS A/S).

All modellering har skett i programvaran GeoScene3D (I-GIS).

Modelleringsledare på SGU har varit Peter Dahlqvist och Mehrdad Bastani.

## **Intressenter och samarbetspartner**

Huvudintressent är Länsstyrelsen i Kalmar län samt Mörbylånga och Borgholms kommuner. Modellen bör vara av intresse för Region Öland, länsstyrelsen, konsulter och universitet m.fl.

## **SYFTE OCH MÅL**

Modelleringsområdet täcker hela Öland. Syftet är att den nya kunskapen och den insamlade informationen ska kunna användas som geologiskt bedömningsunderlag i samband med frågor som berör

- planering av kommunal dricksvattenförsörjning
- vattenskyddsområden, bland annat utformning och tillsyn
- planering och tillsyn av anläggningar för geoenergi
- planering och tillsyn av brunnar för enskild vattenförsörjning och enskilda avlopp
- vattenförvaltningsarbetet
- vattenförsörjningsplaner.

Målet med den flygburna geofysiska undersökningen (fig. 1a) har varit att förbättra kunskapen om de hydrogeologiska förhållandena och identifiera områden på Öland, där det kan finnas förutsättningar för nya och kompletterande grundvattenuttag till befintlig vattenförsörjning.

Målsättningen med undersökningen har varit att ge:

- kunskap om jordlagrens och berggrundens uppbyggnad i 3D
- information som möjliggör identifiering och kartläggning av sprick- och svaghetszoner
- information om berggrundens strukturella uppbyggnad på djupet
- information om djupnivåer för salt grundvatten
- underlag till en förbättrad grundvattenmodell för Öland, avseende avgränsningar och karaktärisering av större grundvattenmagasin.

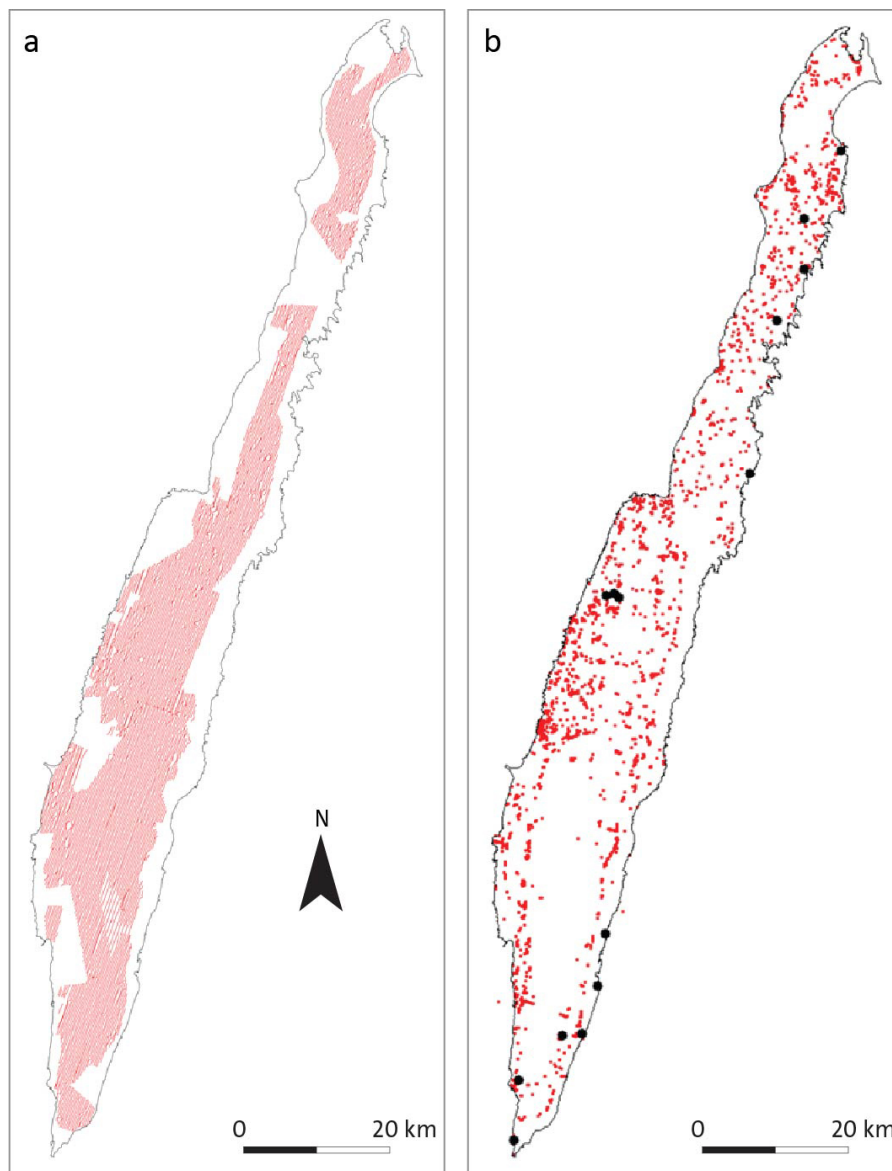
Den litologiska voxelmodellen är tänkt att användas i skalområdet 1:50 000–1:100 000, med beaktande av de osäkerheter som finns i klassningar och avgränsningar av jord- och berggrundslager under markytan. Utanför områden undersökta med flygburen TEM-mätning är 3D-modellen mycket översiktlig och baseras på data från borrhningar och skärningar.

## **UNDERLAG**

### **Flygburna TEM-mätningar**

Undersökningar med flygburen TEM på Öland utfördes under augusti och september 2016 utmed parallella mätlinjer med ca 200 m avstånd. Totalt insamlades data längs 4 000 km under 11 dagar (fig. 1a). Eftersom det inte är tillåtet att flyga med mätutrustningen över tät bebyggelse har detta krävt en anpassning av mätlinjerna. För en rationell och säker mätning är det även viktigt att information om eventuella ledningar, master och höga byggnader i mätområdet samlas in och beaktas i planering och genomförande.

Insamlade data har bearbetats och modellerats i programvaran Aarhus Workbench (Aarhus Geo-Software). Vid bearbetningen rensas data som är påverkade av till exempel kraftledning, elstängsel och järnväg. Med så kallad inversionsteknik skapas därefter en resistivetsmodell med 30 lager för varje mätpunkt, som visar resistivetsfördelningen i marken ner till ca 300 m djup. Vid modelleringen görs antagandet att marken är endimensionell, det vill säga att resistiviteten enbart varierar med djupet, vilket gör metoden väl lämpad för den horisontella lagring som är förhärskande på Öland. Variationerna i den elektriska resistiviteten i jordlagren och berggrunden på Öland 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.



**Figur 1. a.** Karta som visar flyglinjerna för SkyTEM-undersökningarna hösten 2016, **b.** Läget av befintliga brunnar från SGUs brunnarsarkiv (röda punkter) och borrhål från Oljeprospektering AB (OPAB) (svarta punkter).

## Brunnsarkiv och borrhningar

Information om jordlagerföljder har hämtats från SGUs olika databaser. Merparten av lagerföljdsinformationen kommer från Brunnsarkivet som består av borrhprotokoll inskickade från olika typer av borrhningar, framför allt för enskild vattenförsörjning och energibrunnar. Dessa data är öppna och fritt tillgängliga på SGUs webbplats. Totalt har data från ca 2 200 brunnar och sammanlagt 775 sonderingar från SGUs jord- och grundvattenkartläggning ingått som underlag (fig. 1b). Noteras bör att 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 av informationen om de hundratals olika lagerföljder som finns i databaserna gjorts.

Information från 12 borrhningar med geofysiska borrhålsloggningar, som utförts av Oljeprospektering AB (OPAB) under 1960-, 70- och 80-talen har tolkats och digitaliserats till litostratigrafiska lagerföljder. Dessa data finns som inskannade TIF-filer hos SGU.

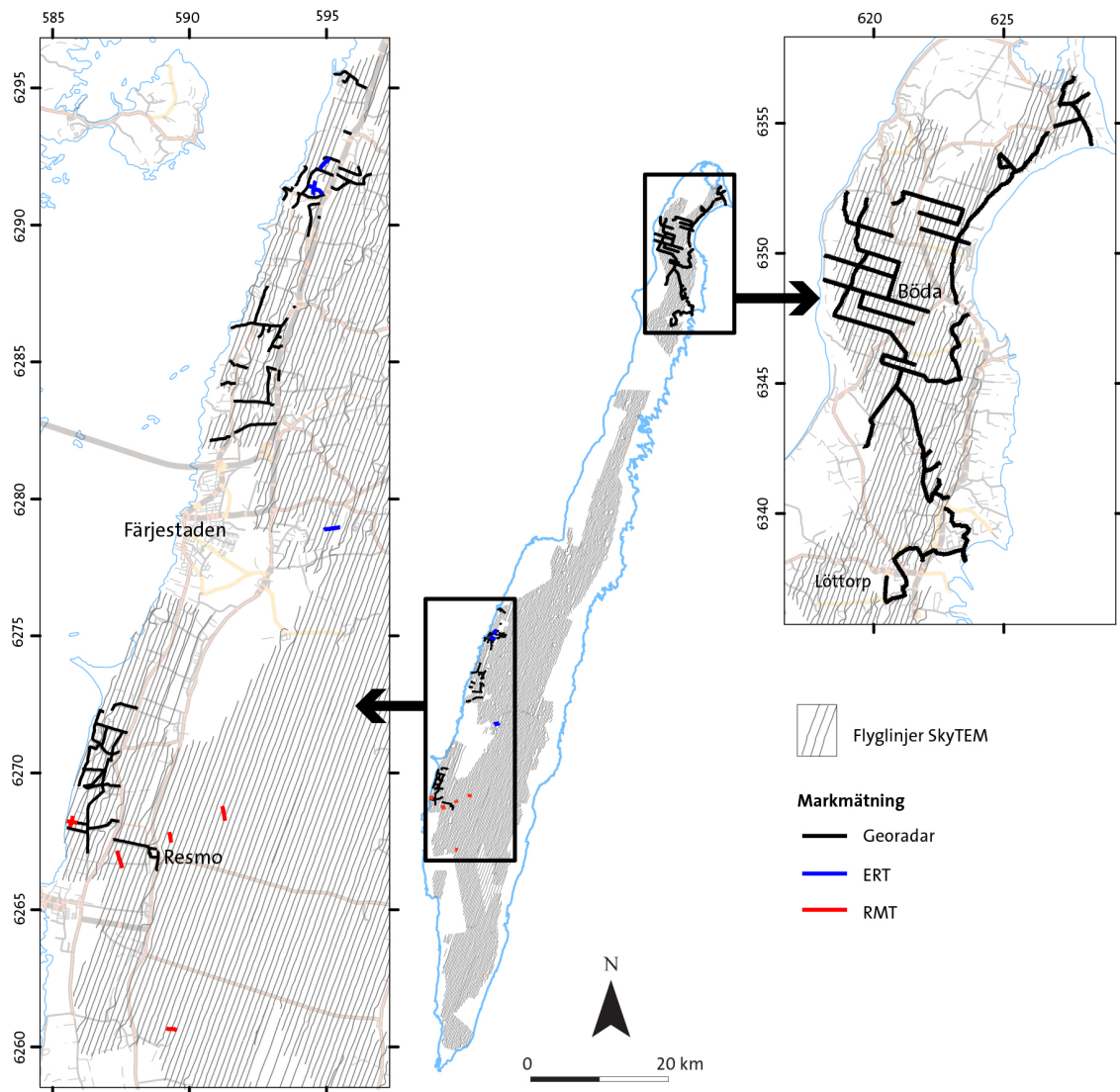
I rapporten refereras all information från Brunnsarkivet och borrhningar som borrhålsdata.

## Geofysiska markmätningar

För att få kompletterande geofysisk information, och för att följa upp intressanta anomalier som indikerats i SkyTEM-data, utfördes under 2016 och 2017 markmätningar med ERT (elektrisk resistivitetstomografi) och georadar. Det fanns även RMT- (radio-magnetotellurik) mätningar och georadarmätningar, som gjorts i samband med tidigare uppdragsprojekt. Dessa har använts som stöd vid den slutliga tolkningen och 3D-modelleringen av Öland (fig. 2). Undersökningarna har framför allt fokuserats på områden med mäktiga sandiga jordarter (för detaljer om markmätningar, se Dahlqvist m.fl. 2018).

## Övriga kartor och databaser

- Lantmäteriets höjdmodell 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 borrhålsuppgifter.
- SGUs jordartskarta. Skalan i modellområdet är 1:25 000 i området närmast åsen och 1:50 000 i övrigt.
- SGUs karta över grundvattenmagasin. Magasinsavgränsningen har använts för att avgränsa lagret isälvssediment och tillrinningsområdet har definierat modellområdets avgränsning. Vissa justeringar har gjorts, bl.a. med hänsyn till ny information.
- SGUs berggrundskarta. Skalan i modellområdet är 1:250 000.
- Databaserna Brunnar, Jordlagerföljder och Geofysiska markmätningar (markradar, seismik, ERT och RMT).
- Borrhålsdata från Oljeprospektering ABs (OPABs) prospekteringsborrhningar 1972 på Öland, och data från kärnborrhningarna vid Segerstads Fyr och Böda Hamn, utförda 1968 av SGU och 1955 av Stockholms universitet. Data från borrhålen finns sammanställda i Dahlman och Skoglund (Sveriges geologiska undersökning, opublicerad rapport, 1969), Grossi (1973) och Hessland (1955).



**Figur 2.** Lägen för de markbundna geofysiska profil­mätningarna (ERT, RMT och Georadar) som SGU utfört inom projektet SkyTEM Öland (Dahlqvist m.fl. 2018) och tidigare undersökningar. De grå linjerna visar området för den flygburna SkyTEM-undersökningen.

## TERRÄNGLÄGE OCH GEOLOGISK ÖVERSIKT

Här följer en kortfattad beskrivning av Ölands jordarter, berggrund och hydrogeologiska förhållanden. För en mer utförlig beskrivning se Dahlqvist m.fl. 2018 och referenser i den rapporten.

### Jordlager

Topografin och morfologin på Öland präglas framför allt av berggrunden och dess ytformer. Jordlagren är i regel tunna och saknas ibland helt, vilket gör att berggrunden är blottad över stora områden, speciellt på södra Öland.

Jordlagren avsattes framför allt under den senaste istiden, Weichselistiden, och den efterföljande postglaciala tiden. Hela Öland ligger under högsta kustlinjen (HK). På grund av samspillet mellan landhöjningen och mängden smältvatten som tillfördes haven har Östersjön genomgått olika



stadier, dels som insjö, dels som innanhav. Detta avspeglas på Öland framför allt i en stor förekomst och utbredning av svallsediment med tydliga strandvallar på olika nivåer.

Tabell 1 är en sammanfattning av jordarter och baseras främst på de jordartsgeologiska kartorna med tillhörande beskrivningar (Rudmark 1980, 1981, 1983, 1986).

**Tabell 1.** Sammanfattande beskrivning av jordlagerförhållandena på Öland.

Jordart	Kortfattad beskrivning	Kommentarer
Torv och gyttja	Torvmarkerna på Öland har bildats genom igenväxning av sjöar. Detta innebär att det finns gyttja under torven. De flesta torvmarkerna är i dag utdikade och uppodlade kärr.	Gyttjan är ofta kalkgyttja men kan även vara en alggyttja, lergyttja eller bleke.
Flygsand	Flygsanden utgörs av fraktionerna mellan- och finsand.	Flygsand förekommer i spridda områden på ön. Jordarten är dock vanligare på norra Öland. På nordligaste Öland finns ett av Sveriges största dynamiska områden.
Svallsediment och strandvallar	Hela Öland ligger som nämnts under Högsta kustlinjen (HK). Svallsediment i form av grus och sand förekommer rikligt på ön och allra mest på den norra delen. Under utveckling av Litorinahavet inträffade flera transgressioner för 5 000–7 000 år sedan. Även då avsattes tydliga strandvallar.	Även på lägre nivåer än Litorinavallen finns svallsediment, men oftast bara någon meter mäktigt. Det recenta svallsedimentet utgörs ofta av klapper, som nästan uteslutande består av kalksten.
Glaciala och postglaciala finkorniga sediment	Troligen har dessa sediment större utbredning, men överlagras av svallsediment. Postglaciala finsediment har avsatts i sänkor, oftast i anslutning till organogena jordarter.	Glacial lera och silt påträffas i små sänkor i moränen.
Isälvavlagringar	Generellt innehåller isälvavlagringarna ett långtransporterat material som domineras av urberg och sandsten. Detta skiljer sig från områdena med morän och svallsediment som helt domineras av bergartsfragment från den lokala kalkstenen.	Isälvavlagringar förekommer sparsamt på Öland
Morän	Moränens ytliga delar är svallade och består i regel av ett grovkornigt svallskikt. Blockhalten i markytan är i regel normal eller låg. Moränerna är vanligen typiska lokalmoräner, dvs. de präglas helt av material som kommer från erosion av den underliggande berggrunden. Generellt domineras moränerna av sandig morän och lerig sandig morän.	Direkt på berggrundsytan finns i regel ett lager med morän, en osorterad jordart bildad av bergartsmaterial som inlandsisen brutit loss, transporterat och avlagrat. Hög karbonathalt kännetecknar moränen som påträffas på kalkstensberggrunden. Moränens grovgrus- och stenhalt är i regel hög.

## Berggrund

Dahlqvist m.fl. (2018) beskriver Ölands sedimentära berggrund som baseras främst på de berggrundsgeologiska kartorna med tillhörande beskrivningar (Lundegårdh m.fl. 1985, Bruun m.fl. 1997, Wik m.fl. 2005) och publikationer av Stouge (2004) samt Nielsen och Schovsbo (2011).

Den sedimentära berggrunden består av underkambrisk sandsten (File Haidar-formationen), mellankambrisk siltsten och lerskiffer (Borgholmformationen) följt av överkambrisk (furonian)–underordovicisk alunskiffer, orsten och kalksten (Alunskifferformationen), underordovicisk glaukonitisk kalksten (Djupvik- och Köpingsklintformationerna) och överst en under- och mellanordovicisk sekvens med ett drygt 10-tal olika kalkstensformationer. Den sedimentära berggrunden överlagrar det prekambrika urberget och subkambriska peneplanet med lokala ”inselberg”, eller restberg, som till exempel Blå Jungfrun och Mossbergadomen.

Som ytberggrund förekommer i dag underkambrisk sandsten överlagrande urberget inom ett smalt stråk längs Smålandskusten angränsande till Kalmarsund. Eftersom lagerföljden stupar regionalt 0,2–0,3 grader åt öst och sydöst ökar den totala mäktigheten samt representationen av successivt yngre lager i samma riktning. I de mer låglänta delarna av ön, väster om den västra landborgens höjdrygg som sammanfaller med den ordoviciska kalkstenens utgående i väster, består berggrundsytan av mellankambriska lager med siltsten (Borgholmformationen). I branten påträffas, till exempel vid Äleklinta och söder om Degerhamn ner mot Ottenby, lager med alunskiffer (Alunskifferformationen) och glaukonitisk kalksten, sandsten och skiffer (Djupvikformationen och Köpingsklintformationen). Sammanlagt är den sedimentära berggrunden som mest ca 250 m mäktig på den sydvästra delen av ön. I norr är mäktigheten ca 160 m och i anslutning till Mossbergadomen påträffas urberget bestående av prekambrisk kvartsit redan på ca 70 meters djup.

## Hydrogeologiska förhållanden och vattenförsörjning på Öland

Öland har ofta brist på dricksvatten under sommarperioden. Ett stort antal turister och sommarboende resulterar i en kraftigt ökad vattenförbrukning samtidigt som påfyllningen av grundvattenmagasinen under motsvarande period är i princip obefintlig. Under 2016 kulminerade problemen med låga grundvattennivåer, vilket gjorde att man var tvungen att finna alternativa sätt att få bättre redundans i dricksvattenförsörjningen. Man körde tankbilar med dricksvatten från fastlandet, byggde en dricksvattenledning från fastlandet och startade projektering och anläggning av avsaltningsanläggningar. En viktig anledning till grundvattenbristen på Öland är jordlagrens och berggrundens begränsade magasineringsskapaciteter. Tunna jordlager i kombination med en relativt tät berggrund och ett utdikad landskap, gör att merparten av nederbörden som faller under vinterhalvåret inte bildar grundvatten utan snabbt rinner ut i Östersjön. Grundvattenbildningen under sommarhalvåret är även begränsad på grund av små nederbörds mängder, hög avdunstning och vegetationens vattenupptag. Därför är det av stor vikt att kartlägga, avgränsa och på ett ansvarsfullt sätt förvalta de områden på Öland som har eller kan få stor betydelse för den framtida dricksvattenförsörjningen.

### *Grundvatten i jord*

Förutsättningar för uttag av större volymer grundvatten ur de kvartära jordlagren finns i huvudsak i områden med isälvsediment och i större svallavlagringar som de vidsträckta fälten vid Löttorp och Böda. Vid flera av dessa platser har Borgholms och Mörbylånga kommun gjort grundvattenbrunnar för uttag av grundvatten, och på några av platserna har man dessutom gjort anläggningar för att kunna förstärka grundvattenbildningen. Av vattentäkterna i jordlager är Mörbylångas vattentäkt i Tveta avvikande, då den till skillnad från de andra inte är placerad i ett område med sand, utan i ett område med morän. Moränen vid Tveta är generellt något mer porös och genomsläpplig jämfört med moränen i allmänhet på Öland, samtidigt som de övre delarna av

berggrunden i området är uppsprucken. I gränsen mellan moränen och det uppspruckna berget finns lokalt gynnsamma uttagsmöjligheter i ett kombinerat jord- och berggrundsmagasin. Liknande förhållanden förekommer vid vattentäkter på andra ställen på ön, men är extra tydlig vid Tveta.

### **Grundvatten i berg**

Den sedimentära berggrunden på Öland innehåller varierande mängd grundvatten, ofta med mycket skiftande kvalitet. Kunskapen om grundvattentillgångarna i det underliggande urberget är i princip okända, det kan dock antas att grundvattnet i urberget är salt, vilket resulterar i ett begränsat värde som dricksvattenresurs. Den underkambriska sandstenen finns på ytan i fastlandssidan, och från borrhningar kring Kalmar är uttagsmöjligheterna i sandstenen generellt sett goda till mycket goda, uttagsmöjligheter på upp till 20 000 l/tim per brunn är inte ovanliga. På Öland är få brunnar borrade ner i sandstenen på grund av att den ligger relativt djupt, 30 m under havsnivån och lägre. De brunnar som når ner i sandsten har ofta visat sig innehålla ett grundvatten med höga kloridhalter. Över sandstenen finns en lagersekvens med mellankambrisk lerskiffer/siltsten/finkornig sandsten. De lerigare lagren är täta och har dessutom en låg sprickfrekvens medan de siltiga och sandiga avsnitten är mer uppspruckna och är en viktig akvifer för den öländska vattenförsörjningen, även om enskilda brunnar sällan ger mer än 3 000 l/tim per brunn. Över denna sekvens förekommer alunskiffer som är lokalt vattenförande med upp mot 5 000–7 000 l/tim.

Vattenföringen i alunskiffern beror i huvudsak på en hög sprickfrekvens, ofta i anslutning till orstenslager och kalkstenslager i alunskiffern. Vattenkvaliteten i alunskiffern på Öland är över lag dålig, det förekommer problem med både lukt och smak på grund av bland annat höga halter organiskt material och svavel. Den bergart som generellt utgör ytbergart på Öland öster om Västra landborgen är den ordoviciska kalkstenen. Kalkstenens vattenföring är, precis som för de underliggande bergarterna, kopplad till sprickor. Sprickfrekvensen varierar ganska mycket inom kalkstensområdet. Kalkstenen har dock ofta en förhöjd sprickighet i den övre delen närmast överliggande jordlager. Brunnar där intaget sker i övergången mellan jordlagren och den uppspruckna övre delen av berggrunden ger ofta stora vattenmängder, speciellt i områden med större jordmäktigheter på grund av dess vattenhållande egenskaper.

I den ordoviciska kalkstenen förekommer även ett antal sprickzoner med varierande utsträckning från några hundra meter till flertalet kilometer. Bredden varierar från några meter till ca 100 m. De centrala delarna av sprickzonerna är ofta även karstvittrade och fyllda med vittringsjord. En sådan större zon är Resmozonen som sträcker sig från Resmo by ca två kilometer ut på Alvaret. Resmozonen är så pass vittrad att den är tydligt markerad i terrängen, vid Resmo by har Mörbylånga kommun en vattentäkt där grundvatten från Resmozonen strömmar ut mot väster.

## **METODER**

All modellering har skett i programvaran GeoScene3D (I-GIS).

### **Jordartsmodell**

Jordlagret har delats in i tre klasser som är speciellt viktiga ur ett hydrogeologiskt perspektiv; friktionsjord (isälvsediment och postglacial sand-grus), kohesionsjord (morän, moränlera, och lera-silt) samt organisk jord. Voxelmodelleringen för jordlagren har utförts enligt följande arbetsflöde (Gulbrandsen m.fl. 2018, fig. 3):

- Befintlig information (brunnar, jordartskartan, jorddjupsmodell, resistivitetsmodell, m.m.) importerar till GeoScene3D.
- En tom 3D voxel-modell som täcker modelleringsområdet skapas. De voxeler som ligger mellan mark- och berggrundsytan (genom att använda jorddjupsmodellen) tilldelas litologin från jordartskartan enligt de förenklade jordartsklasserna.
- De voxeler som genomskärs av en borrhning tilldelas den jordartsinformation som anges i borrhningen.
- Med hjälp av sannolikhetsanalys på de resistivitetsmodeller som tagits fram ur SkyTEM-data (i form av en 3D-grid) och litologi från borrhningar uppskattas en gräns för att urskilja områden med lera/moränlera och annan klass (sand och grus). På Öland har voxeler (i resistivitetsmodellen) med en resistivitet mindre än 80 Ohmm klassats som lera/moränlera och de voxeler med resistivitet mer än 80 Ohmm klassats som sand och grus.
- Alla voxeler uppgraderas automatisk enligt sannolikhetsmodellen.
- 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 voxeler (från markytan och 4 m ner) tilldelats litologin från SGUs jordartskarta. Slutligen sker manuell kontroll och finjustering av modellen.

## Berggrundsmodell

I berggrundsmodellen har den lagermodellen använts som grund vid den litologiska modelleringen eftersom vissa litologiska gränser även sammanfaller med de litostratigrafiska gränserna. Inom områden med flygburna TEM mätningar har resistivitetsmodellerna använts för att dela in silt-/lersten (i Borgholmformationen) i två klasser (fig. 4), dvs. lersten (mindre än 30 Ohmm) och siltsten (mer än 30 Ohmm). Utanför områden med flygburna TEM mätningar voxeler i Borgholmformationen har enbart klassen silt-/lersten (fig. 4) använts.

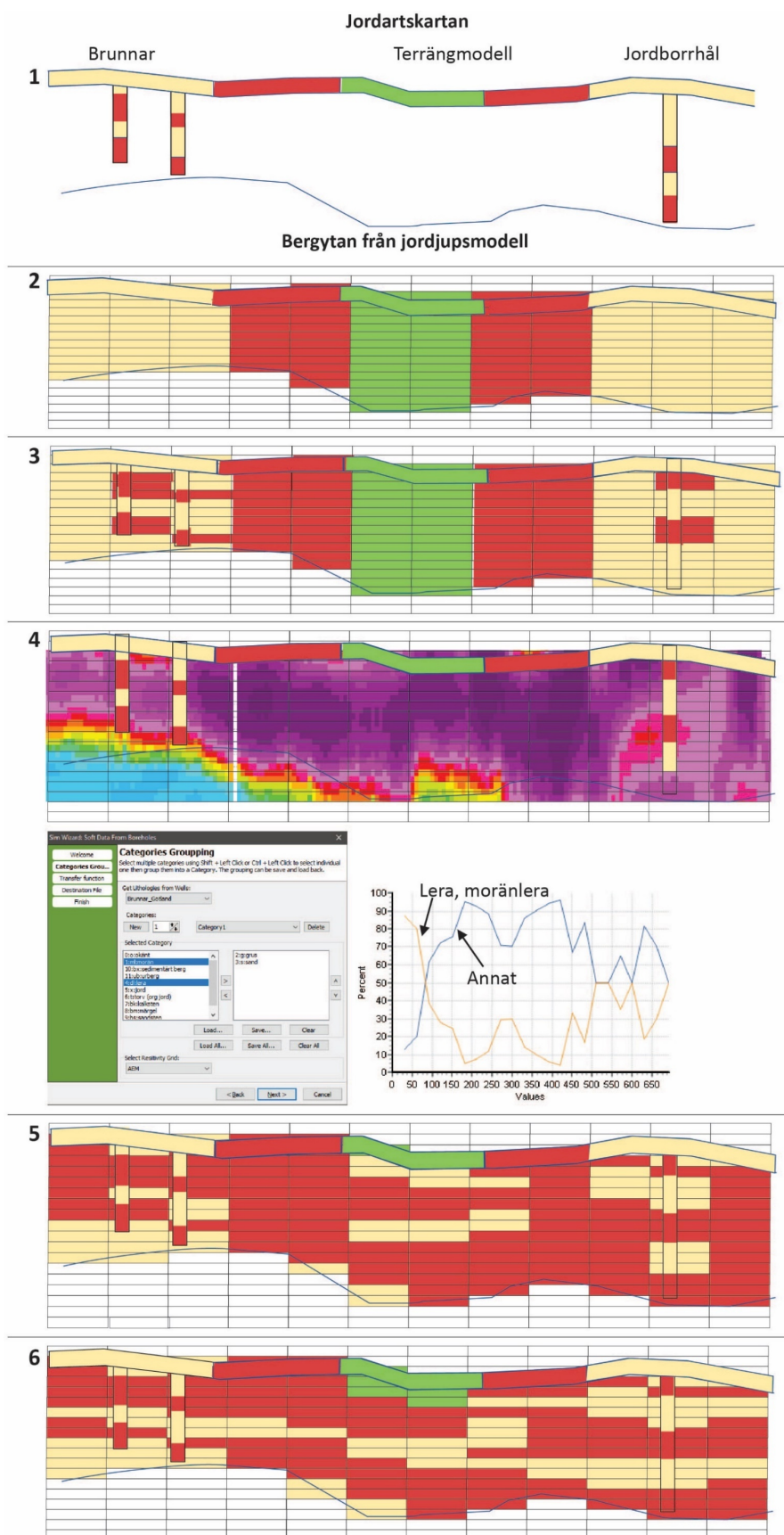
## MODELLENS BEGRÄNSNINGAR OCH OSÄKERHET

Det är viktigt att komma ihåg är att den geologiska 3D-modell som skapats är en modell och inte en exakt återgivning av jordlagren och berggrunden på Öland. Den ska ses som ett konceptuellt underlag inför fortsatta mer detaljerade undersökningar inom specifika områden. I områden där det finns både borrhålsdata och resistivitetsmodell från SkyTEM modellen är mycket säkrare.

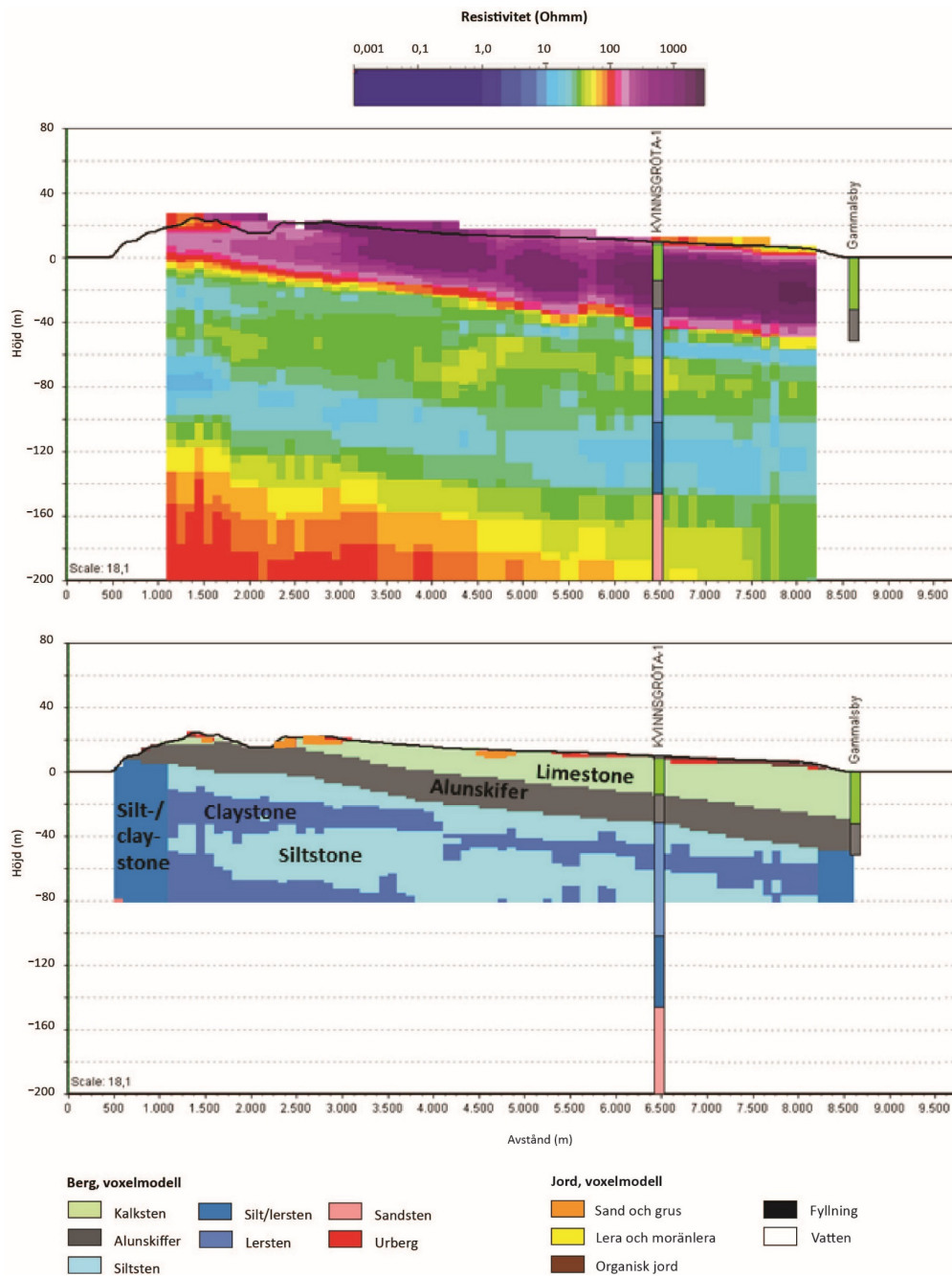
3D-modellen ger en generaliserad bild av jordlagren och berggrunden. Osäkerheten i lagrens utbredning och mäktighet är betydande särskilt på större djup. Inom områden som täcks av SkyTEM-undersökningar är osäkerheten beroende på datakvalitet, resistivitetskontrast mellan olika lager och upplösning av metodiken som reduceras logaritmiskt med djup.

Osäkerheten är störst inom de delar av modellområdena där det inte finns geofysiska data (flyg och mark) eller så många borrhålsuppgifter. Generellt kan sägas att på större avstånd från en observationspunkt än något hundratal meter är osäkerheten betydande.

De generella antaganden som gjorts i modelleringen innebär i sig en osäkerhet. Man kan inte förvänta sig att de överensstämmer med verkligheten överallt.



**Figur 3.** Arbetsflöde för voxelmodellering av jordlager. **1.** Import av befintlig information till GeoScene3D. **2.** En tom voxel skapas och fylls med information från jordartskartan ovanpå berget. **3.** Borrhålsinformation tilldelas. **4.** Sannolikhetsanalys på resistivetsmodell genomförs. **5.** Alla voxlar uppdateras. **6.** Litologin uppdateras och några voxlar finjusteras manuellt.



**Figur 4.** Exempel för voxelmodellering av berggrunden längs en öst–västlig profil genom OPAB-borrhålen Kvinngröta 1. Resistivetsdata (övre bild) och den litologiska voxelmodellen (undre bild). Observera underindelningen av Borgholmformationen i lersten och siltsten i områden där SkyTEM-data finns. Se Nielsen och Schovsbo (2011) för mer detaljerad beskrivning av litostratigrafi i olika formationer på Öland.

## RESULTAT

### Modellerade ytor, lager och volymer

Resultaten från mätningarna med SkyTEM-systemet (se Dahlvist m.fl. 2015, 2017, 2018, 2019 för detaljerad beskrivning om systemet) i form av resistivitetsmodeller utgör ett bra underlag för att skapa geologiska modeller i 3D. SGU har använt programvaran GeoScene3D (I-GIS) för att skapa 3D-modeller över Öland. Förberedelserna för modelleringsarbetet har inkluderat import av resistivitetsmodellerna från SkyTEM-data, höjddata, fastighetskartan, jordartsgeologiska kartan, berggrundsgeologiska kartan, resultat från markbundna geofysiska mätningar, SGUs brunnarkiv samt övriga undersökningsborrningar. När all data importerats granskas resistivitets-fördelningen längs samtliga mätprofiler. Jämförelser med geologisk information ger successivt en bild av hur resistiviteten längs de enskilda profilerna kan vara avgränsade men också vad de kan motsvara för typ av geologisk eller hydrogeologisk enhet.

Figur 5 visar ett exempel på arbetsgången över ett område vid Lindbyfältet, sydöst om Borgholm samt en 3D-vy över samma område. Själva tolkningen och 3D-modelleringen har skett i flera steg. Initialt har vi delat in modellen i sex lager: jord, kalksten, alunskiffer, ler-/siltsten, sandsten och urberg. Detta arbete görs till största delen manuellt och är relativt tidskrävande. I det här skedet används främst borrhålsdata tillsammans med resistivitetsmodellerna (fig. 5a och 5b). Borrhålsdata är viktiga eftersom de innehåller värdefull information om lagerföljder och med hjälp av resistivitetsmodellerna kan vi sedan knyta ihop de olika lagren i områden mellan borrhålen och där borrhålsinformation saknas.

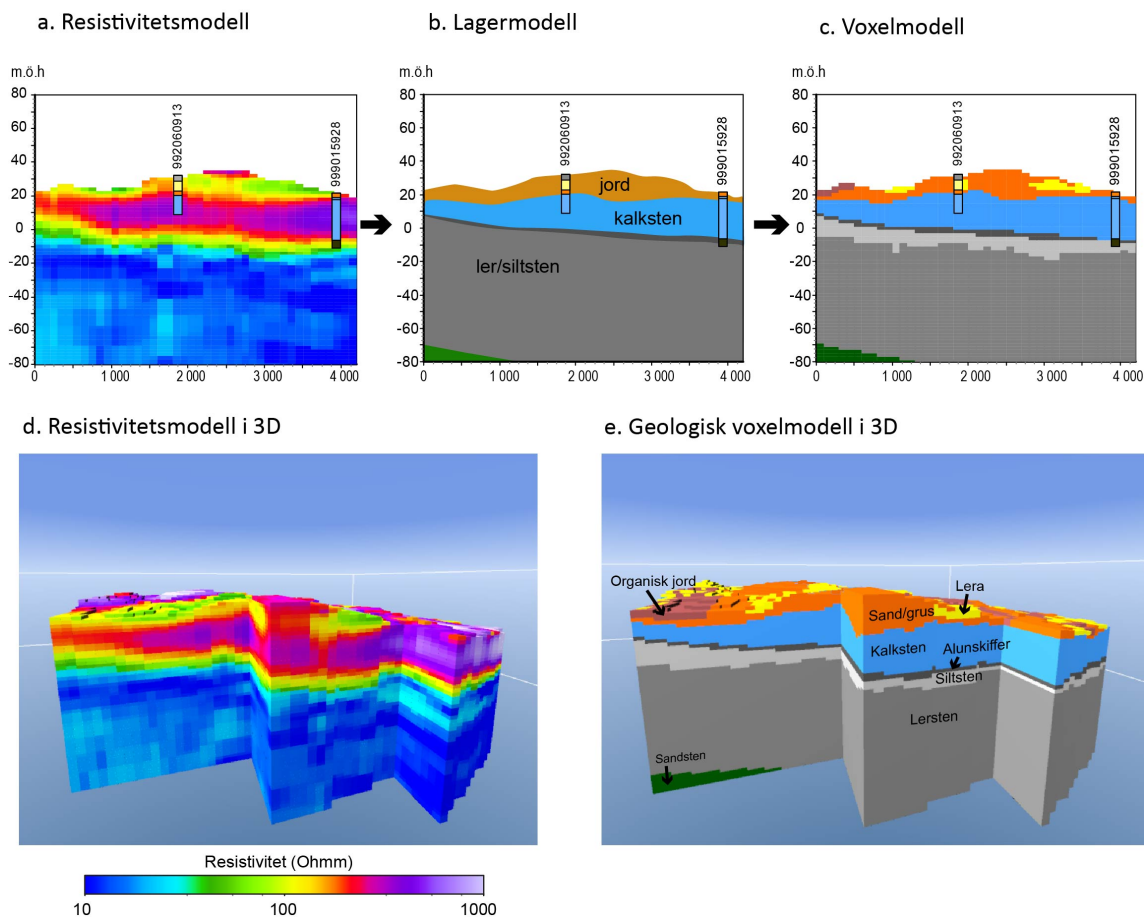
I steg två har lagermodellen konverterats till en voxelmodell med enskilda celler med en storlek på  $100 \times 100$  m i horisontalled och 2 m i djupled (fig. 5c). Varje cell har tilldelats ett värde från lagermodellen, dvs. jord eller bergartstyp. I steg tre har sedan voxelmodellen förfinats. Voxelmodellen sträcker sig från markytan och ner till 80 m under havsytans nivå.

#### *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 80 m under havsytans nivå, samt en med lägre upplösning ( $100 \times 100 \times 5$  m) ner till 250 m under havsytans nivå (fig. 5a och 5d).

#### *Lagermodell*

Den stratigrafiska modellens indelning (tabell 2) baseras främst på de berggrundsgeologiska kartorna med tillhörande beskrivningar (Lundegårdh m.fl. 1985, Bruun m.fl. 1997, Wik m.fl. 2005), publikationer av Stouge (2004) och Nielsen och Schovsbo (2011), resistivitetsmodellen, samt OPABs kärnbörningar. Modellen innehåller totalt fem lager från det prekambriskas urberget upp till under- och mellanordovicisk kalksten (sekvens av ett drygt 10-tal kalkstensformationer) (fig. 6). Den stratigrafiska modellen finns både som lagermodell och voxelmodell.



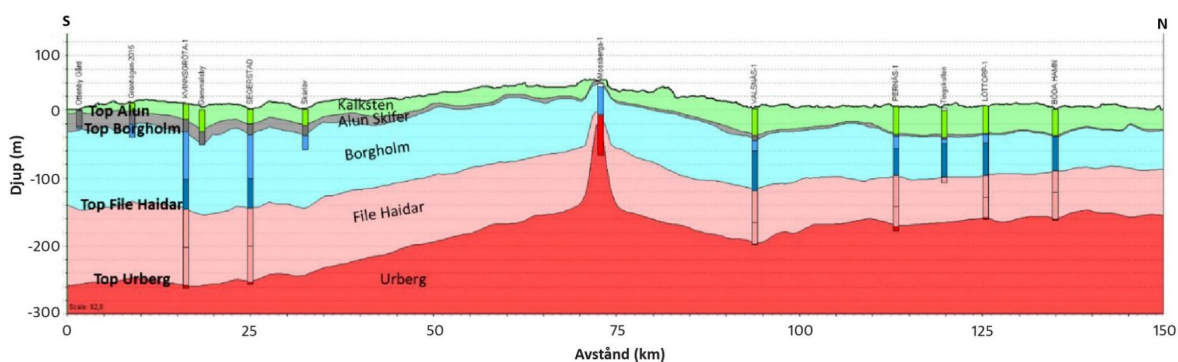
**Figur 5.** Arbetsgången vid 3D-modellering i GeoScene3D. Figurerna visar en profil samt 3D-vy över sand- och grusavlagringarna vid Lindbyfältet, sydöst om Borgholm. **a.** Resistivitetsmodell från SkyTEM-data samt borrhålsinformation, **b.** Geologisk lagermodell, **c.** Geologisk voxelmodell, **d.** Ett utsnitt ur den tredimensionella resistivitetsmodellen, **e.** ett utsnitt ur den tredimensionella geologiska voxelmodellen. Profilen i a–c går från nordväst mot sydöst. I 3D-vyn i d–e ligger betraktelsepunkten i sydväst och den vertikala skalan är överdriven 20 gånger i förhållande till den horisontella.

**Tabell 2.** Modellerade lager och voxlar i den stratigrafiska modellen.

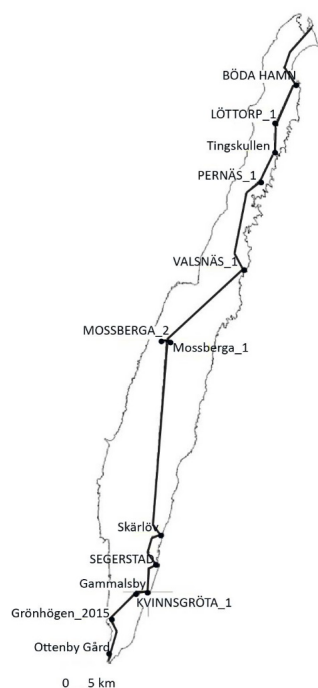
Lagernamn	Bergart_geoenhet	Beskrivning	Kommentar
Ordovicisk kalksten	311_509	Kalkstenslagren består av ett 10-tal olika enheter med uthållig utbredning. Kalkstenen är som mest ca 40 m mäktig på den nordöstra delen av Öland.	Enskilda lager är vanligtvis 5–20 cm mäktiga och åtskilda av tunna lagringsplan som delvis är oxiderade eller lerfyllda
Alunskifferformationen	309_504	Består av svart skiffer med orsten- och kalkstenslager/bankar. Är drygt 20 m mäktigt på södra Öland medan den i norr endast är någon meter mäktig.	Ofta kraftigt uppsprucken, speciellt i den norra delen av ön. Ofta med svavel och hög organisk halt.
Borgholmsformationen	308_545	Domineras av siltsten och lersten	
File Haidar-formationen	303_546	Finkornig sandsten och lersten.	
Urberg	203_113	De få borrhningar som når ner i urberget visar på en dominans av gnejs och granit. Lokal förekomst av prekambrisk kvartsit.	



a



b



**Figur 6. a.** Lagermodellen längs en ca 150 km lång profil över Öland. Mossberga-  
domen ligger i mitten av profilen med en markant förhöjning av urbergsytan. **b.**  
Läget av profilen. Lagernamnen som visas i figuren är en förkortning av namnen  
som presenteras i den första kolumnen i tabell 2.

Lagermodellen har tagits fram genom att tolkningspunkter lagts in manuellt längs rörliga profiler, så att de bildar ett regelbundet nätverk med ungefär samma avstånd mellan varje punkt. I områden med sämre datatäckning kan avståndet mellan tolkningspunkterna vara större. Därefter har varje punktskikt interpolerats till en yta med cellstorleken  $500 \times 500$  m.

Tolkningspunkterna är lagrade i en accessdatabas där punkttypen anger vilken typ av data som tolkningen baseras på: 1: Borrning (inklusive OPABs borrningar), 2: Geofysiska mätningar (inklusive flygburna TEM-data), 0: Ingen data (hjälpunkt).

### Litologisk modell

Den litologiska modellen består av berggrunden och jordlagren som slagits ihop till en gemensam voxelmodell med cellstorleken  $100 \times 100 \times 2$  m (fig. 3e). Jordarts- och bergartsindelningen (tabell 2) är en förenkling jämfört med SGUs jordarts- och berggrundskartor över området.

**Tabell 3.** Modellerade lager och voxlar i den litologiska modellen.

Lager	Kod enligt SGUs ramverk	Beskrivning	Kommentar
Isälvsediment och postglacial sand–grus	1_OSED_S-G_0	friktionsjord	Kod enl. Jorddb: 50/31
Morän, moränlera, och lera–silt	1_OSED_L-B_0	kohesionsjord	Kod enl. Jorddb: 100/98/86
Organisk jord	1_TORV_ospec_0	Torv/gyttja/kärrtorv	Kod enl. Jorddb: 75/6/5
Vatten	VATTEN	Områden täckt med vatten i form av polygoner	Kod enl. Jorddb: 91
Kalksten	SEBERG	Ordovicisk (se tabell 2)	Kod enl. bmoddb: 311
Alunskiffer	SEBERG	Alunskifferformationen (se tabell 2)	Kod enl. bmoddb: 309
Siltsten	SEBERG	Borgholmformationen (se tabell 2)	Kod enl. bmoddb: 308
Silt–/lersten	SEBERG	Borgholmformationen (se tabell 2)	Kod enl. bmoddb: 308
Lersten	SEBERG	Borgholmformationen (se tabell 2)	Kod enl. bmoddb: 308
Sandsten	SEBERG	File Haidar-formationen (se tabell 2)	Kod enl. bmoddb: 303
Urberg	URBERG	Granit/kvartsit (se tabell 2)	Kod enl. bmoddb: 203/306

Jordarter av underordnad betydelse och jordarter med liknande egenskaper har förts till någon av de tre jordartsklasser som modellerats (tabell 3). Över de områden som är täckta med flygburna TEM-mätningar har en ny tolkning av berggrundens överyta gjorts, och i övriga områden har SGUs jorddjupsmodell använts som främst är baserad på borrhningar.

## REFERENSER

- Bruun, Å., Kornfält, K.-A. & Wikman, H., 1997: Beskrivning till provisoriska berggrundskartan över Kalmar. *Sveriges geologiska undersökning Ba 46*, 33 s.
- Dahlqvist, P., Triumph, 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., Triumph, 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.
- Dahlqvist, P., Bastani, M., Persson, L., Triumph, C.-A., Erlström, M., Gustafsson, M., Jørgensen, F., Gulbrandsen, M. & Malmberg Persson, K. 2018: SkyTEM-undersökningar på Öland – Geologiska tolkningar och hydrogeologisk tillämpning. *Rapporter och Meddelanden 145*, Sveriges geologiska undersökning, 104 s.
- Dahlqvist, P., Brolin, C., Hellstrand, E., Erlström, M., Gustafsson, P., Malmberg-Persson, K., Engdahl, M., Lång, L.-O., & Andersson, J. 2019: SkyTEM-undersökningar i Halland – Geologiska tolkningar och hydrogeologisk tillämpning. *Rapporter och Meddelanden 147*, Sveriges geologiska undersökning, 123 s.
- Grossi, B., 1973: Öland drilling 1972. Rapport OPAB, 10 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 7<sup>th</sup> International Workshop on Airborne Electromagnetics.
- Hessland, I., 1955: Studies in the lithogenesis of the Cambrian and Basal Ordovician of the Böda Hamn sequence of strata. *Bulletin of the Geological Institution of the University of Uppsala 35*, 35–109.

- Lundegårdh, P.H., Wikström, A. & Bruun, Å., 1985: Beskrivning till provisoriska översiktliga berggrundskartan Oskarshamn. *Sveriges geologiska undersökning Ba 34*, 27 s.
- Nielsen, A. T. & Schovsbo, N.H., 2011: The Lower Cambrian of Scandinavia: Depositional environment, sequence stratigraphy and palaeogeography. *Earth Science Reviews 107*, 207–310.
- Rudmark, L., 1980: Beskrivning till jordartskartan Kalmar NO/Runsten NV. *Sveriges geologiska undersökning Ae 43*, 100 s.
- Rudmark, L., 1981: Beskrivning till jordartskartan Borgholm SV. *Sveriges geologiska undersökning Ae 45*, 67 s.
- Rudmark, L., 1983: Beskrivning till jordartskartan Borgholm NV/NO. *Sveriges geologiska undersökning Ae 55*, 73 s.
- Rudmark, L., 1986: Beskrivning till jordartskartorna Kalmar SO/Runsten SV Kristianopel NO. *Sveriges geologiska undersökning Ae 70–71*, 72 s.
- Stouge, S., 2004: Ordovician siliciclastics of Öland, Sweden. *Erlanger geologische Abhandlungen Sonderband 5*, 91–111.
- Wik, N.G., Bruun, Å., Claeson, D., Jelinek, C., Juhojuntti, N., Kero, L., Lundqvist, L., Stephens, M.B., Sukotjo, S. & Wikman, H., 2005: Beskrivning till regional berggrundskarta över Kalmar Län. *Sveriges geologiska undersökning Ba 66*, 50 s.