# Helikopterburna TEM-mätningar över Östgötaslätten

# – Geologiska tolkningar och hydrogeologisk tillämpning

Peter Dahlqvist, Oskar Henriksson, Jonas Ising, Mikael Erlström november 2020 & Mattias Gustafsson

SGU-rapport 2020:33





Omslagsbild: Foto på helikopter med SkyTEM-systemet. Vallerstad kyrka i bakgrunden.

Fotograf: Peter Dahlqvist

Författare: Peter Dahlqvist, Oskar Henriksson, Jonas Ising, Mikael Erlström & Mattias Gustafsson

Granskad av: Jakob Levén, Lena Persson & Eva Hellstrand Språkgranskning av Abstract: Helena Dahlgren

Ansvarig enhetschef: Jakob Levén

Redaktör: Johan Sporrong

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

www.sgu.se

# INNEHÅLL

Sammanfattning	4
Abstract	5
Termer	6
Inledning	7
Undersökningsområde	
Mål och syfte	9
Genomförda undersökningar och metoder	
SkýľEM	
Brunnsarkiv och borrningar	
Geofysiska borrhåls- och markmätningar	15
Geologisk beskrivning	
Berggrunden	
Jordarter	23
Hydrogeologiska förhållanden och vattenförsörjning	
Resultat och områdesspecifika tolkningar	
Bergöveryta, berggrundsenheter och jorddjupsmodell	
Förkastningszoner i berggrunden	
Områdesvisa geologiska tolkningar	
Område 1: Lemunda-Boren	
Område 2: Vadstena-Tåkern	
Område 3: Skänninge-Motala	54
Område 4: Motala-Fornåsa	
Område 5: Borensberg-Ljungsbro	70
Hydrogeologisk beskrivning av berggrunden	77
Slutsatser och diskussion	
ATEM-metodens möjligheter och begränsningar	
Geologisk och hydrogeologisk tolkning	
Kommunvisa rekommendationer för vidare arbeten	
med ATEM-data och vattenförsörjning	
Referenser	
Bilaga 1. Lagerföljder från utförda borrningar	90
Bilaga 2. Geofysisk borrhålsloggning	
Bilaga 3. Redovisning av tTEM-resultat	
Bilaga 4. Medelresistivitet för valda djupintervall	

## SAMMANFATTNING

I juni 2018 undersökte Sveriges geologiska undersökning (SGU) ett område mellan Motala, Linköping och sjön Tåkern med helikopterburen transient elektromagnetisk mätning (Airborne Transient Electromagnetic, ATEM). Undersökningarna syftar primärt till att förbättra det hydrogeologiska underlaget till stöd för planering av vattenförsörjning. Undersökningarna ska bidra med information om jordlager och berggrund, och möjliggöra tolkningar av grundvattenmagasin och dess utbredning.

Undersökningsområdet som utgörs av Östgötaslätten ligger i huvudsak under högsta kustlinjen. Generellt är jordlagren mellan 10 och 20 m mäktiga. Den vanligaste jordarten är morän, större isälvsavlagringar finns som tydliga åsformer med nord–sydlig orientering, och finkorniga jordarter i låglänta områden. Berggrunden består till största delen av sedimentär berggrund i form av kalksten, skiffer och sandsten och urberget av granit. De större grundvattentillgångarna i området finns framförallt i de större sand- och grusavlagringarna, både som öppna och slutna grundvattenmagasin, samt i sprick- och porakviferer i den sedimentära berggrunden.

De helikopterburna mätningarna utfördes med mätsystemet SkyTEM av ett danskt företag med samma namn. Flygningarna skedde längs parallella flyglinjer med cirka 200 m mellanrum. Mätinstrumentet som hänger under helikoptern finns i en 300 m<sup>2</sup> stor ram som befinner sig på 30–50 m över marken under flygningen. Totalt undersöktes ett område på cirka 670 km<sup>2</sup>.

ATEM-metoden tar fram en modell av markens elektriska ledningsförmåga utryckt som resistivitet. Olika geologiska material, till exempel sand och urberg, har skilda resistivitetsvärden beroende på sin mineralsammansättning, porositet och vattenmättnadsgrad. Det gör det möjligt att med hjälp av lagerföljdsinformation från bland annat borrningar, skilja geologiska enheter åt. I denna rapport sker en översiktlig beskrivning av bearbetning och analys av mätresultat, samt en inledande geologisk och hydrogeologisk tolkning av dessa. I Brolin m.fl. (2020) finns en ingående beskrivning av metoden samt hur resistivitetsdata bearbetats och analyserats. Kompletterande fältarbete utfördes som en del i tolkningsarbetet av resistivitetsdata. Borrningar med lagerföljdsbestämning utfördes i berg på tre platser och i jord på 12 platser. Två av borrhålen i berg undersöktes även med geofysisk borrhålsloggning. Därtill utfördes förfinad geofysisk undersökning i tre småområden med en markdragen transient elektromagnetisk metod (tTEM – towerd Transient Electromagnetic).

Resistivitetsdata och samtolkning med borrhålsinformation visar att TEM-metodiken lämpar sig väl för en karaktärisering av såväl jord- som berglager i undersökningsområdet. Speciellt lämplig var metoden att urskilja lager i den sedimentära berggrunden vilket underlättat för en tredimensionell kartläggning av de sedimentära bergarternas utbredning. Ett viktigt resultat är att gränsen mellan jord och berg har kunnat bestämmas med betydligt högre noggrannhet än tidigare vilket ger en mer tillförlitlig jorddjupskarta i området. ATEM-data har även använts för att lokalisera förkastningszoner vilket ökat kännedomen om dessa i området.

I undersökningsområdet har ett antal områden pekats ut som intressanta ur ett hydrogeologiskt perspektiv. Det rör sig oftast om områden i anslutning till tidigare kända grundvattenförekomster i jordlagren, bland annat områden med mäktiga jordlager i anslutning till grundvattenförekomster vid Djurkällaplatån, Nässja, Lagmansberga-Ramstad, Grepstad och Fornåsa. Ett antal befintliga grundvattenförekomster föreslås få nya avgränsningar, i vattenförvaltningsarbetet, baserat på tolkningar utförda på resistivitetsdata och den nya jordartskartan. SGU föreslår att ett antal områden utreds vidare för att klarlägga de hydrogeologiska förhållandena i större detalj och eventuellt kan utgöra viktiga vattenförsörjningsresurser. Med hjälp av tolkningarna av resistivitetsdata skapades en geologisk 3D-modell, innehållande jordlager samt de olika sedimentära berglager och det kristallina urberget, som kan utgöra ett viktigt underlag vid undermarksplanering i området.

## ABSTRACT

In June 2018, the Geological Survey of Sweden (SGU) conducted a survey of an area between Motala, Linköping and lake Tåkern using helicopter borne transient electromagnetic measurements (ATEM - Airborne Transient Electromagnetic Measurement). The primary purpose of the survey was to improve the hydrogeological knowledge of the area in order to facilitate the management of water resources and water supply. The acquired measurements provide information about soil and bedrock geology and assist in the identification and delimitation of groundwater aquifers. The survey covered a geographical area referred to as "Östgötaslätten", the Östgöta plain. The greater part of this area lies below the highest ancient shoreline. The soil layers generally reach depths of 10-20 m and the most common soil type is till. Sand and gravel ridges with north-south alignment are also relatively common, as are fine-grained clay deposits in lower lying areas. The bedrock consists mainly of sedimentary rocks – limestone, shale and sandstone – on top of a crystalline basement of granite. Large groundwater resources are expected to be found in the larger sand and gravel deposits, both as confined and unconfined aquifers, but also in fractures and pores within the sedimentary bedrock. The helicopter survey was carried out by the Danish company SkyTEM Surveys Aps using their ATEM method. The helicopter flights were undertaken along parallel flight-lines spaced at approximately 200-metre intervals. The measuring equipment is attached below the helicopter and consists of a  $300 \text{ m}^2$ frame hanging 30–50 m above ground. A total area of roughly 670 km<sup>2</sup> was covered.

The ATEM method provides a model of the ground's electrical conductivity expressed as resistivity. Different geological materials such as sand or a granitic bedrock show different values of resistivity depending on mineral composition, porosity and water saturation. The differences in resistivity together with lithological information from boreholes makes it possible to distinguish between different geological units. This paper gives a brief overview of the processing and analysis of the resistivity data as well as a synoptic interpretation of the geology and hydrogeology of the survey area. In Brolin et.al. (2020) a more in-depth description of the method and how the resistivity data has been analyzed and processed is presented. In order to supplement existing data and provide improved correlation in soil and bedrock, fifteen boreholes were drilled (twelve in shallow drillings in the quaternary deposits and three into the bedrock). Borehole resistivity logging was performed at two of the boreholes. More detailed measurements were carried out in three areas with the tTEM method (tTEM -towed Transient Electro Magnetic measurements).

The results acquired from the resistivity measurements together with information from borehole information show that the ATEM-method is well suited for characterizing soil and bedrock layers within the survey area. The method was found to be particularly suitable for distinguishing the different types of sedimentary bedrock, which facilitated a three-dimensional mapping of the distribution of the sedimentary rocks. An important result is that the boundary between soil and bedrock could be determined with significantly higher accuracy than before, providing a more reliable soil depth map of the area. The ATEM data have also been used to identify fault zones, which has increased awareness of their location. A number of areas have been pointed out as interesting from a hydrogeological perspective. These include areas with thick soil layers in, or adjacent to, the five groundwater bodies Djurkällaplatån, Nässja, Lagmansberga-Ramstad, Grepstad and Fornåsa. Based on interpretations of the aquired resistivity data and the updated soil map, the delimitation of a number of groundwater bodies will be revised and updated in relation to the Water Framework Directive. SGU propose further investigation of the identified areas of interest in order to clarify the hydrogeological conditions in greater detail, which could lead to the identification and utilisation of important water supply sources. A geological 3D model has been created, containing soil layers, the various sedimentary rock layers and the crystalline bedrock. This model could form an important basis for underground planning.

## TERMER

Akvifer	En vattenförande formation i jord eller berg som kan avge vatten i användbara volymer.
ATEM	Airborne Transient Electromagnetic. Luftburen TEM-metod.
Borrhålsloggning	Olika geofysiska mätinstrument förs ner i ett borrhål och registrerar borrhålsväggens och grundvattnets fysikaliska egenskaper.
Brunnsarkivet	SGUs brunnsarkiv som tar emot och lagrar information om brunnar enligt lagen om uppgiftsskyldighet (SFS 1975:424).
DGPS	Differentiell GPS (globalt positionssystem) där en ökad noggrannhet ner till centimeter- nivå uppnås genom systematisk korrektion
Geofysisk sondering	En fiktiv borrning som istället för att bestå av en lagerföljd visar hur en fysikalisk parameter (till exempel resistivitet) varierar med djupet i en punkt.
GIS	Geografiska informationssystem. GIS är datorbaserade informationssystem för inmatning, bearbetning, lagring, analys och presentation av geografiska data.
Grundvattenmagasin	En hydrauliskt avgränsad enhet av en eller flera geologiska formationer som medger uttag av grundvatten.
Hydraulisk kondukti- vitet, K (m/s)	Ett mått på markens vattengenomsläpplighet.
Lineament	En linjär struktur observerad i någon typ av data, oftast geofysisk, som representerar en geologisk struktur.
Litologi	Beskrivning av jord- eller bergart beroende på kornstorlek och mineralsammansättning.
Paleogeografi	Beskrivning av historisk geografi.
Resistivitet	Ett materials motstånd till att leda elektrisk ström.
Seismik	Geofysisk metod som utnyttjar hur en tryckvåg breder ut sig i marken, utnyttjas framförallt för bestämning av jorddjupet.
Skruvborrning	En jordskruv roteras ner genom jordlagren med en borrbandvagn. Skruven tas upp och bedömning av jordart samt eventuell provtagning görs i fält.
SkyTEM	Helikopterburen TEM-metod anpassad för hydrogeologiska tillämpningar. SkyTEM är också namnet på det företag som utför mätningarna.
Sondering	En spets trycks, vrids eller slås ner genom jordlagren med en borrbandvagn. Motståndet mot neddrivningen registreras och tolkas till jordart.
TEM	Transient Electromagnetic, en tidsdomän elektromagnetisk geofysisk mätmetod.
T-värde	Ett värde på grundvattnets horisontella flöde genom en akvifer, den så kallade transmissiviteten.
tTEM	towed Transient electromagnetic. En TEM-mätning som utförs genom att en sändare och mottagare dras på en släde efter en fyrhjuling.

## INLEDNING

Låga grundvattennivåer har de senaste åren skapat problem för såväl kommunal som enskild vattenförsörjning runt om i Sverige. SGU fick 2018 ett regeringsuppdrag som bland annat går ut på att vi ska utöka kartläggningen och karakteriseringen av grundvattenresurser i särskilt utsatta bristområden. Det rör sig framförallt om områden med liten tillgång men även med stora behov. Syftet är att kartläggningen ska bidra med ett förbättrat planeringsunderlag som förenklar och säkerställer kommunal och regional vattenförsörjningsplanering. I Östergötland har både yt- och grundvattennivåerna varit låga de senaste åren vilket skapat problem för vattenförsörjningen.

På Östgötaslätten finns flera områden med förutsättningar för större grundvattenuttag i såväl de mäktiga jordlagren som den underliggande sedimentära berggrunden. SGU har de senaste åren gjort omfattande undersökningar på Gotland, Öland och i Halland och Västergötland med en helikopterburen geofysisk teknik. Undersökningarna har gett detaljerad information om geologiska förhållanden i jordlagren och berggrunden som kan kopplas till hydrogeologiska förutsättningar och bedömning av förekomst av grundvattenmagasin som även lett till att nya vattentäkter kunnat tas i bruk (Dahlqvist m.fl. 2015, 2017, 2018a, 2019, 2020). SGU bedömde att man genom en undersökning av Östgötaslätten med samma metod kan kartlägga kända men även okända grundvattenförekomster och bidra med ett förbättrat geologiskt underlag till regionen.

Metoden samlar in stora mängder data på kort tid och är kostnadseffektiv om man ser till den insamlade mängden. Tack vare att man får en tredimensionalitet utgör metoden ett starkt tolkningsunderlag både vad gäller geologi och inte minst områdets hydrogeologiska förutsättningar. De helikopterburna undersökningarna kompletterades med tre undersökningsborrhål, 12 skruvborrningar, två geofysiska borrhålsundersökningar, samt markbundna TEM-undersökningar med fyrhjuling för detaljstudier i tre mindre områden.

Under juni 2018 utfördes ATEM-mätningar inom området mellan Motala, Linköping och sjön Tåkern (fig. 1). Resultatet från mätningarna blir resistivitetsmodeller med cirka 30 m avstånd längs de profiler som helikoptern flyger. Variationer i resistivitet beror framförallt på skillnader i porositet, andel lermineral, och vatteninnehåll hos det geologiska materialet. Med hjälp av geologiska konceptuella modeller och annan data (främst lagerföljder från borrhålsinformation) kan resistiviteten översättas till geologi och tolkningar angående områdets hydrogeologiska förutsättningar kan göras.

SGUs insamlande och tolkning av resistivitetsdata bidrar till ett förbättrat geologiskt underlag och ökar samtidigt kunskapen om de hydrogeologiska förutsättningarna i undersökningsområdet. Rapporten vänder sig framförallt till de som arbetar med grundvattenfrågor inom eller i anslutning till undersökningsområdena. Det kan till exempel vara handläggare eller tekniker på berörda kommuner och länsstyrelser men även konsulter. Resultaten kan även användas vid vattenförsörjningsplanering av större lantbruk och samfälligheter.

Rapporten utgör inte en fullständig redovisning av all data och tolkningar av dessa, utan redogör översiktligt för hur data har tolkats inom området. En beskrivning av bearbetningen, rensning samt tolkningen av ATEM-data finns i Brolin m.fl. (2020). Undersökningsområdet har på basis av databearbetning delats in i fem delområden. I separata avsnitt beskrivs tolkning av resistivitetsdata gällande berggrund, jordlager och hydrogeologi i jordlagren. De hydrogeologiska förutsättningarna i berggrunden beskrivs i ett eget avsnitt.

Insamlade resistivitetsdata kommer att finnas att tillgå för allmänheten för vidare tolkning utöver vad som presenteras här. Det är SGUs målsättning att underlaget ska komma samhället till gagn genom vidare tolkning av externa intressenter såsom högskolor, universitet och konsulter samt genom att myndigheten utvecklar sitt arbete med 3D-modeller i användandet av ATEM-data i kartering av grundvatten, jordlager och berggrund.

# UNDERSÖKNINGSOMRÅDE

ATEM-undersökningen utfördes inom ett område i Östergötlands län och berör delar av Motala, Linköping, Mjölby och Vadstena kommun (fig. 1). Undersökningsområdet är cirka 670 km<sup>2</sup> och består i huvudsak av den så kallade Östgötaslätten som till största delen utgörs av odlingsmark. Området är flackt men lokalt böljande. I sydväst vid Vätterns strand finns Omberg som höjer sig över landskapet (240 m ö.h.). Jordlagrens mäktighet är tämligen stora i området och berggrunden består främst av sedimentära bergarter. I randområdena till slättlandskapet ligger urbergsområden med hällar och relativt tunna jordlager. Nordväst om Motala finns även Visingsösandsten.

Vättern breder ut sig väster om undersökningsområdet, i norr ligger Göta kanal med sjöarna, Boren, Norrbysjön och Roxen, och i söder den grunda fågelsjön Tåkern (fig. 1). I norr rinner ett antal småbäckar ut mot Vättern, Göta kanal och sjöarna här. I de södra delarna rinner Svartåns tillflöde söderut och Svartån har därefter sin avrinning österut mot sjön Roxen.

Huvudsakliga grundvattenmagasin finns framförallt i de mäktiga sand- och grusavlagringar som på vissa ställen ligger ytligt och ibland överlagras av andra jordarter, samt i den sedimentära berggrunden och eventuellt i förekommande förkastningszoner. Vattenförsörjningen på Östgötaslätten sker i huvudsak genom ytvattentäkter där vatten från Vättern, Boren och Motala ström används. En vattentäkt med konstgjord grundvattenbildning finns mellan Mjölby och Skänninge. Grundvattentäkter i drift finns vid Normlösa (jord) och Skeppsås (berg). Tidigare har det även funnits kommunala vattentäkter i den sedimentära berggrunden.



# MÅL OCH SYFTE

Syftet med undersökningarna på Östgötaslätten var att öka och förbättra det geologiska underlaget, framförallt med inriktning att identifiera och avgränsa områden där goda förutsättningar för större grundvattenuttag kan finnas. Något förenklat var målsättningen att undersökningen ska bidra med kunskap om de olika jord- och berglagrens uppbyggnad i tre dimensioner.

SGUs mål är att den insamlade informationen och de nya kunskaperna ska kunna användas som geologiskt och hydrogeologiskt bedömningsunderlag av Motala, Linköping, Mjölby, Vadstena och Ödeshögs kommun, Länsstyrelsen Östergötland, Vattenmyndigheten i Södra Östersjön, konsulter och Mark- och miljödomstolen i anknytning till ärenden som berör ett flertal frågor (fig. 2) som till exempel:

- planering av kommunal dricksvattenförsörjning och utformning av vattenskyddsområden
- planering och tillsyn av brunnar för enskild vattenförsörjning och enskilda avlopp
- vattenförvaltningsarbete och vattenförsörjningsplaner
- exploateringsfrågor, till exempel gällande undermarksplanering.

SGU har dessutom som långsiktigt syfte att utvärdera hur undersökningsmetodiken kan användas för att öka kunskapen om jordlagrens och berggrundens uppbyggnad samt grundvattnets förekomst i fler delar av Sverige. Det gäller i första hand områden med sedimentär berggrund men även möjligheten att använda metoden i områden med urberg. I dagsläget koncentrerar SGU insatserna till sådana områden där det på grund av bland annat klimatförändringar råder långvarig torka samt områden med stora dricksvattenbehov som har problem med tillgången på grundvatten för sin dricksvattenförsörjning.



**Figur 2.** Basen för en hänsynsfull samhällsplanering är ett tillförlitligt geologiskt underlag. Underlaget krävs för en långsiktigt hållbar användning, för bevarande och skyddande av viktiga vattenresurser. Figuren är omgjord från figur 1 i SGU-rapport 2009:24.

# GENOMFÖRDA UNDERSÖKNINGAR OCH METODER

## **SkyTEM**

ATEM som är en förkortning av Airborne Transient Electromagnetic är den generella termen för metoden att undersöka markens resistivitetsfördelning med ett luftburet system. SkyTEM är ett helikopterburet geofysiskt mätsystem som är utvecklat i Danmark vid Århus universitet. Den geofysiska metoden TEM är en induktionsmetod som innebär att en elektrisk ström induceras genom variationer i ett magnetfält. Den använda mättekniken är anpassad för hydrogeologisk kartering med avseende på upplösning och djup (ner till cirka 200 m). ATEM är tack vare att den är luftburen en mycket effektiv metod för att kartlägga stora områden.

I ramen som hänger under helikoptern finns en spole som består av en kabelslinga (fig. 3).

I denna kabelslinga går en ström som slås av momentant och ger upphov till ett magnetfält. Responsen på magnetfältet ger i sin tur upphov till ett inducerat elektriskt och magnetiskt fält i jord- och berglager. Förändringarna som uppstår i detta magnetiska fält mäts i mottagarspolen på ramen (fig. 3). För en utförligare beskrivning av SkyTEM-metodiken se Sørensen & Auken (2004) eller Christiansen m.fl. (2009). Resultaten från ATEM-mätningarna presenteras vanligen som elektrisk resistivitet i enheten Ohm-meter (Ohmm).

Variationerna i den elektriska resistiviteten i jord- och berglager beror främst på skillnader i porositet mellan olika geologiska enheter och deras innehåll av lermineral och vatten samt vattnets ledningsförmåga. Genom att koppla resistiviteten till annan geologisk information, som till exempel lagerföljder från brunnar, kan man översätta och tolka inversionsresultaten till geologi. En utförlig beskrivning av bearbetningen, rensning samt tolkningen av data finns i Brolin m.fl. (2020). På grund av tekniska skäl och för databearbetningens skull har undersökningsområdet delats in i fem delområden som beskrivs var för sig rent geologiskt (fig. 4A). Data som anses störd av till exempel elektriska installationer rensas bort (fig. 4B).



#### Långt efter strömavslag

Figur 3. Grundprincipen för mätsystemet och strömutbredning i marken. Ramens (blå) storlek är cirka 30 × 15 m.

Under mätningarna i Östergötland flög helikoptern i 80 till 110 km/timme, med ramen hängande under sig på 30–40 m höjd över markytan. Undersökningen utfördes längs relativt parallella linjer med cirka 200 m avstånd (fig. 4). Under flygningarna sker anpassningar både i horisontell och vertikal position för att dels undvika störningar i mätningarna vid tät bebyggelse, skog, kraftledningar, järnvägar och annan infrastruktur, dels i områden med till exempel hästar som kan bli skrämda av en helikopter men lågt hängande last.

Flyglinjer inom undersökningsområdet redovisas i figur 4A. Totalt flögs 3 237 linjekilometer under sammanlagt 14 dagar i juni 2018. Data från flygundersökningarna består av mätningar med cirka 30 till 40 m mellanrum längs flyglinjerna. Totalt har data från cirka 90 000 så kalllade TEM-sonderingar samlats in inom undersökningsområdet vilket gett upphov till cirka 58 000 resistivitetsmodeller som använts för tolkning (fig. 4B, Brolin m.fl. 2020). Modellens vertikala upplösning är 2 m i ytan och ökar succesivt (logaritmiskt) med djupet. Det betyder att jord- och berglager tunnare än så inte går att urskilja i resistivitetsdata. Totalt delas jord och berg in i 30 lager i resistivitetsmodellerna. De beräknade modellerna visar mjukare övergångar än verkligheten och resistivitetskontraster är oftast underskattade.



## Brunnsarkiv och borrningar

### Brunnsarkiv och lagerföljdsdata

Information om jordlagerföljder och berggrundens uppbyggnad har inhämtats från databaser som förvaltas av SGU. Merparten av lagerföljdsinformationen kommer från Brunnsarkivet med ursprung från borrprotokoll, till största delen bestående av privata brunnar. Data om lagerföljder är fritt tillgängliga på SGUs webbplats (www.sgu.se). Uppgifter från 4616 brunnar (Brunnsarkivet) och 449 sonderingar från SGUs jord- och grundvattenkartering har använts som underlag för våra tolkningar (fig. 5). Dessutom har externa borrningar från Trafikverket, merparten längs riksväg 50 (Mjölby–Motala) och riksväg 34 (Motala–Borensberg) använts.

Data från Brunnsarkivet innehåller uppgifter om lagerföljder i jord och berg, jorddjup, samt i vissa fall uppskattning av uttagskapacitet och uppmätta grundvattennivåer. Bland annat vid äldre borrningar där den geografiska noggrannheten för brunnsuppgifter är bristfällig kan det finnas osäkerheter på mer än 200 m gällande position. Kvaliteten på underlaget gällande lagerföljder varierar också, mycket beroende på vad syftet med borrningen varit. Borrningar från SGUs jordartskartering har i regel pålitlig information både med avseende lagergränser och geologi, medan det vid en borrning till en enskild energibrunn ibland endast anges var övergången mellan jord och berg finns. I databaserna finns sammanlagt flera hundra olika unika benämningar i lagerföljdsuppgifter från borrningar inom området. För att kunna göra en enhetlig bedömning har en förenkling och omklassning till ett hanterligt antal litologiska klasser utförts. De uppgifter som finns rörande uttagskapacitet och grundvattennivåer är relativt osäkra då observationer och mätningar är utförda i anslutning till genomförd borrning.



**Figur 5.** Borrningar från SGUs databaser samt lägena för de skruvborrningar/sonderingar (gröna punkter) och bergborrningar (gula punkter) som utförts i SGUs regi under projektets gång inom undersökningsområdet.

#### Utförda borrningar, sonderingar och provpumpning

SGU har utfört totalt 12 skruvborrningar eller sonderingar i jordlagren (fig. 5, tabell 1). Syftet var att få information om jordlagrens lagerföljder, mäktighet och eventuell vattenföring. Lagerföljdsdata för de 12 borrningarna och sonderingarna finns i SGUs databas för grund-vattenkartering (parameterdatabasen) och redovisas även i bilaga 1.

Tre undersökningsborrningar (hammarborrningar med diametern 115 mm) i jord och berg utfördes av en borrfirma, samtliga i Motala kommun (fig. 5, tabell 1). Syftet med borrningarna var att få information om lagerföljder i jordlagren och berggrunden men även information om vattenföring i jord respektive berggrund. Borrhålsloggning utfördes i två av borrhålen (BH1 och BH3) med syfte att erhålla geofysiska data från jord och berg. Lagerföljdsinformation från hammarborrningarna redovisas i bilaga 1 och är inlagrade i SGUs databas Brunnsarkivet (jord och berg) och parameterdatabasen (endast jord). Borrningarna utfördes efter en första översiktlig tolkning av ATEM-data och platserna valdes ut för att ge stöd i tolkningsarbetet. Vid borrningarna togs ett representativt kaxprov, varje meter i jordlagren, samt var tredje meter i berggrunden. Tillsammans med noteringar från borrningen användes proverna som stöd för berg- och jordartstolkning av SGU (fig. 6). Även tidigare nämnda borrhålsloggning i BH1 och BH3 användes som stöd för att urskilja lagergränser i jordlagren och i berggrunden.

Undersökningsborrningarna BH1–3 besöktes under januari 2020. I de fall det var möjligt gjordes det slugtest och provpumpning med dränkbar pump (fig. 7A). Syftet var att utvärdera hydraulisk konduktivitet och uppskatta en uttagskapacitet. Grundvattenytan uppmättes med lod och position samt nivå med DGPS (tabell 1). Tryckgivare användes för att registrera mätvärden direkt under provpumpning. Vid BH1 och BH3 installerades tryckgivare med automatisk fjärrloggning anslutna till det rikstäckande grundvattennätet för att registrera skillnader över tid (fig. 7B).

**Tabell 1**. Information från utförda borrhål och sonderingar. Nivån för markytan vid borrhålen (m ö.h. = meter över havet) är tagen med hjälp av DGPS när det gäller borrningarna, vid sonderingarna är höjden tagen från GSD-höjddata, grid 2+, noggrannhet +/–0,25 m (Lantmäteriet). Grundvattenytan (m.u.m.y. = meter under markytan) uppmätt 2020. Notera att jorddjupen när det gäller sonderingarna är samma som totaldjupet. I vissa fall kan det vara avslut mot berg, i vissa fall mot ett block och ibland fortsätter jordlagren. \*Totaldjup inom parentes lodat i efterhand. Lagerföljder, se bilaga 1.

Borrhålsnummer (område)	Borrhåls- namn	Nivå markyta (m.ö.h)	Totaldjup (m)	Jorddjup (m)	Grundvattenyta (m.u.m.y)
BH1 (område 1)	Övralid	110,20	101 (80*)	23	5,51 (januari 2020)
BH2 (område 4)	Vinnerstad	122,95	51 (27*)	14	13,60 (september 2020)
BH3 (område 5)	Mårtorp	101,14	61 (24*)	23	11,55 (januari (2020)
SB1 (område 2)	BMW196530	95,89	6,5	≥ 6,5	
SB2 (område 2)	BMW196531	95,69	5	≥5	
SB3 (område 3)	BMW196532	96,22	4	≥4	
SB4 (område 3)	BMW196533	108,82	16	≥16	
SB5 (område 5)	BMW196534	84,94	4,5	4,5	
SB6 (område 5)	BMW196535	92,79	5,5	5,5	
SB7 (område 5)	BMW196536	81,20	4	4	
SB8 (område 5)	BMW196537	100,59	6	6	
SB9 (område 4)	BMW196538	107,95	5,7	5,7	
SB10 (område 4)	BMW196539	98,89	6	6	
SB11 (område 4)	BMW196540	106,39	3,8	3,8	
SB12 (område 1)	BMW196541	101,89	15,8	15,8	ca 2 m vid borrtillfället



**Figur 6.** Borrkax frånborrningen vid Övralid (BH1). Påsarnas innehåll representerar ett intervall på vardera 1 m ner till 30 m djup och därefter intervall på 3 m. Lagerföljden börjar vid markytan längst upp till vänster med 0–1 m och avslutas längst ner i högra hörnet med 84–87 m. Gränsen mellan jord och berg går vid 22–23 m. För fullständig lagerföljd se bilaga 1 och 2. Viss redigering av fotot har skett för att minska blänk. Foto: Oskar Henriksson.



**Figur 7. A.** Foto på utrustning vid provpumpning av BH1 vid Övralid, röd slangvagn med pump och flödesmätare samt ljud- och ljuslod. **B.** Foderrör med automatisk tryckgivare installerad vid BH3, Mårtorp. Redovisning av dagliga mätningar finns på SGUs webbplats, Grundvattennivåer, tidsserier, Stationens namn är Motala\_73. Foto: Oskar Henriksson.

## Geofysiska borrhåls- och markmätningar

## Borrhålsloggning

Geofysisk borrhålsloggning utfördes i två av borrhålen (BH1 och BH3, fig. 4) i januari 2020. Mätningarna utfördes med mätsonder som mäter temperatur, vattnets konduktivitet, resistivitet, självpotential och gammastrålning. Dessutom användes en så kallad Caliper-log som mäter borrhålets storlek och form vilket bland annat kan användas för hydrogeologiska tolkningar samt en så kallad akustisk televiewer som genererar en bild av borrhålsväggen. Data från borrhålsloggningen, förutom akustisk televiwer, redovisas i bilaga 2 och tolkning av dessa finns under respektive områdesbeskrivning i denna rapport. För jordlagren används endast gamma-log.

## ťTEM

Mätningar med tTEM bygger på samma princip som de helikopterburna TEM-mätningarna men sändarspole och mottagarspole sitter istället på en släde som dras efter en fyrhjuling (fig. 8). Avståndet mellan mätlinjerna är mindre (20–30 m) än med ATEM. Den mindre sändarramen gör att en mindre volym av mark undersöks i varje mätpunkt vilket gör att den rumsliga upplösningen blir bättre. Med tTEM-mätningar kan mer detaljerade modeller konstrueras av de ytliga geologiska lagren. Däremot är djupkänningen begränsad, oftast max 70 m, det beror dock delvis på markens resistivitet.

SGU utförde tTEM-mätningar på cirka 9 km i tre områden vid Fivelstad, Lönsås och Södra Freberga i Motala kommun för att komplettera ATEM-data (fig. 4). De preliminära resultaten redovisas i bilaga 3 och diskuteras översiktligt under respektive område i tolkningsavsnittet. Resultaten visar att metoden lämpar sig väl för att få en högre detaljeringsgrad av den ytligt liggande geologin. En stor fördel om man jämför med andra typer av geofysiska markmätningar är att man, precis som med ATEM-mätningarna, kan samla in mycket data på kort tid och få en tredimensionell täckning av undersökningsområdets geologi. Slutlig bearbetning av tTEM-data kommer göras tillgänglig via SGUs databas för geofysik.



**Figur 8.** Foto på mätningar med mätsystemet tTEM i Östergötland. Fyrhjulingen drar två slädar med sändarspole (röd stor släde) respektive mottagarspole (vit liten släde) på. Avståndet från fyrhjulingen till sändarspolen är cirka 3 m och avståndet mellan sändarspolen och mottagarspolen cirka 7 m. Foto: Oskar Henriksson.

# **GEOLOGISK BESKRIVNING**

## Berggrunden

Berggrunden inom området kan delas in i tre olika delar: urberget bestående till största del av granit, prekambrisk berggrund bestående av Visingsösandsten samt den för undersökningsområdet dominerande kambro-siluriska sedimentära berggrunden (fig. 9).

## Urberget

I undersökningsområdets gränszoner utgörs urberget av företrädesvis röd medelkornig granit tillhörande de så kallade Smålands-Värmlandsgraniterna (fig. 9). I anslutning till dessa finns även vulkaniter och övergångsformer mellan vulkaniter och graniter. Urberget har kartlagts och rapporterats av bland annat Claesson m.fl. (2013) samt Bruun m.fl. (1995). Längs en förkastningszon i norr vid sjön Boren är urberget kraftigt förskiffrat och krossat. Urberget som underlagrar de sedimentära bergarterna på Östgötaslätten är enligt kärnborrningar kraftigt vittrat de översta metrarna. Till urberget räknas även diabasgångar orienterade i nord–sydlig riktning (fig. 9). Vid Norra Freberga finns ett område med urberg som ligger mellan sedimentära bergarter tillhörande Visingsöformationen i nordväst och den kambro–siluriska berggrunden i sydost. Urbergets överyta är inte plan utan är påverkad av förkastningar (se i avsnittet *Förkastningszoner i berggrunden* i denna rapport) och kan ha en svagt kuperad yta Wikman m.fl. (1982).

## Visingsöformationen

I den nordvästra delen av området, norr om Motala (fig. 9) finns det sedimentära bergarter bestående av lersten och sandsten tillhörande Visingsöformationen, utförligt beskriven av bland annat Collini (1951), och Vidal (1982, 1985). Ursprungssedimenten till dessa bergarter avsattes för 886–740 miljoner år sedan (Moczydlowska m.fl. 2018) i det så kallade Vätterntråget som bildades när superkontinenten Rodinia sprack upp (Wickström & Stephens 2020). Visingsöformationen är nedsänkt i förhållande till den kristallina berggrunden efter förkastningar som stryker i ostnordostlig-västsydvästlig och nordostlig-sydvästlig riktning. Det finns få blottningar av denna berggrund och kunskapen om sandstenens uppbyggnad kommer främst från uppgifter från borrningar. Visingsögruppen har en mäktighet på totalt 1 400 m och består av tre formationer (Moczydlowska m.fl. 2018, Wickström & Stephens 2020). Den undre formationen (cirka 400 m) som finns bevarad i de västra och södra delarna av Vätternsänkan, består av sandsten och skiffer vars ursprungssediment avsattes i en fluvial deltamiljö. Sandstenen är vit till rödbrun, ofta korsskiktad och relativt ren och kvartsrik (Wickström & Stephens 2020). Den mellersta formationen (cirka 450 m) finns i de centrala delarna av Vätternsänkan samt på Visingsö och i ett smalt stråk mellan Omberg och Lemunda (Arenstedt 2018). Den består av sandsten, konglomerat, lersten och skiffer vars ursprungssediment avsattes i en grund marin miljö. Den översta formationen (knappt 600 m) utgörs av lersten, skiffer, finkornig sandsten och stromatolitförande dolomitisk kalksten som representerar en grundmarin tidvattenpåverkad och lerdominerad strandmiljö. Formationen påträffas längs Vätterns östra strand från Gränna till strax norr om Omberg (Moczydlowska m.fl. 2018).

Enligt tidigare tolkningar (se bland annat figur 2 i Ahrenstedt 2018) kan samtliga dessa formationer finnas i undersökningsområdets nordvästra hörn (fig. 9). Lagerföljden i en sandstenstäkt vid Lemunda, nära Vätterns strand, består i huvudsak av medelkorning sandsten med inslag av röd-grön sandig lera men mot sydväst finns även lersten och konglomerat (Vidal 1974, se även figur 21 i Wikman m.fl. 1982). Längs Vätterns strand i delområde 1 *(Lemunda-Boren)* finns ett antal mindre skärningar med Visingsösandsten. Ett stort antal förkastningar med strykning nordväst–sydost skär igenom förekomsten av Visingsösandsten och olika bergarter avlöser varandra på korta avstånd (Wikman m.fl. 1980).

## Den kambro-siluriska berggrunden

Den kambro–siluriska berggrunden är i stort sett helt täckt av 10–20 m mäktiga kvartära jordlager. Ett fåtal blottningar består av delvis igenfyllda och nedlagda stenbrott mellan Berg och Borensberg samt vid Borghamn norr om Omberg (se Bruun m.fl. 1995). Förutom ett 20-tal kärnborrningar som främst är beskrivna i Westergård (1940) och Wikman m.fl. (1980) baseras berggrundsinformationen huvudsakligen på brunnsuppgifter från SGUs brunnsarkiv. I grova drag består den uppemot 250 m mäktiga kambro–siluriska berggrunden av sandsten, lerskiffer, alunskiffer och kalksten. Berggrunden påträffas inom ett nedsänkt triangelformat bergblock som stupar åt norr och nordnordväst. Området sträcker sig från Vätterns östligaste del utanför Motala till Roxen i Öster och Omberg i söder (fig. 9) och begränsas norrut av en normal förkastningszon med en maximal vertikal språnghöjd på 250–300 m (fig. 10). Djupast nedsänkt är berggrundsområdet norr om Motala ström mellan Vättern och Boren. Här ligger urbergsytan på cirka 150 m under havsytans nivå. Här är följaktligen den kambro–siluriska berggrunden som mäktigast och avslutas med silurisk lerskiffer. I Vättern, strax utanför Motala, avgränsas utbredningen av den kambro–siluriska berggrunden mot Visingsösandstenen i väster av en nord–sydlig förkastningszon.

Förkastningarna bildades förmodligen i samband med tension (isärdragning) i jordskorpan under yngre paleozoikum vilket ledde till nedsänkta bergblock där paleozoisk berggrund skyddats från senare erosion. Sannolikt har en del av förkastningarna även reaktiverats under mesozoisk tid till följd av kompression i berggrunden som resulterat i upphöjning och omböjning av de sedimentära berggrundlagren. Detta indikeras främst utmed den norra förkastningszonen. Här finns ett antal parallellt orienterade mindre förkastningar och omböjningar av berggrunden som gjort att det i en smal zon, söder om huvudförkastningen, finns hängande



**Figur 9.** Berggrundskarta över undersökningsområdet baserad på SGUs berggrundsgeologiska kartdatabas (SGU 2019: Berggrund 1: 250 000– 1:1 000 000). OBS, notera att berggrundskartan som visas i figuren är baserad på vad som var känt innan ATEM-mätningarna och att den kommer att uppdateras på flera ställen beroende på vad som framkommit i undersökningen. Den kambro–siluriska berggrunden består av bergarter med grön nyans.

bergblock med relativt äldre delar av den kambro-siluriska berggrunden än direkt söder om zonen (fig. 10). I den uppemot två kilometer breda zonen finns även relativt ytnära förekomster av kambrisk sandsten, lerskiffer och alunskiffer samt underordovicisk kalksten.

Åt söder och sydost blir den kambro–siluriska berggrunden successivt tunnare. Lokala skillnader i stratigrafisk representation och mäktighet kan knytas till förekomster av mindre gravsänkor och horstar, avgränsade av nordnordost–sydsydvästliga förkastningar (fig. 9). Kring Flistad (6481526, 523015) har dessa förkastningssystem resulterat i ytligt liggande berggrund och vad som tidigare betraktats som ett "urbergsfönster" inom det kambro–siluriska området (fig. 9). Tolkning av området diskuteras mer ingående i avsnittet *Område 5: Borensberg-Ljungsbro* under resultatdelen.

På grund av den generella lagerstupningen bildar också successivt äldre delar av den kambro-siluriska lagerserien berggrundsytan söderut. Det kambro-siluriska områdets avgränsning i söder utgörs av en oregelbundet undulerande erosionsgräns som ligger på 80–90 m över havsytans nivå. Sannolikt kan det dock utanför det sammanhängande kambro-siluriska området finnas mindre erosionsrester i skyddade sänkor och sprickdalar. Öster om Tåkern visar äldre seismiska undersökningar dock att den södra gränsen här är förkastningsbetingad (Persson m.fl. 2019). Gränsen mot Omberg är skarp och den kambriska och ordoviciska berggrunden är här endast i mindre omfattning påverkad av förkastningsrörelser. Detta har tolkats som att Omberg redan under paleozoikum var en upphöjd urbergshorst (se diskussion i Persson m.fl.1985).

Öster om Vadstena påträffas Granbystrukturen, en cirka tre kilometer stor ringformad sänka i urberget fylld med bland annat mellanordovicisk och över ordovicisk kalksten. Enligt



**Figur 10.** Schematiska tvärsnitt av den kambro–siluriska berggrunden från tidigare undersökningar. Profilerna är från **A.** Hesslan & Armands (1977) och **B.** Wikman m.fl. (1980) och går från norr (vänster) till söder (höger).

analysresultat från undersökningar av kärnborrningarna Fylla-3 och Fylla-9 inne i strukturen visar att den bildades av ett meteoritnedslag under yngre ordovicium för cirka 470 miljoner år sedan (Grahn m.fl. 1996, Henkel m.fl. 2011). Runt sänkan finns en ringformad randzon med ytligt liggande urberg medan det i de centrala delarna ligger det på cirka 270 m djup (fig. 11). Under kalkstenen i sänkan finns breccior med urbergs och sedimentära bergartsfragment. De bergartsfragmenten i breccian utgörs av olika fragment av kambriska och eventuellt underordovicisk ålder (Wikman m.fl. 1982).

## Tidigare undersökningar

Från slutet av 1800-talet fram till början av 1920-talet utförde SGU geologiska undersökningar i Östergötland som resulterade i ett antal kombinerade jord- och bergartskartor i serien Aa (Aa 83; Linnarsson & Tullberg 1882, Aa102; Jönsson 1887, Aa 130; Blomberg 1905, Aa 150; Magnusson m.fl. 1922). Den första heltäckande kartan av Östergötlands kambro-siluriska berggrund gjordes av Rosén (1916). Till de tidiga kartorna räknas även de som presenterades tillsammans med stratigrafisk information i Westergårds omfattande publikationsserie (exempelvis Westergård 1922, 1928, 1940, 1944). Under slutet av 1930-talet påbörjades även systematiska undersökningar av alunskiffern med kärnborrning och kemiska analyser för att utreda skifferns potential som råvara för framställning av skifferolja (Westergård 1940, 1944). Nämnas ska också Thorslunds arbeten och beskrivningar av den kambro-siluriska berggrunden (Thorslund 1951, 1962). Under 1970-talet kom även Statens Industriverks (SIND) utredning om Sveriges alunskifferförekomster och dess potential som energiråvara samt innehåll av olika metaller (Hesslands & Armands 1977, fig. 10A). I SIND-utredningen presenterades kartor, tvärsnitt och borrhålsinformation som utgör viktiga referenser till den kambro-siluriska lagerseriens uppbyggnad. Samtidigt utförde SGU en berggrundskartläggning av Östergötland i skalan 1:50 000. I beskrivningarna till kartbladen Linköping NV Af 119 (Wikman m.fl. 1980), Hjo SO Af 134 (Persson m.fl. 1985) och Hjo NO Af 120 (Wikman m.fl. 1982, fig. 10B, 11) ges sammanfattningar av dittills gjorda paleontologiska och stratigrafiska arbeten. SGU utförde även ett antal kärnborrningar som redovisas i beskrivningen till Linköping NV (Wikman m.fl. 1980).



**Figur 11.** Nordväst–sydostligt orienterat tvärsnitt över Granbystrukturen. Profilen från Wikman m.fl. (1982). Granbystrukturen är lokaliserad några kilometer sydost om Vadstena (se fig. 9).

Förutom dessa arbeten finns information i SGUs rapport om malmer och industriella mineral i Östergötland (Bruun m.fl. 1995). I Andersson m.fl. (1985) ges ytterligare information om främst alunskifferformationens uppbyggnad.

Den kambro–siluriska berggrundens uppbyggnad och stratigrafiska indelning i Östergötland sammanfattas i en strukturell och tektonisk beskrivning av berggrunden i Bergslagen (Stephens m.fl. 2009). Den stratigrafiska indelningen av lagerföljden baseras på arbeten av Nielsen & Schovsbo (2006, 2011, 2015), Ebbestad m.fl. (2007) och Bergström & Bergström (1996). I Bergström m.fl. (2011) ges en detaljerad stratigrafisk beskrivning av mellersta ordovicium–undre silur från Borenshult. Uppgifter om de olika lagrens mäktighet härrör från dessa publikationer och kärnborrningar i SGUs Af-beskrivningar samt från Westergård (1940, 1944).

#### Stratigrafisk indelning och bergartsbeskrivningar

#### Kambrium–undre ordovicium

Den uppemot 60 m mäktiga kambriska lagerföljden består av en undre 22–25 m mäktig sandstensenhet följt av 14–24 m lerskiffer och siltsten och cirka 20 m med alunskiffer (fig. 12). Den stratigrafiska indelningen av kambrium är under ständig revision vilket gjort det svårt att exakt korrelera information i äldre beskrivningar till gällande indelning. Idag används till exempel inte de traditionella beteckningarna undre, mellersta och övre kambrium. Istället har namn som Series 4, Miolingian och Furongian införts. Dessutom har nya litostratigrafiska enheter tillkommit och gamla reviderats. Den stratigrafiska indelningen av den kambriska och underordoviciska sekvensen har därför i stort följt indelningen av Nielsen & Schovsbo (2006, 2011, 2015). Mäktighetsuppgifterna kommer från kärnborrningar beskrivna i Westergård (1940, 1944), Wikman m.fl. (1980) och Nielsen & Schovsbo (2006, 2011).

De understa sandstenslagren vilar på det prekambriska urberget som ställvis är uppsprucket och vittrat till flera meters djup. Sandstenen bildar från Roxen mot Tåkern berggrundsytan inom en oregelbunden uppbruten sydostlig randzon av det kambro–siluriska området. Lagerföljden stupar generellt svagt åt nordnordväst. Sandstenlager finns även ytligt i en smal zon med hängande bergblock utmed den norra huvudförkastningen. Idag finns inga blottningar av sandstenen. Tidigare har sandstenen brutits i mindre skala vid Motala ström vid Näs (6488614, 523918). Sandstenslager har också påträffats i samband med kraftverksbygget i Svartån strax väster om Brogård (6477617, 514689). De överliggande lerskiffer-, siltsten- och alunskifferlagren förekommer som ytlig berggrund inom ett oregelbundet område nordnordväst om den underliggande sandstensenheten och i hängande bergblock utmed den norra förkastningszonen. Alunskiffern har tidigare varit tillgänglig i stenbrott vid Västanå (6490612, 516935), Knivinge (6481832, 527444) och Kalkberget (6490247, 521991).

#### Den undre sandstensenheten (Series 4)

Sandstensenheten delas in sin tur upp i Mickwitzia- och Lingulidsandsten som båda förs till File Haidarformationen. I Bårstad-2-kärnan inleds den cirka 10 m mäktiga Mickwitziasandstenen med ett tunt konglomerat följt av två meter grå-ljusgrå ren kvartssandsten som i regel är relativt lös i förhållande till överliggande sandstenslager (Nielsen & Schovsbo 2011). Uppåt följer cirka åtta meter med mörkare grå, lerigare och tätare sandsten–siltsten, rik på grävspår och tunna lerskikt. Torksprickor och böljeslagsmärken är vanligt förekommande. Avsnittet avslutas i Bårstad-2-kärnan av ett tunt konglomerat, som enligt Nielsen & Schovsbo (2011) markerar basen för Lingulidsandstenen vilken utgör de övre cirka femton metrarna av File Haidarformationen. Den undre delen av Lingulidsandstenen består av ett antal cykler med sandsten, siltsten och lera medan de översta cirka fem metrarna består av ljusgrå och vit kvartssandsten. File Haidarformationen avslutas med tunna fosforitrika konglomeratlager. Dessa markerar ett betydande sedimentationsavbrott mellan Series 4 och Miaolingian. Avbrottet har kopplats till Hawke Bay-händelsen, en regional regression av havet och en tektonisk upphöjning av den baltiska plattan (Nielsen & Schovsbo 2015).

#### Borgholmsformationen, Miaolingian (tidigare mellersta kambrium)

Borgholmsformationen vars totala mäktighet varierar mellan 14 och 24 m innefattar Kvartorp-, Bårstad- och Tornbyleden. I borrningen Bårstad-2 består det undre 1,4–5,5 m mäktiga Kvarntorpledet av grönaktig, kraftigt glaukonitisk, delvis lerig sandsten med tre tunna konglomeratlager. Gränsen mot den underliggande File Haidarformationen är mycket skarp. Bårstadledet består av en uppemot 5,5 m mäktig ler-, silt- och sandsten som i den undre delen domineras av grönaktig och glaukonitisk lerig sandsten medan den övre delen består av grå lerig siltsten. Ledet är bäst beskrivet från Tornbyborrningen (Nielsen & Schovsbo 2006). Närmast över dessa led kommer ett komplext stratigrafiskt intervall där Torbyledet och Alunskifferformationen är representerad i olika grad och mäktighet beroende på var i området man befinner sig. I Tornbyborrningen är mäktigheten på Tornbyledet 13 m medan i andra delar av området är det avsevärt tunnare. Ledet är enbart känt från Närke och Östergötland och består av grå grönaktig slamsten med låg halt organiskt material. Motsvarande alunskifferintervall är uppemot fyra meter mäktigt och påträffas främst i de östra delarna av området.

#### Alunskifferformationen, Miolingian, Furongian, Tremadoc

Alunskiffern bildar berggrundsytan inom ett brett bälte från Roxen mot Omberg samt utmed norra förkastningszonen mellan Berg och Västanå. I området kring och sydväst om Vreta Kloster och Berg har det tidigare funnit ett flertal små stenbrott i alunskiffern men dessa är idag igenfyllda (Gorbatschev m.fl. 1976). Vid Knivinge finns ett vattenfyllt stenbrott från tiden med småskalig alunskifferbrytning i området. Ingen brytning har skett i Knivingebrottet efter 1940. Runt brottet finns fortfarande högar med rödfyr. Alunskifferformationen är i de fem kärnborrningar som Westergård (1944) beskriver mellan 14 och 20 m mäktig och består till övervägande del av svart och svartgrå skiffer med hög organisk halt. I sekvensen påträffas även orsten och kalkstenslager med varierande lateral utbredning. Andelen alunskiffer är cirka 80 % av den totala mäktigheten i dessa borrningar. Den kambriska delen av formationen varierar i mäktighet mellan 5 och 14 m med flera stratigrafiska luckor. Avsnittet karakteriseras också av ett stort antal orstenslager i jämförelse med den underordoviciska delen av formationen. Den uppemot en meter mäktiga "stora orstensbanken" är ett sådant karakteristiskt lager. Vissa avsnitt av den kambriska alunskiffern innehåller också höga halter av metaller och kerogen. Den underordoviciska delen av Alunskifferformationen inleds med två meter bituminös, siltig och karbonathaltig sandsten, följt av svartbrun alunskiffer. Den 0,9 och 8,8 m mäktiga ordoviciska alunskiffern har tidigare ofta benämnts dictyonemaskiffer. Den domineras av brunsvart alunskiffer med liten andel orsten. Typiskt för den ordoviciska alunskiffersekvensen är att den innehåller frekvent sandstensskikt och sandiga skiktytor.

#### Ordoviciska kalkstenar

Ordovicisk kalksten dominerar den kambro-siluriska berggrunden i Östergötland. Den totalt cirka 135 m mäktiga sekvensen består av olika kalkstensenheter särskilda med färg, lerhalt, kornstorlek och lagertjocklek (fig. 12). Flertalet av formationerna är svåra skilja åt enbart på deras litologiska egenskaper. Kalkstensbrytning har pågått på flera platser, bland annat i Borghamnsområdet (6471069, 481654), Tornby (6481025, 510435) och Västanå (6490612, 516935). Det ska poängteras att de exakta stratigrafiska placeringarna (dvs serietillhörighet) för några av de informellt klassificerade kalkstensformationerna är osäkra eftersom de inte går att definiera

enbart på litologiska grunder. Detta gäller speciellt för kalkstensformationerna i undre och mellersta ordovicium. Den underordoviciska kalkstenen inleds av Latorpformationen, som direkt överlagrar Alunskifferformationen, kännetecknas underst av någon meter med kraftigt gröngrå glaukonitisk kalksten som sannolikt stratigrafiskt borde föras till Bjørkåsholmenformationen. Denna är regionalt känd på Baltoscandia men inte ännu definierad i Östergötland (Stouge 2004, Egenhoff m.fl. 2010, Erlström & Sopher 2019). Denna undre glaukonitiska del av Latorpformationen följs av gröngrå, delvis glaukonitisk kalksten och tunna lerskifferlager som i sin tur överlagras av rödbruna och tjockbankade kalkstenenar tillhörande Lannaformationen. Därpå följer den cirka fem meter mäktiga grå och knöliga Holenkalkstenen som i sin tur överlagaras av Segerstad-, Skärlöv-, Seby- och Folkeslundaformationerna. Segerstad och Skärlövformationerna är generellt något rödare, småknöliga i jämförelse med de gråare och lerigare Seby- och Folkeslundaformationerna. Överlagrande Furudal- och Dalbyformationerna domineras av grå regelbundet bankade medel- och grovkorniga kalkstenar. Dalbylagren avslutas med två bentonitlager där det övre är den cirka 1,5 m mäktiga Kinnekullebentoniten (KB i fig. 12). Den 14–17 m mäktiga Frebergaformationen består av en finkornig kalksten



**Figur 12.** Illustration som visar förekommande litostratigrafiska enheter i Östergötlands kambro–silurområde. Siffrorna anger mäktigheter i meter. Notera att de sedimentära lagren till höger ligger under lagren i den vänstra kolumnen.

med tunna lager med karbonatrika slamstenar. På denna följer Slandromformationen som vanligtvis är ett par meter mäktigt avsnitt med brun-beige-ljusgrå karbonatrik slamsten som avslutas med en oregelbunden erosionsyta med paleokarst. Denna markerar ett regionalt betydande sedimentationsavbrott (Calner m.fl. 2010). Erosionsytan överlagras av Fjäckaskiffer, en uppemot tre meter mäktig svartbrun skiffer, följt av Jonstorpsformationen. Den senare är en 11–20 m mäktig sekvens med grå, gröna och rödbruna leriga kalkstenar och märgelstenar. Jonstorpsformationen delas in i en undre grågrön lerig kalkstensenhet och en övre rödbrun, åtskilda av det mellanliggande Öglundaledet som består av knappt en meter mäktig, grå finknölig kalksten. Den ordoviciska sekvensen avslutas med ett kalkstenskonglomerat och grå

#### Silur

Silurisk berggrund påträffas enbart i området väster om Boren, mellan Motala och den norra förkastningszonen. Här inleds lagerföljden med rödbrun slamsten och märgelsten följt av Kallholmsformationens mörkgrå lerskiffrar. I brunnsborrningar vid Lindenäs (6492629, 495212) och Gatugården (6492650, 496517) har den siluriska sekvensen bedömts vara 37 respektive 66 m mäktig (Wikman m.fl. 1982). Mäktighetsuppgifterna är osäkra då borrningarna ligger i anslutning till den norra förkastningszonen där omböjda eller kraftigt stupande lagerföljder förekommer.

## Jordarter

De flesta jordlagren på Östgötaslätten avsattes under den senaste istiden och tiden strax därefter, medan landet fortfarande var nedpressat av tyngden från landisen, och innan landet steg ur Östersjöns tidigare stadier (fig. 13). Då inlandsisen smälte undan, för cirka 12 000 år sedan, var Baltiska issjön uppdämd av landisen i norr och de högsta uppmätta strandlinjerna i området ligger på 139 m vid Omberg och 155 m norr om Motala (Agrell 1976, Påsse & Andersson 2005). Därefter höjde sig landet fort och Baltiska issjön tappades, så för cirka 11 000 år sedan var i stort sett hela slätten torrlagd (fig. 13).

Jorddjupet är i större delen av området mellan 5 och 20 m men framförallt vid Motala är det ställvis upp emot 60 m. Den nationella jorddjupskartan (Daniels & Thunholm 2014) är uppdaterad inom stora delar av undersökningsområdet och diskuteras i avsnittet *Bergöveryta, berggrundsenheter och jorddjupsmodell* senare i rapporten). Jordarterna i området karterades i huvudsak på 1970-talet i SGUs serie Ae (Fromm 1976, Johansson 1975, 1976, 1979 och Svantesson 1981). Under 2019 har jordartskartan över Östgötaslätten uppgraderats framförallt med hjälp av lantmäteriets höjddata (Lantmäteriet 2019), ortofoton och begränsad fältkontroll (fig. 14).

Den vanligaste jordarten på Östgötaslätten är morän. Den täcker cirka 43 % av markytan. För det mesta är den förhållandevis lerig i området, beroende på ett stort inslag av kalksten och skiffer. Moränen är vanligen avsatt direkt på berggrunden, men kan även förekomma som ett tunt lager (cirka 1 m) på en del isälvsavlagringar. Ytan är för det mesta flack eller böljande och mäktigheten varierar från ett par till något 10-tal meter. Större mäktighet finns vid ett par stora moränryggar som hör ihop med "den mellansvenska randmoränzonen" och sträcker sig genom områdets västra del (fig. 14). Dessa ryggar kan ha en komplex sammansättning med inslag av andra sediment. På delar av området finns svärmar av små moränryggar mestadels orienterade tvärs isens rörelseriktning.

Isälvssediment förekommer inom området i avgränsade stråk ofta med huvudsaklig nord– sydlig riktning (fig. 15). De är alla delar av den mellansvenska randmoränzonen, vilket innebär att de delvis innehåller lager som är störda av veckning från en oscillerande is. De kan förutom



**Figur 13.** Strandlinjens förändring vid tiden för inlandsisens avsmältning, 12 000 till 11 000 före nutid (BP= Before Present). Högsta kustlinjen utbildades direkt efter isavsmältningen. Röd polygon visar undersökningsområdet. Relief i bakgrunden från Lantmäteriets höjddata.



Figur 14. Jordartskarta (SGUs kartdatabas, Jordarter 1:25 000-1: 100 000). Området innanför polygonen är uppgraderad inom projektet.



**Figur 15.** Isälvssediment inom området markerat med grön färg. Kartrutorna för den äldre jordartskarteringen (Ae-serien) har markerats. Relief i bakgrunden från Lantmäteriets höjddata. Streckade områden = samhällen.

isälvsgrus och sand innehålla både morän och finkorniga sediment. Delvis har avlagringarna varit föremål för täktverksamhet.

Nässja-området (fig. 15) vid Vättern är delvis utformad som åsnät med stenigt och grusigt innehåll. Söderut övergår de i moränen utan tydlig gräns. Sandön är en liten ö i Vättern som mest består av sand och grus, men även lite morän ingår i lagrena. Djurkällaplatån (fig. 15) är en större isälvsavlaring som omger södra delen av Äskebergahöjden. Den består av ett centralt åsnät och ett par platåer i olika höjd. Den högsta är förmodad att nå upp till högsta kustlinjen. Materialet är mestadels grusigt men med ett stort innehåll av kalksten och skiffer som kan ha cementerat ihop kornen. I Motalaområdet finns ett par isälvsavlagringar som kan ses som en fortsättning av Djurkällaplatån. Även de innehåller mycket kalksten och skiffer och är delvis täckt av morän.

Vid Hagebyhöga (fig. 15) finns ett antal kullar och åsar med isälvssediment som delvis är utbrutna. Även dessa är delvis täckta av morän. De ligger i anslutning till en större nordost– sydvästlig rygg. Fivelstad–Skänninge-avlagringen har delvis betydande mäktighet. De olika delarna hänger troligen ihop under lager av postglacial sand. På östra delen av avlagringen öster om Fivelstad finns små moränryggar uppe på isälvssedimenten. Vid en grundvattenundersökning av SGU 1974 (Johansson 1974, Möller m.fl. 1981) ritades ett par profiler tvärs igenom avlagringen. Isälvsavlagringarna Ask–Varv, Lönsås–Normlösa, Klockrike och Linköpingsåsen (fig. 15) har alla en mer eller mindre nord–sydlig utsträckning, delvis dolda av lera och postglacial sand. De har på flera ställen ost–västliga utlöpare vid lägen för eventuella stillestånd eller framryckningar av isen i samband med isavsmältningen.

Lera och silt förekommer på stora ytor i låglänta delar av området (fig. 14). Förutom där de går i dagen finns de på många ställen under postglacial sand, grus och torv. På de äldre jordartskartorna finns många ytor med postglacial lera och silt, ofta med ringa mäktighet (0,3–1 m). Till stora delar verkar dessa bestå av tunna lager av postglaciala sediment ovanpå glaciala. Dessa små ytor av postglaciala finsediment har inte tagits med i den uppgraderade kartan.

Postglacial sand och grus finns spritt på hela området men framför allt längs med isälvssedimenten då dessa till stora delar har utgjort källmaterialet till svallsedimenten (fig. 14).

I sluttningar som har varit exponerade för vågor har det ibland bildats strandvallar, till exempel på Djurkällaplatån, Omberg och Lunds backe. Framför allt finsand har även fyllt ut sänkor och täcker då ofta glaciala finsediment.

De största ytorna med torv på området är Dagsmosse, längst i sydväst, Tranberga mosse, Fyllamossen, Vålberga mosse och Berga mosse (fig. 14). Dessa större torvmarker består till stora delar av mossetorv. Mäktigheten av torv har uppmätts till cirka 6 m på Dagsmosse och upp till 5 m på övriga mossar. På Dagsmosse och Tranberga mosse har det bedrivits torvtäkt. Svämsediment förekommer i begränsad omfattning i området, framför allt längs Motala ström, Svartån och Tåkerns forna utlopp. Till största delen består de av silt–finsand. En större yta med svämsediment på gamla jordartskartan har klassats om till postglacial finsand. Fyllning har markerats där de har en betydande mäktighet eller döljer underliggande jord så att vi inte har kunnat bestämma jordarten. I en del fall har fyllning på annan jordart markerats, men då är avgränsningen av underliggande jordart osäker. Rödfyr finns vid gamla alunskifferbrott i östra delen av området samt vid Omberg.

Inom SGUs jordartskartering har ett antal glacialtektoniska skollor av kalksten pekats ut (fig. 14). I kartan finns inlagt ytor vid Skedet, Freberga och Charlottenborg öster om norra delen av Omberg (Svantesson 1981). I beskrivningarna finns fler observationer beskrivna som ej har lagts in på jordartskartan då de inte är blottade på mer än möjligen små ytor. Det är vid Kastad Kulle, Hässelberget och Fyrstensberget (Johansson 1975), Högrabacken, Dunteberget och Ulvåsahöjden (Johansson 1976) samt Pålstorp (Fromm 1976). I Wikman m.fl. (1982) finns det ytterligare områden beskrivna, bland annat vid Örberga (fig. 16). De utgör i många fall markerade höjder i landskapet och kan ha en mycket komplicerad lagerföljd.



Figur. 16. Foto på trolig glacialtektonisk skolla vid Örberga, fotograferat från väster mot öster. Foto: Peter Dahlqvist.

## Hydrogeologiska förhållanden och vattenförsörjning

## Grundvattenmagasin i jordlagren

Grundvattentillgångarna på Östgötaslätten utgörs av ett antal mer eller mindre tvärgående isälvsavlagringar i området mellan Skänninge-Fågelsta och öster ut mot Roxen (fig. 17). Det förekommer också rikligt med i huvudsak sandiga svallsediment, i vilka ytliga, lokala grundvattenmagasin kan förekomma I området väster om Skänninge-Fågelsta är jordlagren i huvudsak uppbyggda av morän och lera, i vilka grundvattentillgångarna är begränsade. Isälvsavlagringarna vid Klockrike och Maspelösa (fig. 17) utgörs av åsar med en uttagsmöjlighet på cirka 5–25 l/s. Vid Forsåsa och Lönsås finns ett stråk med isälvsmaterial som i SGUs regionala kartläggning (Aneblom m.fl. 1997) bedöms ge mellan 5 och 25 l/s, området är troligen sammansatt av flera mindre grundvattenmagasin, som möjligen tillsammans kan ge 25 l/s.

I denna del finns ett flertal mindre källflöden som avvattnar grundvattenmagasinen.

Vid Fivelstad finns en större sand- och grusavlagring som med mindre avbrott sträcker sig söderut mot Skänninge och Mjölby (fig. 17). Avlagringen är avdelad i flera grundvattenmagasin. Vid Fivelstad har undersökningar (Möller m.fl. 1981) konstaterat att det förekommer ställvis moräninlagringar i och ovan på isälvsmaterialet. Det kunde vid undersökningarna även konstateras att trycknivån i den underliggande sandsten är belägen långt under grundvattennivån i jordlagren, vilket tolkades som att området är av vikt för grundvattenbildningen till sandstenen.

Stråket söder om Fivelstad mot Skänninge inrymmer bland annat Midsommarkällan, vilken flödar med mellan 5 och 10 l/s (Gustafsson & Jirner 2016). Norr om Motala samhälle finns den stora Djurkällaplatån (fig. 17), vilken bedöms ha goda till utmärkta uttagsmöjligheter (5–25 l/s). Även här finns en källa som ger i storleksordningen 15 l/s (Aneblom m.fl. 1997).

#### Grundvattenmagasin i berggrunden

Inom det undersökta området utgörs berggrunden i huvudsak av sedimentär berggrund. En tidigare undersökning av såväl uttagsmöjlighet som grundvattnets fysikaliska och kemiska sammansättning för respektive bergart presenteras i Möller m.fl. (1981). I ett mindre område vid Motala förekommer Visingsösandstenen. Av de sedimentära bergarterna är det i huvudsak sandstenarna och kalkstenarna som är grundvattenförande (fig. 18). Skiffrarna är generellt måttligt till dåligt vattenförande och utnyttjas inte i någon större utsträckning som primärt magasin. De sedimentära skiffrarna, både lerskiffern och alunskiffern, som i allmänhet återfinns mellan den övre kalkstenen och sandstensakviferen utgör generellt en barriär mellan de båda mer vattenförande bergarterna. Då skiffern inte är helt tät sker ett visst utbyte mellan kalkstenen, sandstenen och skiffern. Grundvattenbildningen till sandstenen i de delar där den täcks av yngre bergarter sker genom en långsam transport av vatten genom kalkstenen och skiffrarna, där en kemisk förändring av grundvattnet sker. Det finns få data om hur vattenföringen i det underliggande urberget är, det kan dock antas att den är relativt begränsad och att kalk- och sandstenarna är betydligt mer vattenförande. Grundvattentillgångarna i urberget är översiktligt bedömda av Aneblom m.fl. (1997, fig. 18).

Ett antal grundvattenförekomster har pekats ut i vattenförvaltningen (redovisas i VISS (VattenInformationsSystem Sverige), se fig. 17). Uttagsmöjligheterna är som nämnts bäst i de kambriska sandstenarna och ordoviciska kalkstenarna (fig. 18). Tidigare bedömda uttagsmöjligheter ligger i spannet mellan 2 000 och 20 0001/timme, med de gynnsammare möjligheterna centralt i undersökningsområdet. En ny sammanställning av data från Brunnsarkivet visar att den sedimentära berggrunden på Östgötaslätten är avsevärt bättre kvantitetsmässigt än omkringliggande urberg och att de bästa förutsättningarna finns i de södra delarna. Preliminära data från denna undersökning (Hjerne m.fl. 2020, under bearbetning) redovisas i denna rapport i avsnittet *Hydrogeologisk beskrivning av berggrunden*.

#### Vattenförsörjning

Inom undersökningsområdet finns i huvudsak kommunal vattenförsörjning genom ytvattentäkter. Motala och Vadstena nyttjar Vättern som sin huvudvattentäkt, Motala har dessutom ytterligare en ytvattentäkt i Boren för Borensbergs samhälle och Linköpings kommun utnyttjar Motala Ström. Mjölby kommun har en anläggning för konstgjord grundvattenbildning i jordlager mellan Mjölby och Skänninge (Gustafsson & Jirner 2017). En mindre kommunal vattentäkt i jord finns i Normlösa, Mjölby kommun (Jirner & Gustafsson 2015). I Skeppsås, Mjölby kommun finns en liten kommunal vattentäkt i berggrunden. Tidigare har även små kommunala vattentäkter i den sedimentära berggrunden funnits i Maspelösa, Fågelstad, Skänninge och Lönsås.

Den enskilda vattenförsörjningen på Östgötaslätten baseras till i huvudsak på brunnar, antingen grävda i jordlagren eller genom borrning. De grävda brunnarna är i allmänhet nedförda i den ytliga svallsanden, ofta kan tillgången vara tillräcklig för enskild vattenförsörjning, men problem med dålig vattenkvalitet i form höga nitrathalter förekommer frekvent. Borrade brunnar är generellt nedförda i den underliggande sedimentära berggrunden. I huvudsak är det borrning för enskild vattenförsörjning, ett antal är även utförda för bevattning, även om jordbruksbevattningen på Östgötaslätten för närvarande i huvudsak sker genom ytvatten. Vid borrning där alunskifferlagren står i kontakt med brunnen är ofta kvaliteten på grundvattnet dålig. Ska borrning ske ned till den underliggande sandstenen bör borrhålet fodras förbi alunskiffern för att i möjligaste mån undvika en negativ påverkan. Alunskiffern innehåller förutom många tungmetaller även mycket svavel, vilket ofta renderar en dålig vattenkvalitet.



**Figur 17.** Grundvattenförekomster (inom vattenförvaltningen, redovisas i VISS) i jordlagren och berggrunden. Grundvattenförekomsterna namnges och diskuteras inom respektive delområde under Hydrogeologi i jordlagren, samt i avsnittet om *Hydrogeologisk beskrivning av berggrunden*.



Figur 18. Schematisk tvärprofil, från NV mot SO, av berggrunden på Östgötaslätten med uppskattad uttagskapacitet för brunnar nedförda i de olika bergarterna.

Länsstyrelsen Östergötland har sammanställt en regional vattenförsörjningsplan för Östergötland (Länsstyrelsen Östergötland 2013) och nyligen utfört en fördjupad version (Länsstyrelsen Östergötland 2020). I publikationerna redogörs för länets vattenresurser, skydd av och hot mot, samt användning av dessa.

På Östgötaslätten förekommer det naturligt höga halter av klorid i grundvatten från berggrunden. Det gäller framförallt borrade brunnar som får sitt vatten från den kambriska sandstenen eller urberget (Möller m.fl. 1981). Ett annat problem är att så kallad biogen gas, härrörande från alunskiffern, förekommer i flera borrningar inom undersökningsområdet (Erlström 2014, enligt Brunnsarkivet 65 stycken). Gas påträffas i borrningar i såväl alunskiffer som lerskiffer men vanligast är det i den kambriska sandstenen (Möller m.fl. 1981).

## **RESULTAT OCH OMRÅDESSPECIFIKA TOLKNINGAR**

Resultaten från ATEM-undersökningen presenteras med en översiktlig litologisk tolkning av jord- och berglager i fem delområden: *Lemunda-Boren, Vadstena-Tåkern, Skänninge-Motala, Motala-Fornåsa*, samt *Borensberg-Ljungsbro* (se *Områdesvisa geologiska tolkningar* och fig. 19). Varje delområde kan baserat på skillnader i resistivitet som speglar topografi, jordartsfördelning, jorddjup, samt berggrundsförhållanden delas in i ytterligare fler områden. Målet har varit att vart och ett av de fem delområdena ska kunna läsas var för sig, så en viss överlappning av områden och upprepning av text förekommer. Varje delområde har en inledande översiktlig beskrivning följd av områdets karakteristika när det gäller resistivitetsfördelning i berggrunden, jordlagren och en hydrogeologisk beskrivning av jordlagren. Områdets hydrogeologiska förutsättningar i berggrunden diskuteras i ett eget avsnitt i rapporten. Avgränsningar av alla delområden som diskuteras är ungefärliga då förändringar i geologi och därmed resistivitet inte är skarp.

Genom bearbetning av ATEM-data får man en bild av hur resistiviteten är fördelad inom området och på djupet (fig. 20). Data med information om resistivitetsfördelningen finns ner till cirka 150–200 m djup, dock avtar upplösningen med djupet. I bilaga 4 finns översiktliga bilder på medelresistiviteten för 10 m intervall från markytan ner till 170 m djup. För att använda ATEM-data till geologisk och hydrogeologisk tolkning behöver resistivitetsfördelningen översättas till geologiskt material och hydrogeologiska egenskaper hos olika jord- och bergarter.



Figur 19. Undersökningsområdet med de fem delområdena som diskuteras mer ingående i områdesvisa geologiska tolkningar.

I tabell 2 finns en sammanställning över ungefärliga översättningsvärden för olika jord- och berglager, med en koppling till dess innehåll av grundvatten, inom undersökningsområdet. Dessa intervall har erhållits genom korrelation mellan resistivitetsdata och information från olika borrhålsdatabaser (se fig. 20). Värdena som anges i tabell 2 är inte alltid själva bergartens resistivitet utan den resistivitet som modellen ger, denna påverkas av ovanliggande jord och berglager samt djup till var bergarten befinner sig (för diskussion se Brolin m.fl. 2020).

Sand- och grusavlagringar som utgör magasin för grundvatten har oftast en resistivitet på mellan 80 och 200 Ohmm under grundvattenytan. De delar av sand- och grusavlagringar som ligger över grundvattenytan har ofta en betydligt högre resistivitet, från cirka 400 till flera tusen Ohmm. Detta gör att sand- och grusavlagringar oftast åtskiljs enkelt mot jordlager dominerade av lera och torv som oftast har en resistivitet på mellan 20 och 80 Ohmm.

Moränen i området har ett resistivitetsintervall från 40 till över 1000 Ohmm vilket överlappar värdena för samtliga övriga jord- och bergarter. Det gör det svårt att säkert särskilja denna jordart från andra jordlager. Precis som sand- och grusavlagringar är det de högt liggande områdena (och därmed mestadels ovan grundvattenytan) som har hög till mycket hög resistivitet (över 300 Ohmm) medan morän i lägre liggande områden har en resistivitet på cirka 100–150 Ohmm. Områden med lerig morän ligger i det lägre intervallet, ofta mellan 40 och 80 Ohmm.

Visingsösandstenen finns i de nordvästra delarna av området, norr om Motala. Resistiviteten varierar mellan 20 och 600 Ohmm. Här finns två tydliga delar av sandstenen, dels en högresistiv sandsten som troligen består av en mer ren sandsten som har en resistivitet mellan 200 och 600 Ohmm, dels en lågresistiv sandsten som till stora delar består av skiffer och leriga sandstenar med en resistivitet på 20 till 100 Ohmm. Där den högresistiva sandstenen överlag-

Tabell 2. Översättningstabell med resistivitetsintervall för olika geologiska material i undersökningsområdet.
Notera att resistivitetsvärden i tabellen är värden som visas i profiler och kartor och inte nödvändigtvis måste
vara bergartens verkliga resistivitet (se diskussion i Brolin m.fl. 2020).

Geologi	Grundvattenmiljö	Resistivitetsintervall (Ohmm)	Kommentar
Torv och lera	Under grundvattenytan	20 till 80	Ofta vattenmättade jordarter, ibland hög halt lermineral som sänker resistiviteten
Sand och grus	Över grundvattenytan	300 till över 1 000	Främst ytligt i mäktiga isälvsavlagringar
Sand och grus	Under grundvattenytan	80 till 200	Under grundvattenytan sänks resistiviteten märkbart p.g.a. vattenmättnad
Morän	Över grundvattenytan	300 till över 1 000	Främst i tunna eller högt liggande torra avlagringar
Morän	Under grundvattenytan	40 till 150	Lerinnehåll och vattenmättnads- grad sänker resistiviteten
Skiffer (silur)	Under grundvattenytan	20 till 50	Högt lerinnehåll ger låg resistivitet
Kalksten	Under grundvattenytan	100 till 700	Kan ligga över grundvattenytan. Hög resistivitet visar lågt vatten- innehåll
Alunskiffer	Under grundvattenytan	100 till 300	Kalkstensbankar höjer resistiviteten trots att det rör sig om skiffer
Lerskiffer	Under grundvattenytan	10 till 30	Högt lerinnehåll ger låg resistivitet
Sandsten (kambrisk)	Under grundvattenytan	50 till 200	Vattenmättnadsgrad och lerinnehåll påverkar resistiviteten
Visingsö- sandsten	Under grundvattenytan	20 till 600	Vattenmättnadsgrad och lerinnehåll påverkar resistiviteten
Urberg		300 till över 1 000	Vattenmättnadsgrad och totaldjup påverkar resistiviteten

ras av sand- och grusavlagringar respektive lågresistiv sandsten överlagras av moränlera och lera med en liknande resistivitet är det svårt att skilja jordlager från Visingsösandstenen. På grund av de många förkastningarna i området finns stora laterala resistivitetsskillnader inom Visingsösandstenens utbredningsområde.

Den finns ett stort antal förkastningar i undersökningsområdet vilket diskuteras i ett eget avsnitt (*Förkastningszoner i berggrunden*) i denna rapport. Flera av dem syns tydligt i resistivitetsdata, i vissa fall på nästan exakt samma ställe som tidigare tolkningar och i vissa fall med en annan sträckning och riktning. Några av de tidigare tolkade förkastningarna syns inte alls i resistivitetsdata.

De ingående bergarterna i den kambro-siluriska lagerföljden (fig. 12) är relativt väl åtskilda och enkla att dela in (tabell 2). Det understa sedimentära lagret är sandsten med en mäktighet på cirka 40 m inom resistivitetsintervallet 50–200 Ohmm. Över sandstenen ligger en cirka 20 m mäktig lerskiffer med en betydligt lägre resistivitet, mellan 10 och 30 Ohmm. Gränsen mellan sandsten och lerskiffer får anses vara väl underbyggd i vår modell. Över lerskiffern kommer en cirka 20 m mäktig alunskiffer med en högre resistivitet, cirka 100–300 Ohmm. Även gränsen mellan lerskiffer och alunskiffern får anses vara relativt säker i vår data. Överlagrande alunskiffern kommer en kalksten på upp mot 100 m mäktig med ett resistivitetsintervall på 100–700 Ohmm med laterala skillnader i både lokal som regional skala. Gränsen mellan alunskiffer och kalksten har på grund av överlappande resistivitet varit svår att dra. Överst i lagerföljden finns en skiffer som har en resistivitet mellan 20 och 50 Ohmm. Vissa tecken



**Figur 20.** Överst ett exempel på profil som visar resistivitetsfördelningen inom undersökningsområdet. Terrängytan är draperad med färgkodning från jordartskartan. Till vänster nedan visas teckenförklaring från jord- och berglager från borrningar, teckenförklaringen gäller för samtliga profiler, i rapporten, med borruppgifter. Till höger nedan visas resistivitetsteckenförklaringen som gäller för samtliga resistivitetskartor och profiler, i rapporten, förutom i figur 52A.

finns på att man kan dela in denna skiffer ytterligare baserat på mer eller mindre lerinnehåll. Där skiffern är som mäktigast är den cirka 65 m mäktig och man kan ana en indelning med mer låg- respektive högresistiva partier som skulle kunna motsvara förändringar i ler- och kalkstensinnehåll.

Urberget ligger i stora delar av området på sådant djup att det är svårt att avgöra var gränsen mellan urberget och sandstenen ligger. I norr och söder finns dock urberg i dagen som endast överlagras av tunna jordlager eller tunn sedimentär berggrund (fig. 9). Urberget är ofta tydligt i ATEM-data på grund av sin höga resistivitet (oftast över 500 Ohmm). Högst resistivitet (ofta över 1000 Ohmm) har urberget där det ligger ytligt. På större djup, där urberget underlagrar sedimentära bergarter är resistiviteten oftast något lägre (300–500 Ohmm). Detta kan bero på att de översta metrarna är mer uppspruckna och håller mer grundvatten eller så kan det vara en modelleringseffekt (se Brolin m.fl. 2020).

## Bergöveryta, berggrundsenheter och jorddjupsmodell

Berggrundens överyta har identifierats i resistivitetsdata i stora delar av undersökningsområdet och en ny förbättrad jorddjupsmodell har skapats (fig. 21). Tolkning av jorddjupet har skett genom att gränsen mellan jordlager och bergets överyta markerats manuellt längs flera resistivitetsprofiler. Punkterna har sedan interpolerats till en yta inom dataområdet. De stora jorddjupen sammanfaller ofta med höjdpunkter i topografin och avspeglar åsformer och platåer.



Figur 21. A. Ny jorddjupsmodell i huvudsak baserad på ATEM-data. B. Skillnaden mellan befintlig och ny jorddjupsmodell.

I områden med glacialtektoniska skollor kan jorddjupet ha både över- och underskattats i vår tolkning. Medelmäktigheten på jordlagren är cirka 15 m inom undersökningsområdet. I de delar där mycket data rensats bort (Brolin m.fl. 2020) samt i tätorterna har vi använt SGUs befintliga jorddjupsmodell (Daniels & Thunholm 2014) för att få en heltäckande bergöveryta. I figur 21B redovisas differensen mellan den nya och den tidigare jorddjupsmodellen.

Bergets överyta ligger i modellen mellan 210 och 15 m över havet och utgörs av olika bergarter (fig. 22A) vilket avspeglas tydligt i resistiviteten (fig. 22B). Mest markant är den lågresistiva lerskiffern som syns tydligt där denna utgör den ytligaste berggrunden. Området norr om Motala sticker också ut med något lägre resistivitet vilket motsvarar den siluriska skifferns utbredningsområde. Längst upp i nordväst syns såväl låg som hög resistivitet där de höga värdena motsvarar urberg och högresistiv Visingsösandsten medan de låga värdena



**Figur 22. A.** Tolkning av vilka bergarter som utgör bergets överyta inom undersökningsområdet. **B.** Resistivitet vid bergets överyta (motsvarar medelresistivitet för de översta 2 m i berggrunden) samt de olika bergarternas gränser. För resistivitetsteckenförklaring, se figur 20.

motsvarar en lerigare sekvens av Visingsöformationen (fig. 22B). Längst i söder syns ett högresistivt område som motsvarar den kambriska sandstenen och urberget. Kalkstenen uppvisar viss variation i resistivitet vid sin överyta (fig. 22B). Alunskiffern är inte helt lätt att urskilja resistivitetsmässigt från kalkstenen varför denna kan ha fått en något mindre utbredning än i verkligheten.

Med hjälp av resistivitetsdata och punkttolkning har vi avgränsat de olika bergarternas över- och underytor samt deras utbredning (fig. 23). Bergarternas utbredning skiljer sig något åt mot tidigare bedömningar (jämför med fig. 9) vilket diskuteras områdesvis vid de geologiska beskrivningarna. Resistivitetsvärden för vissa bergarter överlappar delvis (tabell 2) vilket gör att gränserna mellan kalksten och alunskiffer samt sandsten och urberg är något mer osäkra. Noggrannheten är också oftast högre i områden med större antal brunnar (jämför fig. 5) och lägre i områden med förkastningar (se diskussion i avsnittet *Förkastningszoner i berggrunden*) samt på djup större än 200 meter där resistivitetsdata i många fall är svårtolkad. I bilaga 4 redovisas resistivitetskartor för utvalda intervall som tydligt visar på hur resistiviteten varierar med djupet vilket motsvarar bergarternas lutande lagring.

Med hjälp av den geologiska lagermodellen kan man få fram de olika bergarternas tolkade mäktighet (fig. 24). Den siluriska skiffern har en mäktighet på mellan 0 och 60 m (fig. 24A)



Figur 23. De olika bergarternas överyta i m ö.h. A. Silurisk skiffer. B. Kalksten. C. Alunskiffer. D. Lerskiffer. E. Sandsten. F. Urberg. Det vita området representerar Granbystrukturen.
vilket stämmer med de mäktighetsuppgifter som finns från borrningar. Kalkstenens mäktighet varierar stort, från 150 m i de norra delarna till att den försvinner i de södra delarna (fig. 24B). Alunskiffern som har varit relativt svår att skilja från kalkstenen då de har en något överlappande resistivitetssignal har en mäktighet på 0–15 m (fig. 24C). Lerskiffern som är den enhet som enklast kan avgränsas har en mäktighet på 0–40 m i området (fig. 24D). Den kambriska sandstenens mäktighet varierar från 0–50 m, de större mäktigheterna i modellen hänger samman med att det varit svårt att avgränsa sandstenen från urberget (fig. 24E). Den sedimentära berggrundens totala mäktighet är som mest 250 m (fig. 24F).



**Figur. 24.** Figuren visar de olika sedimentära bergarternas bedömda mäktighet. **A.** Silurisk skiffer. **B.** Kalksten. **C.** Alunskiffer. **D.** Lerskiffer. **E.** Sandsten (i figuren visas både den prekambriska Visingsösandstenen och den kambriska sandstenen, men i respektive utbredningsområde) F. Den sedimentära berggrundens totala mäktighet. Notera annorlunda färgskala i 24F.

## Förkastningszoner i berggrunden

Inom områdets sedimentära berggrund finns ett stort antal förkastningar, vilka bildades genom tension i jordskorpan under yngre paleozoikum vilket skapat nedsänkta block med berggrund som skyddats från senare erosion. Senare reaktivering av förkastningarna till följd av kompression under mesozoisk tid har resulterat i upphöjning och omböjning av berggrundlagren.

För att lokalisera förkastningar har vi letat efter linjära mönster med tydliga förändringar i resistivitet längs profiler och ytmässigt. Förändringar kopplade till förkastningar kan svårligen återskapas med TEM-metoden varför noggrannheten är något lägre i områden med förkastningar. I bilaga 4 redovisas resistivitetsytor för utvalda intervall, från markytan och ner till 170 m under markytan, och här kan man se underlaget som mycket av våra tolkningar grundar sig på. I figur 25 redovisas de sprickzoner som indikeras i resistivitetsdata. De flesta av de tidigare tolkade förkastningszonerna syns i resistivitetsdata, i vissa fall på samma ställe och i vissa fall med en något annorlunda sträckning och riktning. I figur 26 visas resistivitetsprofiler i området med de tolkade förkastningarna. Förkastningarna gör att bergartsled kan ligga tiotals meter högre respektive lägre på två sidor om en förkastning.

Förkastningar kan vara intressanta ur ett grundvattenperspektiv då berget ofta är mer vattenförande i dessa zoner. Sprickzoner kan vara svåra att kartlägga med tillräcklig noggrannhet med ATEM varför ytterligare undersökningar med till exempel markbaserade geofysiska undersökningar bör utföras innan man gör eventuella provborrningar. Under projektet utfördes två borrningar (BH2 och BH3) vid platser där vi lokaliserat förkastningszoner (fig. 25). Båda borrningarna uppvisade en svårtolkad lagerföljd och även dålig vattenföring (se diskussion i avsnittet *Hydrogeologisk beskrivning av berggrunden*).

Den översta berggrunden har i områden med kalksten visat sig vara påverkad av glacialtektonik vilket kan ses som en sorts förkastning. Detta diskuteras i avsnittet om *Jordarter* samt i den geologiska beskrivningen av delområde 2 och 3.



Figur 25. Förkastningar i berggrunden baserad på tolkning av ATEM-data tillsammans med tidigare tolkningar av förkastningar. Bakgrundskartan visar resistivitet på 30 m djup ner i berggrunden. För resistivitetstecken-förklaring, se figur 20.









**Figur 26.** Profiler inom undersökningsområdet som visar resistivitetsfördelning, tolkning av gräns mellan jord och berg samt olika berglager, förkastningar i berggrunden, och lagerföljder från borrningar. **A.** Profil i NV –SO riktning i delområde 4. **B.** Profil i V–Ö riktning i delområde 4. **C.** Profil i VSV–ÖNO riktning i delområde 1 norr om Motala. **D.** Profil i V–Ö riktning vid Omberg i delområde 2. Profilernas läge visas i fig. 25. Terrängytan är draperad med färgkodning från jordartskartan, för teckenförklaring se figur 14. För resistivitetsteckenförklaring, se figur 20.

# Områdesvisa geologiska tolkningar

## Område 1: Lemunda-Boren

Området ligger norr om Motala längs Vätterns strand upp i höjd med Sjökärret och österut till sjön Borens nordvästra strand (fig. 27, 19). Vid Illersjö finns två mindre sjöar medan större vattendrag saknas i området. Topografiskt sett domineras området av en markant höjd centralt vid Äskeberga med kringliggande relativt flack terräng (fig. 27). Markanvändningen domineras av skogsbruk medan åkermark framförallt finns i de strandnära och låglänta delarna. Som komplement till resistivitetsdata utförde SGU en borrning i jord och berg vid Övralid och en jord- och bergsonderingar vid Illersjö (fig. 27). ATEM-data har framförallt rensats bort vid i de nordliga flyglinjerna, vid Äskeberga, längs väg 50 samt vid järnvägen och en stor elledning vid Evrasteby (fig. 4, Brolin m.fl. 2020).

## Berggrund

Inom området finns markanta förkastningszoner som översiktligt delar in områdets berggrund i tre delområden, ett i väster med i huvudsak Visingsösandsten, ett i nordost med urberg och ett i söder med kambro–siluriska bergarter (fig. 25, fig. 27).

Höjden vid Äskeberga består av urberg. Mycket av data har rensats bort i området och den data som finns kvar visar på hög resistivitet (över 500 Ohmm) vilket pekar på en berggrund bestående av urberg (fig. 28A). Övergången är markant vid förkastningszonen söderut där resistiviteten minskar i och med att den kambro–siluriska lagerföljden vidtar (fig. 28A). I området kring norra Freberga med urberg som enligt berggrundskartan skiljer Visingsösandsten i norr från kambro–silur i söder (fig. 9) är inte resistivitetsdata helt entydig. I vissa delar verkar det finnas Visingsösandsten över det tolkade urbergsområdet och i vissa områden syns inte urberget. Klart är att det finns en högresistiv urbergsrygg samt en mängd förkastningar i området. Urberget verkar även ligga relativt ytligt längst i sydväst (fig. 23).

Berggrunden i väster består enligt tidigare undersökningar av sand- och lersten tillhörande Visingsösandstenen (fig. 27). Resistivitetsvärden i berglagren varierar kraftigt inom området vilket kan förklaras av att det finns ett flertal förkastningar i området (fig. 25, 28AB, 29).



Figur 27. Undersökningsdelområdet *Lemunda-Boren* samt de olika delområden som diskuteras i avsnittet. Lokalisering av profiler som diskuteras i texten samt borrning (BH1) och skruvborrning/sondering (SB12) som utförts av SGU.

I två delområden, vid Övralid och Hals, är berggrunden betydligt mer lågresistiv än kringliggande berggrund. I nordväst vid Övralid utförde SGU en borrning (BH1) i vad som ser ut som ett lågresistivt tråg i högresistivt urberg (fig. 28B). Borrkaxet visar på en cirka 78 m mäktig heterogen sekvens av den sedimentära berggrunden med stora färgskiftningar och växlande litologier i framförallt vad som verkar vara olika leriga och sandiga sediment (fig. 6, bilaga 1). Tolkningen är att den lågresistiva delen av Visingsösandstenen har denna uppbyggnad. Borrningen avslutas på 101 me djup under markytan och enligt borrkaxet kommer urberget ungefär på 96 m djup (bilaga 1). I sydväst nära Hals (fig. 27), finns ett område som har en liknande resistivitetssignal som vid Övralid och det är troligt att även detta område består av i huvudsak lerrika sediment tillhörande Visingsösandstenen (fig. 29). Här är det dock inte tal om en mindre ficka utan här verkar den lågresistiva sedimentära berggrunden vara mäktigare (fig. 28A). Resistivitetssignalen är även mycket lik den uppbyggnad som finns mot sydost mot Motala, det är dock inte troligt att det ligger kambro–silur här. Området vid Hals syns även relativt tydligt i VLF-data (SGUs geofysiska flygmätningar 2018, magnet-VLF och gammastrålning).



**Figur 28.** Profiler inom *område 1 Lemunda-Boren*, som visar resistivitetsfördelning, tolkning av gräns mellan jord och berg samt olika berglager och lagerföljder från borrningar. **A.** Profil i V–Ö och N–S riktning. Profilens riktning ändras vid cirka 5 500 m. **B.** Profil i V–Ö riktning vid Övralid. **C.** Profil i V–Ö riktning mellan Kärsby och Offerby. Profilernas läge visas i figur 27. Terrängytan är draperad med färgkodning från jordartskartan, för teckenförklaring se figur 14. För resistivitetsteckenförklaring, se figur 20.

I motsats till områdena vid Övralid och Hals har Visingsösandstenen generellt en relativt hög resistivitet överst (100–500 Ohmm, fig. 29) som sedan minskar på djupet (20–100 Ohmm). Detta överensstämmer med resistivitetssignal från Visingsösandstenen i Västergötland (Dahlqvist m.fl. 2020). Troligen består den övre delen av en renare sandsten med lägre lerinnehåll vilket förklarar den högre resistiviteten. Vid stenbrottet Lemunda har sandstenen använts för glastillverkning och består av sandsten och konglomerat (fig. 30). Vid Vätterns strand finns flera mindre skärningar i Visingsösandsten både vid Lemunda gård och Lilla Halsudden. Den delen av lagerföljden som består av en lågresistiv Visingsösandsten tolkas vara mer lerrik. Där sandstenen är som mäktigast är avgränsningen till urberget osäker då man närmar sig nedträngningsdjupet för metoden.

Söder om den stora förkastningen finns hela den kambro-siluriska lagerföljden representerad enligt berggrundskartan (fig. 9) vilket också avspeglas tydligt i resistiviteten (fig. 22, 28A, 28C). Två borrningar med god stratigrafisk indelning finns vid Borenshult och Smedsbygård. Båda dessa visar på 5–6 m lerig kalksten motsvarande Motalaformationen och således saknas den siluriska skiffern i delar av området. Det finns några brunnar med lagerföljder som har skiffer över kalkstenen, två av dessa ligger vid Lindenäs nära Vätterns strand (fig. 27). Här finns även en brunn som visar på urberg. Det finns en antydan i resistivitetsdata att resistiviteten ökar snabbt mot Vätterns strand i området, vilket skulle kunna stödja att även här finns en förkastning där urberget kommer högre upp (fig. 29). Det kan även stämma med att det finns mäktig skiffer i närheten då denna tenderar att finnas i anslutning till de större förkastningszonerna mellan urberg och kambro-siluriska bergarter. Den förväntade resistivitetssignalen för lagerföljden bör vara lågresistiv skiffer på högresistiv kalksten, lågresistiv skiffer och högresistiv sandsten och urberg. Den övre skiffern som överlagrar kalkstenen finns i södra delen av området (fig. 23) och blir tunnare när man närmar sig Motala och även österut mot Evrasteby där den delvis saknas helt (fig. 24, 28C). Kalkstenen har en resistivitet inom intervallet 50-150 Ohmm. Den totala mäktigheten av de sedimentära bergarterna är enligt borruppgifter upp emot 250 m vilket är mer än vad ATEM-metoden kan upplösa i detta område (fig. 23). Mäktigheten på den sedimentära berggrunden avtar både som helhet och som individuella lager, söderut (fig. 24). I de östra delarna vid Evrasteby som ligger åtskilt av en förkastning är den totala mäktigheten några tiotals meter mindre (fig. 24F). Lagerföljden ligger högre upp i denna del av området än väster om förkastningen (fig. 28C).



**Figur 29 (t.v.).** Figuren visar resistivitetsvärden vid bergets överyta. Notera skillnaderna i resistivitet vilket tolkas som lerigare Visingsösandsten (lågresistiv = grön och gul) eller sandig Visingsösandsten (högresistiv= röd och lila). I figuren visas även förkastningar och borrhålet vid Övralid. För resistivitetsteckenförklaring, se figur 20. **Figur 30 (t.h.).** Foto på Visingsösandsten vid Lemunda stenbrott. Foto: Peter Dahlqvist.

### Jordlager

Jorddjupet inom *Lemunda-Boren* varierar stort (men har ofta en medelmäktighet på över 20 m, fig. 31). Som mäktigast är jordlagren vid Djurkälla och Smedsby där de är över 40 m inom stora områden. De minsta jorddjupen finns i höjdområdet vid Äskeberga, Norra Freberga, vid Boren samt i områdets västra delar nära Vättern där jordlagren i medeltal är cirka 10 m mäktiga.

Jordlagren vid det skogbeklädda höjdområdet vid Äskeberga (fig. 26) har en resistivitet på mellan 250 och 1000 Ohmm (fig. 32A, bilaga 4, Meter under markytan: 0 m). I de norra delarna av området har data dessutom till stora delar tagits bort vilket tyder på mycket hög resistivitet och brus i data. Enligt jordsartskartan består de ytliga jordlagren av morän och isälvsmaterial. På grund av den höga resistiviteten är det svårt att tolka jordlagrens uppbyggnad och jorddjup. Borrningar visar på relativt tunna jordlager (2–10 m) med sand och morän som dominerande jordart, vilket stämmer överens med resistiviteten och den uppskattade jordmäktigheten (fig. 31).

Söder om Äskeberga ligger ett skogbevuxet område vid Djurkälla med mäktiga isälvsmaterial (fig. 31). Jordlagren har hög resistivitet (ofta 200–1000 Ohmm), vanligen en mäktighet på 30–50 m och skiljer sig tydligt mot den underlagrande lågresistiva (30–50 Ohmm) berggrunden som här troligen består av silurisk skiffer (fig. 32A). Det finns få borrningar i området, de brunnar som finns i Brunnarkivet ligger i utkanten av själva isälvsmaterialet. De visar att det är stor sannolikhet att områdets jordlager består av sand- och grusavlagringar som ibland ligger direkt på det sedimentära berget och ibland underlagras av några meter lera.

Ett jordbruksdominerat, flackt, och lägre liggande område breder ut sig söder om Djurkälla vid Lindenäs och vidare mot Vättern (fig. 31). Områdets ytnära geologi karakteriseras av svallsand med tunna torvtäckta sediment och svallad sandig morän. Resistiviteten på jordlagren ligger mellan 50 och 150 Ohmm och jordlagren är 10–30 m mäktiga, med något lägre resistivitet och minskande mäktighet söderut (fig. 31, 32A). Berggrunden har en lägre resistivitet (30–50 Ohmm, skiffer) än jordlagren vilket gör att gränsdragningen mellan jord och berg är relativt säker här.



**Figur 31.** Figur över jorddjupet inom *Lemunda-Boren*. Lokalisering av profiler som diskuteras i texten samt borrning (BH1) och skruvborrning/sondering (SB12) som utförts av SGU.

Väster om Åskeberga och Djurkälla ligger Lemunda (fig. 31). Jordlagren här består i ytan till stora delar av svallsand och svallad sandig morän men längst i norr finns även lera. Generellt har jordlagren en högre resistivitet i de centrala och östra delarna och något lägre söder-, väster- och norrut. I sydvästra delen, vid Hals, är jordlagren lågresistiva och svåra att skilja från den lågresistiva berggrunden då både jord och berg har en resistivitet på mellan 30 och 50 Ohmm. De lågresistiva jordlagerna är ett tecken på relativt stort lerinnehåll och vattenmättade sediment i form av torv, lera och morän.

SGUs borrning vid Övralid ger information om jordlagerföljden genom kaxprovtagning och geofysisk loggning (bilaga 1 & 2). Jorddjupet vid borrningen var cirka 23 m och jordlagren består från markytan av cirka 3 m morän följt av växellagring av finsand till grusig sand hela vägen ner till berggrunden. Från den geofysiska loggningen kan man se en förändring i jordlagrens sammansättning mot något lerigare parti vid ungefär 18 m djup (bilaga 2).

De ytliga jordlagren vid Illersjö (fig. 31) domineras i norr av siltiga sediment och söderut av isälvsmaterial. Resistivitetsdata tyder på att isälvsmaterialet fortsätter såväl mot nordväst som ostsydost under de lågresistiva ytliga jordlagren (fig. 32B). I området närmast Illersjö finns mer högresistiva jordlager under de lågresistiva, något som även bekräftas genom en borrning utförd av SGU (SB12, fig. 32B, bilaga 1, lagerföljd: 0–2,5 m silt, 2,5–5 m silt/sand, 5–10 m silt, 10–16 m sand. Mellan Illersjö och Askareby finns ett område med mäktiga jordlager (fig. 31). Vid Askareby domineras avlagringarna av högresistiv morän i norr. Vid Evrasteby är jordlagrens resistivitet högre än väster om järnvägen. Tolkningen är att jordlagren är relativt tunna här (fig. 31).



**Figur 32.** Profiler inom *område 1 Lemunda-Boren*, som visar resistivitetsfördelning, tolkning av gräns mellan jord och berg samt lagerföljder från borrningar. **A.** Profil i N–S riktning vid Äskeberga–Djurkälla–Lindenäs. **B.** Profil i NV–SÖ riktning i området vid Illersjö. Profilernas läge visas i figur 31. Terrängytan är draperad med färgkodning från jordartskartan, för teckenförklaring se figur 14. För resistivitetsteckenförklaring, se figur 20.

#### Hydrogeologi i jordlagren

Inom *Lemunda-Boren* finns fyra grundvattenförekomster, en i jord och tre i den sedimentära berggrunden (fig. 17). En översiktlig tolkning av grundvattenförekomster i berggrunden presenteras i avsnittet *Hydrogeologisk beskrivning av berggrunden*.

Grundvattenförekomsten Djurkällaplatån (WA74537039, fig. 17, 33) är belägen i de centrala delarna av området Lemunda-Boren. Enligt tidigare bedömningar (Aneblom m.fl. 1997) är uttagsmöjligheterna ur sand- och grusförekomsten goda eller utmärkta i bästa delen av grundvattenmagasinet (5–25 l/s). Utbredningen av grundvattenmagasinet har hittills varit knutet till områden med ytligt isälvsmaterial och svallsand. Jordlagren är vanligen mellan 30 till 60 m mäktiga inom magasinet (fig. 31) och mäktiga jordlager förekommer även norr om undersökningsområdet (se fig. 32A) där flera brunnar pekar på upp mot 30 m mäktiga sandavlagringar, till exempel vid samhället Nykyrka. Trolig vattendelare norrut vid den lilla byn Tyrhult. Isälvsmaterialet vid Djurkälla som är det huvudsakliga nybildningsområdet fortsätter enligt resistivitetsdata söderut under svallsanden mot Motala och dyker upp i dagen igen söder om Illersjö (fig. 33). Resistivitetsdata indikerar även att isälvsmaterialet finns under de ytligt svallade silt- och moränavlagringarna som består av odlingsmark vid Illersjö och skogsområdet mot Askareby (fig. 33). En skruvborrning (SB12) utfördes vid Illersjö (fig. 33). Borrningen övergår efter cirka 13 m av finkorniga sediment till sand som gav stora mängder vatten i denna undre akvifer bestående av isälvsmaterial (fig. 33, bilaga 1). Dessvärre kunde inget grundvattenrör sättas i samband med borrningen med hänsyn till rådande markanvändning.

Även området väster om höjdområdet vid Äskeberga är intressant ur hydrogeologisk synvinkel. Resistiviteten ligger mellan 100 och 180 Ohmm och kaxprovtagning av borrningen vid Övralid (BH1) visar på en i huvudsak sandig uppbyggnad med mäktighet på 20 m (bilaga 1). Avgränsningen av grundvattenförekomsten Djurkällaplatån kan därmed även utökas till området väster om höjdområdet (fig. 33). Längs denna västra kant finns ett antal källsprång som lokalt kallas upprinnar. De skapas troligen genom stora nivåskillnader och ett antal mindre genomsläppliga lager som tvingar upp grundvattnet till ytan. Detta speglas tydligt i floran, med företrädesvis torra barrskogsarealer högst upp och mer lövskog och fuktängar längre ner på kullen (fig. 34). Detta syns relativt tydligt i resistivitetsdata med en sänkning av resistiviteten när man går från de högre liggande områdena till områden vid kullens fot. Den del av grundvattenförekomsten som ligger uppe på toppen av höjdområdet Äskeberga kan betraktas som i princip helt torr (fig. 32A). Området är troligen betydelsefullt när det gäller grundvattenbildningen till förekomsten. Det är även troligt att grundvattenförekomsten fortsätter söderut in under Motala (fig. 33), tyvärr saknas resistivitetsdata här. Här finns dock redan en annan avgränsad grundvattenförekomst (WA87456290) men det är troligt att de båda förekomsterna har hydraulisk kontakt. Brunnar mellan de två magasinen visar på 20–30 m jorddjup och till största delen sandiga jordlager vilket stöder denna tolkning.

Preliminära grundvattendelare har tolkats in för grundvattenförekomsten Djurkällaplatån baserat på befintliga ytvattendelare, och grundvattenflödet går från högre mot lägre liggande områden (fig. 33). Den nederbörd som faller på höjden avrinner mot grundvattenmagasinet öster, väster och söder om höjden. Även om stora delar av avlagringarna är torra finns det stora mäktigheter med mättade avlagringar och ett stort grundvattenmagasin. Vår tolkning är att uttagsmöjligheten i grundvattenförekomsten ligger över 25 l/s. Den omättade zonen är stor, framförallt där mäktigheten är som störst (fig. 31).

Strax söder om grundvattenmagasinet Djurkällaplatån ligger en källa (Djurkälla) som enligt (Aneblom m.fl. 1997) har ett flöde på ca 15 l/s, är belägen i morän eller svallsediment, och som ingår i den regionala miljöövervakningen.



**Figur 33.** Grundvattenförekomsten Djurkällaplatån. Karta med preliminära tolkningar av magasinsavgränsning. Streckad avgränsning är förslag på utökning av grundvattenförekomsten. Jordartskartan som bakgrund, för teckenförklaring se figur 14. Lokalisering av borrning (BH1) och skruvborrning/sondering (SB12) som utförts av SGU.



**Figur 34. A.** Foto på källsprång nära Övralid. Notera den torra barrskogen i bakgrunden som dominerar i höjdområdena vid Äskeberga. **B.** Foto på fuktig ängsmark vanlig i nederkanten av sluttningarna väster om höjdområdet Äskeberga. Foto: Peter Dahlqvist.

# Område 2: Vadstena-Tåkern

Området ligger mellan Vadstena, Omberg och sjön Tåkern och markanvändningen består nästan uteslutande av jordbruksmark (fig. 35). Området är relativt flackt, med höjdområde vid Omberg i sydväst samt några moränryggar med sydväst–nordostlig riktning (fig. 14) som får landskapet att bölja. Sjön Tåkern är ett Natura 2000-område och har sin avrinning norrut via Tåkerns kanal och Mjölnaån. I sydvästra hörnet ligger Dags mosse där det tidigare brutits torv. SGU har som ett komplement till resistivitetsundersökningarna utfört tre skruvborrningar och sonderingar i jordlagren vid Källstad, Vallaslätten och Säby (fig. 35). Datatäckningen är mycket god i området på grund av få störningskällor (vägar kraftledningar mm., fig. 4, Brolin m.fl. 2020). Endast i ett fåtal områden längs vägar, bland annat väg 919 mellan Ödeshög och Vadstena har data varit störd och tagits bort. Av hänsyn till Natura 2000-området vid Tåkern utfördes inga mätningar här. I direkt anslutning till Vadstena samhälle gjordes inga flygningar.



Figur. 35. Undersökningsdelområdet *Vadstena-Tåkern*. Lokalisering av profiler som diskuteras i texten samt skruvborrningar och sonderingar som utförts av SGU.

#### Berggrund

Den sedimentära berggrundens uppbyggnad syns tydligt i resistivitetssignalen, såväl vid bergets överyta som längs profiler (fig. 22, 36). Området domineras av högresistiv kalksten (ofta över 500 Ohmm men även inom intervallet 200–500 Ohmm) med stor mäktighet i norr som tunnar söderut för att försvinna strax söder om väg 919 mellan Omberg och Vadstena (fig. 35, 36A). Ett undantag är kalkstenen ute på udden vid Nässja. Här har kalkstenen en resistivitet på mellan 130 och 200 Ohmm, vilket kan tyda på att den övre kalkstenen har en något lerigare sammansättning än längre söderut eller att den är mer vattenmättad här. Resistivitetsskillnaderna vid Nässja, med lägre resistivitet norr och högre i söder, verkar vara förkastningsbetingade (fig. 25). Under kalkstenen och söder om kalkstenens utbredning ligger en relativt högresistiv alunskiffer (200–400 Ohmm) underlagrad av lågresistiv lerskiffer (lägre än 50 Ohmm) följt av sandsten med en något högre resistivitet (100–300 Ohmm) som ligger på högresistivt (över 300 Ohmm) urberg (se profiler i figur 36). De sedimentära bergarternas utbredning har med hjälp av resistivitetsdata ändrats något mot tidigare (fig. 23).

Ett antal förkastningar finns i berggrunden, framförallt i de mellersta och sydöstra delarna (fig. 25). Flera av dessa går att följa i resistivitetsdata (fig. 36B, D). Det gäller bland annat i områdets östra delar där resistivitetsdata visar att berggrundens lagerföljdsmönster förändras abrupt. Det syns tydligt genom att den lågresistiva skiffern ligger cirka 20 m lägre än bara några 100 m västerut (fig. 36B). Tolkningen är att förkastningen är en fortsättning på den förkastning som även syns söderut (se fig. 25). En annan eller bidragande förklaring kan vara att området är påverkat av impaktsktrukturen vid Granby som ligger nordost om förkastningen (diskuteras i avsnittet *Område 3: Skänninge-Motala* senare i denna rapport).

I anslutning till urbergshöjden Omberg finns en 50–80 m mäktig sedimentär lagerföljd med störst mäktighet nära Vättern och minskande mot sydost. Branten mot urberget på Omberg är markant och tydlig i resistivitetsdata (fig. 36C). Vid stenbrottet i Borghamn ligger kalkstenen ytligt och har en synlig mäktighet på cirka 10 m (sektionen litologiskt beskriven i Hadding 1958). Enligt resistivitetsdata är kalkstenen cirka 20 m här och tunnar snabbt ut för att försvinna söderut. Möjligen finns det även en förkastning i kontakten mot Omberg (fig. 36C).

I de södra delarna tunnar den sedimentära berggrunden ut avsevärt och där den lågresistiva lerskiffern mestadels saknas kan det vara svårt att avgränsa jordlagren från sandstenen som ligger på urberget då dessa har ungefär samma resistivitet (se 9000 till 10500 m i profilen i fig. 36D). I området vid Svälinge och Källstad utförde SGU tre skruvborrningar (fig. 35) för att utröna jorddjupet och lagerföljden i jorden. Trots tolkade jorddjup på över 15 m kunde inte borrningen nå djupare än till 4–6,5 m djup, jordlagerföljderna diskuteras i avsnittet om jordlagren nedan.

Urbergsytan verkar relativt undulerande i söder och förändringar i den sedimentära berggrundenens lagerföljd och mäktighet är tydliga (fig. 36). Detta kan till exempel illustreras med det område mellan Svälinge och Palsgården där den sedimentära lagerföljden är mycket svårtolkad och troligen starkt påverkad av ett flertal förkastningar (fig. 36D). Här kan man även se hur ett område som börjar vid Åsberga och fortsätter österut (4500–12000 m i fig. 36D) helt saknar kalksten och till viss del även lerskiffer (9500–10500 m).

I Wikman m.fl. (1982) finns det flera områden, bland annat vid Örberga, som är utpekade som glacialtektoniska skollor, och det verkar som att flera av de höjder som finns i området kan ha en kärna av kalksten. I SGUs jordartskarta finns ett antal skollor markerade men fler finns. Området vid Svälinge kan möjligen vara ett sådant (fig. 36D). Det är dock svårt att urskilja skollor i resistivitetsdata då resistiviteten överlappar varandra.









**Figur 36.** Profiler inom *område 2, Vadstena-Tåkern,* som visar resistivitetsfördelning, tolkning av gräns mellan jord och berg samt olika berglager och lagerföljder från borrningar. **A.** Profil i SO–NV riktning genom hela delområdet **B.** Profil i V–Ö riktning centralt genom hela området. **C.** Profil i V–Ö riktning från Omberg till Tåkern. **D.** Profil i V–Ö riktning från Borghamn till Svälinge. Profilernas läge visas i figur 35. Terrängytan är draperad med färgkodning från jordartskartan, för teckenförklaring se figur 14. För resistivitetsteckenförklaring, se figur 20.

## Jordlager

Jorddjupet inom *Vadstena-Tåkern* är generellt mellan 5 och 20 m (fig. 37). De minsta jorddjupen finns i områdets sydvästra delar nära Vättern där jordlagren sällan är över 10 m mäktiga och där det även finns sedimentärt berg i dagen och dessutom glacialtektoniska skollor i moränen. De ytliga jordlagren domineras helt av lera, lerig morän och morän (fig. 14) med en låg till medelhög resistivitet, oftast mellan 50 och 100 Ohmm (bilaga 4, Meter under markytan: 0 m). Mäktiga jordlager finns framförallt vid Nässja där de företrädesvis sandiga sedimenten har en mäktighet på upp mot 35 m (fig. 37, 38A) bestående av isälvsmaterial och svallsand (fig. 14).

Vid Tåkern finns stora områden med kärr och mossar och dessa domineras av torv. Torvbrytning har skett vilket åskådliggörs i reliefen i områdets sydvästra kant (fig. 37). Av hänsyn till Natura 2000-området utfördes inga mätningar i närheten av Tåkern varför data saknas för torvområdena. Ett stort område norr om Tåkern består till stora delar av lera i ytan (fig. 14) vilket syns tydligt genom företrädesvis låg resistivitet i de ytliga geologiska lagren (oftast under 30 Ohmm, fig. 38, bilaga 4). Jordlagren vid Tåkern är ställvis mäktiga och vanligen över 20 m (fig. 37).



**Figur 37.** Figur över jorddjupet inom *Vadstena-Tåkern*. Lokalisering av profiler som diskuteras i texten samt skruvborrningar och sonderingar (SB1, SB2, SB3) som utförts av SGU.

SGU utförde tre skruvborrningar och sonderingar inom området, vid Källstad, Vallaslätten och Säby, samtliga i närheten av Tåkern (fig. 37). Syftet med sonderingarna var att se hur stort jorddjupet var och om de lågresistiva ytliga jordlagren underlagrades av jordarter eller berggrund med medelhög resistivitet eller om det var berggrund. Borrningarna blev 6,5, 5,0 respektive 4 m djupa och visade jordlager huvudsakligen bestående av morän (fig. 38B, bilaga 1). De tre borrningarna avslutades innan avslut mot block eller berg och den bedömda jordmäktigheten (30, 25, respektive 15 m) uppnåddes inte och därför saknas även hela jordlagerföljden.

Nordost om Omberg ansluter randbildningarna från mellansvenska randmoränzonen mot Omberg, vilket skapar förutsättningar för större jordmäktigheter. Ett antal större åsformer med morän finns i området (fig. 14). Vissa av höjderna i området kan delvis innehålla kalksten i form av skollor. De glacialtektoniska skollorna av sedimentärt berg som beskrivits från området (Wikman m.fl. 1982) har tidigare klassats som berg i SGUs jorddjupsmodell (Daniels & Thunholm 2014). Det har varit svårt att urskilja dessa skollor i ATEM-data och i vår jorddjupsmodell har dessa möjligen inkorporerats i jordlagren istället (fig. 37).

Vid Ombergs fot är jorddjupen relativt små förutom i de sydöstra delarna (fig. 37, se även fig. 36C). Här ligger Dagsmosse och Tåkern, vilka kan tänkas ligga i sänkor i berggrunden som har eroderats av att isen har styrts vid sidan av Omberg. Det kan ha skett under flera nedisningar och därmed ha fyllts i av jordlager före eller under den senaste nedisningen.



**Figur 38.** Profiler inom *område 2, Vadstena-Tåkern,* som visar tolkning av gräns mellan jord och berg samt lagerföljder från borrningar och de tre skruvborrningar som utfördes av SGU. **A.** Profil i N–S riktning från Nässja till Tåkern som visar den geologiska modellen över områden med större jorddjup. **B.** Profil i V–Ö riktning strax norr om Tåkern som även visar resistivitetsfördelningen. Profilernas läge visas i figur 37. Terrängytan är draperad med färgkodning från jordartskartan, för teckenförklaring se figur 14. För resistivitetsteckenförklaring, se figur 20.

## Hydrogeologi i jordlagren

Inom *Vadstena-Tåkern* finns två grundvattenförekomster, en i jord och en i den sedimentära berggrunden (fig. 39). En diskussion om grundvattnet i berggrunden presenteras i avsnittet *Hydrogeologisk beskrivning av berggrunden*. Området består nästan enbart av leriga jordarter och morän vilket skapar få riktigt goda förutsättningar för större grundvattenuttag från jordlagren. Intressanta områden bör vara knutna till mäktigare jordlager (fig. 37).

Vid Nässja ligger en smal grundvattenförekomst längs Vätterns strand (WA4187885) som här kallas Getryggen (fig. 39). Grundvattenmagasinet är en porakvifer och enligt tidigare översiktlig bedömning (Aneblom m.fl. 1997) är uttagsmöjligheter 5–25 l/s i grundvattenmagasinet. Endast ett fåtal resistivitetsmodeller finns inom området. Resistiviteten i höjdområdena ligger på 200–300 Ohmm och är troligen relativt torra medan största delen av mäktigheten ligger på cirka 100 Ohmm vilket tyder på en relativt mäktig vattenmättad del (fig. 40A). Jorddjupet är cirka 20 m och består mestadels av sand och isälvsmaterial (fig. 14). Vätterns normalvattenstånd är cirka 88,5 m (SMHI) och delar av magasinet ligger under sjön. Förekomsten fortsätter troligen ut i Vättern, och på land är den något uppstyckad av några vikar och moränområden (fig. 40A). Utbytet mellan yt- och grundvatten borde vara stort med tanke på läget.



**Figur 39.** Grundvattenförekomster i jord, utpekade områden som diskuteras ur hydrogeologisk synvinkel, samt lokalisering av profiler som diskuteras i texten. Jordartskartan som bakgrund, för teckenförklaring se figur 14.

Tillrinningsområdet, till grundvattenmagasinet Getryggen, på land är litet och består i princip av isälvsavlagringens utbredningsområde, men induceringsmöjligheterna torde vara i det närmsta obegränsade med rätt placerade brunnslägen.

I anslutning till Omberg finns relativt stora jorddjup längst i söder vid Dags mosse (fig. 37). Jordlagren i området har en lägre resistivitet vilket tolkas som att de är mer vattenmättade. Mycket av jordlagerföljden består av finkorniga jordar och torv men det finns brunnar som visar att det finns friktionsmaterial under dessa. Avrinningen från höjdområdet vid Omberg skapar högst troligen ett relativt stort bidrag till grundvattenbildning i denna zon.

Borrningarna som SGU utförde strax norr om Tåkern blev endast mellan 6,5 och 4 m djupa, var helt torra och avslutades i moränen. Jorddjupet i dessa områden har tolkats till mellan 30 och 15 m och resistiviteten tyder på att det kan finnas jordlager bestående av sand under den lågresistiva moränen (fig. 38B). Det kan dock vara morän. Undersökning med starkare borrmaskin bör ske för att se om det finns friktionsmaterial under och om detta är vattenförande.

Det finns fler brunnar inom delområdet som visar på förekomst av sand och grus under tätare jordlager. Ett exempel är området vid Örberga (fig. 40B, 16). Såväl förekomsten av glacialtektoniska skollor och komplexa moränlagerföljder med stor mäktighet (fig. 37) kan skapa förutsättningar för åtminstone mindre akviferer i jordlagren.



**Figur 40.** Profiler inom *område 2, Vadstena-Tåkern*, som visar resistivitetsfördelning, tolkning av gräns mellan jord och berg samt olika berglager och lagerföljder från borrningar. **A.** Profil längs Vätterns kust, riktning från S mot N och sedan Ö, **B.** Profil i NO–SV riktning från Nässja till Örberga. Profilernas läge visas i figur 39. Terrängytan är draperad med färgkodning från jordartskartan, för teckenförklaring se figur 14. För resistivitetsteckenförklaring, se figur 20.

# Område 3: Skänninge-Motala

Området ligger mellan *Vadstena-Tåkern* i väster och *Skänninge-Motala* i öster, järnvägen intill väg 50 utgör områdets östra avgränsning (fig. 41). Bortsett från ett område mellan Fivelstad och Skänninge med skog rör det sig i princip uteslutande om jordbruksmark. Några områden med isälvsavlagringar i form av åsar och moränryggar (fig. 14) sticker upp till tiotalet meter i ett annars flackt landskap. Området saknar större sjöar och vattendrag, ett fåtal mindre sjöar finns i söder där även Skenaån rinner. Som komplement till resistivitetsdata utförde SGU en jord- och bergsondering vid Ramstad samt 1,5 km tTEM-undersökningar väster om Fivelstad (fig. 41). Vid Skänninge finns även 2 seismik- och 11 radarprofiler, utförda av SGU (Gustafsson & Jirner 2016), som använts vid tolkningarna. ATEM-data har rensats bort i områden med större elledningar samt längs väg 206 mellan Vadstena och Skänninge (fig. 4, Brolin m.fl. 2020).



**Figur 41.** Undersökningsdelområdet *Skänninge-Motala*. Lokalisering av profiler och skruvborrning/sondering (SB4) som utförts av SGU under projektets gång.

#### Berggrund

Den sedimentära berggrunden har en homogen uppbyggnad (fig. 42A) med uppifrån högresistiv kalksten (150–800 Ohmm), alunskiffer som är relativt medel till högresistiv (70–250 Ohmm), lågresistiv lerskiffer (10–50 Ohmm), sandsten med en något högre resistivitet (70–300 Ohmm), och underst i stratigrafin högresistivt urberg (över 300 Ohmm). Resistivitetsmässigt har området stora likheter med området *Motala-Fornåsa* som gränsar österut. De sedimentära bergarternas utbredning kan baserat på resistivitetsdata korrigeras något mot vad som tidigare var känt (fig. 23). Urbergsytan stupar mot nordväst och den sedimentära lagerföljden blir tunnare och innehåller färre lager mot sydost (fig. 43A). Flera tidigare tolkade förkastningszoner syns tydligt i resistivitetsdata medan andra inte har kunnat påvisas. Några nya förkastningszoner har dessutom identifierats i resistivitetsdata som inte tidigare varit kända (fig. 25). Storleken på förkastningarna inom området är mellan 10 och 30 m i höjdskillnad (fig. 42A–B).

Kalkstenen är mäktigare och har en något mer heterogen resistivitetssignal i de nordligaste delarna av delområdet, norr om Skeppstad (fig. 42A). Kalkstenslagerföljden kan här delas in i tre delar med (underifrån) 15–20 m (200–250 Ohmm), 15–0 m (strax under 100 Ohmm) och därefter cirka 20 m (över 250 Ohmm). Den mer högresistiva delen minskar i mäktighet söderut vilket delvis kan bero på sammansättning av olika delar av kalkstenen men det kan även vara påverkan av förkastningar i norr samt även glacialtektonik som gett upphov till den avvikande lagerföljden.

Framförallt i de södra delarna visar resistivitetsdata på att den annars så tydliga lerskiffern saknas (fig. 42B). Det finns även områden där resistivitetsdata pekar mot att det antingen finns ett fönster från jordlagren ner till sandstenen eller där sandstenen av någon anledning ligger högre och överlagras av jordlager. I vår 3D-modell har vi i de flesta fall antagit att lerskiffern finns närvarande trots detta, men det kan vara förkastningar som skapat vissa av dessa resistivitetsmönster (se till exempel vid cirka 2000m och 3250–3500 m i figur 42B). I något område, bland annat vid Brustorp, finns mäktiga lågresistiva lager som tolkas som upp mot 50 m mäktig lerskiffer (fig. 24D), även detta verkar vara förkastningsbetingat.

Inom området finns impaktstrukturen Granby som skapades av ett meteoritnedslag för cirka 470 miljoner år sedan. En zon med högresistivt (över 500 Ohmm) urberg syns som en ringform i resistivitetsdata medan den ordoviciska lagerföljden som finns inuti kratern har en resistivitet som påminner om lagerföljden utanför kratern (fig. 43). Randzonen är något högre i topografin vilket troligen beror på det mer motståndskraftiga urberget. Den maximala mäktigheten av sedimentära bergarter är 360 m (Wikman m.fl. 1982) vilket är djupare än vad ATEM-data kan upplösa med de nu använda inställningarna varför de djupare gränserna är mer osäkra. Typisk resistivitetsprofil (fig. 42C) inom strukturen är 20 till 40 m medel- till högresistiv (100–300 Ohmm) kalksten och alunskiffer, 30 till 50 m lågresistiv (20–50 Ohmm) lerskiffer följt av ca 50 till 60 m medelresistiv (50–80 Ohmm) berggrund, underlagrat av lågresistiv berggrund troligen bestående av breccia (20–50 Ohmm) och på ca 250–280 m djup högresistiv berggrund som tolkas som breccia eller urberg. Den högresistiva ringen med urberg är mest markant i de västra delarna (fig. 43).

Precis öster och väster om Granbystrukturen syns ett annorlunda resistivitetsmönster (fig. 42C, 43). Det kan tolkas som att även detta område är påverkat av meteoritnedslaget men det är troligare att det till viss del rör sig om något förkastningsbetingat i anslutning till Granbystrukturen. Generellt är resistiviteten betydligt lägre här än vad man kunnat vänta sig. Kalkstenen är mindre mäktig än vad den är en bit därifrån eller saknas eventuellt helt (fig. 42C). Det högresistiva urberget syns inte alls på djupet, vilket tolkas som att det finns en viss påverkan som kan vara knuten till modelleringen av data.



**Figur 42.** Profiler inom *område 3, Skänninge-Motala*, som visar resistivitetsfördelning, tolkning av gräns mellan jord och berg samt olika berglager och lagerföljder från borrningar. **A.** Profil i NV–SO riktning i östra delen. **B.** Profil i V–Ö riktning centralt genom området. **C.** Profil i V–Ö riktning vid Granbystrukturen. Profilernas läge visas i figur 41. Terrängytan är draperad med färgkodning från jordartskartan, för teckenförklaring se figur 14. För resistivitets-teckenförklaring, se figur 20.



**Figur 43.** Resistivitetsfördelning vid Granbystrukturen. **A.** 5 m under bergets överyta. **B.** 55 m under bergets överyta. Den lila "ringen" representerar det högresistiva urberget, dvs. impaktstrukturens kanter. För resistivitets-teckenförklaring, se figur 20.

## Jordlager

Jorddjupet inom *Skänninge-Motala* är generellt över 10 m mäktigt (fig. 44). De minsta jorddjupen finns vid Vadstena där mäktigheten ibland är under 5 m. De största jorddjupen (20–40 m) finns i tre områden, två kopplade till områden med isälvsavlagringar vid Skeppstad-Hageby respektive söder om Fågelsta, samt området söder om impaktstrukturen vid Granby (fig. 44, 45A). De stora jorddjupen sammanfaller ofta med höjder i topografin.

Mellan Fågelsta och Skänninge ligger en stor isälvsavlagring som en höjd (fig. 15). Området har till stora delar högresistiva (200–500 Ohmm), troligen torra, jordlager i ytan (bilaga 4, Meter under markytan: 0 m) underlagrat av jordlager med något lägre resistivitet (100–200 Ohmm). Dessa tolkas som vattenmättad sand och grus men kan i vissa områden utgöras av morän. Därunder kommer berggrund i form av kalksten (100–600 Ohmm) som minskar i mäktighet mot sydost. Lokalt kan det vara så att de övre delarna av kalkstenen är mer vattenmättad vilket sänker resistiviteten och gör det svårare att särskilja jordlagren från kalkstenen. I de norra delarna av den stora isälvsavlagringen kördes ett par profiler med tTEM strax öster och norr om Fivelstad (fig. 44) som ett komplement till ATEM-data. Resultaten från tTEM visas i bilaga 3 men diskuteras kort i denna text. tTEM-data visar en tydlig variation i resistivitet för jordlager i östra jämfört med centrala och västra sidan av avlagringen. Längs västra sidan mot Fivelstad, där jordlagren överlagrar kalkstene är resistiviteten betydligt lägre (60–120 Ohmm) medan den östra sidan mot väg 50, där kalkstenen eventuellt saknas, har en resistivitet som överstiger 200 Ohmm (fig. 45B). Resistivitetsvärden i tTEM-data visar liknande värden som ATEM-data.



**Figur 44.** Figur över jorddjupet inom *Skänninge-Motala*. Lokalisering av profiler som diskuteras i texten samt skruvborrning/sondering (SB4), och tTEM-profiler (röd) som utförts av SGU.

Väster om det stråk med isälvsavlagringar och svallsand mellan Fågelsta och Skänninge finns ett område med stora jorddjup som sträcker sig mot sydväst i riktning mot Ramstad och Bjälbo (fig. 44). Den lågresistiva skiffern saknas inom delar av området och jordlagren ligger här direkt på sandstenen. En jord- och bergsondering vid Ramstad utförd av SGU visar på 16 m morän-lera-morän (bilaga 1) medan en borrning cirka 1 km mot nordost visar på 36 m sand och grus (Brunns-ID-85100436) för ungefär samma resistivitetsprofil. Det är därmed svårt att säkert veta om det är sand och grus eller morän. Då det mäktiga jorddjupet fortsätter uppifrån nordost och isälvsavlagringarna där, och vissa borrningar visar på sand och grus, är det dock möjligt att det finns isälvsmaterial i delar av detta stråk. Området är dessutom bildat delvis som en höjdrygg.

Vid Skeppstad-Hageby finns ett område med stora jorddjup som utgör en höjd. Området är karterat som morän med spridda isälvsavlagringar (fig. 14). Det bildas nästan som en gryta av relativt högresistiva (150–400 Ohmm) jordlager med ett något mer lågresistivt (30–50 Ohmm) område centralt som har lera och torv, och som av allt att döma är en resterna efter en dödissjö. Jorddjupet är mellan 15 och 40 m och resistiviteten är i princip runt 100 Ohmm inom stora delar av området. Flertalet av brunnarna i området visar på 20–30 m sand men de flesta borrningar har skett i områden med karterat isälvsmaterial. I området norr om Skeppstad, vid Hässleby, där resistivitetsdata indikerar förändringar i den ytliga berggrunden (se fig. 42A) som kan indikera påverkan av glacialtektonik och skollor vilket stämmer överens med områdets kulliga topografi.

De stora jorddjupen knutna till Granbystrukturen (fig. 44) beror troligen på att urberget som utgör randzonenen utgjort en motståndskraftig höjd och bakom en sådan kan det ofta finnas större jorddjup. Det rör sig då ofta om morän men kan även vara sand och grus då vatten kan ledas hit och skapa isälvsavlagringar.

I Vadstena tätort saknas resistivitetsdata men här finns ett stort antal brunnar. Lagerföljderna visar på jordmäktigheter på 5–10 m med övervägande sand, men även morän och lera. De ytliga jordlagren är karterade som morän men denna kan underlagras av andra jordarter.



**Figur 45.** Profiler inom område 3, Skänninge-Motala, som visar resistivitetsfördelning (i B både SkyTEM och tTEM), tolkning av gräns mellan jord och berg samt lagerföljder från borrningar. **A.** Profil i huvudsakligen N–S riktning genom områden med mäktiga jordlager. **B.** Profil i huvudsaklig V–Ö riktning vid Fivelstad. Profilernas läge visas i figur 44. Terrängytan är draperad med färgkodning från jordartskartan, för teckenförklaring se figur 14. För resistivitetsteckenförklaring, se figur 20.

#### Hydrogeologi i jordlagren

Inom området *Skänninge-Motala* finns två tidigare utpekade grundvattenförekomster i jordlagren, Fivelstad och Lövingsborg (fig. 46). Den västra delen av *Skänninge-Motala* består nästan uteslutande av morän och lera vilket gör att områden som är intressanta för större grundvattenuttag är knutna till den östra delen av området. I övergångszonen mellan morän och isälvsmaterial, mellan Lagmansberga och Ramstad, finns ett avgränsat område som kan ha potential för grundvattenuttag (fig. 46). Även områden knutna till stora jorddjup vid Hagebyhöga och söder om Granby diskuteras.

Grundvattenmagasinet Fivelstad (WA63960982, fig. 46) ligger som en förlängning norrut av grundvattenmagasinet Lövingsborg, vid Fivelstad och Fågelstad. Enligt tidigare översiktlig bedömning (Aneblom m.fl. 1997) är uttagsmöjligheterna goda till utmärkta (5–25 l/s) inom de bästa delarna av magasinet. En tydlig skillnad mellan högre och lägre resistivitet (fig. 45B) uppträder inom isälvsavlagringen vilket syns både i ATEM- och tTEM-data. Sett till topografin skulle det kunna röra sig om en gräns mellan vattenmättade och torra sediment. Det finns dock brunnar som visar på förekomst av morän och lera och avlagringen verkar inte helt homogen. De östra delarna är delvis täckta av ett tunt moräntäcke med åsformer i moränen (fig. 14). Den totala mäktigheten på jordlagren är cirka 30 m och de översta 10–15 m har en högre resistivitet och utgör den omättade zonen (fig. 47A). Fivelstadområdet ses som ett viktigt nybildningsområde för grundvatten och en grundvattendelare finns i nord-sydlig riktning i avlagringen (Möller m.fl. 1981). tTEM-profilerna som ligger norr om Fivelstad indikerar inte att isälvsavlagringen skulle ha en större utbredning i denna riktning (bilaga 3, fig. 46). I sydväst är grundvattenförekomsten avgränsad av svallsand. Enligt resistivitetsdata minskar jordlagrens mäktighet betydligt i detta område, oftast endast 5–10 m mäktiga (fig. 44), och består delvis av så lågresistiva jordlager att vi tolkar detta som lerrika sediment. Uttagsmöjligheten i denna del av avlagringen torde därmed vara betydligt mindre än i området där isälvsmaterialet går i dagen. En rörlig vattendelare avgränsar grundvattenförekomsterna Fivelstad och Lövingsborg (fig. 47A), resistivitetsdata tyder på att gränsen mellan grundvattenförekomsterna ligger vid Snyttringe.

Norra delen av grundvattenförekomsten Lövingsborg (WA50192622, fig. 46) ligger i en isälvsavlagring söder om Fivelstad-avlagringen som fortsätter söderut mot Skänninge. Enligt tidigare bedömning (Gustafsson & Jirner 2016) finns en rörlig vattendelare mellan grundvattenmagasinen Fivelstad och Lövingsborg, samt ytterligare en grundvattendelare några kilometer åt sydost (fig. 46). Resistivitetsdata tyder på att grundvattenförekomsten Lövingsborg börjar strax innan den södra grundvattendelaren vid diket. Här finns vad vi tolkar som en urbergsklack och jordlagren är som minst mäktiga här (5–10 m, fig. 44, fig. 47A). Enligt tidigare bedömning (Gustafsson & Jirner 2016) är uttagsmöjligheten utmärkt (25–125 l/s) inom grundvattenmagasinet längre söderut. Grundvattenströmningen sker i huvudsak från norr fram till undersökningsområdets avgränsning i söder (inne i Skänninge samhälle). Vid tidigare undersökningar har SGU (Gustafsson & Jirner 2016) utfört 2 seismikprofiler och georadar längs 11 profiler i detta område (fig. 4). Den nordliga seismikprofilen visar cirka 5 m torr sand och grus följd av en 10 m mättad zon med isälvssediment. Profilen längre söderut uppvisar 10 m mäktiga torra sand- och grusavlagringar på 20 m vattenmättad morän. Generellt är det mäktiga jordlager här med stora områden med 20–30 m mäktighet (fig. 47A).

Området med stora jorddjup vid Granbystrukturen kan vara av intresse ur grundvattensynpunkt. Resistivitetsdata visar på mäktiga jordlager som till stora delar kan bestå av vattenmättad sand och grus. Jordlagren kan vara mellan 20 och 35 m (fig. 46) här och ett antal brunnar visar på förekomst av ett undre sand- och gruslager som kan ha en mäktighet på upp mot 15 m (fig. 47B). Jordlagren ligger i den av isen starkt påverkade moränområdet vilket skapat komplexa lagerföljder med mycket inslag av lera och morän men detaljundersökningar i området kan utmynna i intressanta och produktiva brunnslägen. I området kring Hagebyhöga finns jordlager med stora mäktigheter (fig. 46). Såväl resistivitetsdata som lagerföljder från brunnar visar på upp mot 30 m mäktiga jordlager huvudsakligen bestående av sand och grus inom ett stort sammanhängande område (fig. 47C). Området torde vara av stort intresse för framtida grundvattenundersökningar. Resistivitetsvärden visar delvis var det är företrädesvis torrt (högresistiva högre liggande delar), troligen vattenmättad sand och grus (runt 100 Ohmm) samt områden där det troligen finns lera (lågresistiva områden) (fig. 47C).

Sydväst om Fivelstad finns ett långsmalt delområde i nordost–sydvästlig riktning mellan Lagmansberga och Ramstad som resistivitetsmässigt pekar mot att området kan vara av intresse för mer noggranna grundvattenundersökningar (fig. 46). Området sticker ut i jorddjupskartan med stora arealer med över 30 m mäktiga avlagringar (fig. 44). I området ligger relativt högresistiva lager (100–200 Ohmm) som vi tolkar som jordlager direkt på relativt högresistiv berggrund (100–200 Ohmm), tolkat som sandsten, innan urberget med resistivitet på 200 till över 1 000 Ohmm (fig. 47D). Jordlagren består till vissa delar av isälvsmaterial men till vissa delar morän och lera enligt brunnsprotokoll. Resistivitetsmässigt är det svårt att skilja moränen från isälvsmaterialet. I vissa brunnar finns det sand- och grusavlagringar under lera vilket är extra intressant ur grundvattensynpunkt (fig. 47D). Att det inte finns någon (eller i alla fall väldigt tunn) skiffer mellan vattenmättade jordlager och sandstenen gör att det finns möjlighet för en kombinerad jord- och sandstensakvifer inom delområdet. Den totala vattenmättade lagerföljden (innan urberget) kan då vara mellan 40 och 60 m. Vid Älgsjö-Marstad tunnar jordlagren ut och berggrunden är relativt ytlig här. Detta kan skapa en trolig grundvattendelare som delar det utpekade området i en nordlig och en sydlig del (fig. 46).



**Figur 46.** Grundvattenförekomster i jord, utpekade områden som diskuteras ur hydrogeologisk synvinkel, samt lokalisering av profiler som diskuteras i texten. Jordartskartan som bakgrund, för teckenförklaring se figur 14.







**Figur 47.** Profiler inom *område 3, Skänninge-Motala,* som visar resistivitetsfördelning, tolkning av gräns mellan jord och berg samt lagerföljder från borrningar. **A.** Profil i N–S riktning vid Fivelstad-Lagmansberg-Lövingsborg. **B.** Profil vid Granbystrukturen. **C.** Profil vid Hagebyhöga. **D.** Profil i NNO–SSV riktning vid Lagmansberg och Ramstad. Profilernas läge visas i figur 46. Terrängytan är draperad med färgkodning från jordartskartan, för teckenförklaring se figur 14. För resistivitetsteckenförklaring, se figur 20. Där resistivitet endast visas i jordlagren (A & C) är det 3D-grid.

# Område 4: Motala-Fornåsa

Området sträcker sig från Motala och sjön Boren i norr till Skänninge och Svartån i söder, västerut till väg 50 mellan Skänninge och Motala och österut till Lönsås (fig. 48). Odlingsmark dominerar men centralt i området och i anslutning till Motala finns större sammanhängande skogsmark. I norr finns de högst belägna områdena som sedan sluttar mot ostsydost med de lägst liggande områdena vid Älvestad respektive vid sjön Borens sydöstra strand. Endast ett fåtal mindre vattendrag, sjöar och våtmarker finns inom området som dock avgränsas av Skenaån och Svartån i söder samt Boren i norr. Området är relativt tätbebyggt med bland annat några större kraftledningar, en järnväg och vägar där data plockats bort och gett upphov till luckor i resistivitetsdata (fig. 4, Brolin m.fl. 2020). Som komplement till resistivitetsdata utförde SGU en borrning i jord och berg vid Vinnerstad, tre jord- och bergsonderingar vid Vedemö, Byckorp och Rimstad, tre kilometer tTEM-undersökningar vid S. Freberga. Även information från tidigare undersökningar med markradar vid Örvad (fig. 48) har använts vid tolkningarna.



**Figur 48.** Undersökningsdelområdet *Motala-Fornåsa*. Lokalisering av profiler som diskuteras i texten samt borrning (BH2), skruvborrningar och sonderingar (SB9, SB10, SB11), seismikprofil och tTEM-profiler som utförts av SGU.

### Berggrund

Den sedimentära berggrunden har en relativt homogen uppbyggnad inom stora områden. Den totala mäktigheten inom området är som mest cirka 180 m i nordväst vid Motala. Längst i norr finns ett lågresistivt lager som överlagrar kalkstenen (jämför östra delarna av Område 1: Lemunda-Boren) som troligen består av silurisk skiffer som därmed sträcker sig längre söderut än tidigare bekräftat (fig. 23). Skiffern underlagras av högresistiv kalksten, som mest 80 m mäktig, som i sin tur underlagras av 15–20 m högresistiv alunskiffer följt av cirka 20 m lågresistiv skiffer som underlagras av sandsten med en högre resistivitet och därefter urberg med ännu högre resistivitet (fig. 49A). Kalkstenens mäktighet är som störst i den norra delen för att sedan tunnas ut söderut. Hela den sedimentära berggrunden tunnar ut söderut (fig. 49A). I de södra delarna finns det områden som saknar skiffer och där sandstenen utgör det ytligaste berglagret. Detta sker inte med en jämn gradient när man rör sig mot sydost vilket troligen beror på de förkastningar som finns i området (fig. 25). Vid till exempel Sjöhangen, Rimstad och Skeppsås finns områden där det enligt resistivitetsdata saknas lerskiffer (fig. 23). Då lerskiffern är den klart tydligaste markören i resistivitetsdata är det relativt säkra bedömningar. I de delar där jordlagren ligger direkt på sandstenen är det ibland svårt att göra en gränsdragning för bergets överyta då resistivitetsintervallen för morän och sandsten överlappar varandra (fig. 49A).

Området Motala-Fornåsa är det mest förkastningstäta i hela undersökningsområdet (fig. 25). Centralt ligger förkastningar i väst–ostlig riktning och söder om detta ett flertal med sydvästlig–nordostlig riktning. Flera av dessa förkastningar syns i resistivitetsdata (fig. 49B), enklast är det att följa den lågresistiva skiffern vars över- och underyta framträder tydligt i resistivitetsdata. I några fall har förkastningarna bidragit till förskjutningar i höjdled på så mycket som 20 m i lagerföljden (fig. 49B). Notera att förkastningarna ofta är brantare än vad ATEM-data kan visa i profilerna.



**Figur 49.** Profiler inom *område 4, Motala-Fornåsa,* som visar resistivitetsfördelning, tolkning av gräns mellan jord och berg samt olika berglager och lagerföljder från borrningar. **A.** Profil i S–N riktning från Skänninge till Boren. **B.** Profil i V–Ö riktning vid Jolstad-Lönsås. Profilernas läge visas i figur 48. Terrängytan är draperad med färgkodning från jordartskartan, för teckenförklaring se figur 14. För resistivitetsteckenförklaring, se figur 20.

Vid Vinnerstad utfördes en undersökningsborrning (fig. 48). Borrningen lokaliserades för att försöka träffa en förkastning och för att se vad de hydrogeologiska förutsättningarna var i förkastningszonen. Totaldjupet är 51 m och tolkad övergång mellan jord och berg vid 15 m med foderrör till 21 m (bilaga 1). Borrkax visar på en lagerföljd bestående av grå till rödbrun, lerig till ren kalksten, eventuellt motsvarande den mellanordoviciska kalkstenssekvensen (fig. 12). Dock kan det vara tal om upprepning då borrningen skett i eller nära en förkastning.

Strax väster om borrhålet, i friluftsområdet Fålehagen utfördes även tTEM-mätningar (bilaga 3). tTEM-data visar på bra upplösning av jordlager och berggrund ner till ett djup av cirka 100 m. Det finns tydliga tecken på att det finns förkastningar i berggrunden i området (se bilaga 3). Nivåskillnader på olika geologiska lagers över- och underytor kan vara upp mot 30 m. Det finns indikationer på att hela området öster om Motala har en komplex berggrundsuppbyggnad som inte motsvarar den primära plana lagringen. Det är troligt att detta till stora delar är skapat av glacialtektonik och består av mer eller mindre uppskjuvade berggrundsenheter. Längst i norr vid Ulvåsa är den övre berggrunden något heterogen med medelhög resistivitet och hög om vartannat (fig. 50A). Även detta område utgörs av en höjd och tolkas som skollor. Ytterligare ett område med en liknande heterogen uppbyggnad finns längre söderut i ett stråk ända ner mot Varby (fig. 48).

Söder om profilen i figur 49B mellan Jolstad och Lönsås (fig. 48) visar resistivitetsdata på en mer lättolkad sekvens med tydliga gränser och relativt plana lager enligt förväntad geologisk modell. De sedimentära lagrens mäktighet stupar något mot väster, kalkstenen som är 10–20 m i öster är 40–50 m i väster (fig. 24). I höjd med Hycklinge försvinner kalkstenen i öster och det är alunskiffer eller sandsten som utgör den ytliga berggrunden (fig. 50B).



**Figur 50.** Profiler inom *område 4, Motala-Fornåsa,* som visar resistivitetsfördelning, tolkning av gräns mellan jord och berg samt olika berglager och lagerföljder från borrningar. **A.** Profil i V–Ö riktning vid Ulvåsa. **B.** Profil i V–Ö riktning i delområdets centrala delar. Profilernas läge visas i figur 48. Terrängytan är draperad med färgkodning från jordartskartan, för teckenförklaring se figur 14. För resistivitetsteckenförklaring, se figur 20.

### Jordlager

Resistiviteten speglar i stort sett den ytligt karterade jordarten. Områden med medelhög till mycket hög resistivitet (100 till över 1 000 Ohmm) förekommer i områden med isälvsmaterial och morän medan områden med låg resistivitet (oftast under 50 Ohmm) representerar ytliga lager bestående av lera och torv (bilaga 4, Meter under markytan: 0 m). Jordlagren är i stora delar av området runt 20 m mäktiga. Sydost om Motala vid Staffanstorps naturreservat och Fålehagen finns upp till 50 m mäktiga jordlager (fig. 51).

I området finns två större sammanhängande och ett antal mindre områden med isälvsmaterial i ytan (fig. 14, 15). De två stora avlagringarna ligger vid Lönsås-Fornåsa samt vid Byckorp-Födekulla (fig. 51). Resistiviteten ligger mellan 70 och 300 Ohmm (vanligen cirka 100 Ohmm) med de högre värdena på höjderna (ofta åsformer) och de lägre värdena i de mer flacka områdena mellan höjderna. Skillnaderna i resistivitet speglar troligen delvis vattenmättnadsgrad och delvis någon mer inblandning av silt och lera i de lägre liggande partierna. Liknande mönster finns även i de andra områdena med isälvsmaterial. Vid de smalare avlagringarna norr om Ekeby (fig. 48), är det generellt lägre resistivitet vilket tolkas som att detta endast är tunna isälvsavlagringar.

Precis söder om Motala vid Galgbacken-S. Freberga finns jordlager med stora mäktigheter och en heterogen uppbyggnad (fig. 51, 52). Den del som består av isälvsmaterial är bebyggd och här saknas ATEM-data. I friluftsområdet Fålehagen sydost om Motala utfördes tTEM-mätningar för att se om man kunde få bättre upplösning av jordlagren (bilaga 3). Resistivitetsvariationerna är stora inom detta lilla område. Resistiviteten varierar från 50 till 800 Ohmm (fig. 52A). Det



**Figur 51.** Figur över jorddjupet inom *Motala-Fornåsa.* Lokalisering av profiler som diskuteras i texten samt borrning (BH2), skruvborrningar och sonderingar (SB9, SB10, SB11), och tTEM-profiler som utförts av SGU. som är karterat som sandig morän varierar mellan 50 och 250 Ohmm (fig. 52A). Isälvsmaterialet har en resistivitet på mellan 200 och 800 Ohmm i ytan, och sand 100–200 Ohmm. Vid Vinnerstad utfördes en borrning (fig. 51). Jordlagren är 15 m mäktiga här och består enligt borrkaxet av grovsilt till finsand (0–7 m) mellansand (8–10 m), sandig morän (10–13 m) och finsand-grovsilt (13–15 m) och därunder berggrund (bilaga 1). Berggrunden tolkas vara påverkad av glacialtektonik vilket gör att det förekommer skollor bestående av sedimentärt berg i jordlagren.

Tre jordborrningar utfördes inom delområdet (fig. 51, bilaga 1). Vid Vedemö avbröts borrningen, troligen mot block, redan efter 3,8 m då tolkat jorddjup är cirka 20 m, översta metern utgjordes av sand och resten sandig morän. Vid Byckorp var lagerföljden 3 m finsand följd av 3 m sandig morän innan borrningen avbröts, troligen mot block då tolkade jordmäktighet är cirka 20 m. Vid Rimstad bestod de översta 5 m av morän följt av 0,4 m sand innan borrningen avbröts, troligen mot block då jorddjupet tolkas vara 11 m här. Resistiviteten från jordlagren är liknande vid de tre sonderingsplatserna och visar på svårigheterna att skilja morän från sand i resistivitetsdata.

I några områden, bland annat vid Skeppsås och Rimstad, finns jordlager med en resistivitet på cirka 100 Ohmm med relativt stor mäktighet direkt på sandsten med samma resistivitet (fig. 52B). Resistivitetsprofilerna visar ingen eller endast tunn eller lokalt förekommande lerskiffer i detta område (fig. 52B). Båda områdena ligger också högre i terrängen. Brunnsborrningarna är dock inte helt överensstämmande utan pekar på varierande jordlagerföljder med mäktiga lerlager respektive isälvsmaterial inom korta avstånd. Inga skillnader ses i resistivitetsfördelningen mellan morän och isälvsmaterial. Området är svårtolkat och det krävs mer detaljerade undersökningar, exempelvis tTEM för att kunna göra säkrare bedömningar av jordlagrens utbredning i området.



**Figur 52.** Profiler inom *område 4, Motala-Fornåsa,* som visar resistivitetsfördelning, tolkning av gräns mellan jord, samt lagerföljder från borrningar. **A.** Profil vid Fålehagen, notera att det är resultat från tTEM-undersökningen och att legenden för denna figur är annorlunda. **B.** Profil i NNV–SSO riktning. Profilernas läge visas i figur 51. Terrängytan är draperad med färgkodning från jordartskartan, för teckenförklaring se figur 14.

### Hydrogeologi i jordlagren

Det finns fem tidigare utpekade grundvattenförekomster i jordlagren inom området *Motala-Fornåsa* samt en i berggrunden (fig. 53). Grundvatten i berggrunden presenteras i ett separat avsnitt. Baserat på tolkning av resistivitetsdata har vi pekat ut områden i anslutning till grundvattenförekomsterna som kan vara av intresse för vidare hydrogeologiska undersökningar.

Grundvattenförekomsten Motala-Galgbacken (WA14501368, fig. 53) inryms i en sand- och grusavlagring som till stora delar ligger under bebyggelse, endast de södra delarna av befintlig förekomst är relativt oexploaterad. Tidigare översiktlig bedömning (Aneblom m.fl. 1997) anger mycket goda till utmärkta uttagsmöjligheter (5–25 l/s) för de bästa delarna av grundvattenmagasinet. Resistiviteten på jordlagren ligger runt 100 Ohmm. Resistivitetsdata tyder på att isälvsmaterialet fortsätter både söderut och mot sydväst (fig. 53). Det kan även finnas en akvifer i området söder om motorbanan. Ett stort antal brunnar finns inom förekomsten som indikerar



**Figur 53.** Grundvattenförekomster i jord, utpekade områden som diskuteras ur hydrogeologisk synvinkel, samt lokalisering av profiler som diskuteras i texten. Jordartskartan som bakgrund, för teckenförklaring se figur 14.

sand och grus med mäktighet på 20–50 m (fig. 51). Grundvattenförekomsten har eventuellt en större utbredning, framförallt mot området vid S. Freberga. Den brunnsborrning som SGU utförde vid Vinnerstad (fig. 53) gav enligt borrarna "en del vatten" i intervallet 7–14 m som enligt borrkaxet består av mellansand och sandig morän (bilaga 1). Vid besök i september 2020 låg grundvattennivån på 13,60 m under marknivå. Uttagsmöjligheterna bedöms dock som goda även om stora delar av jordlagren kan vara omättade. Vid höjdområdet Fålehagen där det gjordes tTEM-undersökningar är jorddjupet något mindre, jorddjupet ökar dock söderut vid S. Freberga, förbi avfallsanläggningen och golfbanan. Det är inte osannolikt att de till ytan osammanhängande isälvsavlagringarna har en större utbredning på djupet och kontakt med Motala-Galgbacken. Sett till topografi och bergöveryta är det även troligt att det sker ett visst grundvattenflöde mot syd–sydväst. Möjlig grundvattendelare finns vid Galgbacken (fig. 53).

Grundvattenförekomsten Motala-Mörtviken (WA74879796, fig. 53) ligger i utkanten av undersökningsområdet i en isälvs- och svallsandsavlagring och resistivitetsdata saknas härifrån. Enligt tidigare översiktliga bedömningar av grundvattenmagasinet (Aneblom m.fl. 1997) är uttagsmöjligheten 5–25 l/s i de bästa delarna av grundvattenmagasinet. Grundvattenförekomsten kan ha kontakt med både grundvattenförekomsten norr om Motala ström (WA87456290) och ovan beskrivna Motala-Galgbacken (WA14501368, fig. 53). Brunnar i området visar på cirka 20 m mäktiga jordlager. Lagerföljderna visar på såväl sand och grus som lera och morän. Uppgifter från utförda grusfilterbrunnar i förekomsten visar på utmärkta uttagsmöjligheter med bedömda kapaciteter på 45 000 l/timme. Grundvattenförekomsten som helhet är inte stor men dess strandnära läge och möjliga kontakt med andra grundvattenförekomster ökar potentialen.

Grundvattenmagasinet Byckorp-Östervarv (WA72107553, fig. 53) ligger i en relativt bred avlagring bestående av isälvsmaterial i åsform och svallad sand och grus (fig. 14). Tidigare översiktlig bedömning (Aneblom m.fl. 1997) av uttagsmöjligheter från magasinet anges till 5–25 l/s. Resistivitetsdata visar att det finns såväl områden med i huvudsak torra avlagringar och områden med mer vattenmättade sediment. Det är svårt på enbart resistivitetsdata att avskilja den laterala utbredningen gentemot moränen (fig. 54A). Det är dock troligt att förekomsten sträcker sig något längre österut och mot sydost än tidigare känt (fig. 53). Sedan tidigare finns en bedömd grundvattendelare mot grundvattenförekomsten Landstorp-Födekulla som vidtar söderut. Inga tydliga höga berglägen syns i resistivitetsdata, dock är sand och grusavlagringarna tunna här. Om det sker något flöde mellan grundvattenförekomsterna så sker det troligen från norr mot söder. Väster om Byckorp-Östervarv finns det isälvsmaterial i dagen vid Grepstad (fig. 54A). Dock visar resistivitetsdata på att stora delar av omkringliggande svallsandsområde är lågresistivt och troligen har en större andel lera i jordlagerföljden. Området med isälvsmaterial kan dock utgöra ett grundvattenmagasin, resistivitetsdata pekar mot 30 m mäktiga jordlager varav 15 m torde vara mättade (fig. 54A). Det är osäkert om det finns kontakt mot grundvattenförekomsten Byckorp-Östervarv.

Grundvattenförekomsten Fornåsa (WA42045184, fig. 53) som är belägen i en isälvs- och svallavlagring öster om Österstad och Fornåsa. Tidigare översiktlig bedömning (Aneblom m.fl. 1997) pekar på mycket goda till utmärkta uttagsmöjligheter (5–25 l/s) i de bästa delarna av grundvattenmagasinet. Isälvsavlagringarna är relativt tunna (5 m) i söder, blir mäktigare centralt vid (25 m), och tunnar sedan ut något norrut (fig. 54B). I de mäktigaste delarna finns flera grustäkter och mycket av sanden är bortbrutet. Brunnarna i området visar på framförallt sand och grus med mäktigheter kring 20 med i de centrala delarna. Resistiviteten i jordlagren ligger generellt sett mellan 100 och 300 Ohmm inom förekomsten (fig. 54B). Generellt visar de sydöstra delarna något högre resistivitet vilket kan tolkas som en mäktigare omättad zon. En rörlig topografiskt betingad grundvattendelare föreslås, baserat på resistivitetsdata, vid midjan vid Mårtorp (fig. 53). Grundvattenförekomsten avgränsas västerut av områden med

lägre resistivitet. Precis öster om grundvattenförekomsten Fornåsa finns en brunnsborrning som SGU utförde vid Mårtorp vilken diskuteras i avsnittet *Område 5: Borensberg-Ljungsbro*.

Grundvattenförekomsten Landstorp-Födekulla (WA89138464, fig. 53) ligger söder om förekomsten Byckorp-Östervarv, i en avlagring bestående av isälvsmaterial samt svallad sand och grus. Enligt tidigare översiktlig bedömning (Aneblom m.fl. 1997) är uttagsmöjligheterna mycket goda till utmärkta (5–25 l/s) i de bästa delarna av grundvattenmagasinet. Enligt brunnsuppgifter är sand- och grusavlagringarna upp till 30 m mäktiga. Resistiviteten är relativt hög i ytan och lägre i området med svallsand. Vid området med lera vid Svinorp finns möjligen en grundvattendelare. Såväl topografin som jordlagren sluttar söderut och grundvattnet har troligen en huvudsaklig sydlig komponent. Brunnarna i förekomsten visar relativt ofta på cirka 10 m mäktiga jordlager ofta bestående av grus. Liknande förhållanden som finns i avlagringarna vid Landstorp-Födekulla verkar finnas i isälvmaterialet västerut mot Götala (fig. 54C) som idag inte är en utpekad grundvattenförekomst. Möjligen är dessa båda isälvsavlagringar i kontakt under leran (fig. 54C). Den västra delen av Götala är i vissa delar 10–20 m mäktig och vi föreslår att denna del inkorporeras i grundvattenförekomsten Landstorp-Födekulla. Möjligen är även förekomsten något bredare västerut vid Sjöhagen (fig. 53).



**Figur 54.** Profiler inom *område 4, Motala-Fornåsa,* som visar resistivitetsfördelning, tolkning av gräns mellan jord och berg samt lagerföljder från borrningar. **A.** Profil i Ö–V riktning centralt genom hela delområdet. **B.** Profil i N–S riktning vid Fornåsa. **C.** Profil i V–Ö riktning från Götala. Profilernas läge visas i figur 53. Terrängytan är draperad med färgkodning från jordartskartan, för teckenförklaring se figur 14. För resistivitetsteckenförklaring, se figur 20.

# Område 5: Borensberg-Ljungsbro

Området ligger mellan Borensberg, Ljungsbro och Fornåsa med Svartån i söder och Göta kanal/Norrbysjön i norr (fig. 55). Likt flera av de andra områdena är det jordbruksmark som är den dominerade markanvändningen men det finns en del större skogsområden mellan Klockrike, Fornåsa och sjön Boren samt mindre mossmarker i form av Vålberga mosse och Berga mosse. Området är småkulligt med moränhöjder och några större åsformade isälvs-avlagringar vid Klockrike, Maspelösa och söder därom, samt ett flackt område vid Svartån i söder. Ett antal mindre vattendrag avvattnas söderut mot Svartån som sedan rinner österut. De västra delarna ligger högre och topografin lutar något åt ost–sydost. Som komplement till resistivitetsdata utförde SGU en borrning i jord och berg vid Mårtorp samt ytterligare fyra jord- och bergsonderingar i området mellan Fornåsa och Klockrike (fig. 55). Inom projektet gjordes det även 4,5 km tTEM-undersökningar vid Mårtorp (fig. 55). Tidigare utförda undersökningar (av SGU) med seismik och markradar i de södra delarna av området har också använts till stöd för tolkning. ATEM-data har tagits bort i områden med större elledningar och vägar, bland annat längs vägarna 1015, 1050 och 1025 (fig. 4, Brolin m.fl. 2020). I direkt anslutning till samhällena Borensberg och Ljungsbro gjordes inga flygningar.



Figur 55. Undersökningsdelområdet Borensberg-Ljungsbro. Lokalisering av profiler som diskuteras i texten samt borrning (BH3), skruvborrningar och sonderingar (SB5, SB6, SB7, SB8), seismik- och tTEM-profiler som utförts av SGU.

#### Berggrund

Berggrunden består av den kambro-siluriska sedimentära lagerföljden. Mäktigheten på den sedimentära lagerföljden är som störst i de nordvästra delarna mellan Borensberg och Klockrike där den nästan når cirka 120 m och minskar mot sydsydost (fig. 56A). Längst i söder är stora delar av den sedimentära lagerföljden borta och endast den kambriska sandstenen finns kvar med en mäktighet på 10–20 m, möjligen försvinner den helt vid områdets södra avgränsning. I ett område mellan St. Berga och Flistad finns det enligt berggrundskartan ett område där urberget sticker upp genom det sedimentära täcket (fig. 9). Här har dock en sammantagen tolkning av resistivitetsdata och befintliga borrhålsuppgifter resulterat i bedömningen att här troligtvis finns ett heltäckande men relativt tunt lager av sandsten på urberget (fig. 23). Överst i den sedimentära lagerföljden ligger kalksten med en resistivitet på 150 till över 1 000 Ohmm. Den underliggande alunskiffern har resistivitet på 15–50 Ohmm. Sandstenen med en resistivitet på mellan 80 och 200 Ohmm ligger på urberget med en resistivitet på 300 till över 1 000 Ohmm.

Det finns ett stort antal förkastningar i delområdet, kraftigast är den stora förkastningen i norr (se cirka 1 000 m i fig. 56A) där den sedimentära berggrunden gränsar mot urberget, men även andra förkastningar med förändringar på upp till 50 m i de olika bergarternas läge. (fig. 25, 56B). De förkastningar med störst skillnad ligger mellan Klockrike och Flistad i sydostlig riktning samt från Klockrike och sydväst mot Älvestad (se vid 7 900 m respektive 2 500 m i fig. 56C). I området mellan dessa förkastningar och söderut ligger urberget mycket ytligt och här finns endast en tunn sekvens med 10–20 m mäktig skiffer och sandsten bevarad (fig. 24). Resistivitetsdata kan visa att urbergets överyta varierar men det kan ändå vara svårt att bedöma om det finns ett tunt sandstenslager ovanpå eller om det endast är jordlager och urberg.

Vid Mårtorp utfördes en borrning (fig. 55) ämnad att träffa en av de många förkastningarna som finns inom undersökningsområdet. Totaldjupet på borrningen blev 61 m och övergång mellan jord och berg återfanns vid 22–23 m (bilaga 1). Borrkaxet visar på en komplex och heterogen uppbyggnad. De översta 17 m består av rödbrun kalksten följt av cirka 8 m ljusgrå kalksten. Därunder indikerar provtagningen på fortsatt kalkrik berggrund medan den geofysiska loggningen (bilaga 2) visar på en väsentlig höjning av lerinnehållet jämfört med ovanliggande kalkstenar. Vår tolkning är att det kan röra sig om den under- till mellanordoviciska lagerföljden och att borrningen stannat nära den nivå där alunskiffern finns. Borrningen är utförd i närheten av en förkastning och det kan vara detta som skapat den svårtolkade lagerföljden.

Strax sydväst om borrhålet Mårtorp utfördes även tTEM-mätningar (fig. 55, bilaga 3). Vid en jämförelse med ATEM-data ser man mycket små skillnader mellan de båda metodernas resistivitetsdata (fig. 56D). Båda metoderna visar på en enhetlig uppbyggnad av och lagergränser i berggrunden. Kalkstenens överyta är skarp mot jordlagren och har lagts ungefär där resistiviteten når 200 Ohmm vilket tolkas som kalksten. Även med den högre upplösningen som tTEM-data ger visar det sig svårt att urskilja alunskiffern från kalkstenen. Lerskiffern utgör ett homogent cirka 25 m mäktigt lager med under 50 Ohmm i resistivitet. Under lerskiffern blir resistiviteten högre igen och sandstenen har en resistivitet på mellan 100 och 200 Ohmm. Sandstenens överyta är det sista som går att upplösa på djupet med tTEM i området.

Den definitiva övergången från sandsten till urberg är i vissa fall svårtolkad med en gradvis ökning i resistivitet, detta blir särskilt påtagligt där det rör sig om förhållandevis tunna sandstenslager (fig. 56C). I områden söder om Svartån, kring Älvestad och mellan St. Berga och Flistad har stor vikt i tolkningsarbetet lagts på befintliga uppgifter från bruksarkiv samt i viss mån tidigare utförda och tolkade seismiska profiler snarare än resistivitetsvärden från ATEM-undersökningen eftersom urberget ligger så ytligt (fig. 22, 23).



**Figur 56.** Profiler inom *område 5, Borensberg-Ljungsbro,* som visar resistivitetsfördelning, tolkning av gräns mellan jord och berg samt olika berglager och lagerföljder från borrningar. **A.** Profil i NV–SO riktning mellan Borensberg och Kränge. **B.** Profil i V–Ö riktning mellan Mårtorp och Ljungsbro. **C.** Profil i V–Ö riktning mellan St. Berga och Roxen. **D.** Profil i S–N riktning vid Mårtorp (resistivitetsdata från tTEM). Profilernas läge visas i figur 55. Terrängytan är draperad med färgkodning från jordartskartan, för teckenförklaring se figur 14. För resistivitetsteckenförklaring, se figur 20.
### Jordarter

De ytliga jordlagren domineras av morän. Områden med sand och grus är knutna till de tre större isälvsavlagringarna vid Fornåsa, Klockrike och väster om Ljungsbro medan lera och silt dominerar i den södra delen (fig. 14). Områden med silt och lera har ofta en mäktighet på 5–15 m (fig. 57, 58A) och vanligen låg resistivitet (mellan 15 och 30 Ohmm, sällan upp mot 60 Ohmm), Områden med morän respektive sand och grus är relativt enkla att urskilja från områden med lera då dessa har en högre resistivitet än leran (bilaga 4, Meter under markytan: 0 m). Dock är det svårt att skilja morän från sand och grus då resistivitetsintervallen är ungefär samma (tabell 2). Resistivitetsdata från isälvsavlagringarna vid Fornåsa, Klockrike och Ljungsbro ligger inom intervallet 80–350 Ohmm (fig. 58). Data är ibland bortplockade på grund av att vägar går uppe på åsarna vilket försämrar helhetsbilden. Generellt är den mäktiga avlagringen Fornåsa något mer högresistiv vilket tyder på en mäktigare omättad zon. Resistiviteten ligger ofta inom samma intervall en bit ut från de karterade isälvsavlagringarna och det är inte omöjligt att vissa delar fortsätter ut under andra jordarter. Flera höjder som är karterade som moränhöjder (till exempel vid Gammelkulla, fig. 57) har samma resistivitetsfördelning som de karterade isälvsavlagringarna.

Vid isälvsavlagringen nära Mårtorp utfördes även tTEM-mätningar (fig. 57, bilaga 3). Vid en jämförelse med ATEM-data ser man mycket små skillnader mellan de olika resistivitetsdata. Båda metoderna visar på en enhetlig uppbyggnad av jordlagren och en tydlig gräns mot bergets



Figur 57. Figur över jorddjupet inom *Borensberg-Ljungsbro*. Lokalisering av profiler samt borrning (BH3), sonderingar (SB5, SB6, SB7, SB8), och tTEM-profiler som utförts av SGU.

överyta. Jordlagren har en resistivitet mellan 90 och 210 Ohmm och består med största sannolikhet av sand och grus. Tolkningsmässigt stämmer det överens med relativt vattenmättad sand och grus. Jordlagren är cirka 10 m mäktiga i det norra tTEM-området och runt 15 m i den södra delen. En borrning mellan områdena visar på 20 m mäktiga sandlager.

Vid Mårtorp utfördes en borrning med ett jorddjup på cirka 23 m (fig. 57). Provtaget borrkax visar sediment som karakteriseras som morän från ytan till berggrunden (bilaga 1). Borrhålet undersöktes även med borrhålsgeofysik där jordlagren undersöktes med så kallad gamma-logg (bilaga 2). Här finns en relativt tydlig gräns vid 7 m djup, under detta parti sjunker gammavärdena vilket tolkas som att lerhalten minskar i moränen (bilaga 3).

Sett till hela området i stort återfinns de största jorddjupen i de västliga delarna av området, söder om Borensberg och väster om Klockrike (fig. 57). Här finns sammanhängande områden med jorddjup på mellan 20 och 40 m att jämföra med de centrala och östra delarna där jorddjupet ligger kring 10 m om man bortser från de mindre men åsformade isälvsavlagringarna som finns i riktning mot Ljungsbro. Jorddjupen som tolkats utifrån resistivitetsdata stämmer generellt sett väl överens med de jorddjupsuppgifter som finns från brunnsborrningar. Delområdet är ett av de områden där den nya jorddjupsmodellen skiljer sig som minst från den gamla (fig. 21B).

Ett stort sammanhängande skogsområde med mäktiga jordlager finns vid Krysshem nära SB8. I stora delar är jordlagren här mäktigare än 20 m och upp mot 50 m (fig. 57). Resistiviteten är generellt hög i hela området, ofta över 200 Ohmm vilket tyder på att området med största sannolikhet består av morän.

Söder om Svartån ligger Västerlösa ås där SGU tidigare gjort ett antal seismiska profiler (fig. 4). Profilerna visar på 5 till som mest 15 m mäktiga sand- och grusavlagringar med cirka 5 m mättad zon med underlagrande morän vilket överensstämmer med resistivitetsdata som från markytan visar relativt hög – sedan lägre – och därefter högre resistivitet innan berget tar vid.



**Figur 58.** Profiler inom *område 5, Borensberg-Ljungsbro,* som visar resistivitetsfördelning, tolkning av gräns mellan jord och berg samt lagerföljder från borrningar. **A.** Profil i V–Ö riktning i de södra delarna av delområdet. **B.** Profil i V–Ö riktning genom isälvsavlagringarna vid Fornåsa, Klockrike och Ljungsbro. Profilernas läge visas i figur 57. Terrängytan är draperad med färgkodning från jordartskartan, för teckenförklaring se figur 14. För resistivitetsteckenförklaring, se figur 20.

### Hydrogeologi i jordlagren

Inom området ligger fyra grundvattenförekomster i jordlager och fem grundvattenförekomster i den sedimentära berggrunden (fig. 59). Grundvatten i berggrunden presenteras i ett separat avsnitt (*Hydrogeologisk beskrivning av berggrunden*). Området består till stora delar av morän och lera. Områden med goda förutsättningar för större grundvattenuttag är knutna till områden med sand och grus samt större jorddjup.

Grundvattenmagasinet Klockrike (WA30907921, fig. 59) inryms i en isälvsavlagring. Förekomsten sträcker sig i nord–sydlig riktning mellan St. Berga i söder och Klockrike kyrka i norr (fig. 59). Enligt tidigare översiktlig bedömning (Aneblom m.fl. 1997) finns det mycket goda till utmärkta uttagsmöjligheter (5–25 l/s) i grundvattenmagasinet. Den nuvarande avgränsningen motsvarar i princip den del där isälvsavlagringen går i dagen, dock gör uppdateringen av jordartskartan att avgränsningen kan förbättras. Baserat på resistivitetsskillnader har magasinet avgränsats ytterligare något, förekomsten har utökats något då sand- och grusavlagringarna i vissa områden tolkas fortsätta ut under jordlager av lera och morän, bland annat i de centrala områdena där de mäktiga jordlagren fortsätter något väster om isälvsmaterialets utbredning. Mycket resistivitetsdata har rensats bort på grund av vägen som går centralt över förekomsten vilket gör det svårt att karakterisera avlagringen som helhet. De flesta brunnarna inom förekomsten visar på 15–25 m mäktiga jordlager med mestadels sand eller grus, ibland hela vägen ned till berg och ibland under lera och ytterligare brunnar visar på morän. Det är troligt att komplexa lagerföljder finns inom förekomsten som kan begränsa eller avgöra hur bra magasinet är lokalt. De södra delarna av förekomsten vid St. Berga är mestadels torra och



**Figur 59.** Grundvattenförekomster i jord, utpekade områden som diskuteras ur hydrogeologisk synvinkel, samt lokalisering av profiler som diskuteras i texten. Jordartskartan som bakgrund, för teckenförklaring se figur 14.

har troligen lägst uttagsmöjlighet. De centrala delarna med större jorddjup torde vara bäst uttagsmässigt.

I de västra delarna av området ligger en isälvsavlagring som innehåller ett grundvattenmagasin Fornåsa-jord (WA42045184, fig. 59). Enligt tidigare översiktlig bedömning (Aneblom m.fl. 1997) finns det mycket goda till utmärkta uttagsmöjligheter (5–251/s) i grundvattenmagasinet. En rörlig topografiskt betingad grundvattendelare föreslås, baserat på resistivitetsdata, vid midjan strax norr om tTEM-området vid Mårtorp (fig. 59, 60). Generellt har sand- och grusavlagringarna en något lägre resistivitet i den södra delen vilket pekar mot att det kan vara något mer vattenmättat än den nordliga delen (fig. 60). Strax öster om förekomsten utfördes en borrning (BH3) vid Mårtorp (fig. 59). Lagerföljden bestod till nästan enbart av morän (bilaga 1) men brunnsborrarna har noterat vatten i intervallet 7–15 m djup vilket stämmer överens med att jordlagren enligt data från borrhålsgeofysiken i BH3 blir mindre leriga i detta intervall (bilaga 2). Borrningen visar att det kan finnas vattenförande sediment under de överliggande leriga jordlagren, framförallt i anslutning till isälvsavlagringar och i områden med mäktiga jordlager.

Grundvattenförekomsten Ljungsbro (WA53522700, fig. 59) ligger i östra delen av undersökningsområdet strax väster om Ljungsbro och Vreta Kloster (fig. 59) Grundvattenmagasinet återfinns i en sand- och grusförekomst. Enligt tidigare bedömning (Müllern & Pousette 1980) finns det mycket goda till utmärkta uttagsmöjligheter (5–25 l/s) i de bästa delarna av grundvattenmagasinet. Nuvarande avgränsning följer i princip isälvsmaterialets utbredning i ytan. Den nya jordartskartan möjliggör en ny avgränsning av grundvattenmagasinet. Avlagringarnas mäktighet är vanligen mellan 10 och 20 m och då ska man betänka att avlagringarna delvis utgör en åsform som reser sig över kringliggande landskap (fig. 57). Tyvärr finns det mycket störningar, framförallt från väg 34 på åsen, vilket gör att i princip all ATEM-data rensats bort. Dock kan man med hjälp av den resistivitetsdata tolka det som att isälvsmaterialet och därmed grundvattenförekomsten inte sträcker sig så långt norr respektive söderut som tidigare avgränsning (fig. 59). Det är möjligt att det precis väster om förekomsten finns isälvsmaterial och ett möjligt grundvattenmagasin vid Maspelösa.

Grundvattenförekomsten Sjövik (WA53530761, fig. 59) är relativt liten och ligger vid sjön Borens sydöstra strand och sträcker sig delvis in under sjön (fig. 59). Grundvattenmagasinet inryms i en isälvsavlagring. Enligt tidigare översiktlig bedömning (Aneblom m.fl. 1997) finns det mycket goda till utmärkta uttagsmöjligheter (5–25 l/s) i grundvattenmagasinet. Det finns endast en liten mängd resistivitetsdata inom den utpekade förekomsten. Resistiviteten ligger på mellan 100 och 200 Ohmm i jordlagren som har en tolkad mäktighet på 10–20 m (fig. 57). Förekomstens utbredning tolkas vara något större än den del som tidigare varit utpekad, dels finns det troligen en utbredning under Vålberga mosse, dels under de i huvudsak leriga jordarterna söderut (fig. 59). Det är troligt att det sker en grundvattenströmning från de högre liggande södra delarna mot sjön. Det är inte klarlagt om inducering är möjlig via uttag nära Boren.



**Figur 60.** Profil inom *område 5, Borensberg-Ljungsbro,* resistivitetsfördelning, tolkning av gräns mellan jord och berg samt lagerföljder från borrningar. Profil i N–S riktning vid Fornåsa. Profilens läge visas i figur 59. Terrängytan är draperad med färgkodning från jordartskartan, teckenförklaring se figur 14. Resistivitetsteckenförklaring, se figur 20.

# Hydrogeologisk beskrivning av berggrunden

I detta avsnitt beskrivs grundvatten i berggrunden översiktligt med tonvikt på vad som framkommit i denna undersökning baserat på tolkningar av resistivitetsdata och brunnsdata. De grundvattenförekomster som finns i VISS (fig. 61) diskuteras var för sig. En genomgång av såväl uttagmöjligheter som grundvattenkemi kopplat till brunnar från de olika ingående bergarterna gjordes för cirka 40 år sedan av Möller m.fl. (1981). Inom de utpekade förekomsterna finns ett stort antal förkastningar och det är möjligt att dessa styr de hydrogeologiska förutsättningarna mer än själva berggrundens sammansättning. I en sammanställning av data från hela Sverige (Brunnsarkivet, fig. 62) pekar mycket mot att variationer inom en bergart generellt är större än variationer mellan bergartsled vilket talar för att de lokala förhållandena där brunnen sitter troligen är viktigare än i vilket bergartsled den sitter i (Hjerne m.fl. 2020, under bearbetning). Generellt är det betydligt högre K (hydraulisk konduktivitet) i de sedimentära bergarterna på Östgötaslätten än i urberget. Figur 63 visar fördelning av K för brunnar och interpolerade värden inom grundvattenförekomsterna i undersökningsområdet.

I nordvästra hörnet finns ett grundvattenmagasin i Visingsösandstenen (Lemunda, WA47091993, fig. 61). Den är i huvudsak att betrakta som en porakvifer då sandstenen har relativt hög porositet. I området finns få brunnar vilket försvårar slutsatser om områdets hydrauliska egenskaper. Det finns dock inget som tyder på att delområdet skiljer sig nämnvärt från hela området med avseende på fördelningen av K (fig. 63). Området genomskärs av ett antal förkastningar (fig. 25) vilket gör att tolkning av berggrund, och i förlängningen dess hydrogeologiska karaktär är svår. Områden med övervägande låg resistivitet, vid Hals och Övralid, tolkas ha en lerigare lagerföljd än inom de högresistiva delarna där sandstenen troligen är mer sandig (fig. 30). Det finns för lite underlag i Brunnsarkivet inom, och osäkerhet kring utbredning av, de skilda litologiska varianterna för att göra en separat tolkning, men uttagsmöligheterna torde vara bättre i områden med en sandig uppbyggnad jämfört med en lerig.



**Figur 61.** Grundvattenförekomster i berg samt borrningar som diskuteras i detta avsnitt. Bakgrunden visar resistivitetsfördelningen vid bergets överyta (motsvarar medelresistivitet för de översta 2 m i berggrunden). För resistivitetsteckenförklaring, se figur 20.

SGU utförde en borrning vid Övralid (BH1, bilaga 1, fig. 61). Borrningen nådde berggrunden på mellan 22 och 23 m djup (cirka 87 m ö.h.) och avslutades efter cirka 78 m borrning i (cirka 9 m ö.h.). Grundvattennivån i brunnen mäts kontinuerligt med tryckgivare som fjärrloggas till SGUs rikstäckande grundvattennät. Grundvattennivån i borrhålet vid Övralid har mellan första mätningen i början på februari 2020 till denna rapports publicering i oktober 2020 legat mellan -5,40 och -5,90 m under markytan (104,8-104,3 m.ö.h.). Trycknivån för grundvattnet ligger alltså cirka 17 m över bergets överyta i området. Kapacitetsmätning med blåsning efter borrning gav en vattenmängd på cirka 7000 l/timme. I januari 2020 utförde SGU en korttidsprovpumpning av borrhålet vid Övralid. En transient utvärdering av provpumpningen gjordes med en modell av Dougherty-Babu (1984) för slutet magasin i programvaran Aqtesolv 4.5. Utvärderingen visar att K för brunnen är cirka 2·10<sup>-7</sup> m/s vilket får betraktas som relativt lågt i jämförelse med kapacitetsmätningen på 7000 l/timme med tanke på det samband mellan K och kapacitetsmätning som presenterats av Ryd (2017). Caliperloggning som utfördes i Övralid tyder på en handfull sprickzoner de översta 30 m i berggrunden (bilaga 2). Tillgången på grundvatten i Övralid-borrhålet kan delvis bero på god kontakt till överliggande magasin i jordlagren.

Norr om Motala ligger grundvattenförekomsten Evrasteby (WA 10218583, fig. 61) som utgörs av en smal förekomst som motsvarar den sedimentära lagerföljden närmst den stora förkastningen i norr. Denna del är starkt påverkad av förkastningar, och till viss del står lagerföljden brant, vilket gör att såväl grundvattenbildning som uttagsmöjligheter troligen varierar mycket. Bäst uttagsmöjligheter torde finnas i den delen av förekomsten som överlagras av sandavlagringar med grundvattenförekomsten Djurkällaplatån (se *Område 1: Lemunda-Boren*). I den norra delen av undersökningsområdet ligger ytterligare en smal grundvattenförekomst,



**Figur 62.** Karta över undersökningsområdet som visar brunnar med K-värde (teckenförklaring uppe till höger) samt interpolerade K-värden (teckenförklaring nere till höger). Underlagsdata från Brunnsarkivet. De interpolerade värdena är mer representativa i områden med fler än endast ett fåtal brunnar.

Borensberg (WA252600072, fig. 61), som motsvarar den sedimentära lagerföljden vid den stora förkastningen norrut. Inom förekomsten finns endast lite användbar ATEM-data på grund av mycket infrastruktur. Även här är berggrunden starkt påverkad av förkastningar, till viss del står lagerföljden brant, vilket gör att uttagsmöjlighet och grundvattenbildning med största sannolikhet varierar. I Evrasteby och Borensberg finns det förhållandevis få brunnar (26 stycken), men data tyder på att K i området är förhållandevis lågt (median 1·10<sup>-7</sup> m/s) jämfört med övriga grundvattenförekomster i undersökningsområdet (fig. 63). Uttagsmöjlighet na tolkas generellt vara tämligen låga inom de båda förekomsterna.

Den stora grundvattenförekomsten Motala-Klockrike (WA31160323) sträcker sig över nästan hela undersökningsområdet (fig. 61). Förekomsten torde få ett bra tillskott av grundvatten från ovanliggande jordlager som till stora delar utgörs av isälvsavlagringar och sand. Grundvattenförekomsten Motala-Klockrike avgränsas i vattenförvaltningen nästan hela den areal där det finns kalksten som ytlig berggrund eller där denna utgörs av silurisk skiffer. Data från Brunnsarkivet inom förekomsten Motala-Klockrike tillsammans med förekomsten Nässja visar ofta på K mellan  $1\cdot 10^{-7}$  m/s och  $1\cdot 10^{-6}$  m/s med en median på  $4\cdot 10^{-7}$  m/s (fig. 63). Uttagsmöjligheten i brunnar varierar kraftigt, ett stort antal brunnar ger väldigt lite vatten medan flera brunnar uppvisar en hög kapacitet. Inom området Lemunda-Boren, samt i nordligaste delen av område 4 (jämför fig. 23A) överlagras kalkstenen till största delen av silurisk skiffer, vanligen med en mäktighet på 20–30 m med avtagande mäktighet söderut för att försvinna helt några kilometer norr om Motala. Skiffern kan påverka grundvattenbildningen till kalkstensmagasinet negativt, speciellt i områden där den är mäktig (fig. 24). Detta kan antydas genom de generellt något lägre K-värden (fig. 62) som finns i skifferns utbredningsområde (fig. 61). Vid Vinnerstad strax söder om Motala utfördes en borrning i berggrunden (BH2, bilaga 1, fig. 61) som nådde berget vid 15 m djup. Foderrör sattes ned till 21 m och lagerföljden bestod av lerig till ren kalksten. Borrningen lokaliserades för att se om man kunde träffa en förkastning och se om denna gav vatten. Vid borrning var brunnen torr men i september 2020 var grundvattennivån på -13,60 m under markytan (109,35 m ö.h.). BH2 sitter i ett område med generellt låga K-värden (fig. 62). På halvön väster om Vadstena ligger en grundvattenförekomst, Nässja (WA67221777, fig. 61), där lagerföljden och de hydrogeologiska förutsättningarna är lika de som finns i förekomsten Motala-Klockrike. De norra delarna av förekomsten ligger norr om den förkastning som finns i området (se figur 25 och diskussion i avsnittet Område 2: Vadstena-Tåkern). De hydrogeologiska förutsättningarna är troligen annorlunda söder och norr om förkastningen.



**Figur 63.** Median och utvalda percentiler avseende log<sub>10</sub>K i brunnar för grundvattenförekomster i berg. Data från Hjerne m.fl. 2020 (under bearbetning). Notera att vissa grundvattenförekomster slagits ihop i figuren då de har en liknande geologisk uppbyggnad samt resistivitetsmönster och därför diskuteras tillsammans i texten.

I området närmast Omberg är de sedimentära lagerna mäktiga inom grundvattenförekomsten Motala-Klockrike. Här har kalkstenen något lägre resistivitet vilket kan betyda att det kan ha en högre vattenmättnadsgrad här. I de södra delarna av Motala-Klockrike utfördes en borrning vid Mårtorp (BH3, bilaga 1, fig. 61) som nådde berggrunden på cirka 23 m djup (cirka 78 m ö.h.) och avslutades i kalksten efter ca 43m borrning i berg (cirka 39 m ö.h.). Foderöret går ner till 24 m. Grundvattennivån i brunnen mäts kontinuerligt med tryckgivare som fjärrloggas till SGUs rikstäckande grundvattennät. Grundvattennivån har mellan första mätningen i början på februari 2020 till denna rapports publicering i oktober 2020 legat i intervallet -12,10 till -12,40 m under markytan (89,04–88,74 m.ö.h.). Trycknivån i grundvattnet ligger cirka 7 m över bergets överyta. Vid borrning noterades att det var dåligt med vatten i borrhålet. En korttidsprovpumpning av borrhålet vid Mårtorp i början av januari 2020 gav en kraftigt nära linjär avsänkning till det maximala djupet för provpumpningsmetodiken varvid lyftkraft och slang blev begränsande. Utan tillfredsställande avsänkningskurva gick det inte att utvärdera kapacitet. Däremot var det tydligt att tillrinningen till brunnen var begränsad med en lång återhämtningstid till den ursprungliga nivån. Caliperlog från borrhålsloggningen tyder på ett fåtal mindre sprickor de översta 2 m i berggrunden, därefter uppvisar borrhålsväggen inga större förändringar (bilaga 2).

Fornåsa (WA69902234) är en stor grundvattenförekomst i berg som sträcker sig genom de fyra södra delområdena (fig. 61). Avgränsningen i vattenförvaltningen visar ett område där den ytliga berggrunden består av kalksten, alunskiffer eller lerskiffer. K för brunnar i området, tillsammans med förekomsten Bergs slussar, är ofta mellan 5·10<sup>-7</sup> m/s och 2·10<sup>-6</sup> m/s med en median på 1·10<sup>-7</sup> m/s vilket är noterbart högre än K för Motala-Klockrike och Nässja (fig. 63). Grundvattenförekomsten hyser de områden där brunnsdata pekar på de bästa förutsättningarna med lägst K-värde inom Östgötaslätten. Det rör sig om områden precis norr och nordost om Tåkern samt vid Sörgården, och området Rimstad-Skeppsås (fig. 62). Nordost om samhället Fornåsa finns ett område där berggrunden ser något annorlunda ut. Här saknas lerskiffern och den relativt högresistiva del som vanligen är cirka 20 m mäktig är här närmare 40 m (fig. 50B). Tolkningen är att området är starkt kopplat till förkastningar och att det är fråga om en något mäktigare sandsten här. Området bör vara intressant att utreda noggrant ur grundvattensynpunkt. Längst österut i undersökningsområdet finns ytterligare en grundvattenförekomst, Bergs slussar (WA 30190595, fig. 61) som har en liknande bergartsavgränsning och fördelning av K-värden som förekomsten Fornåsa. Högst K och bäst förutsättningar verkar finnas vid Knivinge (fig. 63) som ligger precis söder om grundvattenförekomsten Ljungsbro (jordlager).

Längst i söder finns en stor grundvattenförekomst i berg, Skänninge (WA 48412075), som sträcker sig genom område 3, 4, och 5 (fig. 61). Utbredning av förekomsten motsvarar det område där den kambriska sandstenen utgör ytlig berggrund. Även den lilla grundvattenförekomsten längst i sydost inom område 5, Vreta kloster (WA26282050, fig. 61) har samma berggrund men ligger lite åtskild från förekomsten Skänninge. Dock rör det sig om samma berggrund och densamma finns även mellan de två förekomsterna så det är inte omöjligt att det finns en hydraulisk kontakt mellan dessa. Längst i sydväst mot Omberg (område 2) finns ytterligare en liten grundvattenförekomst, Väversunda (WA24040877, fig. 61), där den kambriska sandstenen utgör den ytligaste berggrunden. Sammanställning av brunnsdata tyder på att K ofta är mellan 1·10<sup>-7</sup> m/s och 2·10<sup>-6</sup> m/s med en median på 6·10<sup>-7</sup> m/s vilket är i paritet med Motala-Klockrike + Nässja men lägre än Fornåsa + Bergs slussar (fig. 63). Generellt är K något lägre i de östra delarna av förekomsten vid Flistad och Kullersbro. Den kambriska sandstenen finns även norrut under hela Östgötaslätten vilket egentligen bör betyda att även grundvattenförekomsten bör utökas norrut. I Möller m.fl. (1981, plansch 1) redovisas ungefärliga grundvattennivåer i sandstensakviferen. Som högst ligger nivån på över 100 m ö.h.

vid Fivelstad, Orlunda och Appuna för att sedan minska mot nordväst till cirka 90 m ö.h. mot Vättern och österut till 35 m ö.h. vid Roxen. Vid en jämförelse med sandstenens överyta (fig. 23E) ser man att det råder övertryck i merparten av sandstensakviferen som bör betraktas som ett slutet magasin.

I område 2 finns även grundvattenförekomsten Granbystrukturen (WA72455127). Dess utbredning begränsas av de sedimentära bergarternas utbredning inom impaktstrukturen som omgärdas av urberg. Inom förekomsten Granbystrukturen finns endast 15 brunnar där K beräknats. K för dessa brunnar skiljer sig inte nämnvärt från merparten av brunnar inom undersökningsområdet (fig. 63). SGU har undersökt och beskrivit en liknande struktur vid Locknesjön i Jämtland (Dahlqvist m.fl. 2018b) som visar på grundvattenmagasin i såväl de breccierade (fragmenterade) och uppspruckna bergarterna på djupet som den mer ytligt liggande karstpåverkade kalkstenen.

På några ställen finns indikationer på möjliga dalgångar i berggrunden. Det rör sig framförallt om de södra delarna där det ser ut som att sandstenen avsattes på ett något undulerande underlag av urberg (se till exempel fig. 36D). Områden med dalformer, till exempel vid Rimstad och Skepsås i delområde 4, kan vara något intressantare då det kan samlas mer grundvatten här. Genom att använda sig av urbergets överyta kan man analysera fram möjliga uthålliga stråk som indikerar på möjliga dalar.

Baserat på resistivitetsdata har vi tagit fram en geologisk 3D-modell (fig. 64) över området som kommer att finnas tillgänglig i SGUs 3D-kartvisare när den är färdigställd. Förutom överoch underytor för de olika berglagren som ger möjlighet att visa utbredning och förekomst i förhållande till markytan (se fig. 22, 23, 24) gör 3D-modellen att man även kan få fram en volym på respektive bergart. Volymen på de olika bergartsleden kan användas till översiktliga beräkningar av till exempel hydrogeologiska parametrar när man känner dessa. Det utförs lämpligast inom ett mindre område inom vilket resistivitetsdata visar att förutsättningarna kan antas vara liknande.



Figur 64. Utsnitt från den geologiska 3D-modellen. Figuren visar modellen sedd från öster inom område 4, och den vertikala skalan är överdriven 5 gånger i förhållande till den horisontella.

# SLUTSATSER OCH DISKUSSION

Att utföra en fullständig och noggrann analys av all den insamlade data från SkyTEM-mätningarna i Östergötland är tidskrävande vilket SGU inte haft möjligheter till i detta skede. Istället visar rapporten på ett antal områdesvisa geologiska tolkningar och beskrivningar för undersökningsområdet som helhet, men även mer detaljerade beskrivningar i områden som kan vara hydrogeologiskt intressanta. En stor mängd resistivitetsdata finns nu tillgänglig vilket kan bidra till ett förbättrat geologiskt och hydrogeologiskt underlag. Intressenter som till exempel konsulter, handläggare på länsstyrelser och kommunala VA-bolag kan nu göra fördjupade analyser av de hydrogeologiska förhållandena inom undersökningsområdet som kan ligga till grund för vattenförsörjningsplanering. Utvärderingar och tolkningar visar även hur man kan förbättra underlaget genom att kalibrera och verifiera tolkningar med till exempel borrning (bilaga 1), geofysiska borrhåls- (bilaga 2) och markundersökningar med tTEM (bilaga 3 & 4).

# ATEM-metodens möjligheter och begränsningar

ATEM är en effektiv metod för att samla in resistivitetsdata över stora områden. Metoden ger information om jord- och berglager med en detaljeringsgrad som få andra luftburna mätmetoder kan uppnå. Vissa geologiska förutsättningar måste dock vara uppfyllda för att metoden ska ge tillförlitliga och användbara resultat. I princip kräver TEM-mätningar att det finns ett lågresistivt lager av en tillräcklig mäktighet för att den inducerade strömmen ska kunna fortplanta sig genom jord och berg, i annat fall blir signalen bara brus och därmed oanvändbar. Generellt utgörs dessa lågresistiva lager av lager av lera, sedimentärt berg eller geologiska enheter med saltvattenpåverkat grundvatten.

Beräkningsmetoden som används för att gå från insamlade data till resistivitetsmodell kallas inversion. Den metod vi har använt bygger på ett antagande att resistiviteten endast varierar med djupet, en så kallad endimensionell inversion (1D-inversion). Det vill säga att man antar att jordlagren och berggrunden utgörs av horisontella lager, vilket oftast stämmer bra överens med geologin inom områden med sedimentär berggrund. Dock bör man vara medveten om att i områden med till exempel förkastningar och snabba litologiska förändringar kan resistivitetsmodellerna visa en resistivitetsfördelning som inte stämmer överens med verkligheten eftersom antagandena om endimensionalitet inte är uppfyllda. I sådana områden är tolkningen av resistivitetsdata mycket svårare. Den inversionsmetod som använts är en "mjuk" metod som ger gradvisa övergångar av resistiviteten mellan olika lager vilket har fördelen att man får ett bra resultat i de flesta geologiska miljöer. Nackdelen med metoden är att det kan vara svårt att identifiera exakta lagergränser. För mer information om den bearbetning och inversion som skett av data i detta projekt se Brolin m.fl. (2020).

Kopplingen mellan resistivitetsvariationer och de olika geologiska enheterna (tabell 2) kräver både kunskap om mätmetoden och databearbetningen men även geologisk och hydrogeologisk kunskap om områdets geologi och bildningsprocesser. Ett problem är att olika jord- och berglagers resistivitetsintervall ofta överlappar varandra, det är alltså sällan man kan göra en direkt översättning från resistivitet till ett geologiskt material. Lagerföljder från borrningar i området är en förutsättning för att göra en korrekt tolkning från resistivitetsmodell till geologisk modell.

Rapporten redovisar en översiktlig tolkning och presentation av geologi och hydrogeologi i jordlagren och i den sedimentära berggrunden. I Brolin m.fl. (2020) beskrivs ATEM-metoden ingående med fokus på bearbetning och inversion av data men även en presentation av kvalitetsparametrar för resistivitetsdata. ATEM-data bör i första hand användas för översiktlig tolkning och avgränsning av områden. För att kunna bedöma uttagsmängder, tillrinnings-

områden och grundvattenbildning på ett tillförlitligt sätt krävs mer noggranna undersökningar som till exempel geofysiska markmätningar, borrningar och provpumpningar.

# Geologisk och hydrogeologisk tolkning

Resistivitetsdata från ATEM-undersökningarna har visat sig utgöra ett bra underlag för att kunna identifiera och avgränsa olika bergartsled inom området vilket är en viktig del för beskrivningen av geologin i området. Framförallt är det den lågresistiva lerskiffern som gör tolkningarna av såväl lagerföljder som förkastningszoner (se fig. 25) tämligen enkel. Gränsen mellan kalksten och alunskiffer är svårare att avgränsa, liksom sandsten och urberg, då resistivitetsintervallen för dessa bergarter överlappar varandra (tabell 2). I området norr om Motala där den ytliga berggrunden består av Visingsösandsten finns stora skillnader i resistivitetsmönster geografiskt sett (fig. 30). Det finns områden med generellt högresistiv sandsten i ytan och områden med lågresistiv troligen mer lerdominerad Visingsösandsten. Resistivitetsmönstret speglar även förekomst av ett flertal förkastningar i den sedimentära berggrunden.

Resistivitetsdata från SkýTEM-undersökningarna har i de flesta områden visat sig utgöra en god bas för kartläggning av jordlagrens mäktighet. Det är speciellt tydligt där jordlagren består av lågresistiva jordarter och högresistiv berggrund. I områden med tunna, i huvudsak torra jordlager som överlagrar urberg har mycket data rensats bort på grund av störningar och här är underlaget inte tillräckligt för att göra pålitliga tolkningar. Stora delar av undersökningsområdet har så pass stor tillförlitlighet i data att där nu finns en jorddjupskarta med betydligt högre kvalitet än tidigare (fig. 21A). Den tidigare jorddjupsmodellen har ändrats avsevärt i relativt stora delar med ökat jorddjup på mer än 15 m och i vissa delar med minskat jorddjup med mer än 15 m (fig. 21B). Det finns tydliga resistivitetsvariationer inom jordlagren som motsvarar olika jordarter och olika vattenmättnadsgrad. Lågresistiva jordlager bestående av leriga sediment samt torv kan enkelt urskiljas mot jordarter med högre resistivitet som sand och grus. Moränen i området är så pass högresistiv att den är svår att skilja från sand- och grusavlagringar. Detta försvårar den hydrogeologiska tolkningen då förutsättningarna för grundvattenuttag är vitt skilda mellan till exempel isälvsavlagringar och en moränhöjd trots att de uppvisar samma resistivitetsmönster.

Data från SkyTEM-undersökningarna har använts för att lokalisera och avgränsa sand- och grusavlagringar som innehåller grundvattenmagasin samt göra översiktliga bedömningar av grundvattendelare och grundvattennivåer. I rapporten beskrivs ett antal områden, till viss del tidigare okända men oftast i anslutning till tidigare utpekade grundvattenförekomster, där det kan finnas bättre förutsättningar för större grundvattenuttag (några av dessa visas i fig. 65). Områdesvis rör det sig bland annat om områden med mäktiga jordlager som består av eller ligger i anslutning till grundvattenförekomsterna Djurkällaplatån (område 1, fig. 33), Getryggen (område 2, fig. 39), Lagmansberga-Ramstad (område 3, fig. 46), Grepstad (område 4, fig. 53), samt Fornåsa (område 5, fig. 59).

Vidare föreslås ett antal befintliga grundvattenförekomster i jordlagren få nya avgränsningar baserat på tolkningar utförda på resistivitetsdata och den nya jordartskartan. Underlaget från ATEM-undersökningarna kommer även att ligga till grund för kartering i lokal skala för dessa grundvattenförekomster och kommer att publiceras i SGUs Serie K som till exempel tidigare gjorts vid Lövingsborg (Gustafsson & Jirner 2016).

I rapporten beskrivs förekomsten av grundvatten i berg i avsnittet *Hydrogeologisk beskrivning av berggrunden* istället för under respektive delområde. Anledningen är att grundvattenförekomsterna i berg är betydligt större och att de i de flesta fall sträcker sig över flera av de fem delområdena (fig. 61). Det beror på att de vattenförvaltningsförekomster i berg som föreligger vid denna rapports publicering i huvudsak baseras på den areal där respektive berggrundsenhet utgör det översta lagret i den sedimentära lagerföljden. Vi föreslår att ett troligen mer rättvisande sätt att avgränsa dessa grundvattenförekomster är att varje geologiskt lager, till exempel den kambriska sandstenen, får utgöra en vattenförvaltningsförekomst inom hela sitt utbredningsområde. Detta är ett synsätt som är vanligt i flera andra europeiska länders vattenförvaltningsarbete. På så sätt kan man bättre karakterisera grundvattnets kemiska sammansättning och förekomstens hydrologiska parametrar. Baserat på bland annat resistivitetsdata föreslår vi nya grundvattenförekomster på Östgötaslätten med respektive bergartsleds utbredning (jämför de olika bergartsleden i figur 23 med förekomsterna i berg i figur 61). De nya avgränsningarna kommer att rapporteras in till Vattenmyndigheterna inför nästa möjlighet att ändra deras utbredning.

En av förhoppningarna med undersökningen var att data skulle kunna användas för att peka ut områden i den sedimentära berggrunden där det kunde finnas bättre förutsättningar för större grundvattenuttag. Det har dock varit svårt att baserat på resistivitetsdata hitta och urskilja dessa områden. I flera fall finns det resistivitetsskillnader inom ett bergartsled, tydligast inom kalkstenen, men vi har inte kunnat urskilja något mönster i bättre respektive sämre grundvattentillgång. De avgränsningar av berglagrens utbredning som utförts kan dock bidra till uppskattning av bergartsledens totala grundvattentillgångar genom volymberäkningar.

En ökad kännedom om akvifererna som beskrivs i avsnittet *Hydrogeologisk beskrivning av berg*grunden möjliggör även en långsiktigt hållbar användning av grundvattenresursen på regional skala. Det är möjligt att man på lokal skala kan använda resistivitetsdata för att prediktera möjligheterna för större grundvattenuttag. Vissa områden med hög resistivitet i kalksten kan till exempel uteslutas som grundvattenmagasin. Baserat på resistivitetsdata har vi pekat ut ett antal zoner med tydliga förkastningar (fig. 25) som kan vara mer vattenförande än kringliggande homogent berg. Även här krävs mer undersökningar på lokal skala för att kunna lokalisera förkastningarna så pass bra att man kan träffa dem med borrningar.

En geologisk 3D-modell har skapats för undersökningsområdet (se till exempel fig. 64). Modellen är en lagermodell och består av åtta lager; jordlager, silurisk skiffer, kalksten, alunskiffer, lerskiffer, kambrisk sandsten, urberg och Visingsösandsten. Lagermodellen kan utgöra en bas när man vill skapa voxelmodeller, till exempel för jordlagren där olika litologier kan avgränsas baserat på olika gränsvärden från resistivitetsmodellerna. Inom undersökningsområdet överlappar dock resistivitetsintervallen för jord- och bergarter varandra (tabell 2) vilket gör det omöjligt att ta fram en heltäckande voxelmodell. Dock kan till exempel konsulter upprätta lokala modeller för mindre områden, framförallt om man har tillgång till exempelvis lagerföljdsdata från nya undersökningar i området.

Vid undermarksplanering av större infrastrukturprojekt och olika typer av borrning är det alltid en klar fördel, såväl säkerhetsmässigt som kostnadsmässigt att kunna förutse vilken berggrund man kan förvänta sig på olika djup. Till exempel kan borrning som penetrerar alunskiffern kräva speciella säkerhetsåtgärder angående borrkaxet och spolvattnet som kan innehålla tungmetaller. Även utformning av geoenergibrunnar kan anläggas med större säkerhet baserat på lagergränserna. 3D-modellen ger även möjlighet för beräkningar av de olika berglagrens volym (tabell 3). Det kan användas till översiktliga beräkningar av mängd grundvatten, (framförallt i kalkstens- och sandstenslagren baserat på undersökningar av porositet och sprickfrekvens), samt gas (framförallt i den kambriska sandstenen).

# Kommunvisa rekommendationer för vidare arbeten med ATEM-data och vattenförsörjning

Avslutningsvis redovisas ett antal kommunvisa rekommendationer för vidare utredningsarbeten avseende vattenförsörjning inom utpekade och intressanta område (fig. 65). I områdena kan utökade undersökningar och lokal tolkning av data leda fram till lokalisering av nya brunnslägen, information om nybildningsområden och kanske även lägen för infiltrationsanläggningar.

# Motala kommun

Djurkällaplatån som tolkats ha en större utbredning, har stor omättad zon och relativt lågt påverkanstryck. Förutsättningar finns för större grundvattenuttag inom förekomsten. Förekomsten Fornåsa är stor och har relativt mäktiga jordlager, möjlighet för större uttag finns och bör utredas. I berggrunden är det något bättre i de södra delarna av kommunen.

### Linköpings kommun

Förutom förekomsten Ljungsbro som tolkas ha en annan avgränsning har även ett område vid Maspelösa pekats ut som intressant. Vid Knivinge och söderut är förutsättningarna för större uttag ur bergborrade brunnar troligen som bäst.

### Mjölby kommun

De bästa förutsättningarna i jordlagren är knutna till grundvattenförekomsten Lövingsborg, framförallt i de södra delarna men kanske även i området mellan Lagmansberg och Ramstad. I berggrunden finns områden som uppvisar något bättre förutsättningar precis norr om Skänninge samt vid Skeppsås och Rimstad.

### Vadstena kommun

Grundvattenförekomsten Getryggen, vid Nässja har sand- och grusavlagringarna med en stor mäktighet under Vätterns nivå vilket troligen medger möjligheter för inducerade grundvattenuttag. I berggrunden kan det finnas bättre förutsättningar norr och nordost om Tåkern vid Källstad och Hov. Även området kring Granbystrukturen borde utredas. Mäktiga jordlager och ett troligen uppsprucket och påverkat urberg kan skapa goda förutsättningar här.



**Figur 65.** Områden som diskuteras i texten för kommunvisa rekommendationer för vidare arbeten med vattenförsörjning. Lila polygon = undersökningsområdet.

# REFERENSER

Agrell, H., 1976: The highest coastline in south-eastern Sweden. Boreas 5. 143-154.

- Ahrenstedt, V., 2018: The Neoproterozoic Visingsö Group of southern Sweden: Lithology, sequence stratigraphy and provenance of the Middle Formation. *Dissertations in Geology at Lund University*, No. 551, 46 s.
- Aneblom, T., Pousette, J., Müllern, C-F. & Enqvist, P., 1997: Beskrivning till kartan över grundvattnet i Östergötlands län. *Sveriges geologiska undersökning Ah 14,* 67 s.
- Andersson, A., Dahlman, B., Gee, D.G. & Snäll, S., 1985: The Scandinavian alum shales. *Sveriges geologiska undersökning Ca 56*, 50 s.
- Bergström, S.M. & Bergström, J., 1996: The Ordovician–Silurian boundary successions in Östergötland and Västergötland, S. Sweden. *GFF 118*, 25–42.
- Bergström. S.M., Calner, M., Lehnert, O. & Noor, A., 2011: A new upper Middle Ordovician– Lower Silurian drillcore standard succession from Borenshult in Östergötland, southern Sweden: 1. Stratigraphical review with regional comparisons. *GFF 133*, 149–171.
- Blomberg, A., 1905: Beskrivning till kartbladet Vadstena. Sveriges geologiska undersökning Aa 130, 49 s.
- Bruun, Å., Nilsson, C-A., Sundberg, A., WIK, N-G. & Wikström A., 1995: Malmer, industriella mineral och bergarter i Östergötlands län. *Rapporter och Meddelanden 80*. Sveriges geologiska undersökning, 340 s.
- Brolin, C., Leroux, V. & Dahlqvist, P., 2020: Bearbetning av helikopterburen TEM-data i delar av Östergötland och Västergötland. SGU-rapport 2020:23. Sveriges geologiska undersökning, 60s.
- Calner, M., Lehnert, O. & Nõlvak, J., 2010: Palaeokarst evidence for widespread regression and subaerial exposure in the middle Katian (Upper Ordovician) of Baltoscandia: significance for global climate. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 296*, 235–247.
- Christiansen A.V., Auken E. & Sørensen K., 2009: The transient electromagnetic method. I Kirsch R. (eds) Groundwater Geophysics. Springer, Berlin, Heidelberg
- Claesson, D., Antal, I. & Sukotjo, S., 2013: Beskrivning till berggrundskartan delar av Mjölby, Linköping, och Norrköpings kommuner. *Sveriges geologiska undersökning K 438*, 20 s.
- Daniels, J. & Thunholm, B., 2014: Rikstäckande jorddjupsmodell. SGU-rapport 2014:14. Sveriges geologiska undersökning, 14 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., 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, 135 s.
- Dahlqvist, P., Bastani, M., Persson, L., Triumf, C-A., Erlström, M., Gustafsson, M, Jörgensen, F., Gulbrandsen, M., & Malmberg Persson, K., 2018a: SkyTEM-undersökningar på Öland. Rapporter och Meddelanden 145. Sveriges geologiska undersökning, 100 s.
- Dahlqvist, P., Thorsbrink, M. & Sturkell, E., 2018b: Grundvattenmagasinet Lockne. Sveriges geologiska undersökning K 612, 17 s.

- Dahlqvist, P., Brolin, C., Hellstrand, E., Erlström, M., Gustafsson, M., Malmberg Persson, K., Engdahl, M., Lång, L-O., Andersson, J., 2019: SkyTEM-undersökningar i Halland. Rapporter och Meddelanden 147. Sveriges geologiska undersökning, 124 s.
- Dahlqvist, P., Henriksson, O., Pile, O., Lång, L\_O., Lindh, Å., Gustafsson, M., Leroux, V. & Andersson, J., 2020: Helikopterburna TEM-mätningar vid Vätterns nordvästra strand Geologiska tolkningar och hydrogeologisk tillämpning. *SGU-rapport 2020:24*. Sveriges geologiska undersökning, 71 s.
- Daniels, J. & Thunholm, B., 2014: Rikstäckande jorddjupsmodell. SGU-rapport 2014:14. Sveriges geologiska undersökning, 14 s.
- Dougherty, D.E & Babu, D.K., 1984: Flow to a partially penetrating well in a double-porosity reservoir, *Water Resources Research, vol. 20, no. 8,* 1116–1122.
- Ebbestad, J.O.R., Wickström, L.M. & Högström, A.E.S., 2007: WOGOGOB 2007. Field guide and abstracts. Rapporter och Meddelanden 128. Sveriges geologiska undersökning, 128 s.
- Egenhoff, S., Cassle, C., Maletz, J., Frisk, ÅM., Ebbestad, JOR. & Stübner, K., 2010: Sedimentology and sequence stratigraphy of a pronounced Early Ordovician sea level fall on Baltica
   The Bjørkåsholmen Formation in Norway and Sweden. *Sedimentary Geology 234:1–14.*
- Erlström, M., 2014: Skiffergas och biogen gas i alunskiffern i Sverige, förekomst och geologiska förutsättningar en översikt. *SGU-rapport 2014:19*. Sveriges geologiska undersökning, 28 s.
- Fromm, E., 1976: Beskrivning till jordartskartan Hjo NO. Sveriges geologiska undersökning Ae 19, 77 s.
- Grahn, Y., Nolvak, J. & Paris, F., 1996: Precise chitinozoan dating of Ordovician impact events in Baltoscandia. Geology. *Journal of Micropalaeontology 15*, 21–35, doi:10.1144/jm.15.1.21
- Gorbatschev, R., Froom, E. & Kjellström, G., 1976: Beskrivning till berggrundskartan Linköping NO. Sveriges geologiska undersökning Af 107, 111 s.
- Gustafsson, M. & Jirner, E., 2016: Grundvattenmagasinet Skänninge. Sveriges geologiska undersökning K 567, 9 s.
- Gustafsson, M. & Jirner, E., 2017: Grundvattenmagasinet Högby. *Sveriges geologiska undersökning K 577*, 9 s
- Hadding, A., 1958: The Pre-Quartenary sedimentary rocks of Sweden. Publications from the institutes of mineralogy, paleontology and quartenary geology, *University of Lund, No 50*.
- Henkel, H., Ekneligoda, T.C. & Aaro, S., 2011: The extent of impact induced fracturing from gravity modeling of the Granby and Tvären simple craters. *Tectonophysics* 485, 290–305.
- Hessland, I. & Armands, G., 1978: Östergötland, i Alunskiffer, underlagsmaterial geologi. *Utredning från statens industriverk 1978:3*, 62–75.
- Jirner, E. & Gustafsson, M., 2015: Grundvattenmagasinet Normlösa. Sveriges geologiska undersökning K 524, 7 s.
- Johansson, H. G., 1975: Beskrivning till jordartskartan Linköping NO. Sveriges geologiska undersökning Ae 22, 56 s.
- Johansson, H. G., 1976: Beskrivning till jordartskartan Linköping NV. Sveriges geologiska undersökning Ae 24, 102 s.
- Johansson, H. G., 1979: Beskrivning till jordartskartan Linköping SV. Sveriges geologiska undersökning Ae 36, 74 s.
- Jönsson, J., 1887: Beskrifning till kartbladet Motala. Sveriges geologiska undersökning Aa 102, 43 s.
- Linnarsson, G. & Tullberg S.A., 1882: Beskrifning till kartbladet Vreta kloster. *Sveriges geologiska* undersökning Aa 83, 45 s.

Länsstyrelsen, 2013: Regional vattenförsörjningsplan för Östergötland. 2013:19, 94 s.

- Länsstyrelsen Östergötland, 2020: Fördjupad vattenförsörjningsplan, Östergötlands län. 2020:18, 79 s.
- Lantmäteriet, 2019: Produktbeskrivning: GSD-Höjddata, grid 2+. 10 s.
- Müllern, C-F. & Pousette, J., 1980: Beskrivning till hydrogeologiska kartan Linköping NO. Sveriges geologiska undersökning Ag 9, 96 s.
- Möller, Å., Engqvist, P. & Andersson, J.-E., 1981: Hydrogeologiska förhållanden inom Östergötlands sedimentära berggrund. *Sveriges geologiska undersökning Ag 10,* 104 s.
- Nielsen, A.T. & Schovsbo, N.H., 2006: Cambrian to basal Ordovician lithostratigraphy in southern Scandinavia. *Bulletin of the Geological Society of Denmark, 53*, 47–92.
- Nielsen, A.T. & Schovsbo, N.H., 2011: The Lower Cambrian of Scandinavia: Depositional environment, sequence stratigraphy and palaeogeography. *Earth Science Reviews 107*, 207–310.
- Nielsen, A.T. & Schovsbo, N.H., 2015: The regressive Early-Mid Cambrian "Hawke bay Event" in Baltoscandia: Epeirogenic uplift in concert with eustasy. *Earth Science Reviews* 107, 288–350.
- Magnusson, N.H., Munthe, H. & Rosén, S., 1922: Beskrivning till kartbladet Mjölby. Sveriges geologiska undersökning Aa 150, 144 s.
- Persson, L., Bruun, Å. & Vidal, G., 1985: Beskrivning till berggrundskartan Hjo SO. Sveriges geologiska undersökning Af 134, 143 s.
- Påsse, T. & Andersson, L., 2005: Shore-level displacement in Fennoscandia calculated from empirical data. *GFF 127*, 250–268.
- Rosén, S., 1916: Zur Fragee des Vorhandenseins von dem Oboluskonglomerat entsprechenden Bildungen in Östergötland. *Bulletin Geologiska Institutionen Uppsala universitet 15*, 213–218.
- Stephens, M.B., Ripa, M., Lundström, I., Persson, L., Bergman, T., Ahl, M., Wahlgren C-H., Persson P-O. & Wickström L., 2009: Synthesis of the bedrock geology in the Bergslagen region, Fennoscandian Shield, south-central Sweden. *Sveriges geologiska undersökning Ba 58*, 259 s.
- Stouge, S., 2004: Ordovician siliciclastics and carbonates of Öland, Sweden. *Erlanger geologische Abhandlungen Sonderband 5:91–111.*
- Svantesson, S.-I., 1981: Beskrivning till jordartskartan Hjo SO. Sveriges geologiska undersökning Ae 44, 101 s.
- Svantesson, F., 2013: Alunskiffern i Östergötland utbredning, mäktigheter, stratigrafi och egenskaper. *Examensarbeten i geologi vid Lunds universitet, nr 372,* 15 s.
- Sørensen, K.I. & Auken, E., 2004: SkyTEM a new high-resolution helicopter transient electromagnetic system. *Exploration Geophysics*, 35(3), 194–202.
- Thorslund, P., 1951: Grundvattnet på Östgötaslätten. Grundförbättring 4, 123–133.
- Thorslund, P., 1962: The Cambro–Silurian. In N.H. Magnusson, P. Thorslund, F. Brotzen, B. Asklund, & O. Kulling: Description to accompany the map of pre-Quaternary rocks of Sweden. Sveriges geologiska undersökning Ba 16, 69–110.
- Westergård, A.H., 1922: Sveriges Olenidskiffer. Sveriges geologiska undersökning Ca 18, 241 s.
- Westergård, A.H., 1928: Om Östergötlands kambrium. Geologiska Föreningens i Stockholm Förhandlingar 50, 193–206.
- Westergård, A.H., 1940: Nya djupborrningar genom äldsta ordovicium och kambrium i Östergötland och Närke. *Sveriges geologiska undersökning C 437*, 72 s.

- Westergård, A.H., 1944: Borrningar genom alunskifferlagret på Öland och i Östergötland 1943. *Sveriges geologiska undersökning C 463*, 22 s.
- Wikman, H., Bruun, Å. & Dahlman, B., 1980: Beskrivning till berggrundskartan Linköping NV. Sveriges geologiska undersökning Af 119, 105 s.
- Wikman, H., Bruun, Å., Dahlman, B. & Vidal, G., 1982: Beskrivning till berggrundskartan Hjo NO. Sveriges geologiska undersökning Af 120, 112 s.

# BILAGA 1. LAGERFÖLJDER FRÅN UTFÖRDA BORRNINGAR

#### BH1

Id: Övralid	
N= 6495839, E= 496233	
0 – 1 m	Svallsand/morän
1 – 2 m	Siltig morän
2 – 3 m	Lerig morän
3 – 5 m	Grusig sand
5 – 6 m	Lera/Finsand
6 – 7 m	Finsand/Grus
8 – 9 m	Grusig sand
9 – 10 m	Sand m lite grus
10 – 12 m	Finsand m lite grus
12 – 15 m	Finsand
15 – 16 m	Grusig sand
16 – 17 m	Sandigt grus
17 – 18 m	Fingrus (lerigt)
18 – 19 m	Grusig finsand
19 – 20 m	Grus/fingrus
20 – 21 m	Grovsand/fingrus
21 – 23 m	Grusig sand

#### BH2

Id: Vinnerstad	
N= 64877064, E= 5	504051
0 – 4 m	Grovsilt
4 – 6 m	Finsand
6 – 7 m	Grovsilt
7 – 9 m	Mellansand
9 – 12 m	Sandig morän
12 – 13 m	Finsand
13 – 15 m	Grovsilt

#### BH3

Id: Mårtorp	
N= 6484432, E= 515707	
0 – 6 m	Lerig morän
6 – 7 m	Grus
7 – 15 m	Lerig morän
15 – 16 m	Sand m sten
16 – 23 m	Lerig morän

### SB1

ld: BMW196530	
N= 6470185, E= 488106	
0 – 0,5 m	Matjord
0,5 – 1 m	Lera
1 – 3,7 m	Moränlera
3,7 – 4 m	Morän
4 – 6,5 m	Moränlera
Öppet avslut	

#### SB2

Databas-id: BMW196531 N= 6470993, E= 488883 0 – 1 m Mull 1 – 3 m Moränlera Öppet avslut

#### SB3

Databas-id: BMW196532									
N= 6470798, E= 493884									
0 – 2 m	moränlera								
2 – 4 m	morän								
Öppet avslut									

#### SB4

 Databas-id: BMW196533

 N= 6470924, E = 499182

 0 - 6 m moränlera

 6 - 10 m Lera

 10 - 16 m moränlera

 Öppet avslut
 Katalana

#### SB5

#### SB6

#### SB7

Databas-id: BMW196536 N= 6481388, E= 518317 0 - 4 m Lerig morän Avslut mot block eller berg

#### SB8

Databas-id: BMW196537 N= 6487245, E = 516996 0-0,7 m Grusig svallsand 0,7-1 m Sandig morän 1-6 m Morän Avslut mot block eller berg

#### SB9

 $Databas-id: BMW196538 \\ N= 6480388, E= 510404 \\ 0-0,5 m Fyllning \\ 0,5-1 m Lerig morän \\ 1-5,3 m Sandig morän \\ 5,3-5,7 m sand \\ Avslut mot block eller berg$ 

#### SB10

#### SB11

Databas-id: BMW196540	)
N= 6489927, E= 507144	
0 – 1 m	Grusig grovsand
1 – 2 m	Sandig morän
2 – 3,8 m	morän
Avslut mot block eller b	berg

#### SB12

Databas-id: BMW196541 N= 6493344, E= 499705 0 – 1 m SIlt 1 – 2 m Lerig silt Finsandig grovsilt 2 – 2,5 m 2,5 – 4 m Grovsiltig finsand Mellansandig finsand 4 – 6 m Siltig finsand 6 – 7 m 7 – 8 m Finsandig mellansand 8 – 8,5 m Finsandig silt 8,5 – 10 m Lerig silt 10 – 13 m Finsandig silt 13 – 15,8 m Sand Avslut mot block eller berg

SGU Sveriges geologiska undersökning M.Erlström/2020.07.02							vinnerstad 7:62														
Teckenförklaring, dominerande bergart         Jordlager, morän          Kalksten, röd-rödbrun       Sandsten Grå, rödbrun						Koordinater (Sweref 99):504051E/64877064 N Hammarborrning. Foderrör till 21 m. Totaldjup: 51 m															
	Kalksten, grå Siltsten,lerskiff rödbrun-grågrö	ēr, òn		Lerig kalksten, lersten (förkastning?) kalksten, lersten? Kristallint urberg (granitiskt)			0	Temperatur 0 Celcius 14			Spontaneous potential 100 mv 250			Short resistivity 100 Ohmm 10000							
Stratigrafi	ໂຍ ຍ ດກ່ໄດ	Kaxprov	Berggrund borrkax o	sbeskrivning, tolkning baserat på och borrhålsloggning	0	Naturlig gamma 0 cps 100		100	1	Caliper 100 mm 150		Single point re 0 Ohm		esistance ı 3500		Long resistivity 10 Ohmm 10		stivity n 10000			
Kvartär			Jordlager (0-15 sandiga och gru grusig morän) M mellan 5 och 10 (15-19 m) Grå-g	m), domineras av gulbruna isiga jordarter (sandig- lycket sandigt intervall m n																	
			(19-24 m) Mörk (24-29 m) Ljusg (29-39 m) Rödb	grå-rödbrun lerig kalksten rå kalksten (finkornigt kax) run-mörkbrun kalksten																	
		- <u>v</u>	(39-43 m) Grå k (43-51 m) Rödb	alksten run- mörkgrå kalksten													+				

# **BILAGA 2. GEOFYSISK BORRHÅLSLOGGNING**

#### SGU ÖVRALID 1:1 Sveriges geologiska undersökning M.Erlström/2020.06.10 Koordinater (Sweref 99):496233E/6495839N Teckenförklaring, dominerande bergart Hammarborrning. Foderrör till 30 m. Totaldjup: 101 m Jordlager, morän Röd-brun siltig lersten Temperatur Spontaneous potential Short resistivity Grå-mörkgrå lerig siltsten Celcius 100 250 10 Ohmm 10000 0 14 mv Kristallint urberg (granitiskt) Naturlig gamma Caliper Single point resistance Long resistivity ĥ Berggrundsbeskrivning, tolkning Djup m r Kaxprov 0 cps 350 100 mm 150 0 Ohm 3000 10 Ohmm 10000 Bergart baserat på Stratigrafi borrkax och borrhålsloggning 0. a water and Kvartär -10 0-23 m: Kvartära jordlager, sand, lera -20 v -30 3 v v v -40 v Sand Con z 23-89 m: Heterogen lagerserie med lerig siltsten och röd finsandig och siltig lersten, enstaka karbonatnivåer, omväxlande röda, bruna, grå, mörkgrå och svartgrå lager, varierande härdhet. Relativt hög ξ Ż v Server and the server -50 Visingsöformationen sen prekambrium v GR-nivå generellt indikerar högt inslag av lermineral och/eller fältspat. 200 v 2 Intervallet bedöms tillhöra Z v Visingsöformationen v ş -60 v ¥ v -70 v v v -80 ¥ K v 5 v prekambrium — ¥ -90 z 89-101 m: Kristallint urberg, röd fältspat, granitiska urbergsfargemnt, biotit, hornblände, kvarts ¥ v $\checkmark$ -100



# **BILAGA 3. REDOVISNING AV tTEM-RESULTAT**

Bilaga 3 består av appendix II från den datarapport över tTEM mätningar som utfördes, av Hydro Geophysics Group från Aarhus Universitet, i Östergötland. Rapporten är tillgänglig i sin helhet via SGU, referera till Rapport: tTEM Mapping Motala, Sweden, diarienummer 423-1539/2019.



# **APPENDIX II: CROSS SECTIONS**

Selected cross sections for the smooth inversion are included. Each section holds the model bars blanked at the DOI- standard value. Sections for all the mapping lines are available in the delivered Workspace.









BILAGA 4. MEDELRESISTIVITET FÖR VALDA DJUPINTERVALL



































