Helikopterburna TEM-mätningar vid Vätterns nordvästra strand

- Geologiska tolkningar och hydrogeologisk tillämpning

Peter Dahlqvist, Oskar Henriksson, Otto Pile, Lars-Ove Lång, Åsa Lindh, Mattias Gustafsson, Virginie Leroux & Jenny Andersson

juni 2020

SGU-rapport 2020:24





Omslagsbild: Foto från undersökningsområdet ut över Munkeberg och Vättern. Fotograf: Peter Dahlqvist.

Författare: Peter Dahlqvist, Oskar Henriksson, Otto Pile, Lars-Ove Lång, Åsa Lindh, Mattias Gustafsson, Virginie Leroux & Jenny Andersson

Granskad av: Jakob Levén 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	8
Mål och syfte	9
Genomförda undersökningar och metoder	10
SkyTEM	10
Brunnsarkiv och borrningar	12
Geofysiska borrhåls- och markmätningar	15
Geologisk beskrivning	16
Berggrund	16
Jordarter	18
Hydrogeologiska förhållanden och vattenförsörjning	21
Resultat och områdesspecifika tolkningar	23
Bergöveryta och jorddjupsmodell	26
Områdesvisa geologiska tolkningar	28
Hjo-Karlsborg	28
Björkhult-Munkeberg	30
Mosshult-Spånhult	32
Mullsjön	34
Utvalda områden med hydrogeologisk tolkning	36
Karlsborg-S. Fågelås	38
Kråks	40
Kleven	41
Fagersanna	42
Älgarås	43
Stora Röå	44
Mullsjön	45
Källebo-Åsen	47
Slutsatser och diskussion	48
ATEM-metodens möjligheter och begränsningar	48
Geologisk och hydrogeologisk tolkning	49
Referenser	51
Bilaga 1. Lagerföljder från utförda borrningar	53
Bilaga 2. Resultat från geofysisk borrhålsloggning	55
Bilaga 3. Redovisning av tTEM-resultat	57
Bilaga 4. Seismikprofiler och tolkning	70

SAMMANFATTNING

I juni 2018 undersökte Sveriges geologiska undersökning (SGU) ett område mellan Hjo och Karlsborg, längs Vätterns nordvästra strand, med helikopterburen transient elektromagnetisk mätning (ATEM – Airborne Transient ElectroMagnetic). Undersökningarna syftar primärt till att få fram ett bättre hydrogeologiskt underlag för planering av enskild och kommunal vattenförsörjning. Undersökningarna ger information om lagerföljden i jordlager och berggrund, och möjliggör tolkningar av mäktighet och utbredning av grundvattenförande jord-och bergarter. De helikopterburna TEM-mätningarna utfördes med mätsystemet SkyTEM av företaget med samma namn. Flygningarna utfördes längs parallella flyglinjer med cirka 200 m mellanrum med mätinstrumentet på 30–50 m över marken. Totalt undersöktes ett område på cirka 170 km² i Karlsborg, Tibro och Hjos kommun.

Undersökningsområdet ligger i huvudsak under högsta kustlinjen och har en komplex deglaciationshistoria inkluderande stora händelser med stor inverkan på kvartärgeologin. Generellt är jordlagren mer än 20 m mäktiga. Berggrunden består av granit som i öster överlagras av sedimentär berggrund i form av Visingsösandsten. Större grundvattentillgångar förekommer i sand- och grusavlagringar i öppna och slutna akviferer samt i porakviferer i sandstenen.

Undersökningsmetoden ger en modell av markens elektriska ledningsförmåga uttryckt som resistivitet. Olika geologiska material har skilda resistivitetsvärden beroende på mineralsammansättning, porositet och vattenmättnadsgrad. Det betyder att det går att särskilja vissa geologiska enheter från andra och tolka mätresultaten till geologisk information, något som görs med hjälp av lagerföljdsinformation från bland annat borrningar. I denna rapport beskrivs bearbetning och analys av mätresultat endast översiktligt medan tyngdpunkten ligger på att visa på geologisk och hydrogeologisk tolkning av resistivitetsdata. SGU beskriver i Brolin m.fl. (2020) mer ingående om metoden samt hur data bearbetats och analyserats. Resultaten visar att ATEM-metodiken lämpar sig väl för en karaktärisering av vissa jord- och berglager i undersökningsområdet. Lägre kvalitet på data och överensstämmelse med faktisk geologi uppstod i områden med tunna och torra jordlager bestående av morän och grus på urberg.

Inom undersökningsområdet utfördes borrning och sondering efter en första tolkning av insamlade resistivitetsdata. Borrningarna visade på komplexa jordlagerföljder, ofta mäktiga sand- och grusavlagringar men även morän. Brunnar nedförda i den sedimentära berggrunden visar att Visingsösandstenen är relativt homogen i sin uppbyggnad och till största delen består av ren sand. Grundvattnets trycknivå är i stora delar av sandstenen artesiskt (trycknivån ligger över markytan) och storleken på magasinet gör att den kan vara av vikt för vattenförsörjning.

För att komplettera den resistivitetsdata som initialt samlats in med helikopter genomfördes geofysiska mätningar i fält. Det gjordes dels ytterligare elektromagnetisk mätning med fyrhjuling (tTEM - towed Transient ElectroMagnetic) inom ett område norr om Mullsjön och dels geofysisk borrhålsloggning i två av borrhålen som borrades inom projektet.

I området vid Mullsjön finns en tidigare dåligt känd geologisk bildning i jordlagren som kan utgöra en akvifer av en storlek som gör den intressant för kommunal dricksvattenförsörjning. Utförda borrningar i området visar på relativt stor utbredning och mäktighet av sand och grus samt relativt god vattenföring. Dock krävs utförligare undersökningar för att klarlägga de hydrogeologiska förhållandena i detalj. Intressanta grundvattenmagasin har även pekats ut längs Vätterns strand där relativt mäktiga sand- och grusavlagringar ligger delvis under morän till exempel vid Stora Röå och Kleven. Både akviferen vid Mullsjön och längs Vätterns strand samverkar troligen med akviferen i Visingsösandstenen vilket kan öka uttagskapaciteten ytterligare och gör dem till potentiella områden för framtida vattenförsörjning.

ABSTRACT

During June 2018 the Geological Survey of Sweden (SGU) made helicopter-borne transient electromagnetic measurements (ATEM – Airborne Transient Electromagnetic) in order to investigate an area between Hjo and Karlsborg, along the north-western shore of Lake Vättern. The primary purpose of the survey was to obtain improved hydrogeological interpretations of the area in order to facilitate water supply management. The data acquired provides information regarding soil and underlying bedrock, which can be used to interpret the extent of groundwater and aquifers within the area.

The survey area lies mostly below the highest coastline and have a complex deglaciation history. The bedrock consists of granite which, to the east is overlaid by sandstone. Relatively thick soil layers cover the bedrock. Large groundwater resources – both confined and unconfined aquifers – can be found within the sand and gravel as well as within the sandstone.

The helicopter survey was made using the SkyTEM-system and operated by the company with the same name. The measurements were carried out along parallel flight-lines with approximately 200-meter intervals at a height of 30–50 m above the ground. An area of 170 km² was surveyed within Karlsborg, Tibro and Hjo municipalities.

The method provides a model of the ability of soil and bedrock to conduct electricity. Geological materials show different resistivity values depending on mineral composition, porosity and water saturation. It is therefore possible to distinguish different geological units from each other and interpret the values as geological information, with support from layer sequences from drillings. This report presents the processing and analysis of the data, but focus lies on geological and hydrogeological interpretation of resistivity data. The method and data processing are more conclusive described in Brolin et.al. (2020). The results show that the ATEM-method is suitable for characterization of certain types of soil and bedrock within the survey area. Lower data quality and correlation with actual geology was found within areas with thin and dry soil consisting of glacial deposits and till on crystalline bedrock.

Following the initial interpretation of the resistivity data, drilling and borehole logging was carried out at carefully chosen sites within the investigation area. Drillings showed complex sequences of glacial deposits often with thicker dimictic deposits than previously known, as well as layers of sorted sand and gravel with considerable thickness. Boreholes drilled in the sandstone show a relatively homogenous sandstone consisting almost solely of sand. Groundwater within the sandstone had pressure-levels above ground surface and the aquifer seems to be a confined aquifer. The sandstone (Visingsösandstone) is a large aquifer which could have an importance as a future water supply.

To supplement the resistivity data initially collected by helicopter, geophysical measurements were carried out from the ground. An additional quad-wheel electromagnetic measurement (tTEM - towed Transient ElectroMagnetic) was carried out in an area north of Mullsjön and geophysical borehole logging in two boreholes.

At Lake Mullsjön to the west of Hjo, SGU found a previously poorly known geological unit consisting of sand and gravel with a potential aquifer large enough to be of interest as a municipal water supply. Drillings within the Mullsjö area indicate relatively extensive and thick layers with a good water discharge. However, further investigations are needed in order to investigate the hydrogeological conditions in more detail. Additional interesting aquifers are found along Lake Vättern in thick sand and gravel deposits beneath a thin sheet of till, e.g. Stora Röå and Kleven. Both the sandy aquifer at Mullsjön and along the shore of Lake Vättern is in contact with the aquifer in the Visingsösandstone, which may increase the total withdrawal capacity in the area and the potential as future drinking water resources.

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 mätinstrument förs ner i ett borrhål och registrerar borrhålsväggens och grundvattnets fysikaliska egenskaper vid olika djup.
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.
K-värde	Ett värde på markens vattengenomsläpplighet, den så kallade hydrauliska konduktiviteten.
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 här 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

De senaste åren har det varit låga grundvattennivåer vilket skapat problem för såväl kommunal som enskild vattenförsörjning på flera ställen i Sverige. Sveriges geologiska undersökning (SGU) fick ett regeringsuppdrag 2018 där det står att vi bland annat ska utöka kartläggningen och karakteriseringen av grundvattenresurser i särskilt utsatta områden. Det kan vara områden där behoven är stora men även där tillgången är liten. Huvudsyftet med våra undersökningar är att kartläggningen ska bidra till ett förbättrat planeringsunderlag som underlättar och förbättrar kommunal och regional vattenförsörjningsplanering.

SGU gjorde bedömningen att det i området mellan Hjo och Karlsborg kan finnas områden med förutsättningar för större grundvattenuttag i såväl de mäktiga jordlagren som den underliggande sedimentära berggrunden, och att detta kan undersökas med hjälp av helikopterburen transient elektromagnetisk mätning (ATEM). SGU-undersökningar på Gotland, Öland och i Halland har gett goda erfarenheter med denna teknik och visar att mätningarna ger detaljerad information om geologiska förhållanden i jordlagren och berggrunden som kan kopplas till hydrogeologiska förutsättningar och bedömning av förekomst av grundvattenmagasin (Dahlqvist m.fl. 2015, 2017, 2018, 2019).

Metoden har en hög kostnad men är ändå kostnadseffektiv då extremt mycket information samlas in över stora områden på kort tid. Den tredimensionalitet man får med metoden utgör ett mycket bra tolkningsunderlag vad gäller både geologi och hydrogeologi. Förutom de helikopterburna undersökningarna har undersökningen omfattat tre undersökningsborrhål, tretton skruvborrningar och sonderingar, geofysiska borrhålsundersökningar i två borrhål, data från fem seismiska profiler samt i ett litet område markbundna TEM-undersökningar med hjälp av fyrhjuling.

Under juni 2018 utfördes mätningar av det danska företaget SkyTEM inom ett område mellan Hjo och Karlsborg (fig. 1). Resultatet från mätningarna blir resistivitetsmodeller med cirka 30 m avstånd längs helikopterns flyglinjer. Resistivitetsvariationer beror framförallt på skillnader i porositet, andel lermineral, och vattenmättnadsgrad hos det geologiska materialet. Samtolkning med geologiska konceptuella modeller och annan data (främst lagerföljder från borrhålsinformation) gör att resistiviteten kan översättas till geologi och därefter går det att göra tolkningar kring områdets geologi och dess hydrogeologiska förutsättningar.

Rapporten vänder sig främst till de som arbetar med grundvattenfrågor inom eller i anslutning till undersökningsområdena; exempelvis berörda kommuner och länsstyrelser men även användare av data, såsom konsulter. Resultaten kan även användas av till exempel större lantbruk och dricksvattensamfälligheter.

Denna rapport utgör inte en fullständig redovisning av all data utan redogör kortfattat för hur data har samlats in samt tolkats i området som helhet. Därefter kommer en något mer detaljerad geologisk beskrivning av ett antal delområden som går att urskilja på grund av olika resistivitetsmönster. Detta följs av en beskrivning av hydrogeologiskt intressanta områden som kan avgränsas samt beskrivas på ett bättre och noggrannare sätt med hjälp av data från undersökningen.

Mer information än vad som presenteras i rapporten finns att hämta ur insamlade resistivitetsdata från undersökningsområdet. SGUs målsättning är att det ska komma samhället till nytta genom externa intressenter som universitet och högskolor samt genom vidare användning inom myndigheten i form av 3D-modeller samt utveckling av karteringsmetodik för jordlager, berggrund och grundvatten.

Undersökningsområde

ATEM-undersökningen utfördes inom ett område i Hjo, Tibro och Karlsborgs kommun (fig. 1). Undersökningsområdet är cirka 170 km² och karakteriseras av ett i huvudsak skogbeklätt höjdområde i väster som blir något flackare mot Vätterns strand. De lägre liggande områdena domineras av jordbruksmark. Höjden består av urberg, i form av granit, med hällar och för området som helhet, relativt tunna jordlager mestadels i form av morän och sandavlagringar. Topografiskt sluttar höjden både mot väster men framförallt mot öster och Vättern. I området närmast Vättern överlagras urberget av sedimentär berggrund, bestående av Visingsösandstenen, som i sin tur överlagras av mäktiga jordlager i form av svallsand, morän samt lera och torv. Väster om Hjo ligger Mullsjön där det trots sitt västliga läge finns sedimentär berggrund och mäktiga jordlager vilket gör området mer likt de östra delarna.

Vättern som breder ut sig öster om området utgör ett tydligt inslag i landskapet (fig. 1). Övriga större sjöar inom området är Mullsjön och Örlen. Ett flertal vattendrag men även källflöden har sin begynnelse i höjdområdet. Ytvattenavrinningen sker i huvudsak mot Vättern, men några mindre bäckar går västerut.

Huvudsakliga grundvattenmagasin finns i de mäktiga sand- och grusavlagringar som ibland ligger ytligt och ibland överlagras av morän, samt i Visingsösandstenen som kan ha en mäktighet på mer än 150 m i området. Vattenförsörjningen i området sker i huvudsak genom



ytvattentäkter där Vättern utgör den största och viktigaste. Grundvattentäkter i drift finns vid Fagersanna och vid Mölltorp. Det har även funnits vattentäkter som tagit vatten från Visingsösandstenen men de är numera nedlagda.

MÅL OCH SYFTE

Syftet med undersökningarna vid Vätterns nordvästra strand var att öka den geologiska kunskapen och förbättra det geologiska underlaget. Fokus i rapporten har varit att identifiera områden där det kan finnas goda förutsättningar för större grundvattenuttag. Målsättningen med undersökningen var att den skulle ge:

- kunskap om jordlagrens uppbyggnad i tre dimensioner
- en ny förbättrad modell för bergöverytans läge (ger en förbättrad jorddjupsmodell)
- underlag för att skapa geologiska och hydrogeologiska 3D-modeller.

Den övergripande målsättningen är att den insamlade informationen och de nya insikterna ska kunna användas som geologiskt och hydrogeologiskt bedömningsunderlag av Hjo, Tibro och Karlsborgs kommuner, Länsstyrelsen Västra Götaland, Vattenmyndigheten i Södra Östersjön, konsulter och mark- och miljödomstolen i samband med ärenden som berör ett flertal grundvattenrelaterade frågor (fig. 2) såsom:

- planering av kommunal dricksvattenförsörjning och vattenskyddsområden
- planering och tillsyn av brunnar för enskild vattenförsörjning, geoenergi och avlopp
- vattenförvaltningsarbete och vattenförsörjningsplaner.



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

SGU har även ett långsiktigt syfte att utvärdera hur ATEM-metodiken kan användas för att öka kunskapen om jordlagrens och berggrundens uppbyggnad samt grundvattnets förekomst i fler områden i Sverige. I första hand gäller det områden med sedimentär berggrund, men mätningar i detta projekt ska också användas för att utvärdera möjligheten i urbergsområden. I dagsläget koncentreras SGUs insatser till områden som på grund av bland annat klimatförändringar och stora behov har problem med tillgång på grundvatten för dricksvattenförsörjningen.

GENOMFÖRDA UNDERSÖKNINGAR OCH METODER

SkyTEM

SkyTEM är namnet på det helikopterburna mätsystem som använts och är utvecklat i Danmark vid Århus universitet. ATEM står för Airborne Transient Electromagnetic och är den allmänna termen för metoden att undersöka markens resistivitetsfördelning på djupet genom mätning från ett luftburet system. TEM är en induktionsmetod, vilken innebär att en elektrisk ström uppstår (induceras) genom en variation i ett magnetfält. SkyTEMs mätteknik är anpassad för hydrogeologisk kartering med avseende på upplösning och djupkänning. Genom att den är luftburen är det en effektiv metod för att samla in data i stora områden.

En spole, bestående av en kabelslinga, monteras i en ram som hängs under helikoptern (fig. 3). En ström skickas ut i kabelslingan och slås sedan av momentant vilket ger upphov till ett magnetfält. Responsen på detta magnetfält ger upphov till ett inducerat elektriskt och magnetiskt fält i jord- och berglager. Förändringen i detta magnetiska fältet mäts i en mottagarspole som också sitter på ramen (fig. 3). För en mer komplett beskrivning av själva metodiken kopplad till SkyTEM-systemet se Sørensen & Auken (2004) eller Christiansen m.fl. (2009). Resultaten från mätningarna presenteras oftast som elektrisk resistivitet och anges i enheten ohm-meter (Ohmm).



Långt efter strömavslag

Figur 3. Grundprincipen för mätsystemet och strömutbredning i marken. Dimensionen för ramen är cirka 30 × 15 m.

Variationerna i den elektriska resistiviteten i jordlagren och berggrunden beror på skillnader i porositet mellan olika geologiska material samt deras innehåll av lera och vatten. Genom att koppla resistiviteten till geologisk data, till exempel information från lagerföljder, översätter och tolkar vi inversionsresultaten till geologi. En utförlig beskrivning av bearbetningen samt tolkningen av data från Västergötland finns i Brolin m.fl. (2020).

Under mätningarna i Västergötland flög helikoptern, så att ramen med mätsystemet befann sig 30 till 40 m över markytan, i en hastighet av 80 till 110 km/timme. Undersökningen utfördes längs parallella linjer med cirka 200 m avstånd, vilket möjliggör en tredimensionalitet i presentation av resistivitetsdata. Anpassningar under flygningen sker både i position och i höjdled för att undvika störningar i mätningarna och av säkerhetsskäl. Avvikande flygriktning och höjd sker vid tät bebyggelse, skog, kraftledningar, järnvägar och annan infrastruktur samt över områden med tamdjur som kan bli skrämda av en lågt flygande helikopter.

Utförda flyglinjer inom undersökningsområdet redovisas i figur 4A. Totalt flögs 804 linjekilometer under sammanlagt två dagar i juni 2018. Resistivitetsdata från helikoptermätningen består av mätningar med cirka 30 m mellanrum längs flyglinjerna. Totalt har vi analyserat 15633 resistivitetsmodeller vilket utgör cirka 70 % av rådata (fig. 4B). För att data ska kunna användas för geologisk tolkning behöver responsen vi mäter med SkyTEM vara tillräcklig kraftig och inte vara för påverkad av infrastruktur såsom elledningar m.m. Över områden där kristallin berggrund ligger ytligt är resistiviteten för hög och den uppmätta responsen



Figur 4. A. Karta över undersökningsområdet med flyglinjer längs vilka det har samlats in ATEM-data. Även lokalisering av geofysiska borrhåls- och markmätningar illustreras. **B.** Figuren visar på hur mycket data som är av god kvalitet (röd), av lägre kvalitet samt vid en jämförelse med flyglinjerna i A hur mycket data som rensats bort.

för svag och brusig för att kunna användas. Nära infrastruktur kan störningar uppstå som gör att de geofysiska modellerna inte kan anpassas till data. För att möjliggöra en tillförlitlig detaljerad tolkning är det viktigt att identifiera och ta bort data som i hög grad påverkas av annat än geologi.

De ytligaste lagerna i resistivitetsmodellen är 4 m mäktiga och ökar successivt (logaritmiskt) med djupet. Detta innebär att upplösningen som bäst är den samma, vilket innebär att tunnare lager än så inte går att identifiera i data. De modellerna vi beräknar visar mjukare övergångar än verkligheten och resistivitetskontraster är oftast underskattade.

Brunnsarkiv och borrningar

Brunnsarkiv och lagerföljdsdata

Information om jord- och berglagerföljder har hämtats från olika databaser förvaltade av SGU. Majoriteten av lagerföljdsinformationen kommer från Brunnsarkivet som består av borrprotokoll från borrningar, mestadels för enskild vattenförsörjning och energibrunnar. Dessa data är öppna och fritt tillgängliga på SGUs webbplats (www.sgu.se). Inom undersökningsområdet har uppgifter från 407 brunnar (Brunnsarkivet) och sammanlagt 109 sonderingar från SGUs jord- och grundvattenkartering ingått som underlag för våra tolkningar (fig. 5).



Brunnsarkivet (407)

- SGU-borrningar 2019 (3)
- SGU jordlagerföljder 2019 (13)
- Parameterdatabasen
- (Grundvattenkartering) (35) Jordlagerföljder (Jordartskartering) (74)

Figur 5. Borrningar från SGUs databaser samt lägena för de sonderingar och borrningar som utförts i SGUs regi under projektets gång inom undersökningsområdet.

Den geografiska noggrannheten för brunns- och lagerföljdsuppgifter varierar och kan ha en osäkerhet på mer än 200 m gällande positionen. Data från Brunnsarkivet har gett uppgifter om jorddjup, lagerföljder i jord och berg, samt i vissa fall uppskattning av uttagskapacitet och grundvattennivåer. Kvaliteten på underlaget gällande lagerföljder varierar beroende på syftet med borrningen. Borrningar från SGUs jordartskartering har i regel pålitlig information metervis, medan det vid en borrning för en energibrunn till en fastighet ibland endast anges var övergången mellan jord och berg finns. I arbetet med att ta fram en enhetlig lagerföljdsbedömning har en förenkling och sammanslagning gjorts av de hundratals olika lagerföljdsdata som finns i databaserna. Kapacitetsuppskattningar och grundvattennivåer från brunnsdata är osäkra då de ofta är gjorda i direkt anslutning till genomförd borrning.

Utförda borrningar och sonderingar

SGU har utfört totalt 13 skruvborrningar samt sonderingar i jordlagren inom undersökningsområdet (fig. 5, tabell 1). Syftet var att inhämta information om jordlagrens lagerföljder, vattenföring i jordlagren samt djup till berg. Lagerföljdsdata finns i SGUs databas för grundvattenkartering (parameterdatabasen) och redovisas i bilaga 1.

Tre undersökningsborrningar (BH1–3, hammarborrningar med diametern 115 mm) i jord och berg utfördes av en borrfirma, en i Hjos kommun och två i Karlsborgs kommun (fig. 5, tabell 1). Syftet med borrningarna var att få information om jordlagrens och berggrundens lagerföljder, samt information om vattenföring i jord respektive berg. Dessutom utfördes borrhålsloggning i två av borrhålen (BH1 och BH2) för att få geofysiska data. Lagerföljdsinfor-

Tabell 1. Information från 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 från GSD-höjddata, grid 2+,
noggrannhet +/–0,25 m (Lantmäteriet). Grundvattenytan (m u.m.y. = meter under markytan) uppmätt 30 januari
2020. (r) = grundvattenrör. Notera att jorddjupen när det gäller sonderingarna är samma som totaldjupet. I vissa fall
kan det vara avslut mot berg. *Totaldjup lodat 30 januari 2020. Lagerföljder, se bilaga 1.

Borrhåls- nummer	Borrhåls- namn	Nivå markyta (m.ö.h)	Totaldjup (m.u.m.y)	Jorddjup (m.u.m.y)	Grundvattenyta (m.u.m.y)
BH1	Svärtan	136,18	120	38	Artesiskt (+0,94)
BH2	Ulvhult	100,05	61 (30,14*)	23	Artesiskt (+2,35)
BH3	Torpet	107,46	70 (33,13*)	28	9.54
SB1	BMW196340	136,38	17	17	
SB2	BMW196341 (r)	140,25	25 (17,48*)	≥ 25	Artesiskt (+0,17)
SB3	BMW196344	95,57	5	≥5	
SB4	BMW185012	155,45	20	≥20	
SB5	BMW196343 (r)	163,19	25 (9,69*)	≥ 25	Inget vatten
SB6	BMW185011	131,78	6,2	6,2	
SB7	BMW196342	91,03	11	≥ 11	
SB8	BMW185008	123,07	23,5	≥ 23,5	
SB9	BMW185006	149,14	11,3	11,3	
SB10	BMW185007	156,61	11,7	≥ 11,7	
SB11	BMW185005	147,96	14,5	14,5	
SB12	BMW196345	116,98	23,5	23,5	
SB13	BMW196346	90,75	12,3	12,3	

mation från borrningarna redovisas i bilaga 1 och är inlagrade i SGUs databas Brunnsarkivet (jord och berg) och parameterdatabasen (endast jord).

Undersökningsborrningarna gjordes efter en första grov tolkning av ATEM-data och platserna valdes ut baserat på var det såg mest intressant ut i resistivitetsdata samt där det fanns tydliga kunskapsluckor för att ge stöd i tolkningsarbetet. Vid borrningarna togs ett representativt prov från varje meter i jord, respektive var tredje meter i berg. Kaxproverna användes som stöd för berg- och jordartstolkning av resistivitetsdata (fig. 6, bilaga 2).

Under januari 2020 besöktes BH1–3 samt grundvattenrören SB2 och SB5 för att genom korttidsprovpumpning utvärdera den hydrauliska konduktiviteten och uppskatta uttagskapaciteten (fig. 7A). Grundvattenröret SB5 var torrt vid tillfället och provpumpades därmed inte. Anledningen är att filtret inte kom tillräckligt långt ner vid rörsättningen utan sitter i moränen istället för i de underlagrande isälvssedimenten (bilaga 1).

Grundvattenytan uppmättes med lod och i de fall detta inte var möjligt på grund av artesiska förhållanden, med tryckgivare förslutet under tätat lock (tabell 1). Tryckgivare användes även för att registrera mätvärden under provpumpning samt efter avslutad provpumpning för att mäta skillnader i grundvattennivå över tid. Vid BH3 och SB2 installerades tryckgivare med automatisk fjärrloggning anslutna till det rikstäckande grundvattennätet (fig. 7B).



Figur 6. Borrkax från BH 1 (Svärtan) vid Mullsjön. Påsarnas innehåll representerar vardera ett intervall på 1 m. Lagerföljden för borrningen börjar vid markytan längst upp till vänster med 0–1 m och avslutas längst ner i högra hörnet med 41–42 m. Gränserna mellan sand och lera vid 3–4 m, lera och sand/grus vid 18 m samt gränsen mot Visingsösandstenen vid 37–38 m, illustreras med vita linjer i figuren. Viss redigering av fotot har skett för att minska blänk. Foto: Oskar Henriksson.



Figur 7. A. Foto på utrustning vid provpumpning av BH3, Torpet, till vänster en röd slangvagn med pump och flödesmätare, uppe till höger ett ljud- och ljuslod på vinda, samt nere till höger en tryckgivare för nivåmätning. **B.** Foderrör med förlängd antenn till automatisk tryckgivare för ökad signalstyrka. Foto: Oskar Henriksson.

Geofysiska borrhåls- och markmätningar

Borrhålsloggning

Borrhålsloggning utfördes i två av borrhålen (BH1 och BH2, fig. 4 och 5) i januari 2020. Mätningarna inkluderade loggning med mätsonder som mäter resistivitet, självpotential och gammastrålning i borrhålet. 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 redovisas i bilaga 2 och tolkningar återfinns i områdesbeskrivningarna i denna rapport. BH2 hade tyvärr rasat igen under foderröret. Då de flesta sonderna inte fungerar i foderrör finns det endast data från gammastrålning här (0–32 m).

tTEM

tTEM-mätningar bygger på samma princip som ATEM-mätningar men sändarspole och mottagarspole sitter på en släde som dras efter en fyrhjuling (fig. 8). Avståndet mellan mätlinjerna och mätpunkterna är tätare än med ATEM och därmed blir den rumsliga upplösningen betydligt bättre. Mätningarna sker i 15–20 km/timme och normalt blir det en geofysisk sondering var 10 m. Däremot är djupkänningen något begränsad, oftast cirka 70 m, men det beror dock på markens resistivitet och sändarens strömstyrka. Med tTEM-mätningar kan mer detaljerade modeller konstrueras av de ytliga geologiska lagren. För en detaljerad beskrivning av metoden se Auken m.fl. (2019).

SGU använde sig av tTEM-mätningar (totalt9,5 km) i ett område i Hjo kommun, vid Mullsjön, för att komplettera ATEM-data (fig. 4). De preliminära resultaten i form av resistivitetsprofiler redovisas i bilaga 3 och diskuteras i tolkningskapitlet. Metoden visar i korthet att den lämpar sig för att få en högre detaljeringsgrad av den ytligt liggande geologin i intressanta områden. En stor fördel gentemot andra typer av geofysiska markmätningar är att man får en tredimensionell täckning inom undersökningsområdet. Inom ramen för detta projekt har endast en inledande granskning och databearbetning gjorts av insamlad tTEM-data. Den slutliga bearbetningen kommer att vara tillgänglig i SGUs databas för geofysik.



Figur 8. Illustration av mätsystemet tTEM. Mätningar bygger på samma princip som ATEM-mätningar men sändarspole och mottagarspole sitter på en släde som dras efter en fyrhjuling istället. Illustration: Oskar Henriksson.

Seismik

SGU har i ett tidigare karteringsprojekt ("Grundvattenkartering inom Västerhavets vattendistrikt", projekt-id: 83024) utfört seismisk refraktionsmätning längs fem profiler inom undersökningsområdet (fig. 4A). Mätningen har gett upplysning om djupet till bergytan samt viss information om grundvattenytans läge och jordlagrens egenskaper. Tolkningar av de seismiska mätningarna visas i bilaga 4 och diskuteras i beskrivningarna av områdena.

GEOLOGISK BESKRIVNING

Berggrund

Berggrunden i regionen präglas av deformation relaterad till storskaliga rörelser i jordskorpan under prekambrisk bergskedjebildning och efterföljande perioder av extension som gett upphov till Vättersänkan (Andreasson & Rodhe 1992, Möller & Andersson 2018). Deformationszonerna har varit fortsatt aktiva under perioder i fanerozoisk tid och under perioder av deglaciation ända fram i postglacial tid (Andreasson & Rodhe 1992, Månsson 1996, Jakobsson m.fl. 2014).

Undersökningsområdet ligger i en av de mest framträdande deformationszonerna i den skandinaviska urbergsskölden. Den är en del av en storskalig nordsydligt orienterad kilformad plastisk deformationsstruktur som utgör gränsen mellan odeformerad jordskorpa i öster och kraftigt deformerad och förgnejsad berggrund i väster (fig. 9, Andreasson & Rohde 1992, Wahlgren m.fl. 1994). Zonen markeras av ett tydligt tyngdkraftsunderskott och kontrasterande strukturer i det regionala magnetanomalimönstret (Wik m.fl. 2006). Deformationsstrukturerna i undersökningsområdet löper huvudsakligen parallellt med den storskaliga nordsydliga till nordnordostliga brant stupande regionala deformationsstrukturen (fig. 9). Rörelseindikatorer i deformationszonerna indikerar att de västra blocken höjts i relation till de östra.

Berggrunden i undersökningsområdet är endast översiktligt inventerad, kartläggning utfördes under åren kring sekelskiftet 1900 och utgörs av kombinerade jordarts- och berggrundskartor (Blomberg 1906a, Westergård m.fl. 1926). De södra delarna av undersökningsområdet kartlades 2007 översiktligt i skala 1:250 000 (knappt ett 30-tal observationer, beskrivning saknas) samt i översiktlig form omkring 1900 (Blomberg 1906a, b). Med undantag från de nordöstra delarna runt Karlsborg och sjön Örlen, är berggrunden endast sparsamt blottad i undersökningsområdet. Sammantaget gör detta att det endast finns begränsad information om berggrundens uppbyggnad och struktur i undersökningsområdet.



Figur 9. Berggrundskarta över undersökningsområdet baserad på SGUs berggrundsgeologiska kartdatabas (SGU 2019: Berggrund 1: 250 000– 1:1 000 000). Notera förändring i utbredning av Visingsösandstenen från tidigare tolkning till nuvarande tolkning baserad på resistivitetsdata.

Enligt befintlig information utgörs berggrunden i undersökningsområdet av två huvudenheter: granitiskt urberg och sedimentärt berg (fig. 9). I de östra lägst liggande delarna (sänkta block) förekommer sedimentära bergarter dominerade av sandsten (Visingsögruppen, Collini 1951, Vidal 1982, 1985). Sedimenten avsattes för cirka 800 miljoner år sedan (Moczydlowska m.fl. 2018; Wickström & Stephens 2020). Inom undersökningsområdet har de sedimentära bergarterna endast observerats i lösa block (Blomberg 1906a, b, Westergård m.fl. 1926).

Visingsögruppen består av tre formationer med en total mäktighet om drygt 1400 m (Moczydlowska m.fl. 2018, Wickström & Stephens 2020). Den undre formationen (cirka 400 m) består av sandsten med lager av skiffer avsatta i en fluvial deltamiljö. Sandstenen är vit till rödbrun, ofta korsskiktad och är relativt ren och kvartsrik. Denna övergår gradvis i den mellersta formationen (cirka 450 m) som består av sandsten, konglomerat, lersten och skiffer avsatta i grund marin till prodelta miljö. Kontakten till den övre formationen utgörs av en skarp gräns mellan sandsten (mellersta) och laminerad lersten (översta). Den översta formationen (knappt 600 m) utgörs av lersten, skiffer, finkornig sandsten och från en grund marin strandmiljö (Moczydlowska m.fl. 2018). Tillgänglig information indikerar att det aktuella undersökningsområdet omfattar den undre formationen. Sandstenen är ofta löst sammansatt med hög porositet vilket gör att den kan innehålla mycket grundvatten.

Baserat på ATEM-data och lagerföljder har vi gjort en uppdaterad utbredningskarta för Visingsösandstenen som visas i figur 9 och diskuteras senare i avsnittet *Resultat och områdes-specifika tolkningar*. Gränserna för Visingsösandstenens utbredning har ändrats på flera ställen.

I de västra höjda blocken dominerar urberg (fig. 9) bestående av granitiska och granitlika magmatiska bergarter (Petersson m.fl. 2015). Det granitiska urberget genomsätts av nordsydligt orienterad diabas, i äldre litteratur beskrivna som huvudsakligen odeformerade (Blomberg 1906b). Nordsydligt till nordnordvästligt strykande strukturer i magnetanomalikartan över södra undersökningsområdet orsakas troligtvis av diabasgångarna. Generellt är diabaser väldigt täta, dock kan det i kontakten mellan diabas och sidoberg uppstå zoner med relativt god vattenföring.

Det finns ytterst få blottade kontakter mellan urberget och Visingsögruppens sedimentära bergarter. På ön Stora Röknen i norra delen av Vättern förekommer ställvis 1–2 m djup leromvandling (kaolinitisering) av det granitiska urberget som föregått bildningen av överlagrande sedimentära bergarter (Wikström & Karis 1993). En kraftig kaolinitisering kan påverka förekomsten av grundvatten då kaolin är en lera.

Jordarter

De flesta jordlagren inom undersökningsområdet avsattes under den senaste istiden och tiden strax därefter, medan landet fortfarande var nedpressat av tyngden från landisen. Då inlandsisen smälte undan från området, under en period av cirka 1000 år för 12 500–11 500 år sedan, var Baltiska issjön samt Tidanisjön, väster respektive öster om undersökningsområdet, uppdämda av landisen i norr och stora delar av området var vid olika tidpunkter täckt av vatten (fig. 10). De högst uppmätta strandlinjerna, vilka utgör områdets högsta kustlinje (HK) ligger på cirka 145 m ö.h. söder om Hjo och cirka 150 m ö.h. sydväst om Mölltorp. I stort sett hela området var torrlagt för cirka 11 000 år sedan (Påsse & Andersson 2005, fig. 10).

Cirka 90 % av området är jordartskarterat med regional kartläggning inom de topografiska kartbladen Hjo NV respektive Hjo SV (Linden 2010a, b) i skala 1:100 000. Karteringsmetoden innebär att okulär bedömning av jordarter skett längs samtliga vägar i området. Detta medför att relativt stora ytor mellan vägarna inte besökts och endast tolkats med hjälp av flygbilder och äldre jordartskartor. Övriga 10 % har kartlagts med lokal kartläggning i skala 1:50 000. Metoden innebär att i princip samtliga ytor är fältundersökta. Under 2019 har jordartskartan uppgraderats med hjälp av Lantmäteriets höjddata (Lantmäteriet 2019), ortofoton och begränsad fältkontroll. Uppgradering (fig. 11) innebär att presentationsskalan nu är 1:50 000 respektive 1:25 000.

Jorddjupet är inom stora delar av området betydande med mäktigheter på 20–70 m. SGUs nationella jorddjupskarta (Daniels & Thunholm 2014) har reviderats under projektets gång och diskuteras i denna rapport (se avsnittet *Bergöveryta och jorddjupsmodell*).



Figur 10. A–D. Paleogeografisk utveckling. Tidanissjön och Baltiska issjöns högsta nivåer under perioden 12 200 till 11 000 före nutid. Röd polygon visar undersökningsområdet. BP= Before Present (före nutid).

Jordartsfördelningen inom området är relativt heterogen och domineras av morän, isälvssediment och postglacial sand (fig. 11). Undersökningsområdet återfinns till stora delar inom det som benämns " den mellansvenska randmoränzonen" vilken sträcker sig öst–väst tvärs över norra Götaland. Detta medför att det i området kan finnas komplexa avlagringar som byggs upp av företrädesvis morän och isälvssediment, men även finkorniga sediment kan ingå. Morän har störst utbredning och täcker cirka 45 % av markytan (fig. 11) och utgörs huvudsakligen av sandig morän. Moränen är inom vissa områden i anslutning till Vättern lerig beroende på ett stort inslag av sedimentära bergarter, framförallt kalksten och skiffer.

I området nordost om Nolkärr återfinns ett antal så kallade DeGeermoräner, små moränryggar ibland endast någon enstaka meter höga. Kullig morän (moränbacklandskap) förekommer sparsamt. Moränen förekommer relativt ofta som ett tunt lager (cirka 1 m) på isälvssediment (fig. 11). Detta gör att det i fält kan vara svårt att avgöra vad som är homogen morän ned till berggrunden eller vad som är moräntäckta sediment, varför felaktigheter i jordartskartan inte kan uteslutas.



Figur 11. Jordartskarta (SGUs kartdatabas). Området innanför polygonen är uppgraderad inom projektet.

Morän i områden som är belägna under HK har i olika grad utsatts för vågornas svallning med en ursköljning och omlagring av ytliga lager som följd. Lokalt på höjder och på sluttningar, som varit kraftigt exponerade för vågerosion och vattenströmmar, kan större mäktigheter av svallsediment förekomma. Generellt utgör moränen ett utjämnande täcke på berggrunden men kan även uppvisa egenformer i form av kullar och ryggar. Moränsammansättningen i dessa egenformer är vanligtvis grovkornigare än den dominerande sandiga moränen. De fåtal ryggar som finns inom undersökningsområdet är vanligtvis orienterade tvärs isens rörelseriktning.

Isälvslavlagringarna avsattes av inlandsisens smältvatten i direkt anslutning till inlandsisen; i isälvstunnlar under isen, ovanpå isen eller framför iskanten. Isälvsavlagringarna avsattes således i det tidsspann som ungefärligen omfattas av de paleogeografiska figurerna 10A–C. Isälvssediment är oftast skiktade och välsorterade. Sand och grus är vanligen dominerande kornstorlekar, men såväl sorteringsgrad som kornstorlek kan växla avsevärt inom samma avlagring. Isälvsavlagringarna har ofta karakteristiska ytformer, till exempel åsar, deltan, kullar. Inom undersökningsområdets västra och centrala delar har isälvsavlagringar stor utbredning (fig. 11). I söder dominerar sandiga sediment för att mot norr generellt bli grövre med större innehåll av grus och sten. Huvuddelen av isälvssedimenten återfinns inom den mellansvenska randmoränzonen och isavsmältningen inom denna zon skedde med ett komplicerat och till delar okänt förlopp. Isälvsavlagringarna förekommer upp till ovanligt höga nivåer och uppvisar ibland mycket växlande ytformer. På många platser överlagras isälvsedimenten av ett, ofta tunt, lager av morän. Framförallt förekommer dessa tunna moränlager i ett stråk i områdets centrala delar från Mullsjön i söder till Mölltorp i norr.

Glacial lera och silt förekommer i låglänta delar huvudsakligen i norra delen av området samt i mindre omfattning runt Mullsjön i söder, där även glacial sand återfinns (fig. 11). Glacial lera, silt och sand bildades genom att de finkornigaste partiklarna transporterades ut i öppet vatten av smältvattnet från isen och avsattes på den dåvarande bottnen (fig. 10A–D.) Den forna Mullsjön utgjorde under några hundra år ett sund mellan Tidanissjön och Baltiska issjön och dess yta var ungefär dubbelt så stor som dagens sjö (fig. 10A). Förutom där de finkorniga jordarterna går i dagen kan dessa även återfinnas under postglacial sand och torv.

Postglacial sand har stor utbredning och finns spritt över hela området (fig. 11). Den postglaciala sanden kan ha bildats på två sätt, antingen som svallsediment eller som issjösediment. I samband med landhöjningen efter den senaste istiden utsattes tidigare avsatta jordarter för vågornas och strömmarnas påverkan (fig. 10A–C). Jordarternas ytliga delar omlagrades och avsattes som svallsediment på lägre nivåer. Svallsedimenten återfinns framför allt längs med isälvssedimenten, då dessa till stora delar har utgjort källmaterialet, men även på moränsluttningen längs Vättern. Denna postglaciala sand domineras av mellan- och grovsand och kan innehålla mer eller mindre grus. I sluttningar som har varit kraftigt exponerade för vågor har det ibland bildats strandvallar och väl utvecklade fornstränder. Issjösediment i form av postglacial finsand återfinns företrädesvis i flacka, ofta lägre liggande områden och bildades under den tid som ungefärligen motsvaras av de paleogeografiska figurerna 10B–C. Störst utbredning har den postglaciala finsanden i den norra delen, där den ofta överlagrar lera och silt. Vindsediment (eoliska sediment) har endast kartlagts i närheten av Mullsjön, där ett fåtal dyner av flygsand konstaterats.

Torv förekommer antingen som mossetorv eller kärrtorv. Inom undersökningsområdet dominerar mossetorven och stora mossar återfinns i kartans norra del, öster och nordost om Frökärr (fig. 11). I två av dessa mossar har det bedrivits torvtäktsverksamhet. Kärrtorv utgörs, med ett par undantag, av små ytor. Dikning och odling har omvandlat många torvmarker i dalstråk och sänkor så att bara tunna rester återstår.

Hydrogeologiska förhållanden och vattenförsörjning

Grundvattenmagasin i jordlagren

Grundvattentillgångarna i jordlagren var innan denna undersökning påbörjades angivna i översiktlig skala i länskartan över Skaraborgs län (Wikner m.fl., 1991). SGU tar sedan 15 år tillbaka fram beskrivningar av enskilda grundvattenmagasin. Inga sådana beskrivningar är klara inom undersökningsområdet. Under 2005 genomfördes hydrogeologiska undersökningar inom ATEM-området vid Fagersanna och öster om Tibro vid Älgarås med målsättningen att publicera magasinsbeskrivningar. Dessa slutfördes inte, men arbetet är återupptaget (Lång & Lindh opublicerat) och kommer att redovisas i två magasinsbeskrivningar senast 2021.

Grundvattenförekomsten Fagersanna (WA40564468), ingående i vattenförvaltningen (redovisad i VISS, fig. 12) ligger i den nordvästra delen av undersökningsområdet. Den är belägen i en isälvsavlagring. Uttagsmöjligheterna bedöms i den bästa delen av grundvattenmagasinet vara 5–25 l/s. I de centrala, västra delarna av ATEM-området vid Älgarås finns ett område som utgör den östra delen av grundvattenförekomsten (WA56579928, fig. 12) ingående i vattenförvaltningen (redovisad i VISS). Även denna grundvattenförekomst är belägen

i en isälvsavlagring. Uttagsmöjligheterna antas inom ATEM-området vara varierande men i huvudsak i den undre delen av intervallet 5–25 l/s. En mer detaljerad beskrivning av Fagersanna och Älgarås återfinns i denna rapport under avsnittet Utvalda områden med hydrogeologisk tolkning. Där ingår också en hydrogeologisk beskrivning av några fler områden: Kråks, Kleven, Stora Röå, Mullsjön och Källebo-Åsen.

Vid Mölltorp, ett samhälle beläget mellan Fagersanna och Karlsborg finns en grundvattenförekomst med samma namn. Mölltorp (WA83568312) är en preliminär sand- och grusförekomst ingående i vattenförvaltningen (redovisad i VISS, fig. 12). Enligt tidigare bedömningar är uttagsmöjligheterna utmärkta eller ovanligt goda i bästa delen av grundvattenmagasinet (5–25 l/s).

Det förekommer vid Karlsborg, i området kring det militära skjutfältet i Kråk och flygplatsen, genomsläppliga jordlager som kan indikera att det finns goda grundvattentillgångar i jordlagren (fig. 12). Även söder om detta område mellan Brevik och ned mot Hjo förekommer isälvsmaterial som kan utgöra en grundvattenresurs. Vid Mullsjön öster om Hjo finns ett större område med isälvsmaterial som kan inrymma en inte ringa mängd grundvatten (fig. 12). Generellt har området längs Vätterns strand stora jorddjup (30–50 m) vilket även detta tyder på att det kan finnas grundvattentillgångar i jordlager på större djup. Ett antal brunnsborrningar spridda längs Vättern indikerar dessutom genomsläppligt sandigt och grusigt material. Jordartskartan över området indikerar dessutom att det förekommer isälvsmaterial under morän, vilket kan peka på att tillgångarna är stora i området. Inom undersökningsområdet förekommer endast ett fåtal kända källflöden (fig. 12).

Grundvattenmagasin i berggrunden

Inom det undersökta området utgörs berggrunden i huvudsak av en prekambrisk sandsten tillhörande Visingsöformationen. Sandstenen utgör en porakvifer och uttagsmöjligheterna är enligt tidigare bedömningar mellan 2000 och 6000, i vissa områden upp till 20000 l/timme, och har namnet Karlsborg–S. Fågelås (WA22881836 (redovisad i VISS), se fig. 12). Visingsösandstenen är relativt dåligt litifierad (löst sammansatt) i området vilket ibland gör den svår att urskilja från överliggande sand- och grusavlagringar i brunnsborrningar. I flera områden samverkar troligen akviferer i jordlagren med akviferen i sandstenen. Uttagsmöjligheterna från urberget, bestående av granit, är generellt lägre än för sandstenen och bedöms i medeltal ligga mellan 600 och 2000 l/timme. Här rör det sig om en sprickakvifer.

Vattenförsörjning

Inom undersökningsområdet sker den kommunala vattenförsörjningen genom ytvattentäkter. Hjo och Karlsborgs kommuner använder Vättern som sin huvudvattentäkt. Inom Tibro kommun finns en kommunal grundvattentäkt i Fagersanna (fig. 12). Vattentäkten är belägen i jordlagren. Äldre kommunala grundvattentäkter i Hjo kommun har funnits i Visingsösandstenen både i Hjo, N. Fågelås och Grevbäck. Hjo kommun har en nedlagd vattentäkt med brunnar i jordlagren på västra sidan samhället. Karlsborgs kommun har en vattentäkt i jordlagren vid Mölltorp som är i drift (fig. 12). Äldre numera nedlagda vattentäkter inom undersökningsområdet i Karlsborgs kommun har funnits i jordlagren vid Brevik och Bro. Inom undersökningsområdet finns tre vattenskyddsområden för grundvattentäkter (fig. 12).

Den enskilda vattenförsörjningen längs Vätterns västra strand baseras i huvudsak på brunnar, antingen grävda i jordlagren eller borrade i berggrunden. De grävda brunnarna är invid Vättern ofta nedförda i den ytliga svallsanden. Ofta kan tillgången vara tillräcklig för enskild vattenförsörjning, men problem med dålig vattenkvalitet i form av höga nitrathalter förekommer frekvent. Borrade brunnar är generellt nedförda i den underliggande Visingsö-



sandstenen. I de västra delarna av undersökningsområdet finns grävda brunnar anlagda i isälvsavlagringar bestående av sand och grus. Borrade brunnar i urberget bidrar här också till den enskilda vattenförsörjningen.

RESULTAT OCH OMRÅDESSPECIFIKA TOLKNINGAR

Resultaten presenteras med en översiktlig litologisk tolkning av jord- och berglager i fyra delområden (fig. 13). För åtta områden görs även en hydrogeologisk beskrivning (se avsnittet *Utvalda områden med hydrogeologisk tolkning*). Bearbetning av ATEM-data resulterar i en tredimensionell bild av hur resistiviteten är fördelad i området. Mätdata ger information om resistivitetsfördelningen ner till cirka 150 m djup. Den vertikala upplösningen är som bäst 4 m och avtar med djupet. För att mätningarna ska kunna användas för geologisk och hydrogeologisk tolkning behöver resistivitetsfördelningen översättas till geologi. För detta ändamål har en översättningstabell sammanställts (tabell 2) där olika jord- och berglager representeras av olika resistivitetsintervall. Dessa intervall har i huvudsak tagits fram genom korrelation mellan ATEM-data och borrhålsinformation, och kan även variera inom undersökningsområdet.

Sand- och grusavlagringar som utgör akviferer eller innehåller grundvatten har oftast en resistivitet på mellan 100 och 200 Ohmm och urskiljs lätt mot jordlager dominerade av lera och torv (oftast resistivitetsintervall mellan 40 och 80 Ohmm) som oftast utgör jordbruksmark och mossar. Sand- och grusavlagringar över grundvattenytan, eller som saknar större mängder grundvatten, har ofta en betydligt högre resistivitet, från cirka 250 till flera tusen Ohmm. Moränen i området har ett resistivitetsintervall på 40–1000 Ohmm som överlappar samtliga jord- och bergarter (tabell 2). Det gör det svårt att säkert särskilja morän från övriga jordlager. Det som tolkas som torr morän har hög till mycket hög resistivitet (över 300 Ohmm). En av anledningarna till den höga resistiviteten kan vara att moränen är relativt sandig i området.

Visingsösandstenen varierar mellan 30 och 600 Ohmm men har oftast en resistivitet på cirka 100–200 Ohmm vilket gör det relativt lätt att åtskilja den från underliggande urberg och ibland från överliggande jordlager. Där sandstenen är tunn är den svårare att urskilja. Detsamma gäller där sandstenen överlagras av sand- och grusavlagringar med en liknande resistivitet.

Urberget i området framträder oftast tydligt på grund av sin höga resistivitet (ofta över 500 Ohmm). Som högst resistivitet (ofta över 1000 Ohmm) har urberget där urberget är över grundvattenytan eller håller väldigt lite grundvatten. På större djup, oftast i område där urberget underlagrar Visingsösandstenen, så är resistiviteten oftast något lägre, 300–500 Ohmm. Detta kan delvis bero på att de översta metrarna är mer uppspruckna och håller mer grundvatten eller att det har att göra med metodens djupseende eller rentav en modelleringseffekt (Brolin m.fl. 2020).

Den stora sprickzonen i nord–sydlig riktning, i Vätterns längdriktning, syns tydligt i resistivitetsdata genom att Visingsösandstenen saknas väster om denna samt är mäktig öster om (fig. 9). De sprickzoner och diabasgångar som är tolkade från annat geofysiskt underlag förekommer i de områden där data rensats bort på grund av störningar och ingen korrelation kan göras.

Undersökningsområdet kan delas in i olika områden baserat på dess resistivitet, som i huvudsak speglar topografi, jordartsfördelning, jorddjup, förekomst av grundvatten samt berggrundsförhållanden. Ett stort område som utgör undersökningsområdets östra delar (*Hjo-Karlsborg*) ett område i väster (*Björkhult-Munkeberg*) ett område mellan ovanstående områden (*Mosshult-Spånhult*), samt ett område vid *Mullsjön* (se avsnittet *Områdesvisa geologiska tolkningar* och figur 13). Områdenas avgränsningar är ungefärliga då förändringarna i geologi och därmed resistivitet inte är skarp.

Geologi	Grundvattenmiljö	Resistivitetsintervall (Ohmm)	Kommentar
Torv, lera, gyttja	Under grundvattenytan	40 till 80	Ofta vattenmättade, ibland hög halt lermineral
Sand/grus	Över grundvattenytan	250 till över 1 000	Främst i mäktiga isälvs- avlagringar
Sand/grus	Under grundvattenytan	80 till 200	Under grundvattenytan sänks resistiviteten
Morän	Över grundvattenytan	300 till över 1000	Tunna eller högt liggande avlagringar
Morän	Under grundvattenytan	40 till 80	Lerinnehåll och vatten- mättnadsgrad sänker resistiviteten
Visingsösandsten	Under grundvattenytan	Övre del 150 till 600 Undre del 30 till 150	Vattenmättnadsgrad och Ierinnehåll gör skillnaden
Urberg	Över grundvattenytan	Över 1000	Ytligt, ofta högt liggande
Urberg	Under grundvattenytan	300 till över 1000	Vattenmättnadsgrad och totaldjup påverkar

Tabell 2. Översättningstabell med resistivitetsintervall för olika geologiska material i området.



Figur 13. Utpekade områden med olika geologisk uppbyggnad, samt lokalisering av profiler, borrningar och skruvborrningar/sonderingar som utförts av SGU under projektets gång.

Bergöveryta och jorddjupsmodell

För delar av området har berggrundens överyta kunnat identifieras i resistivitetsdata och inom dessa områden har en ny förbättrad jorddjupsmodell skapats (fig. 14A). Tolkning av bergets överyta har skett i flera steg. Punkter har genererats automatiskt vid övergången mellan jord och berg där befintliga lagerföljdsuppgifter funnits. Dessutom har borrningar med uppgift om avslut mot berg (jordlagerföljder) genererat en punkt. Därefter har de automatiskt genererade punkterna kompletterats med manuellt placerade punkter utifrån resistivitetsdata längs varje flygprofil. Genom att punkterna gavs olika "typ" (1–9) och "kvalitet" (1–9) är det möjligt att särskilja exempelvis en automatiskt utsatt punkt baserad på lagerföljdsdata (1.1) från en fri tolkningspunkt med mycket stor osäkerhet (8.3). Där lagerföljden varit svårtolkad utifrån resistivitetsdata har stor vikt lagts vid befintliga lagerföljdsuppgifter och sparsamt med tolkningspunkter har placerats ut. Alla punkter har slutligen använts i en interpolation till en kontinuerlig bergöveryta inom dataområdet.

Det gjordes även försök att tolka lagergränser genom maskininlärning där punkter genereras automatiskt med hjälp av ursprungliga manuellt tolkade punkter. Den heterogena uppbyggnaden och lagerföljderna inom undersökningsområdet med avseende till resistivitetsvärden gjorde dock att denna funktion blev svårhanterad och bedömdes ineffektiv. Denna metod läm-



Figur 14. A. Ny jorddjupsmodell i huvudsak baserad på ATEM-data. Den svarta polygonen visar inom vilket område som jorddjupsmodellen uppdaterats. **B.** Skillnaden mellan befintlig och ny jorddjupsmodell.

par sig bäst inom områden med tydliga resistivitetsvariationer och större sammanhängande ytor (Brolin m.fl. 2020).

I den västra delen av undersökningsområdet där mycket data rensats bort (fig. 4, se även Brolin m.fl. 2020) samt i områden där bergöverytan inte gått att urskilja (vilket i stort sett alltid betyder områden med torra jordlager på urberg) har vi använt oss av SGUs befintliga jorddjupsmodell (Daniels & Thunholm 2014). De två modellerna har sammanfogats för att få fram en kontinuerlig bergöveryta inom undersökningsområdet (fig. 14A). För att få en jämn övergång mellan ny och befintlig bergöveryta har vi använt oss av en övergångszon på 100 m. I figur 14 redovisas den nya jorddjupsmodellen baserad på ATEM-data samt skillnaden mellan denna och den gamla jorddjupsmodellen.

Bergets överyta (fig. 15) är en yta som består dels av urbergsytan, dels av överytan för Visingsösandstenen där respektive berggrund utgör ytlig berggrund. I vissa områden intill Vättern är Visingsösandstenens underyta och urbergets överyta svår att urskilja i resistivitetsdata då denna ligger på mycket stora djup. Här finns också få lagerföljdsuppgifter att använda som stöd i tolkningen. Det betyder att tolkningen av Visingsösandstenens mäktighet (fig. 15A) intill Vättern är osäker. För att trots allt göra en uppskattning av mäktigheten har skillnader i resistivitet, i vissa fall även under den gräns där data anses pålitlig (Brolin m.fl. 2020), tillsammans med ett fåtal djupare borrningar använts. För en del profiler där mäktigheten är som störst har ingen nedre gräns kunnat urskiljas och i dessa fall kan den tolkade ytan ses som en



Figur 15. A. Visingsösandstenens utbredning och mäktighet. B. Berggrundens överyta i m.ö.h. Öster om den streckade linjen är mäktighet och bergöverytan mer osäker.

miniminivå. En beskrivning av Visingsösandstenens interna uppbyggnad och resistivitetsmönster presenteras i avsnittet Områdesvisa geologiska tolkningar, Hjo-Karlsborg.

Med hjälp av punkttolkning för tre separata lagergränser (jord, sandsten, urberg) har en grov geologisk modell kunnat upprättats, bestående av jordlager, Visingsösandsten och urberg (fig. 14A och 15A–B). På djupet har modellen en något större osäkerhet med sämre noggrannhet i resistivitetsdata och färre lagerföljdsuppgifter att använda som stöd. Noggrannheten är större närmare markytan men även här finns det osäkerheter inom vissa områden, framförallt i de områden där det är lägre datatäthet (fig. 4). De geologiska lagren visas i några figurer i avsnitten *Områdesvisa geologiska tolkningar* och *Utvalda områden med hydrogeologisk tolkning.* En geologisk 3D-modell över området kommer när den är klar att visas i SGUs 3D-kartvisare.

Områdesvisa geologiska tolkningar

Hjo-Karlsborg: Området utgörs av undersökningsområdets östra delar, längs Vätterns strand från strax söder om Hjo till Karlsborg i norr (fig. 13). Området har en relativt plan relief utan större nivåskillnader, gränsande till ett höjdområde i väster och Vättern i öster. Markanvändningen består av jordbruksmark och i väster områden med skog. I området vilar jordlagren, bestående av morän, svallsand, lera och torv, på företrädesvis mäktig Visingsösandsten som i sin tur överlagrar urberg bestående av granit.

Den västra gränsen för området *Hjo-Karlsborg* är i huvudsak tektoniskt betingad, det vill säga att största delen av det utpekade området består av sänkta block (fig. 9). Mäktigheten på Visingsösandstenen och djupet till urberget ökar markant mot öster (fig. 15 och 16A–C) och uppgår i vissa områden till mer än 200 m (max djupkänning av SkyTEM-metoden inom området med Visingsösandsten). I området mellan Österbo i söder och Stenkulle i norr finns en högresistiv (över 500 Ohmm) rygg som tolkas som en urbergshöjd där sandstenens mäktighet är mindre (fig. 16A). Höjden kan utgöra ett eget förkastningsblock. Visingsösandstenen är mäktigare såväl öster som väster om urbergsryggen (fig. 15).

Baserat på resistivitetsdata och lagerföljder har vi gjort en ny utbredningskarta för Visingsösandstenen (fig. 9 och 15A). Tidigare har tolkningen varit att Visingsösandstenen funnits även i stråket mellan områdena *Hjo-Karlsborg* och *Mullsjön*. Resistivitetsdata pekar mot att så inte är fallet. Under fältarbete fann vi även en urbergshäll i Hjoån som pekar mot att sandstenen saknas här. Urberget har en resistivitet på mellan 300 och över 1000 Ohmm inom området och urskiljs relativt enkelt mot jordlager och Visingsösandsten.

Visingsösandstenen består enligt tidigare undersökningar av den undre delen av Visingsöformationen som består av kvartsrik sandsten med inslag av skiffer och arkosisk sandsten (Moczydlowska m.fl. 2018). Borrkax från BH2 (Ulvhult) och BH3 (Torpet) visar på en kvartsrik sandsten med något varierande kornstorlek och sammansättning. Resistiviteten i Visingsösandstenen sett över hela området har ofta en uppbyggnad med en relativt högresistiv övre del (vanligen 150–300 Ohmm men på vissa ställen så hög som 600 Ohmm) med cirka 30 m mäktighet och därunder en lägre resistivitet (30–150 Ohmm; fig. 16). Ett undantag är området längst upp i norr vid Karlsborg där resistiviteten är lägre även i ytan (cirka 50 Ohmm) vilket troligen betyder att den övre högresistiva delen saknas och att denna del kan utgöra ett eget förkastningsblock. En annan tolkning är att det är en lerigare Visingsösandsten eller att den har högre vatteninnehåll i detta lågresistiva område. Borrhålet Ulvhult skulle undersökas med borrhålsloggning men borrhålet hade rasat igen så det finns endast geofysiska data från jordlagren (bilaga 2). Det betyder att resistivitetsdata från borrhålsloggning saknas från Visingsösandstenen inom Hjo-Karlsborg. Borrhålsloggning av BH1 vid Mullsjön, som penetrerade Visingsösandstenenen, visar ett skifte från hög till låg resistivitet som sammanfaller med en förändring i sandstenens komposition (se vidare under beskrivning av området Mullsjön). Det finns inga sådana tydliga skiften i sammansättningen av Visingsösandstenen i vare sig BH2 eller BH3 vilket troligen beror på att dessa borrningar inte är lika djupa (bilaga 1).

De ytliga jordlagren inom området har ofta en resistivitet på cirka 100 Ohmm (fig. 16A–C). Det är lite förvånande då de ytliga jordlagren domineras av jordarter som vanligen har låg resistivitet i form av lera och torv men även jordarter som oftast har hög resistivitet som sand och grus. Vanligen är det områden med morän eller moräntäckta sand- och grusavlagringar



Figur 16. A–C. Profiler från väst mot öst inom området *Hjo-Karlsborg*. Profilerna visar resistivitetsfördelningen och tolkning av jordlager och berggrund. Profilernas läge visas i figur 13. Notera skillnad i skala mellan profilerna. Terrängytan är draperad med färgkodning från jordartskartan, för teckenförklaring se figur 11. Heldragen linje = bergets överyta. Streckad linje = urbergets överyta där sandstenen överlagrar.

som har högst resistivitetsvärden, oftast över 200 Ohmm (fig. 16B) vilket tyder på att det är fråga om relativt torra sediment. Under uppgraderingen av jordartskartan har det blivit tydligt att det på flera ställen inom området *Hjo-Karlsborg* finns en komplex jordartsfördelning (fig. 11), mycket beroende på de olika issjöstadierna och israndens framstötar.

I norra delen, strax söder om Karlsborg, har jordlagren en genomgående medelresistivitet på cirka 100 Ohmm och ett antal borrningar visar på mäktiga sandlager. Resistiviteten i jordlagren tyder på att det troligen rör sig om företrädesvis vattenmättade sand- och grusavlagringarna. Söderut pekar såväl jordartskartering, samt resistivitetsdata mot att de sandoch grusavlagringar som finns ytligt västerut (till exempel vid Stora Råö och Kleven (fig. 11) fortsätter in under de ytliga jordlagren av morän och torv som finns i området Hjo-Karlsborg. Flera borrningar (fig. 16A–C) visar på stora mäktigheter av sand och grus, ibland hela vägen från markytan till berget, men ibland under finmaterial vilket bland annat syns i SGUs undersökningsborrning BH2 (Ulvhult, fig. 16B, bilaga 1). Det är dock troligt att det som vissa lagerföljdsdata från brunnar visar som sand och grus under finmaterial istället kan vara den dåligt litifierade Visingsösandstenen.

Området söder om Hjo som har resistivitetsdata är avskilt norrut på grund av att ingen data inhämtats vid samhället Hjo (fig. 13, fig. 4). Den generella bilden är jordlager med en resistivitet på cirka 100–150 Ohmm, som överlagrar högresistiv berggrund (cirka 200–500 Ohmm för Visingsösandstenen och över 500 Ohmm för urberget (fig. 16C). Det är tydliga skillnader i resistivitetsdata och dataunderlaget är inte så stort så mycket av tolkningen görs på lagerföljdsdata från brunnar och den befintliga jorddjupsmodellen (fig. 14). I väster utgörs berggrunden av urberg medan det finns Visingsösandsten i öster (fig. 15). Ett antal brunnar visar på sand i ytan med lera under och därefter sand och grus igen (fig. 16C). Huruvida detta är jordlager eller dåligt litifierad sandsten är dock osäkert.

Björkhult-Munkeberg: Området består av det höjdområde som utgör de västliga delarna av undersökningsområdet (fig. 13). ATEM-data inom detta område är i de flesta fall störda och har till stor del rensats bort innan tolkning (fig. 4). I de områden där vi tvingats rensa bort resistivitetsdata kan detta i sig ge en tolkning av trolig geologi (se vidare diskussion i Brolin m.fl. 2020). För att ändå söka stöd i tolkningsarbetet har vi tittat på data med lägre pålitlighet (fig. 4). Dessa visar i princip uteslutande på hög till mycket hög resistivitet igenom hela nedträngningsdjupet. Tolkningsmässigt tyder detta på torra jordlager troligen bestående av morän, sand eller grus som överlagrar urberg. Jorddjupsmodellen i området är till stora delar baserad på data från borrningar då ATEM-data i princip saknas här (fig. 14).

SGU har utfört sex borrningar och sonderingar inom området (tabell 1, fig. 5). Information från dessa borrningar och annan lagerföljdsinformation tyder på komplexa lagerföljder med sand, grus och morän (bilaga 1). Vid SB5 finns en tolkad lagerföljd med isälvsmaterial under en 10 m mäktig morän och ett totalt jorddjup på minst 25 m. Strax intill vid SB4 bedöms jordlagren bestå av morän till minst 20 m djup. I de norra delarna av området vid Björkhult visar sonderingsborrningarna (SB9 –11) jordlager med mäktigheter på mellan 11 och 15 m med morän och morän överlagrat med sand (fig. 5, bilaga 1).

SGU har i ett tidigare skede utfört refraktionsseismik längs fem profiler, varav fyra ligger inom området (fig. 4; se bilaga 4 för detaljerad tolkning av profilerna). Tolkningar visar i grova drag jordlagerföljder bestående av sand- och grusavlagringar med en mäktighet av 30 till 50 m. Profilerna inom området indikerar relativt mäktiga torrare jordlager, där den västligaste profilen (S9) har tolkats ha torra jordlager på 30 m. Övriga tre profiler uppvisar torra jordlager ner till 20 m djup, därefter vattenmättade sediment. Utöver den sydligaste profilen (S12), strax sydväst om Röåsjön, som tolkats innehålla en del morän uppvisar profilerna till största del sand och grus där torra jordlager har hastigheter på 400–800 m/s och vattenmättade cirka 1700 m/s (bilaga 4). Gränsen mellan jord och kristallint urberg (4600 m/s) anses som säker.

Björkhult utgör den nordvästra delen av undersökningsområdet med sjön Örlen som nordvästlig gräns. Österut avgränsas området mot *Mosshult* (fig. 13). De ytliga jordlagren domineras helt av isälvsmaterial som ofta är relativt grovt med både grus och sten (fig. 11). Vid samhället Fagersanna finns ett stort antal brunnar som visar på 30–40 m mäktiga sandiga avlagringar (fig. 17A). I närheten av sjön Örlen finns ett fåtal datapunkter med god kvalitet. Dessa visar på en lägre resistivitet (150–200 Ohmm) vilket tyder på att sand- och grusavlagringarna troligen är mer vattenmättade här.



Figur 17. A–C. Profiler inom området *Björkhult-Munkeberg*. Profilerna visar tolkning av jordlager och berggrund samt i de fall det finns data även resistivitetsfördelningen. **A.** Profil i V–Ö-riktning vid Fagersanna. **B.** Profil i V–Ö-riktning centralt inom området. **C.** Profil i N–S-riktning längst i söder. Profilernas läge visas i figur 13. Terrängytan är draperad med färgkodning från jordartskartan, för teckenförklaring se figur 11. Heldragen linje = bergets överyta.

Söder om Brevik, där *Björkhult-Munkeberg* smalnar av (fig. 13), finns företrädesvis isälvsmaterial och moräntäckta sediment i ytan. De resistivitetsdata som finns visar på mycket höga resistiviteter (ofta över 1000 Ohmm). Det är svårt att urskilja på morän och isälvsmaterial och även var gränsen mellan jordlagren och urberget går. Längre söderut visar jordlagren upp en annan resistivitetsföljd. Överst finns högresistiva jordlager (ofta över 1000 Ohmm) med en mäktighet på 20–30 m och under det finns ett lager med en medelresistivitet på cirka 100 Ohmm med en mäktighet på cirka 10 m (fig. 17B). Tolkningen är att det rör sig om omättade respektive mättade sand- och grusavlagringar. Längre söderut, i det område som på jordartskartan domineras av morän och hällar (fig. 11), är mycket av data borta på grund av störning och tolkningen är att det rör sig om torra sediment, troligen morän, på urberg.

Munkeberg gränsar till *Mosshult* i norr, mot *Spånhult* och *Hjo-Karslborg* västerut samt mot *Mullsjön* i sydväst (fig. 13). Jordlagren består här framförallt av morän (fig. 11). I ett stråk norr om Munkeberg och öster om Yremossen finns höga berglägen tvärs igenom området. Längre söderut finns mer isälvsmaterial och moräntäckta sediment (fig. 11). De få resistivitetsdata som finns visar på resistivitetsintervall på 200–500 Ohmm i isälvsmaterialet, vilket pekar på att det mestadels rör sig om torra jordlager.

Det finns endast ett fåtal brunnar som kan bidra med lagerföljdsdata varav de flesta finns i norr vid Fagersanna samt centralt vid Brevik. Västerut gränsar området vid Munkeberg till Yremossen (fig. 13) som under början av 1900-talet karterades inom ett projekt för att inventera södra Sveriges torvtillgångar. Borrprofiler och dagboksanteckningar finns bevarade i SGUs arkiv och visar en mäktighet på upp till 5 m torv underlagrat av sand (Von Post & Granlund 1926).

Längst söderut inom områdets avgränsning finns ett område med relativt låg datatäthet. Jordarterna består enligt jordartskartering av isälvsmaterial och morän. Resistiviteten i jordlagren ligger mellan 100 till över 1 000 Ohmm (fig. 17C). De högre resistiviteterna är knutna till de topografiskt högre liggande områdena och tolkas utgöra torra jordlager på urberg. Längre söderut blir resistiviteten lägre, cirka 100 Ohmm, vilket kan vara ett tecken på att sedimenten är vattenmättade. Flera brunnar visar på sandiga sediment med en mäktighet på 20 till 30 m. Resistivitetsdata visar att det inte finns någon sandsten i området (fig. 17C).

Mosshult-Spånhult: Området ligger mellan de tidigare beskrivna områdena *Hjo-Karlsborg* och *Björkhult-Munkeberg* (fig. 13). Egentligen består området av två områden, *Mosshult* respektive *Spånhult*, men resistivitetsmönstret är lika i de två områdena varför de beskrivs tillsammans. Resistivitetsmässigt är *Mosshult-Spånhult* ett övergångsområde från det högresistiva höjdområdet i väst (*Björkhult-Munkeberg*) till det mer lågresistiva låglänta området vid Vätterns strand (*Hjo-Karlsborg*). Berggrunden består troligen bara av urberg och Visingsösandstenen kommer först öster om detta *Mosshult-Spånhult-område* (fig. 9). Det kan dock finnas tunn sandsten i området men den går dock inte att urskilja resistivitetsmässigt från urberget.

SGU har utfört tre sonderingsborrningar inom området (tabell 1, fig. 5, bilaga 1). Två av dessa (SB8, SB12) ligger direkt väster om Gärdesmossen och visar sand, bedömt som issjösediment som överlagrar morän. Den nordligaste av de två (SB12) visar även grövre isälvssediment. Den tredje sonderingsborrningen (SB3) vid Spånhult gick inte genom den leriga moränen. Det finns endast ett fåtal lagerföljder från borrningar inrapporterade i SGUs databaser inom området, dock pekar de flesta av dessa, samt det stora flertalet närliggande brunnar, på 20–30 m i huvudsak sandiga jordlager.

SGU har i ett tidigare skede utfört en seismikprofil (S10) inom området (fig. 4, se bilaga 4 för detaljerad tolkning). Mäktigheten av jordlagren har tolkats ligga på mellan 35 och 45 m och bestå huvudsakligen av sand och grus. Jämfört med seismikprofilerna inom *Björkhult*-

Munkeberg har profilen vid *Mosshult* som ligger på gränsen till nyss nämnda område mäktigare vattenmättade sediment, där endast de översta 5 m bedöms vara torra.

I den norra delen, vid Mosshult, domineras jordlagren av relativt lågresistiva (40–100 Ohmm) jordarter vanligen med en mäktighet på 20–40 m (fig. 18A–B). Jordlagren som troligen mestadels består av finkorniga sediment med relativt högt lerinnehåll avgränsas av det hög-



Figur 18. A–D. Profiler från väst mot öst inom området *Mosshult-Spånhult*. Profilerna visar resistivitetsfördelningen och tolkning av jordlager och berggrund. **A–B.** Profiler inom *Mosshult*. **C–D.** Profiler inom *Spånhult*. Profilernas läge visas i figur 13. Notera att profil B går från N–S och inte V–Ö som övriga profiler. Terrängytan är draperad med färgkodning från jordartskartan, för teckenförklaring se figur 11. Heldragen linje = bergets överyta. Streckad linje = urbergets överyta där sandstenen överlagrar.

resistiva (ofta 200–500 Ohmm) höjdområdet västerut och österut av mer högresistiva jordlager (100–200 Ohmm, fig. 18A). Ytligt finns framförallt svallsand och torvjord (fig. 11). Tolkning av denna norra del är att områdets jordarter i huvudsak avsatts under olika sjöstadier i en dödissjö. De jordlager med något högre resistivitet i väster består av sand och grus med ursprung från höjdområdet i väster, medan de högresistiva jordlagren öster om Gärdemossen troligen är någon form av terassbildning eller strandvallar från ett issjöstadie. Gärdesmossen som upptar en stor del av områdets norra areal har inventerats på tidigt 1900-tal (Von Post & Granlund 1926) med borrningarna som visar på en 2,5–5 m mäktig torv underlagrat av sand. Torvmarkens centrala delar följer området med lägst resistivitet men upptar en mindre del av det totala jorddjupet (fig. 18A–B).

Jordlagren blir mindre mäktiga söderut inom *Mosshults-området*. Vid en tidigare utförd seismikprofil (S11, se fig. 4 och bilaga 4) ligger urberget högt och jorddjupet är cirka 10 m. Vid Vasabron och längre söderut mot Spånhult blir jordlagren återigen mäktigare. En stor del av resistivitetsdata har i detta övergångsområde rensats bort, den som finns kvar är oftast markant högre (ofta över 150 Ohmm) än vad som är vanligt för jordlagren i *Mosshult-Spånhult* (40–100 Ohmm). Det gäller speciellt vid området med komplexa jordlager (fig. 11) där resistiviteten är 400–500 Ohmm. Tolkningen är att jordlagren är tunnare och ligger på en urbergshöjd samt är torrare (fig. 18B).

I delområdet Spånhult har vanligen jordlagren en resistivitet på mellan 80 till 100 Ohmm (fig. 18C–D). Högre resistivitet (150–250 Ohmm) finns men är då ofta knutet till höjder vilket representerar torrare sediment. Området ligger lägre än området väster om (*Björkhult-Munkeberg*) och flera vattendrag verkar börja ungefär vid avgränsningen mellan områdena (fig. 13). I figur 18C kan man se hur det vattenmättade jordlagret går från att vara överlagrat av mäktiga torra jordlager i väst till att nu ligga uppe vid ytan. Områdets karaktär och resistivitetsvärde pekar på att det delvis kan betraktas som ett utströmningsområde. Inom de östra delarna av Spånhult kan det förekomma Visingsösandsten men troligen finns det bara urberg.

Mullsjön: Området är lokaliserat till Mullsjön och dess närområde (fig. 13). I området finns förutom ATEM-data, en borrning i jord och berg, två sonderingsborrningar, borrhålsgeofysik, och tTEM-data. (fig. 4 och 5). Trots sitt västliga läge är området mer likt området *Hjo-Karlsborg* än de övriga områdena i sin resistivitetsuppbyggnad och därmed även geologiskt.

De dominerande ytliga jordarterna består av sand och grus i form av isälvsmaterial (fig. 11) som sträcker sig från sjön norrut mot Slättås. De översta jordlagren har en relativt hög resistivitet vilket tolkningsmässigt stämmer bra med såväl torra (200–350 Ohmm) som vattenmättade (80–150 Ohmm) sand- och grusavlagringar (fig. 19A). Dessa sandiga sediment underlagras, i större delen av området, av relativt mäktiga jordlager med en något lägre resistivitet på cirka 50 Ohmm. En borrning (BH1) och två sonderingar (SB1 och SB2) visar entydigt att detta lågresistiva lager består av finkorniga jordarter i form av silt och lera (fig. 19, bilaga 1). Under detta lager kommer ett lager med friktionsmaterial som vid BH1 och SB2 består av isälvsmaterial, det vill säga sand och grus. Detta jordlager har en uppmätt mäktighet på som mest 16 m (BH1) och har en resistivitet på 130–200 Ohmm enligt närmsta befintliga ATEM-data (fig. 19, bilaga 2). Resistivitets- och brunnsdata pekar även på att jordlagren norr om Mullsjön är mäktigare i de östra än i de västra delarna (fig. 20) möjligen kan det vara så att en isälv har haft sitt huvudflöde här. Jordlagren representerar olika sjöstadier och Mullsjön har varit betydligt större än den är idag (fig. 10).

SGU utförde tTEM-mätningarna i de centrala delarna av Mullsjöområdet strax norr om BH1 (fig. 4, se bilaga 3). Resultaten visar en liknande resistivitetsuppbyggnad tolkat som (fig. 19B), sand i ytan (100–150 Ohmm), underlagrat av vattenmättad sand i vissa fall lera



Figur 19. Profiler med resistivitetsfördelningen och tolkning av jordlager och berggrund från väst mot öst (**A**) och nord–syd (**B**) inom området *Mullsjön.* Profilernas läge visas i figur 13. Notera att resistivitetsdata kommer från ATEM-data, 3D-grid samt tTEM-data. Terrängytan är draperad med färgkodning från jordartskartan, för teckenförklaring se figur 11. Heldragen linje = bergets överyta. Streckad linje = urbergets överyta där sandstenen överlagrar.



Figur 20. A. Tolkad jorddjupsmodell inom Mullsjön. B. Tolkad utbredning och mäktighet på Visingsösandstenen.

(80–100 Ohmm), därefter sandsten som överst har en resistivitet på 100–200 Ohmm och sedan en låg resistivitet på 40–60 Ohmm som i sin tur följs av högresistivt urberg (fig. 19). Urberget syns dock tydligare i SkyTEM-data vilket inte är så konstigt då tTEM framförallt är till för de ytligare lagren. Det lågresistiva jordlagret blir mer lågresistivt och mäktigare närmare Mullsjön vilket också var fallet i SkyTEM-data. Även tTEM-data pekar på att jordlagren i denna östra del ligger i en dalsänka som syns i sandstenen (fig. 20).

Jordlagren har generellt en hög resistivitet söder om sjön samt i de perifera delarna i norr, väst och öst, i några delar saknas till och med tillförlitliga data, vilket tolkas som tunna och torra jordlager. Norr om, samt under, sjön är jorddjupen betydligt större (fig. 19 och 20) och når mer än 40 m. I området precis söder om Mullsjön vid Varpet finns jordlager på upp mot 20 m. Jorddjupet är svagt sluttande åt norr och öster medan det är snabbare förändringar mot söder och väster (fig. 20). Enligt lagerföljdsinformation från Brunnsarkivet och resistivitets-data kan sand- och grusavlagringarna ligga direkt på urberg eller sandsten medan det i vissa områden ligger morän eller lera mellan. Där sand eller grus ligger direkt på sandsten är det svårt att se exakt var gränsen går. De torvområden som ligger vid sjöns norra delar har en låg resistivitet på cirka 30–50 Ohmm.

Borrhålet vid Svärtan (BH1) undersöktes med geofysisk loggning (fig. 4, se bilaga 2). Tolkning av loggningen ger ett jorddjup på 33–34 m och därunder sandsten. Inga tydliga skillnader kan ses i jordlagren i gamma-data men tack vare kaxprovtagningen kan man se att det sker ett stort skifte vid 18 m med företrädesvis leriga jordlager ovanför och sand och grus mellan 18 och 34 m (bilaga 1, fig. 6). Vid 61 m finns en tydlig gräns som indikeras i såväl resistivitet (sänks) som caliper (ökar) och gamma (ökar), se bilaga 3. Även borrkaxet visar på en förändring här, från ljust beige sandsten ovan till mer rödbrun sandsten under. Denna övergång överensstämmer med den beskrivna undre delen av Visingsösandstenens lagerföljd, där arkosisk sandsten underlagrar mer kvartsrik sandsten (bl.a. Ahrenstedt 2018).

Urbergets överyta sluttar från höjdområdet i nordost för att sedan branta upp i söder och väster (fig. 19) där det även finns hällar. Urberget har resistivitetsintervall från 300 till flera tusen Ohmm. Förutom i de perifera delarna finns det Visingsösandsten i området. Detta var känt tidigare men med hjälp av nya data kan vi bättre avgränsa dess utbredning (fig. 9).

I större delen av området har sandstenen generellt en högre resistivitet (ofta 200–350 Ohmm) än de ovanliggande jordlagren. I de nordöstra delarna (fig. 19) är sandstenen tunnare eller har av någon anledning en lägre resistivitet än i övriga delar av området. Det samma gäller för den undre delen av sandstenen som ligger inom resistivitetsintervall på 30–150 Ohmm. Sandstenskroppen stupar åt sydväst (fig. 19) vilket tolkas vara förkastningsbetingat och mäktigheten är som mest 150 m (fig. 20B). Visingsösandstenens utbredning i Mullsjöområdet och dess förlängning till området *Hjo-Karlsborg* har ändrats något. Tidigare har det tolkats finnas ett kontinuerligt sandstenstäcke mellan Mullsjön och sandstenen vid Vättern men det finns inga stöd för den tolkningen i varken brunns- eller resistivitetsdata.

Utvalda områden med hydrogeologisk tolkning

Ur en hydrogeologisk synvinkel har vi, baserat på tolkningar gjorda på resistivitetsdata, valt ut åtta delområden och beskrivit dessa. I den sedimentära berggrunden rör det sig om området Karlsborg-S. Fågelås, medan grundvatten som finns i sand- och grusavlagringar beskrivs i områdena Kråks, Kleven, Stora Röå, Älgarås, Fagersanna, Mullsjön och Källebo-Åsen (fig. 21). Områdenas avgränsningar är ungefärliga då förändringar i geologi och därmed resistivitet inte är skarp.



Figur 21. Utpekade områden med hydrogeologisk tolkning samt lokalisering av profiler, borrningar och skruvborrningar/sonderingar som utförts av SGU under projektets gång. För teckenförklaring jordartskarta se figur 11.

Karlsborg-S. Fågelås

Grundvattenmagasinet Karlsborg-S. Fågelås (WA22881836, fig. 12) utgörs av en porakvifer i Visingsösandstenen och finns i hela den västra delen av undersökningsområdet samt vid Mullsjön. Uttag ur sandstenen har tidigare gjorts för kommunal vattenförsörjning både vid Karlsborg och Hjo. Tidigare bedömdes uttagsmöjligheterna ligga mellan 2000 och 6000 l/ timme men flera brunnar visar på kapacitet över 20 000 l/timme. Med hjälp av ATEM-data finns det ett förslag på ny avgränsning av grundvattenförekomsten (fig. 21). Vår bedömning är även att uttagskapaciteten kan höjas till kapacitetsklassen 6 000–20 000 l/timme.

De övre delarna av Visingsösandstenen har en relativt hög resistivitet på mellan 300 och 500 Ohmm vilket vanligen är mer än de ovanliggande jordlagren. I den undre delen av Visingsösandstenen är däremot resistiviteten på mellan 35 och 250 Ohmm vilket tyder på att sammansättningen och troligen de hydrauliska förhållandena är annorlunda i denna del. Den övre delen av sandstenen är ofta dåligt litifierad vilket gör det svårt att skilja på akviferen i jordlager och berggrunden i borrningar. Två av borrningarna (BH2 och BH3) som når ned i Visingsösandstenen hade rasat igen redan några månader efter borrning vilket tyder på en löst sammansatt bergart. Det är troligt att akviferer i jordlagren samverkar med akviferen i sandstenen. Nybildning av grundvatten sker huvudsakligen i jordlager i höjdområdet i väster samt i mindre del från direkt ovanliggande jordlager, företrädesvis från sand- och grusavlagringar. Flera av nybildningsområdena är att betrakta som akviferer som diskuteras i denna rapport.

Tre borrningar utfördes i Visingsösandstenen, BH1 (Svärtan), BH2 (Ulvhult) och BH3 (Torpet). Lagerföljderna redovisas i bilaga 1 och 2. I slutet av januari 2020 utfördes provpumpning i alla tre brunnar (tabell 3). I BH1 som hade artesiskt tryck och ett stort tillflöde gick det inte att sänka grundvattenytan under rörets överkant och på så sätt få data från en fullständigt lyckad provpumpning. Med ett uttag på drygt 0,5 l/s fanns fortfarande ett stabilt artesiskt flöde över rörets överkant. Trots förhållandena kunde ett minimivärde för transmissivitet (T) och hydraulisk konduktivitet (K) estimeras (tabell 3). Det är troligt att resultaten från provpumpningen av BH1 ger klart underskattade värden då kapaciteten uppskattades till 10000 l/timme vid borrtillfället. Vid BH2 som också var artesiskt hade borrhålet rasat in vid foderrörets underkant och vid provpumpning var det mycket sediment i vattnet. Här gjordes framgångsrikt två separata provpumpningar med olika flöden, 0,25 l/s vid det första och 0,14 l/s vid det andra. Faktumet att BH2 rasat in påverkar troligtvis beräkningar för vattenmängd och kapacitet. Det gjordes ingen beräkning av vattenmängd vid borrtillfället. Det tredje borrhålet (BH3) hade också rasat in efter foderrörets slut vid provpumpningstillfället. En provpumpning gjordes med ett flöde på 0,125 l/s. Initialt gjordes även försök till en provpumpning med högre flöde, dock blev avsänkningskurvan alltför brant. Vid borrtillfället uppskattades vattenmängden till cirka 2 l/s (cirka 7 000 l/timme).

Grundvattennivån i de artesiska borrhålen mättes genom tryckskillnaden vid återförslutning av locken. Vid BH1 uppmättes ett grundvattentryck på 94 cm ovanför markytan (137,34 m ö.h.) och således ett par meter över vattenytan i Mullsjön som är belägen cirka 133 m ö.h. Vid BH2 som också var artesiskt var den uppskattade trycknivån 2,35 m ovanför markytan (102,4 m ö.h.), och vid BH3 9,54 m under markytan (97,92 m ö.h.) vilket kan jämföras med Vätterns yta på 88,3 m ö.h. vid tidpunkten. Visingsösandstenens överyta vid borrhålen ligger på 98 (BH1), 77 (BH2) respektive 79 (BH3) meter över havet (fig. 15B). Akviferen i Visingsösandstenen är att betrakta som en sluten akvifer och verkar ha ett övertryck.

I området vid Mullsjön har sandstenen en liknande uppbyggnad med en övre högresistiv del och en undre mer lågresistiv del. Mäktigheten blir större mot sydväst och är mer än 100 m (fig. 20B). Den högresistiva delen har enligt data störst mäktighet relativt centralt under Mullsjön och blir mindre mäktig för att helt försvinna mot nordost (fig. 19). Grundvattenmagasinet i Visingsösandsten vid Mullsjön är åtskilt från övriga delar av sandstenen av en urbergsrygg (fig. 22).

Det finns stora mäktighetsskillnader på Visingsösandstenen vilket kan vara viktigt att känna till både om man ska anlägga en brunn för vattenförsörjning men även om man tänker göra brunnar för geoenergi. Som exempel kan man ta området vid den urbergsrygg som tolkats i höjd med Österbo och Frökärr (fig. 22). Brunnar nedförda vid till exempel 4200 respektive 5000 m kommer att ha helt olika förutsättningar för både grundvattenuttag samt värmeutvinning då mäktigheten på Visingsösandstenen och akviferen skiljer mer än 50 m.

Tabell 3. Tabellen visar beräknad transmissivitet och hydraulisk konduktivitet efter utvärdering av provpumpningarna (januari 2020). Stationär utvärdering, Moyes ekvation (Moye 1967). BH 2 har kompenserats för helt för artesiskt tryck medan BH 1 endast kompenserats delvis på grund av otillräcklig avsänkning.

Borrhål	T [m²/s]	K [m/s]
BH1 Svärtan	2,0E-04	2,7E-06
BH2 Ulvhult	6,4E-05	2,0E-06
BH3 Torpet	4,8E-05	1,3E-06



Figur 22. Figurer inom området *Karlsborg-S. Fågelås.* **A.** Visar en geologisk 3D-modell från syd–öst där tvärsnitt gjorts i höjd med Hjo-Mullsjön i söder samt genom Visingsösandstenen längs Vättern i öster. **B.** Profilen visar resistivitetsfördelningen och tolkning av jordlager och berggrund. Profilens läge visas i figur 21. Terrängytan är draperad med färgkodning från jordartskartan, för teckenförklaring se figur 11. Heldragen linje = bergets överyta. Streckad linje = urbergets överyta där sandstenen överlagrar.

Kråks

I norra delen av undersökningsområdet, söder om Karlsborg, finns mäktiga isälvs- samt svallsandsavlagringar som troligen innehåller ett eller flera grundvattenmagasin (fig. 21). I beskrivningen nedan inkorporeras även området vid själva samhället Karlsborg samt Karlsborgs fästning, norr om det egentliga undersökningsområdet.

Inom området finns ett stort antal borrningar som visar på mäktiga, ofta 25–30 m, sandlager. Jorddjupet verkar relativt jämnt inom området (fig. 23). Resultat från ATEM-mätningarna visar på jordlager med en resistivitet på i medeltal 100 Ohmm vilket kan tyda på vattenmättade sand- och grusavlagringar (fig. 23). Höjdområden, ofta bestående av isälvsavlagringar eller moränkullar, har ofta en resistivitet på 200–450 Ohmm och får betecknas som mer eller mindre torra (fig. 23).

Grundvattentillgången har i en tidigare regional utvärdering av de två inom området liggande isälvsavlagringarna (se fig. 11), bedömts vara låg till måttlig (1–5 l/s). Grundvattenmagasinet har ett begränsat nybildningsområde då största delen av området ligger åtskilt av Vättern. Då det rör sig om ett relativt stort område med mäktiga sand- och grusavlagringar är vår bedömning att uttagskapaciteten ligger något högre än tidigare bedömning, gissningsvis cirka 10–15 l/s. Dessutom ligger sand- och grusavlagringarna på Visingsösandstenen, som också är ett grundvattenmagasin (Karlsborg-S. Fågelås), vilket gör att dessa akviferer kan samspela med varandra och på så sätt kan uttagskapaciteten öka ytterligare. Närheten till Vättern gör att det även kan finnas förutsättningar för inducerad infiltration om man anlägger brunnar relativt nära strandkanten.

Magasinet utnyttjas troligtvis i viss mån för enskild vattenförsörjning även om stora delar av området inklusive Gräshult och Kråk nu har kommunalt VA. Sand- och grusavlagringarna inom området saknar enligt resistivitets- och brunnsdata till stor del mäktiga täta jordlager. Det finns relativt stora områden med lera framförallt i de södra delarna av området men det mesta pekar på att det är ytliga relativt tunna lerlager och att dessa underlagras av sand och grus (fig. 11).

Mellan grundvattenmagasinen Kleven och Kråks är det möjligt att det finns hydraulisk kontakt. Preliminär gräns mellan magasinen är dragen vid en ytvattendelare (fig. 21). På jordartskartan kan man se att det sticker upp isälvsmaterial i och i utkanten av lerlager (fig. 11) vilket pekar på att det troligen finns sand under leran. De brunnar som finns här pekar i huvudsak på sandiga lager. Resistiviteten ligger på cirka 100 Ohmm vilket kan tolkas som vattenmättad sand och grus, förutom i de ytliga lagren där det är jordartskarterat som lera och resistiviteten i ytan kan vara något lägre. (fig. 11).



Profilens läge visas i figur 21. Terrängytan är draperad med färgkodning från jordartskartan, för teckenförklaring se figur 11. Heldragen linje = bergets överyta. Streckad linje = urbergets överyta där sandstenen överlagrar.

Kleven

I de norra delarna av undersökningsområdet ligger grundvattenmagasinet Kleven. Området gränsar i väster till grundvattenmagasinet Fagersanna som beskrivs nedan och gränsen mellan magasinen utgörs av en topografiskt betingad rörlig grundvattendelare (fig. 12 och 21). Mot nordost gränsar Kleven mot grundvattenmagasinen Kråks och det kan finnas hydraulisk kontakt mellan dessa, se diskussion i beskrivning av Kråks. En preliminär gräns mellan magasinen har dragits vid en ytvattendelare (fig. 21).

I de norra delarna av, samt precis utanför, området intill Kopparsjön finns en preliminär sand- och grusförekomst (WA83568312) inom vilken det finns både vattentäkt (Mölltorp) och grustäkt. Undersökningar som gjorts vid vattentäkten visar på upp mot 20 m mäktiga jordlager bestående av mestadels grovkorniga avlagringar med inslag av morän på djupet. Ett omfattande infiltrationsområde samt möjligheten till inducerad infiltration från Kopparsjön gör området ytterligare intressant ur uttagssynpunkt. Utifrån ATEM-data tolkas förekomstens utbredning vara avsevärt mer omfattande än befintlig preliminär förekomst (VISS) och sträcker sig mot sydsydväst. Vi har trots att den till större delen ligger utanför undersökningsområdet inkorporerat grundvattenförekomsten i Kleven då den enligt brunnar har en liknande uppbyggnad som närliggande delar av Kleven (fig. 21).

Resistiviteten i området varierar vilket speglar såväl geologin som hydrogeologin. Jordlagrens mäktighet varierar mellan 20 och 40 m (fig. 14). I väster vilar jordlagren direkt på urberg medan området strax väster om väg 195 har Visingsösandsten som ytlig berggrund. Längst i väster, i höjdområdet (fig. 21), saknas det data eller så är resistiviteten riktigt hög (över 1000 Ohmm) vilket pekar på relativt torra sand- och grusavlagringar eller morän. Vid Gärdemossen sänks resistiviteten (40–100 Ohmm) betydligt medan det norrut mot Mölltorp är resistiviteter på cirka 100 Ohmm som tolkas som vattenmättad sand och grus. Flera borrningar visar på att det finns sand- och grusavlagringar under de leriga jordlagren och det är möjligt att grundvattenmagasinet sträcker sig ytterligare längre österut. Borrhålet BH3 (Torpet) visar på cirka 30 m mäktig sand, och grundvattennivån i Visingsösandstenen på 9,54 m under markytan (97,92 m ö.h.).

Grundvattnets transportriktning är från höjdområdet i väster, som torde utgöra det primära nybildningsområdet för grundvattenmagasinet Kleven. Uttagskapaciteten bör vara större i de östra delarna, men även de delar där akviferen delvis är täckt av tunna till mäktiga jordlager i form av torv. För att minimera risken med höga humushalter, vilket är vanligt i områden med torv, bör man dock inte göra för stora uttag för nära området med torv. Delar av området har bedömts ha stor grundvattentillgång med uttagsmöjligheter på 5–25 l/s. Resistivitetsdata pekar mot att det är möjligt att det finns sand även under torven och den leriga moränen vid Vättern (fig. 24). Dock saknas det brunnar och därmed säkra lagerföljder. Vi har i detta skede valt att inte ta med dessa delar i avgränsningen (fig. 21).



Figur 24. Profil genom området med grundvattenmagasinet Kleven. Profilens läge visas i figur 21. Terrängytan är draperad med färgkodning från jordartskartan, för teckenförklaring se figur 11. Heldragen linje = bergets överyta. Streckad linje = urbergets överyta där sandstenen överlagrar.

Fagersanna

Inom ATEM-området ligger grundvattenförekomsten Fagersanna (WA40564468, fig. 12 och 21). I området finns dels en bedömning av grundvattentillgångar i regional skala samt en ej publicerad tolkning från SGU 2005. Den senare har legat till grund för geometrisk avgränsning av grundvattenförekomsten WA40564468 (se vidare i VISS). SGU kommer att göra en beskrivning av grundvattenmagasinet Fagersanna senast 2021 med publicering i SGUs Serie K. Det kommer att innebära förändringar av grundvattenförekomstens geografiska avgränsning inom vattenförvaltningen.

ATEM-data från det utpekade delområdet (fig. 21) har till stora delar rensats bort på grund av störda data (fig. 4). Då data rensats bort på grund av att det saknas ledande lager blir tolkningen att områdets jordarter och berggrund saknar grundvatten i större mängd (för diskussion se Brolin m.fl. 2020). Studier av rådata ger generellt höga resistivitetsvärden (över 300 Ohmm) vilket gör att en tolkning är att jordlagren mestadels är torra. Detta gäller speciellt de östra delarna av grundvattenmagasinet som ligger högt upp i terrängen. De skruvborrningar och sonderingar (fig. 4, tabell 1) som utförts av SGU visar att det förekommer sandig morän inom området (bilaga 1). Det är främst i den västra delen, bland annat vid Fagersanna, som det finns tydliga indikationer från flera borrningar på att den dominerande jordarten är sand och grus och mäktigheten på dessa jordlager är 20–40 m. Här i den västra delen saknas SkyTEM-data på grund av bebyggt område. Lokalt har området vid Björkhult och nordväst ut en något lägre resistivitet vilket kan tyda på att här finns något bättre uttagsmöjligheter än öster- och söderut.

En översiktlig hydrogeologisk tolkning av detta delområde är att de östra delarna utgör infiltrationsområden och uttagsmöjligheterna bedöms vara låga till måttliga (1–5 l/s). I de centrala och västra delarna finns goda möjligheter för större grundvattenuttag (bedöms främst vara 5–25 l/s men kan även vara högre, fig. 25). Ett antal källsprång förekommer vid foten av höjden öster om byn Björkhult. Grundvattnets strömriktning är från höjdområdena i öster mot sjön Örlen (fig. 25). Magasinets östra gräns är avgränsat på topografiska grunder och tolkas som tänkbart läge för grundvattendelare (fig. 25). I nära anslutning till sjön Örlen är det troligt att man kan öka uttagskapaciteten med hjälp av inducering av sjövatten. Österut gränsar Fagersanna mot grundvattenmagasinet Kleven som beskrivs ovan.



Figur 25. Preliminär tolkning av akviferen Fagersanna, avgränsning, grundvattenflöde och bedömd uttagsmöjlighet.

Älgarås

Inom ATEM-området vid Älgarås återfinns den östra delen av grundvattenförekomsten WA56579928 (fig. 12 och 21). Denna förekomst fortsätter mot väster och inkluderar sand- och grusavlagringarna vid Tibro. I området finns dels en bedömning av grundvattentillgångar i regional skala, dels en ej publicerad tolkning från SGU 2005. Den senare har legat till grund för geometrisk avgränsning av grundvattenförekomsten. SGU kommer att göra en beskrivning av det grundvattenmagasin som området vid Älgarås ingår senast 2021 med publicering i SGUs Serie K. Det kommer att innebära förändringar av grundvattenförekomstens geografiska avgränsning inom vattenförvaltningen.

ATEM-data från detta delområde (fig. 21) har till stora delar rensats bort på grund av störda data (fig. 4). Då data rensats bort på grund av att det saknas ledande lager blir tolkningen att områdets jordarter och berggrund saknar grundvatten i större mängd (för diskussion, se Brolin m.fl. 2020). De resistivitetsdata som finns inom området pekar mot en östlig del, som utgör själva höjden, med relativt torra jordlager (300–500 Ohmm) och en västlig del, i det låglänta området, med mer vattenmättade jordlager på cirka 100–200 Ohmm. Jordlagren vilar på urberg och mäktigheten är oftast relativt liten, cirka 5–10, undantagsvis 15 m (fig. 14).

Grundvattnets strömning sker från höjdområdena i öster mot det mer låglänta jordbrukslandskapet vid Älgarås och Grimstorp i väster (fig. 26). Uttagsmöjligheterna inom området vid Älgarås som ingått i ATEM-undersökningen antas i huvudsak vara begränsad och i den undre delen av intervallet 5–25 l/s, fig. 26). Magasinets östra gräns är avgränsat på topografiska grunder och tolkas som tänkbart läge för grundvattendelare. Österut gränsar Älgarås mot det i denna rapport föreslagna grundvattenmagasinet Stora Röå (fig. 21) som beskrivs nedan. Området består av jordlager, med varierande sammansättning och mäktighet. En hel del torvområden är insprängda i isälvsavlagringen och kan förväntas motsvara grundvattennivåer.



Figur 26. Preliminär tolkning av akviferen Älgarås, avgränsning, grundvattenflöde och bedömd uttagsmöjlighet.

Stora Röå

I de centrala delarna av undersökningsområdet ligger grundvattenmagasinet Stora Röå (fig. 21). Den västra avgränsningen av magasinet utgörs av en relativt fast grundvattendelare som är topografiskt betingad med relativt höga berglägen (fig. 11) och en höjd som sluttar åt både väster och öster (fig. 21).

Resistiviteten i området är generellt hög (över 500 Ohmm) vilket pekar på i huvudsak torra sand- och grusavlagringar eller morän. I den västra delen är jordlagren 10–20 m mäktiga och vilar på urberg (fig. 27). Österut ökar mäktigheten uppemot 50 m. I sonderingsborrning 5 (SB5, BMW196343) sattes ett grundvattenrör. Vid fältbesök i januari 2020 var röret helt torrt varför provpumpning inte kunde ske. Anledningen är troligen att filtret sitter i moränen istället för det underlagrande isälvssedimentet (jämför lagerföljd i bilaga 1). Det finns några områden med något lägre resistivitet (50–150 Ohmm) på större djup i jordlagren vilket kan tolkas som mer vattenförande sediment. Tolkningen är att den lågresistiva undre delen av jordlagren är den mättade zonen och att områden med denna resistivitetsprofil innehåller mer grundvatten och därmed är en bättre akvifer (fig. 27, se även fig. 17B).

Ungefär där de moräntäckta sedimenten börjar komma (i höjd med väg 195, se fig. 21) kommer även Visingsösandstenen in som underlagrande berggrund. I detta område är resistiviteten generellt lägre vilket tolkas som en större mäktighet med grundvattenfyllda sediment. Borrhål 2 (Ulvhult) visar att det finns sand- och grusavlagringar även under den leriga moränen på denna plats (bilaga 1). Tolkningen är att det isälvsmaterial som går i dagen i väster vid höjdområdet fortsätter österut under mindre genomsläppliga sediment, till största delen bestående av morän, kanske ända fram till Vättern. Vi har i detta läge dragit gränsen något längre västerut än strandkanten (fig. 21).

Vid gränsen mellan de resistivitetsmässigt åtskilda delområdena Mosshult-Spånhult och Björkhult-Munkeberg (fig. 13, se tidigare geologisk beskrivning) finns ett antal mindre sjöar och dammar och här börjar även ett antal mindre bäckar, några av dem troligen som källflöden. Vår tolkning är att grundvattenytan är ytlig i detta område och att mycket av vattnet i ytvattendrag och sjöar är grundvatten som läcker ut västerifrån (fig. 27, se även fig. 18C). Inom grundvattenförekomsten ligger även sjön Röåsjön som enligt uppgifter är 8 m djup och saknar såväl tillflöde som frånflöde

Grundvattnets transportriktning sker från höjdområdena i väster, som primärt fungerar som nybildningsområde, mot det låglänta jordbrukslandskapet vid Vättern (fig. 27). Bäst uttagskapacitet torde finnas i de centrala delarna där den mättade zonen är som störst eller de östra delarna där akviferen är täckt av tunna till mäktiga jordlager i form av morän respektive lerig morän. I denna del finns även akviferen i Visingsösandstenen (Karlsborg-S. Fågelås) som jordmagasinet troligen samverkar med.



Figur 27. Profil inom av grundvattenmagasinet Stora Råö. Profilens läge visas i figur 21. Terrängytan är draperad med färgkodning från jordartskartan, för teckenförklaring se figur 11. Heldragen linje = bergets överyta. Streckad linje = urbergets överyta där sandstenen överlagrar.

Mullsjön

I området finns idag ingen utpekad grundvattenförekomst i vattenförvaltningsarbetet. SGU kommer att göra en beskrivning av grundvattenmagasinet som publiceras i SGUs Serie K samt göra en magasinsavgränsning till vattenförvaltningsarbetet. Området kring Mullsjön har kommunal vattenförsörjning men det finns även en del grävda brunnar i området. Sjön som finns inom det utpekade området med samma namn är belägen i västra delarna av undersökningsområdet på cirka 133 m ö.h., har ett medeldjup på 2,7 m och en area på cirka 4 km². Sjön Mullsjön är rund, ligger i en skålform och har ett utlopp österut mot Vättern.

De tre borrningar som SGU utfört (fig. 5, bilaga 1) ger en tydlig bild av jordlagrens uppbyggnad i området. De ytliga jordlagren består av sand och grus i form av isälvssediment och postglacial sand. I området sker en hög grundvattenbildning dels på grund av genomsläppliga sediment, dels för att dalavlagringen ligger i en skålform. Dessa övre jordlager utgör en öppen akvifer med en mäktighet på några meter som är tillräcklig för grundvattenuttag i enskilda brunnar. I de områden som tidigare varit sjö (betydligt större område än nuvarande, jämför fig. 10) finns relativt mäktiga lerlager (upp till 15 m) som underlagrar det översta jordlagret. Detta leriga jordlager är att betrakta som en akviklud, materialet innehåller grundvatten men är ogenomsläppligt, och grundvattenuttag därmed omöjliga. Under dessa sediment finns det, i alla fall i vissa områden, en sand- och grusavlagring med mäktighet på minst upp till 20 m. Den undre akviferens huvudsakliga mäktighet och utbredning finns troligen främst norr om sjön (fig. 28). I utkanten av området utgör jordlagren huvudsakligen infiltrationsområden med måttliga uttagsmöjligheter (fig. 28).

Grundvattnets transportriktning sker huvudsakligen från norr samt från sidorna i väst och öst. Tillrinningsområdet är något större än själva sand- och grusavlagringen och inkluderar troligen ett område till närmsta topografiska höjdpunkt i norr, väster och öster (fig. 28). Området hyser en relativt stor grundvattentillgång med uttagsmöjligheter på 5–251/s. Det är inte omöjligt att det finns möjlighet till inducering från sjön Mullsjön men det är inte något som kunnat klarläggas i denna undersökning. Det finns dock mäktiga lerlager som lokalt talar emot att så är fallet. Det finns högst troligen en kontakt mellan den undre akviferen i jord och den underliggande akviferen i sandstenen. Akvifererna samspelar troligen vilket gör att kapaciteten i Visingsösandstenen är relativt hög då stora uttag härifrån torde få vatten även från akviferen i jordlagren.

Vid borrning av BH1 i december 2019 uppskattades vattenmängden till 10000 l/timme eller 2,8 l/s från Visingsösandstenen. Vid provpumpningen i januari 2020 kunde det konstateras att brunnen flödade artesiskt med mer än 0,5 l/s. Det uppmätta flödet räckte dock inte till att sänka vattenytan under rörets överkant varvid vatten fortsatte att rinna över. Att uppskatta uttagskapaciteten är således svårt, det går dock att sätta 0,5 l/s som ett absolut minimivärde. Även den beräknade hydrauliska konduktiviteten för BH1 bör ses som ett minimivärde. Vid BH1 är jordlagren avskärmade med foderrör och uttagskapaciteten är därmed knuten till grundvattenmagasinet i Visingsösandstenen. Då magasinen troligen kommunicerar med varandra och trycknivån i bergmagasinet på flera ställen verkar vara artesiskt kan uppskattningen ändå ge en viss fingervisning om storleken på möjlig uttagskapacitet. SB2 gav vid tillfället för borrningen bra med vatten från de nedre lagren (isälvsmaterial) som även var lätta att borra. Lagerföljden i SB2 tyder på ett slutet magasin i jord (bilaga 1). Vid BH1 uppmättes grundvattenytan till 94 cm ovanför markytan (137,12 m ö.h.) och vid SB2 är trycket också artesisk och uppmättes till 17 cm över markytan (140,42 m ö.h.). Båda trycknivåerna ligger därmed ett par meter över Mullsjöns vattenyta på cirka 133 m ö.h. Den undre akviferen i jordlagren och i Visingsösandstenen utgör delvis slutna akviferer.



Tillrinningsområde

[] Undre akvifär i jordlager **[**] Akvifär i den sedimentära berggrunden

Figur 28. Preliminär hydrogeologisk tolkning av tillrinningsområden och akviferer inom området Mullsjön. A. Tillrinningsområde. B. Övre akvifer i jordlager. C. Undre akvifer i jordlager. D. Akvifer i Visingsösandstenen.

Källebo-Åsen

Nordväst om Hjo finns en sand- och grusförekomst som tidigare använts för uttag till kommunalt dricksvatten, vid vattentäkterna Åsen och Källebo (fig. 12 och 21). Området är beläget 140–150 m ö.h. vilket kan jämföras med Hjo som ligger på en höjd av cirka 100 m ö.h. Denna topografiska skillnad tillsammans med de naturligt förekommande källorna kring Källebo gård (< 0,5l/s) har historiskt sett gjort att området varit attraktivt för uttag av grundvatten.

Vattentäkten vid Källebo togs i bruk i slutet på 1800-talet med en tillförselledning under självtryck från ytliga sandavlagringar i en ravin vid Källebo gård in till Hjo. Vattenuttaget kompletterades sedan i början på 1900-talet med nya brunnar belägna vid Åsen 600 m söder om Källebo, för att möta en ökad efterfrågan. Vattentäkten vid Åsen bestod initialt av en serie grunda brunnar nerförda i sandavlagringen. I ett senare skede tillkom en sänkbrunn och därefter en borrad brunn i urberget innan grundvattnet helt kopplades bort 2000. Under en period dessförinnan hade man kompletterat grundvatten från täkterna med vatten från Vättern, för att slutligen övergå helt till detta alternativ. Då grundvattnets kvantitet och kvalitet tidigare inte ansetts tillräcklig finns det i dagsläget inte någon tanke att använda brunnarna som reservvattentäkt även om vattenskyddsområdet vid Åsen finns kvar. Troligtvis tar fortfarande ett fåtal fastigheter vatten från Källebo för enskilt bruk.

Mycket av ATEM-data från området har rensats bort på grund av störda data. Rådata samt befintliga lagerföljdsuppgifter från brunnsarkiv indikerar ett jorddjup på 15–25 m bestående av morän, isälvssediment och sand men även en del finkorniga sediment (fig. 29). Jordlagren har en resistivitet på 100–150 Ohmm medan urberget har en betydligt högre resistivitet (cirka 500 Ohmm). Området är beläget på en urbergsklack, som skiljer Visingsösandstenen vid Mullsjön från sandstenen österut mot Vättern, varpå jordarterna direkt överlagrar urberg (fig. 29).

Den översiktliga hydrogeologiska tolkningen av området blir att det rör sig om ett relativt litet infiltrationsområde som följer topografin och har ett grundvattenflöde från norr mot söder. Infiltrationen sker framförallt i det isälvsmaterial som går i dagen (fig. 21 och 29). Uttagskapaciteten i jordlagren har vid en tidigare bedömning satts till 5–25 l/s. Vår bedömning är att uttagskapaciteten ligger i den lägre delen av intervallet, gissningsvis cirka 10 l/s. Grundvatten flödar under normala förhållanden mot lågpunkter och bidrar säkerligen med flöde i Hjoån under delar av året.



Figur 29. Profil med geologisk modell över området vid akviferen Källebo-Åsen. Profilens läge visas i figur 21. Notera att Visingsösandstenen saknas inom området för grundvattenförekomsten Källebo-Åsen, som delvis finns inom det streckade området.

SLUTSATSER OCH DISKUSSION

En fullständig analys av all data som samlats in i samband med ATEM-undersökningarna i Västergötland är tidskrävande och SGU har inte haft de möjligheterna i detta skede. Rapporten visar på vilka möjligheter som finns med ATEM-data genom att översiktligt beskriva områdesvis geologisk uppbyggnad för hela undersökningsområdet men även utföra mer noggranna beskrivningar i de områden som verkar hydrogeologiskt intressanta. Den stora mängden data möjliggör för andra intressenter som till exempel kommuner och konsulter att göra fördjupade analyser av de geologiska och hydrogeologiska förhållandena i området. Det kan exempelvis röra sig om vattentäktsområden där kommunerna har mer lokala data som kan förbättra tolkningarna ytterligare. Resultaten från de utvärderingar och tolkningar som utförts och presenteras i rapporten visar även hur man kan förbättra den geologiska kunskapen genom att kalibrera och verifiera tolkningar av resistivitetsdata med till exempel borrning (bilaga 1) geofysiska borrhåls- (bilaga 2) och markundersökningar (bilaga 3 och 4).

ATEM-metodens möjligheter och begränsningar

ATEM är en bra och effektiv metod för att samla in data över stora områden. Metoden ger dessutom information om jord- och berglager på djupet som få andra luftburna mätmetoder gör. Dess begränsningar utgörs dock av att de geologiska förutsättningarna måste vara på vissa sätt för att metoden ska kunna ge riktigt bra och pålitliga resultat. TEM-mätningar förutsätter att det finns något lågresistivt lager av en viss mäktighet så att en inducerad ström kan fortplanta sig genom marklagerna. Utan detta blir signalen endast brus och kan i många fall behöva rensas bort då det inte ger någon tillförlitlig data. Generellt utgörs dessa lågresistiva lager av mäktiga lager av lera, sedimentärt berg eller saltvattenpåverkade enheter.

Inversionsmetodiken för att ta fram resistivitetsdata bygger på antagandet att resistiviteten punktvis varierar med djupet, den är med andra ord en endimensionell modell. Det förutsätts också att marken är uppbyggd av plana parallella horisontella och homogena lager. I områden där geologin liknar dessa förutsättningar fungerar inversionsmetoden mycket bra. De lokala modellerna som är uppbyggda som enskilda 1D-modeller utgör tillsammans en quasi 3Dmodell. Dessa grova antaganden har visat sig fungera bra och leder till realistiska resultat, även om den sällan beskriver verkligheten på ett helt korrekt sätt. Problem uppstår när snabba laterala variationer finns, vid kraftigt lutande lager, förkastningar och branta strukturer. Då är även enskilda sonderingar påverkade och modellen kan inte ta hänsyn till det på ett korrekt sätt. I nuläget finns inga tillgängliga renodlade tredimensionella inversionsprogram som kan hantera de stora mängder data som redovisas här. Inversionmetoden som har använts i området ger upphov till gradvisa övergångar mellan olika resistiviteter (så kallad "smooth inversion"). Fördelen med detta är att den är enkel att tillämpa och ger ett bra resultat över flera olika geologiska förutsättningar. Nackdelen med metoden är att alla övergångar blir "mjuka" och exakta lagergränser är svårare att identifiera. För mer information om bearbetning och inversion inom området hänvisas till datarapporten för området (Brolin m.fl. 2020).

Kopplingen mellan resistivitetsvariationer och olika geologiska enheter kräver både kunskaper om mätmetoden och bearbetning samt geologisk och hydrogeologisk kunskap om geologin och dess bildningsprocesser. Den kopplingen är lokalt betingad och kan inte överföras från ett undersökningsområde till ett annat, även om det finns generella likheter. Arbetet att sätta samman resistivitet och annan information måste göras för varje undersökt område. Resistivitetsdata kompletteras med andra geofysiska mätningar, geologiska konceptuella modeller och framför allt tillgång på lagerföljder för att tolkas till geologi. En av de första sakerna man gör i tolkning av resistivitetsdata är att bestämma de olika geologiska materialens resistivitetsintervall (tabell 2). En svårighet är att dessa ofta överlappar varandra, man kan alltså inte göra en direkt översättning från resistivitet till geologiskt material.

Resistivitetsdata från ATEM-undersökningarna har i områden med viss geologi visat sig vara tillförlitliga för kartläggning av jordlagrens mäktighet. Det rör sig om områden med jord- och berglager med en resistivitet på under 300 Ohmm. Däremot är förhållandena sådana att mycket data rensas bort i vissa områden (fig. 4) Då rör det sig antingen om områden med infrastruktur, eller att jordlagren är torra och ligger på urberg.

Den här rapporten redovisar en översiktlig tolkning och presentation av möjliga områden för bra tillgång på grundvatten i jordlagren och i den sedimentära berggrunden. Brolin m.fl. (2020) beskriver mer ingående ATEM-metoden, bearbetning och inversion av data. Det är viktigt att betona att ATEM-data endast ska användas för en översiktlig avgränsning av områden. För att noggrannare bedöma uttagsmängder, tillrinningsområden, grundvattenbildning etc., behövs förfinade undersökningar i form av till exempel geofysiska markmätningar, borrningar och provpumpningar.

Geologisk och hydrogeologisk tolkning

ATEM-data har visat sig fungera väl när det gäller att identifiera och avgränsa var berggrunden består av Visingsösandsten respektive urberg (fig. 15). Visingsösandstenen har ett resistivitetsintervall mellan 30 och 300 Ohmm medan urberget oftast ligger högt över 300 Ohmm. Längs Vätterns förkastningszon kan man se stora mäktighetsskillnader i Visingsösandstenen på respektive sida av förkastningen. Det har även lett till att vi har kunnat göra en ny och förbättrad avgränsning av Visingsösandstenens utbredning (fig. 9) men kanske ännu viktigare, en bättre bedömning av grundvattenförekomsten Karlsborg-S. Fågelås (WA22881836, fig. 21). Vi bedömer att uttagskapaciteten i Visingsösandstenen bör ligga mellan 6000 och 20000 l/ timme vilket är högre än tidigare klassning (2000–6000 l/timme). Detta baseras på ett större antal nya brunnar, resistivitetsdata samt tolkning av kontakt till ovanliggande sandiga och grusiga jordlager.

När det gäller jordarterna har det i de flesta områden gått att urskilja jord från berg (fig. 15). Svårigheter har uppstått i områden med torra jordlager på urberg samt i områden med sand och grus på Visingsösandstenen. I det första fallet är resistiviteten så hög att det inte är meningsfullt att göra tolkningar baserat på resistivitetsvärden (se även diskussion ovan i avsnittet *ATEM-metodens möjligheter och begränsningar*). När det gäller sand och grus på Visingsösandsten är resistivitetsintervallen överlappande och metoden ger ingen hjälp att sätta skarpa gränser mellan dessa.

Data från ATEM-undersökningarna har även gjort att vi har kunnat avgränsa grundvattenmagasin i jordlager samt göra tolkningar rörande infiltrationsområde, magasinens avgränsning och mäktighet. Vi har beskrivit ett antal områden med fokus på dess hydrogeologiska förutsättningar, där det tidigare har saknats underlag, som kan vara av vikt för placering av kommunala vattentäkter eller andra större grundvattenuttag (fig. 21). Området är lite speciellt då det ligger nära Vättern med tanke på den stora ytvattenresurs som finns tillgänglig för vattenförsörjning. Möjligheterna till större grundvattenuttag är dock goda inom undersökningsområdet och hade inte Vättern varit en så stor resurs hade värdet av grundvattenresurserna nog skrivits upp ytterligare.

Ett område som har pekats ut som speciellt intressant är Mullsjön. I rapporten föreslår vi att det skapas en ny grundvattenförekomst i vattenförvaltningsarbetet samt lämnar ett förslag på avgränsning för grundvattenmagasinet Mullsjön (fig. 21). Undersökningarna och tolkningarna visar att uttagsmöjligheterna inom grundvattenmagasinet Mullsjön i jordlager tillsammans med det grundvattenmagasin som finns i den underlagrande Visingsösandstenen troligen är tillräckligt stora för att räcka för större grundvattenyta, till exempel vattenförsörjning för ett samhälle.

Förutom grundvattenförekomsten vid Mullsjön har två områden, Stora Röå och Kleven, avgränsats och föreslås som nya grundvattenförekomster i jord (fig. 21). Båda två har en liknande uppbyggnad med mäktiga torra sand- och grusavlagringar i de västra delarna som utgör nybildningsområde för grundvattnet och längre österut är grundvattenmagasinen moräntäckta men fortfarande mäktiga. Det rör sig om relativt stora områden och uttagsmöjligheterna är därmed totalt relativt stora även om de kanske inte är så stora lokalt. En grov uppskattning av hur mycket grundvatten som långsiktigt kan utvinnas med ett rimligt antal standardmässiga brunnskonstruktioner fördelade på lämpliga platser inom respektive magasin bedöms till 10–15 l/s.

Längst i norr har vi avgränsat ett område (Kråks, fig. 21) där det finns relativt mycket grundvatten i jordlagren där det dock krävs ytterligare undersökningar för att verifiera eller förkasta våra bedömningar. De sandiga sedimenten överlagrar här Visingsösandstenen och magasinen kan troligen kommunicera med varandra. Trots att området har kommunal vattenförsörjning från Vättern och att grundvattenförekomsten inte kommer att nyttjas inom förutsägbar framtid finns det ändå en mening med att peka ut områdets potential. De sand- och grusavlagringar som innehåller magasinet saknar enligt våra undersökningar till stor del täta jordlager vilket gör grundvattnet känsligt för påverkan från exploatering. Detta är särskilt viktigt att ta i beaktande då det inom området finns flygfält, järnväg och militärt övningsområde.

En geologisk 3D-modell med tre lager bestående av jordlager, Visingsösandsten och urberg har skapats för undersökningsområdet (se fig. 29 och 22). Det betyder bland annat att det, för de östra delarna av undersökningsområdet samt området kring Mullsjön (områden med god datatäthet), numera finns en jorddjupskarta baserad på ett stort antal punkter med väsentligt högre kvalitet än tidigare (fig. 14A). Den tidigare jorddjupsmodellen har ändrats avsevärt i relativt stora delar med ökat jorddjup på mer än 30 m och i vissa delar med minskat jorddjup med upp till 20 m (fig. 14B). Det finns nu även mäktighetsuppgifter på Visingsösandstenen (fig. 15) vilket kan vara av vikt för till exempel anläggning av geoenergibrunnar.

3D-modellens noggrannhet är god i de områden där datatätheten är stor och mindre god där data saknas eller är av sämre kvalitet. Lagermodellen kan användas för att skapa voxelmodeller baserat på de gränsvärden som finns för olika litologier. Dock överlappar resistivitetsintervallen, framförallt inom jordlagren (tabell 2), så pass mycket att SGU för närvarande inte ser någon möjlighet att göra voxelmodeller över området. Dock kan man i mindre områden med mer homogen geologisk uppbyggnad upprätta lokala modeller, framförallt om man har tillgång till exempelvis mer lagerföljdsdata.

REFERENSER

- Andreasson P.-G. & Rodhe, A., 1992: The Protogine zone. Geology and mobility during the last 1.5 Ga. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co, TR 92-21.
- Arenstedt, V., 2018: The Neoproterozoic Visingsö Group of southern Sweden: lithology, sequence stratigraphy and provenance of the Middle Formation. Examensarbete Lunds universitet. http://lup.lub.lu.se/student-papers/record/8962120
- Auken, E., Foged, N., Larsen, J., Lassen, K., Maurya, P, Møller, S. & Eiskjaer, T., 2019: tTEM – A towed transient electromagnetic system for detailed 3D imaging of the top 70 m of the subsurface. *Geophysics, Vol. 84, No. 1, 01.2019,* s E13-E22. https://doi.org/10.1190/geo2018-0355.1
- Blomberg, A., 1906a: Beskrivning till kartbladet Gällö, Sveriges geologiska undersökning Aa 131.
- Blomberg, A., 1906b: Beskrivning till kartbladet Hjo, Sveriges geologiska undersökning Aa 132.
- Brolin, C., Leroux, V. & Dahlqvist, P., 2020: Bearbetning av helikopterburen TEM-data i delar av Östergötland och Västergötland – datarapport. *SGU-rapport 2020:23*. Sveriges geologiska undersökning.
- Christiansen A.V., Auken E. & Sørensen K., 2009: *The transient electromagnetic method*. I Kirsch R. (eds) Groundwater Geophysics. Springer, Berlin, Heidelberg.
- Collini, B., 1951: Visingsöformationen. I Geijer P., Collini B., Munthe H. & Sandegren R.
- (eds) Beskrivning till kartbladet Gränna. Sveriges geologiska undersökning Aa 193, 22-37.
- Dahlqvist, P., Triumf, C.-A., Persson, L., Bastani, M., Erlström, M., Jørgensen, Thulin, F., Olander, H., Gustafsson, M., Thorsbrink, M., Schoning, K. & Curtis, P., 2015: SkyTEMundersökningar på Gotland. R*apporter och Meddelanden 136,* Sveriges geologiska undersökning, 108 s.
- Dahlqvist, P., Triumf, C.-A., Persson, L., Bastani, M., Erlström, M., & Schoning, K., 2017: SkýTEM-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., 2018: SkyTEM-undersökningar på Öland. Rapporter och Meddelanden 145, Sveriges geologiska undersökning, 100 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.
- Daniels, J. & Thunholm, B., 2014: Rikstäckande jorddjupsmodell. SGU-rapport 2014:14. Sveriges geologiska undersökning, 14 s.
- Jakobsson, M., Björck, S., O'Regan, M., Flodén, T., Greenwood, S.L., Swärd, H., Lif, A., Ampel, L., Koyi, H. & Skelton, A., 2014: Major earthquake at the Pleistocene-Holocene transition in Lake Vättern, southern Sweden. *Geology* 42(5), 379–382.
- Lantmäteriet, 2019: Produktbeskrivning: GSD-Höjddata, grid 2+. 10 s.
- Linden, A.G., 2010a: Beskrivning till jordartskartan 8E Hjo NV. Sveriges geologiska undersökning K 183, 16 s.
- Linden, A.G., 2010b: Beskrivning till jordartskartan 8E Hjo SV. Sveriges geologiska undersökning K 184, 15 s.
- Moczydlowska, M., Pease, V., Willman, S., Wickström, L. & Agić, H., 2018: A Tonian age for the Visingsö Group in Sweden constrained by detrital zircon dating and biochronology: implications for evolutionary events. *Geological Magazine*, *155(5)*, 1175–1189.

- Moye, D., 1967: *Diamond drilling for foundation exploration*. Civil Engineering Trans. Institute of Engineers, Australia, 95–100.
- Månsson, A.G.M., 1996: Brittle reactivation of ductile basement structures; a tectonic model for the Lake Vättern basin, southern Sweden. *GFF 118*, A19
- Möller, C. & Andersson, J., 2018: Metamorphic zoning and behaviour of an underthrusting continental plate. *Journal of Metamorphic Geology*, *36(5)*, 567–589.
- Petersson, A., Scherstén, A., Andersson, J. & Möller, C., 2015: Zircon U–Pb and Hf–isotopes from the eastern part of the Sveconorwegian Orogen, SW Sweden: implications for the growth of Fennoscandia. *Geological Society, London, Special Publications, 389(1),* 281–303.
- Påsse, T. & Andersson, L., 2005: Shore-level displacement in Fennoscandia calculated from empirical data. *GFF 127*, 250–268.
- Sørensen, K.I. & Auken, E., 2004: SkyTEM a new high-resolution helicopter transient electromagnetic system. *Exploration Geophysics*, 35(3), 194–202.
- Wahlgren, C.-H., Cruden, A.R. & Stephens, M.B., 1994: Kinematics of a major fan-like structure in the eastern part of the Sveconorwegian orogen, Baltic Shield, south-central Sweden. *Precambrian Research*, 70, 67–91
- Westergård, A.H., Johansson, H.E. & Willen, N., 1926: Beskrivning till kartbladet Karlsborg, Sveriges geologiska undersökning Aa 162.
- Wickström, L M. & Stephens, M B., 2020: I Stephens, M.B. & Berman, Weihed, J, (eds). Sweden: Lithotectonic Framework, Tectonic Evolution and Mineral Resources. Geological Society, London, Memoirs, 50, 451–477. https://doi.org/10.1144/M50-2016-31
- Vidal, G., 1974: Late Precambrian microfossils from the basal sandstone unit of the Visingsö beds, South Sweden. *Geologica et Palaeontologica*, 8, 1–14.
- Vidal, G., 1982: Den prepalaeozoiska sedimentära berggrunden. I Wikman, H., Bruun, Å., Dahlman, B. & Vidal, G. (eds) Beskrivning till berggrundskartan Hjo NO. Sveriges geologiska undersökning Af 120, 52–76.
- Vidal, G., 1985: Prepalaeozoisk sedimentberggrund. I Persson, L., Bruun, Å. & Vidal, G. (eds) Beskrivning till berggrundskartan Hjo SO. Sveriges geologiska undersökning Af 134, 77–91.
- Wik, N.-G., Andersson, J., Bergström, U., Claeson, C., Juhujuntti, N., Kero, L., Lundqvist, L., Möller, C., Sukotjo, S. & Wikman, H., 2006: Beskrivning till regional berggrundskartan över Jönköpings län. Sveriges geologiska undersökning K 61, 60 s.
- Wikner, T., Fogdestam, B., Carlstedt, A. & Engqvist, P. 1991: Beskrivning till kartan över grundvattnet i Skaraborgs län. *Sveriges geologiska undersökning Ah 9*, 83 s.
- Wikström, A. & Karis, L., 1993: Note on the basement-cover relationship of the Visingsö group in the northern part of the Lake Vättern basin, south Sweden. *Geologiska Föreningen i Stockholm Förhandlingar, 115(4),* 311–313.
- Von Post, L. & Granlund E., 1926: Södra Sveriges torvtillgångar. Sveriges geologiska undersökning C 335.

BILAGA 1. LAGERFÖLJDER FRÅN UTFÖRDA BORRNINGAR

BH1

Id: Svärtan N=6465224, E=454599 0 - 1 m matjord 1 – 2 m Sand 2 – 3 m Finsand 3 – 5 m (siltig) lera 5 – 6 m (lerig) silt 6 – 17 m Lera 17 – 18 m Lerig sandig grus 18 – 23 m Sandigt grus 23 – 25 m Lerig sandigt grus 25 – 26 m Grusig sand 26 – 27 m Grus 27 – 28 m Grusig sand 28 – 29 m Lerig sandigt grus 29 – 31 m Sandigt grus 31 – 32 m Lerig sandig grus 32 – 33 m Siltigt grus 33 – 35 m Siltig finsand 35 – 36 m Finsand 36 – 37 m Siltig finsand 37 – 38 m Finsand 38 – 121 m Sandsten

BH2

Id: Ulvhult N=6472751, E=463677 0 – 2 m Något grusig lera 2 – 3 m Lera 3 – 4 m Grusig lera Lerigt fingrus 4 – 6 m 6 – 8 m Moränlera 8 – 10 m Grusig lera 10 – 11 m Lera 11 – 12 m Lerig sand 12 – 13 m Något lerigt grus 13 – 15 m Lerig grusig sand 15 – 16 m Siltig finsand 16 – 17 m Siltig grusig sand 17 – 21 m Grusig sand 21 – 22 m Grusig Siltig sand 22 – 23 m Grusig lera Sandsten 23 – 60 m

BH3

Id: Torpet	
N=6465224, E=454599	
0 - 1 m	Lera
1 – 2 m	Sandig siltig lera
2 – 3 m	Siltig grusig lera
3 – 9 m	Sand
9 – 15 m	Siltig finsand
15 – 17 m	Sand
17 – 18 m	Finsand
18 – 20 m	Sand
20 – 22 m	Grusig sand
22 – 26 m	Sand
26 – 27 m	Finsand
27 – 28 m	Grusig sand
28 – 69 m	Sandsten

SB1

ld: BMW196340	
N=6466180, E=453522	
0 – 0,5 m	finsand
0,5 – 1 m	sand
1 – 2 m	finsilt
2 – 3 m	lera
3 – 4 m	lera
4 – 14 m	silt
14 – 17 m	sand-block (friktionsjord
Avslut mot block eller	berg

SB2

Databas-id: BMW196341 N=6466780, E=454492 0 – 1 m mellansand 1 – 3 m mellansand 3 – 4 m grovsand 4 – 5 m mellansand finsand 5 – 5,8 m 5,8 – 8 m silt 8 – 9 m silt 9 – 11 m lera 11 – 12 m sand 12 – 15 m silt 15 – 25 m sand-block (friktionsjord) Avslut mot block eller berg

SB3

Databas-id: BMW196344 N= 6473206, E= 464187 0 - 3 m morän 3 - 5 m morän Avslut: ej bedömt

SB4

 Databas-id: BMW185012

 N= 6474438, E = 461911

 0 - 1 m morän

 1 - 3 m sand

 3 - 6 m morän

 6 - 20 m morän

 Öppet avslut
 morän

SB5

Databas-id: BMW196343 N=6474576, E=461473 0 – 1 m finsand 1 – 9,8 m sand 9,8 – 16 m ej bedömd 16 – 17 m ej bedömd 17 – 21 m ej bedömd Sand-block (friktionsjord) 21 – 23,5 m ej bedömd 23,5 – 25 m Avslut mot block eller sten

SB6

Databas-id: BMW185011		
N= 6477910, E = 463680		
0 – 1 m	fingrus	
1 – 6,2 m	morän	
Avslut mot block eller berg		

SB7

Databas-id: BMW196342		
N=6477885, E=466904		
0 – 4 m	morän	
4 – 5,8 m	lera	
5,8 – 6,2 m	finsand	
6,2 – 8 m	mellansand	
8 – 9 m	sand	
9 – 11 m	sand-block (friktionsjord)	
Avslut mot block eller	sten	

SB8

Databas-id: BMW185008 N= 6479422, E = 463005 0 – 1 m Finsand Sand 1 – 4 m 4 – 5 m Sand Grovsilt 5 – 6,5 m 6,5 – 7 m Silt 7 – 9 m Finsand 9 – 13,7 m Silt 13,7 – 23,5 m Morän Öppet avslut

SB9

Databas-id: BMW185006 N= 6480317, E= 460117 0 - 1 m sand 1 -11,3 m morän Avslut mot block eller berg

SB10

Databas-id: BMW185007 N= 6480442, E= 461768 0 – 11,7 m morän Avslut: ej bedömt

SB11

SB12

Databas-id: BMW196345		
sand		
Lera		
Lera		
Finsand		
Silt		
Finsand		
Silt		
Ej bedömd		
Ej bedömd		
sand-block (friktionsjord)		
Avslut mot block eller berg		

SB13

Databas-id: BMW196346 N= 6483423, E= 469846 Fyllning 0 – 1 m Finsand 1 – 2 m 2 – 3 m Silt 3 - 5 m Silt 5 – 6 m Finsand 6 – 8 m Finsand 8 – 11 m Silt sand-block (friktionsjord) 11 – 12,3 m Avslut mot block eller berg

BILAGA 2. RESULTAT FRÅN GEOFYSISK BORRHÅLSLOGGNING



Litologisk logg över BH1 (Svärtan) med resistivitetsvärden från geofysisk loggning och ATEM-mätning samt natural gamma (NGAM) från två separata loggningstilfällen, under respektive genom foderröret.



Litologisk logg över BH2 (Ulvhult) med resistivitetsvärden från ATEM-mätning samt natural gamma (NGAM) från geofysisk borrhålsloggning.



Litologisk logg över BH3 (Torpet) med resistivitetsvärden från ATEM-mätning.

BILAGA 3. REDOVISNING AV tTEM-RESULTAT

Bilaga 3 består av två appendix (II och III) som ingår i den datarapport över de tTEM mätningar som utfördes, av Hydro Geophysics Group från Aarhus Universitet, i Västergötland. Rapporten är tillgänglig i sin helhet via SGU, referera till Rapport: tTEM Mapping Motala, Sweden. (Dnr: 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.

Cross-sections are present for all four priority areas.





This appendix includes mean resistivity maps generated from the smooth model inversion result in 5 m depth intervals from 0 to 30 m, and in 10 m intervals from 30 to 70 m. The resistivity models have been blanked at the DOI standard value prior to the interpolation to regular mean resistivity grids.

The interpolation of the mean resistivity values is performed by kriging interpolation, with a node spacing of 2 m, a search radius of 50 m, and with additional pixel smoothing.

The mean resistivity maps have only been created for priority area 1 and 2 where the line density is high.











SV Refraktionsseismik S9_83024 NO

BILAGA 4. SEISMIKPROFILER OCH TOLKNING

